

The background of the book cover is a photograph of a modern interior space. In the foreground, a black grand piano is partially visible on the right side. To the left, there are large windows with dark frames, looking out onto a green landscape. The room has a light-colored floor and walls. The overall atmosphere is bright and contemporary.

francis ibre

bien entendu

itinéraire d'un **audio**phile

2^e édition revue & augmentée par l'auteur

elektor

Copyright © 2008 Elektor - 2e édition

Conformément au droit d'auteur, ce copyright ne s'applique pas à certains schémas reproduits dans ce livre à titre de **citation** et d'**illustration** des propos et de la démarche intellectuelle de l'auteur, avec l'aimable autorisation des ayants-droit.

Toute reproduction ou copie, même partielle, de ce livre, sans l'accord écrit de l'éditeur, est interdite.

No part of this book may be reproduced, in any form or means whatsoever, without permission in writing from the publisher. While every precaution has been taken in the preparation of this book, the publisher and author assume no responsibility for errors or omissions. Neither is any liability assumed for damages resulting from the use of the information contained herein.

La protection du droit d'auteur s'étend non seulement au contenu mais également aux illustrations, y compris aux circuits imprimés et aux projets y relatifs. En conformité avec l'article 30 de la Loi sur les brevets, les circuits mentionnés ne peuvent être exécutés qu'à des fins particulières ou scientifiques et non pas dans ou pour une entreprise ; **ces exécutions et/ou applications se font en dehors de toute responsabilité de l'éditeur.**

En application de la loi du 11 mars 1957, toute reproduction ou copie de ce livre, même partielle et sur quelque support que ce soit, sans l'accord écrit de l'éditeur, est interdite.

Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit.

L'éditeur remercie d'avance le lecteur qui prendra la peine de lui signaler les erreurs éventuelles qui auront échappé à sa vigilance.

Mise en page : SapoStudio (2e ed. : BEEI)

Couverture : OSTINATO

Coordination : DENIS MEYER

Imprimé aux Pays-Bas par Wilco (02/08)

978 -2-86661-161-3

Francis Ibre

BIEN ENTENDU

itinéraire d'un audiophile

2e édition
revue, corrigée et augmentée (12 pages)
par l'auteur

prises à jour et révisions disponibles sur le site de l'éditeur :

www.elektor.fr/BienEntendu/

ELEKTOR

Table des matières

1 Perspectives	15	<i>Filtre secteur</i>	98
La philosophie	15	<i>Exemple de réalisation</i>	102
La science à sa place	15	Transformateurs d'isolement	
L'objectif	18	des liaisons audio	104
2 Reflets	22	<i>Liaisons symétriques</i>	106
3 L'acte d'écouter	27	Symétrisation du secteur	107
On ne s'entend plus	27	Les cordons de liaison audio	109
Le silence des sommets	28	Exemple de réalisation	113
Un air que je connais	28	Couplage microphonique	115
Avec quoi écoutez-vous ?	29	<i>Lutte contre les vibrations parasites</i>	118
L'espace sonore	31	<i>Supports d'enceintes</i>	125
La matière sonore	32	<i>Caractéristiques vibratoires des matériaux</i>	128
Le mouvement et l'intention	33	Couplage ampli/haut-parleurs	131
Le son vecteur d'émotion	34	<i>Bi-câblage</i>	134
4 Croire ses oreilles	35	Exemple de réalisation	136
Exercices	36	Bi-amplification	137
5 Approche globale	40	Positionnement des enceintes	139
Analyse fonctionnelle (SADT)	42	Bilan de l'optimisation	141
Limitations et bruits	44	8 Enceintes acoustiques	143
Lois de l'ouïe	48	8.1 Autour du haut-parleur de grave	143
Le son : phénomène temporel	53	Encore la mécanique... ..	143
Corrélations	58	Toujours la mécanique	153
6 Le lieu d'écoute	62	Hisser le pavillon !	159
Problèmes de salle	62	Et la première octave ?	161
Traitement des résonances	66	Des alignements	
Traitement de la réverbération	78	pas toujours temporels... ..	162
<i>Absorption des matériaux</i>	82	8.2 Autour du caisson de grave	165
Traitement des réflexions	88	Mesure des paramètres de Thiele et Small .	165
Correction active	89	8.3 Fidel, un caisson exemplaire ?	173
Le point de vue du naturophile	91	Dimensionnement	173
7 Optimisation	93	Une bonne correction ?	178
Couplage par le réseau EDF du secteur	94	8.4 Les voies supérieures	182
<i>Courants de masse</i>	95	Des pavillons	
		et des lobes... de directivité	182
		Le progrès ne réduit pas	
		la longueur d'onde	191
		Mathématiques et formules magiques	192
		Un pavillon médium en... médium ?	197
		Bas-médium : la quatrième dimension ? ...	199

L'insoutenable légèreté de l'aigu	201		
Un pavillon, sinon rien ?	202		
8.5 Séparation des fréquences	204	9.5 Transformateur de sortie	287
Une théorie plus réaliste	204	Le transformateur de sortie	287
Les oreilles en face des lobes	209	Matériaux magnétiques et construction	288
Formules sans cible...	213	9.6 Monotriode	294
Un petit tour chez temporel	214	Étage de sortie simple	294
Amplitude ou phase ?		Chauffage filament	295
Les deux si possible !	222	Un exemple complet :	
Réponse en puissance	223	monotriode 845 alimentations séparées	298
Des composants pas si passifs	226	Simple étage et bruit d'alimentation	303
Exemple de filtrage à cohérence temporelle	229	Triode et impédance du haut-parleur	304
Préparer le terrain	230	Valves redresseuses... de torts !	309
9 L'électronique	231	9.7 Monotriode	
9.1 Circuit court	231	mais... multiamplication	315
L'appât du gain	231	Des couples inséparables	315
L'air qui s'impose	231	Multi-amplication	316
Des amplificateurs en boucle ouverte ?	235	Respect des timbres	321
Des amplificateurs en classe A ?	239	9.8 Tubes à tous les étages	324
9.2 Chaîne alimentaire	242	Nos tubes sont-ils N.O.S. ?	324
Une alimentation saine	242	Adaptateurs d'impédance	327
Des capacités inexploitées	245	Une alimentation distribuée	330
Régulateurs de tension	251	Un peu de technologie	332
Courants de masse	258	Pour faire bonne mesure	335
9.3 Le plus simple appareil	262	<i>Chauffage à tous les étages</i>	<i>335</i>
Naturel et simplicité	262	<i>Baisse de tension ?</i>	<i>336</i>
Ingédients de base	266	<i>Points de fonctionnement</i>	<i>336</i>
Retour au simple étage	268	<i>Mesure des bruits de fond</i>	<i>337</i>
9.4 Aux lampes... adhère !	269	<i>Réponse aux signaux carrés</i>	<i>337</i>
Encore un peu plus près des étoiles	269	10 Instants magiques	339
Les tubes de ma jeunesse	272	Un peu de musique, bien entendu !	340
Déjà le push-pull	273	Des CD à ne pas céder !	341
Ampli de tension (à triode, SRPP, pentode)	273	Références Bibliographiques	343
Déphaseur (à transformateur, de Schmitt, paraphase, cathodyne)	276	Fournisseurs	346
Étage de sortie et couplage au transformateur	278	Annexes	
Évolutions d'un simple push-pull	283	A.1 Correction active	348
		A.2 Bi-amplication passive	349
		A.3 Encore la mécanique	351
		A.4 Dimensionnement	353
		A.5 Une théorie plus réaliste	355
		Index	359

À Marie,
*Qui a accepté de n'être
pas ma seule passion.*

À Jérôme, Patrick et Gérard,
rencontres décisives.

À mon père,
qui sans le savoir m'a appris le métal
et les lampes.

À Jean Hiraga,
Nous sommes les fils de nos lectures...

À propos de l'auteur

Diplômé de Génie Mécanique de l'ENSET - Université de Paris VI, l'auteur a tout d'abord enseigné la métallurgie, les essais mécaniques et les traitements thermiques. Il enseigne actuellement les Sciences et Techniques Industrielles, et en particulier l'Informatique des Systèmes de Production, ainsi que les Sciences de l'Ingénieur.

C'est au laboratoire de vibrations de l'ENSET de Cachan qu'il a acquis sa spécialisation dans l'étude de la propagation des vibrations et dans l'analyse spectrale.

Attiré dès le plus jeune âge par la musique et l'électro-acoustique, c'est au milieu des années 70 que commencent les premières expériences, à partir de haut-parleurs large-bande Audax et d'électrophones, qui sont modifiés, simplifiés et améliorés.

C'est lors d'un séjour au Mans qu'a lieu la rencontre avec Patrick Bouttevin, animateur du magasin spécialisé "l'Atelier Musical". Patrick avait à cette époque réalisé un prototype de bras de lecture radial sur coussin d'air. Tout d'abord sollicité pour rédiger la demande de brevet, basée sur une étude approfondie de l'ellipsoïde d'inertie de ce bras radial, l'auteur est finalement impliqué dans la construction de la platine complète, pour laquelle il établit les calculs, les plans, et réalise les usinages des pièces. Quelques prototypes très performants sont construits et présentés au festival du son.

Depuis cette époque, l'auteur n'a pas cessé ses recherches sur la reproduction sonore de haute qualité. Son salon de 45 m² est devenu, après divers traitements acoustiques, un auditorium dédié autant à la musique qu'aux essais, mesures et expérimentations diverses. Il construit à l'unité, pour ses amis et connaissances, des enceintes acoustiques de très grande qualité et à très haut rendement. Du modèle le plus simple réalisé autour d'un haut-parleur large-bande Davis 20TK8 monté en ligne acoustique, en passant par des colonnes 3 voies - 4HP, jusqu'aux modèles à pavillons en bois.

Ses réalisations à tubes sont variées, allant de la simple réfection de matériels anciens, amplis guitare ou Hi-Fi, à la modification d'appareils réputés en vue

d'améliorer certains points, jusqu'aux créations sans aucun compromis, à partir de tubes d'époque et de transformateurs réalisés sur commandes spéciales.

Les transistors et les circuits intégrés ne sont pas absents des montages, chacune des technologies étant mise à contribution selon ses propres avantages.

C'est l'analyse globale du système qui est le point le plus important de sa démarche de conception, dans laquelle la salle d'écoute, ainsi que les accessoires tels que supports, filtres secteurs, câbles de liaison, revêtent une importance prépondérante, par leur influence directe sur les bruits et perturbations induits.

Une partie importante de ses recherches porte sur l'élimination de ces perturbations, et aboutit à des conclusions importantes concernant la mise en œuvre de chacun des éléments du système, ainsi qu'à des règles de conception strictes portant sur les circuits d'alimentation et l'organisation des masses et des câblages.

Ses connaissances en électronique et acoustique sont construites sur des bases scientifiques acquises lors de ses années d'études, puis complétées par les lectures assidues de la revue l'Audiophile et de très nombreux ouvrages spécialisés, lectures suivies systématiquement d'abondantes mises en pratique qui apportent une expérience solide. Sa formation de "mécanicien", en mettant l'accent sur le rayonnement des ondes sonores et leur combinaison, apporte un éclairage nouveau sur le fonctionnement du système de reproduction, en particulier le haut-parleur, l'enceinte acoustique et son filtre.

Sa philosophie de conception remet la science à sa juste place, moyen d'investigation à mettre au soutien d'un objectif, d'une volonté d'expression musicale.

C'est pourquoi l'approche purement scientifique ne prend jamais le pas sur l'expérimentation en situation réelle, et les outils conceptuels ainsi que les moyens de mesure ne sont utilisés que lorsqu'ils sont en corrélation avec les perceptions sonores.

Son désir : mettre la science maîtrisée au service de l'art.

*Si la musique doit être nourriture de l'amour
Alors chante et emplis-moi de joie,
Ainsi tu emmènes mon âme
Vers des plaisirs intarissables.
Tes yeux, ton air, ta langue déclarent
Que tu es partout musique.
Les plaisirs envahissent l'oeil et l'oreille,
L'émotion est si intense qu'elle me blesse
Et tous mes sens se délectent,
Quand le régal n'est que de son.
Pour sûr je périrai sous tes charmes
Si tu ne me sauves dans tes bras.*

(traduction de l'auteur)

If music be the food of love,
Sing on 'til I am filled with joy,
For then my list'ning soul you move
To pleasures that can never cloy.
Your eyes, your mien, your tongue declare
That you are music ev'rywhere.
Pleasures invade both eye and ear,
So fierce the transports are, they wound,
And all my senses feasted are,
Tho' yet the treat is only sound.
Sure I must perish by your charms,
Unless you save me in your arms.

HENRY PURCELL
"Songs"

Introduction

À propos de l'auteur

La nécessité de rédiger cet ouvrage m'est apparue petit à petit, au fil des années, de plus en plus pressante à chaque fois que des amis, collègues ou connaissances me demandaient conseil. L'un souhaitait acquérir le meilleur ampli (ou lecteur CD...) un autre voulait changer ses câbles, un troisième envisageait de fabriquer lui-même ses enceintes, en comptant bien évidemment sur mes quelques compétences... Et j'étais à chaque fois bien incapable d'apporter une réponse immédiate : comment conseiller de manière absolue, ferme et définitive face à un problème tout relatif, avec un objectif assez mal défini ?

Je commençais donc logiquement par poser un certain nombre de questions à ces amis, concernant leur système d'alors, et les points qu'ils souhaitaient améliorer :

- Dans quel but veux-tu changer d'ampli ? Qu'est-ce qui te laisse penser qu'il est insuffisant ?
- Pourquoi changer tes enceintes ? Commence plutôt par les positionner correctement...
- Si tu veux changer les condensateurs de ton ampli à lampes, dis-moi d'abord quelle évolution tu souhaites obtenir ?

Je ne recevais pas, en général, une réponse précise et claire... Tout simplement parce qu'il n'y avait pas derrière ce désir de changement une démarche cohérente. Pour que cette démarche existe, il est nécessaire qu'il y ait une analyse préalable complète des données du problème.

Pour mener cette analyse, il est indispensable d'acquérir quelques connaissances, assez larges et étendues, mais surtout bien ordonnées, aussi bien scientifiques et technologiques que musicales et humaines.

Pour exploiter cette analyse, un certain recul donnant une vue d'ensemble, en s'éloignant des détails, est recommandé.

Pour que cette démarche aboutisse, il est essentiel de définir un objectif précis ainsi que les limites à l'intérieur desquelles on considérera que cet objectif est atteint, puis les moyens – métrologiques – de s'en assurer.

Au bout de cette démarche, il y aura peut-être une décision d'achat, mais plus souvent une remise en cause de l'utilisation du système, parfois aussi de l'utilisateur.

Cette démarche et le processus qui s'en suit s'inscrivent dans une recherche, ou plutôt une quête, qui a pour but avoué d'atteindre un certain degré de satisfaction, face à un besoin de plaisir auditif. C'est un besoin que l'on peut rattacher au sens esthétique, à l'exigence d'authenticité et d'une certaine manière à la créativité. L'objectif ne saurait donc se définir en terme "d'avoir" (avoir le meilleur ampli...) et le perfectionnisme, fut-il sans compromis et ruineux, ne permet pas de s'en approcher. C'est la porte ouverte à la surenchère... Seuls les matérialistes y trouveront leur compte... provisoirement !

Il ne peut non plus se définir en terme de "**faire**" (faire des enceintes extra...) car une fois l'appareil terminé et le besoin d'action satisfait, le véritable besoin, non reconnu ni exprimé, ressort aussitôt.

L'objectif est du domaine de "**l'être**" et s'exprimera, lorsqu'il sera approché, par une phrase qui pourrait être :

- "Je suis satisfait, dans mon besoin de plaisir musical, car je me sens en prise (en contact, en relation, en communication...) émotionnellement, avec l'œuvre, l'interprète, ou l'événement que j'écoute."

Cela semble élémentaire. Faut-il mettre sur le compte de notre société de consommation, la distance qui nous sépare souvent de l'expression de nos besoins ? Nous pourrions en débattre longtemps... Je constate pourtant que notre éducation porte également une part de responsabilité. "Avoir" un système haute-fidélité est devenu accessible au plus grand nombre, et le réflexe "acheter mieux" est bien naturel.

Malheureusement, acheter est loin d'être suffisant, et ne satisfait que dans l'instant.

Améliorer son système, c'est-à-dire augmenter son plaisir auditif, ne peut qu'être le résultat d'une intention (acheter un appareil haute-fidélité ne relève pas de l'intention, mais du simple désir).

L'intention s'exprime en terme de ressenti, d'émotion, et en particulier si ce ressenti n'est pas satisfaisant, incomplet, le manque lui-même permet de cerner l'intention de manière assez précise.

C'est cette intention qui permettra de définir l'objectif, puis la démarche, et enfin les moyens.

Mener à bien cette démarche demande seulement un peu de méthode, beaucoup de rigueur, et encore plus de patience et d'exigence. Quelques connaissances

scientifiques et techniques peuvent être utiles si elles s'appuient sur une expérimentation pratique bien assimilée, mais elles ne sont pas indispensables, et se révèlent parfois mauvaises conseillères lorsque, incomplètes et usant de modèles simplistes, elles deviennent l'arbre qui cache la forêt. Notre scolarité nous a habitué à considérer qu'un concept est compris seulement quand nous sommes capables d'utiliser le modèle mathématique associé, alors que la plupart du temps une compréhension intuitive suffit à appréhender les rapports de cause à effet. Lorsque les phénomènes physiques mis en jeu sont saisis, il reste à en établir un bilan puis une hiérarchisation, essentiels tous deux au fondement de la démarche. Ce n'est qu'à partir de là qu'une formule mathématique devient parfois utile.

Des éléments scientifiques sont donnés dans cet ouvrage, seulement pour étayer des considérations subjectives découlant des expériences effectuées. Ces approches scientifiques ont été trouvées après coup, en recherchant des éléments d'explication sur un phénomène constaté en pratique, et ne sont pas des considérations purement théoriques faites à priori. Cette démarche pragmatique a depuis longtemps permis aux audiophiles de la première heure de progresser dans la recherche du réalisme, souvent contre les avis scientifiques. Les plus brillants d'entre eux, en particulier au Japon avec Kanéda, mais aussi en France avec Jean Hiraga au premier rang, ont pu ainsi faire admettre patiemment leurs points de vue malgré l'adversité. Leurs travaux constituent les fondations des pratiques actuelles en ce domaine, et ils méritent d'être cités à chaque page de cet ouvrage !

Si certains éléments d'explication paraissent éventuellement discutables, cela ne saurait remettre en cause l'existence du phénomène constaté : le fait de ne pas accepter cet élément, pour quelque raison que ce soit, implique seulement qu'il serait nécessaire (mais pas indispensable...) de chercher une autre explication ! Un autre phénomène physique négligé est peut-être mis en jeu ?

Un guide permettant de se situer, donnant des critères de décision et aidant à évaluer est souvent d'une aide précieuse. Aussi je souhaite vivement que le lecteur puisse prendre cet ouvrage comme base de réflexion. Il n'y trouvera pas une présentation exhaustive de tous les types de haut-parleurs existants, ni la description mathématique de tous les filtres imaginables, ni le déroulement historique de l'évolution des circuits amplificateurs. À aucun moment il n'est question d'orienter les choix vers tel ou tel matériels. Ces choix doivent rester personnels, car s'ils sont influencés par ce que nous avons appris, alors ils ne révèlent pas notre véritable intention. La quête du réalisme sonore demande cependant de sortir d'un carcan, de franchir

des seuils, de dépasser certaines limites, précisément en faisant des choix cohérents, dictés par des principes physiques incontournables. Le franchissement de ces frontières ne se fait pas au hasard, et les chemins qui mènent au réalisme sonore ne sont pas tracés. Quels sont les obstacles ? Quels sont les moyens de les franchir ? Où sont les pièges ? Et surtout, quels itinéraires sont possibles ? Autant de questions pour lesquelles j'apporte quelques éléments de réponse, mais pas de solution toute faite, pas de règle établie, pas de dogme.

Au contraire des ouvrages purement techniques, réservés aux spécialistes, et dans lesquels le texte est souvent minimal, concis et dépouillé afin d'arriver rapidement aux formulations mathématiques, la présentation a été voulue claire et facilement accessible, avec le minimum d'outils scientifiques. Lorsque ceux-ci se révèlent incontournables, des exemples directement adaptables sont donnés, autant pour illustrer l'usage de l'outil que pour servir éventuellement de modèle. Ce n'est qu'au stade final du dimensionnement, autant pour vérifier, valider le choix technologique que pour définir une valeur minimale, un seuil au-delà duquel la décision est possible, que le calcul est nécessaire, en sachant qu'un ordre de grandeur suffit dans bien des cas.

La modélisation mathématique, au stade du projet, a un but prévisionnel, afin d'optimiser le produit et sa fabrication, car elle permet un gain de taille, de poids, de consommation, de fiabilité et de coût. Elle est ici d'une faible portée : quelle serait par exemple l'utilité de connaître avec précision le courant électrique maximal consommé par l'amplificateur, lorsque le choix des filtres secteurs disponibles se limite à trois tailles, par exemple 3, 6, et 10 A ?

Au-delà de la satisfaction intellectuelle, à quoi servirait-il d'optimiser le poids pour un appareil qui ne sera pratiquement jamais déplacé ?

Je crois bien plus fondamental de remettre les composants du problème à leur juste place, et de faire apparaître clairement cette mise en situation, en reléguant l'approche scientifique au second plan.

C'est pourquoi les chapitres 8, consacré aux enceintes acoustiques, en particulier les filtres séparateurs, et 9 traitant des circuits électroniques, peuvent être lus en faisant abstraction des formulations scientifiques et en retenant seulement l'argumentation et la hiérarchisation, les choix décisifs, les critères et les seuils de décision, et finalement les orientations.

Le but de cet ouvrage est de donner au lecteur des idées et des moyens pratiques, et surtout des directions de recherche lui permettant d'améliorer le rendu sonore de son système haute-fidélité. L'outil le plus important présenté ici étant, bien sûr, une philosophie

de conception, permettant d'analyser, de structurer, d'orienter les choix technologiques, et sans laquelle l'activité de l'audiophile semble bien désordonnée et matérialiste...

À la base de cette philosophie se trouve l'acte d'écouter, auquel sera consacré un chapitre entier, car la relation de l'être humain avec l'univers sonore – et avec la musique en particulier – possède indéniablement une dimension spirituelle.

VUE D'ENSEMBLE DU LIVRE

Chapitre 1 : PERSPECTIVES

La mise en situation des connaissances scientifiques, des compétences techniques et des savoir-faire pratiques dans le domaine d'action de la reproduction musicale me paraît fondamentale. Elle fait ressortir que beaucoup de nos choix parfois inconscients, de nos tendances et des orientations de nos actions sont conditionnés par des habitudes, des modes, des a priori. Qu'il s'agisse du choix et de l'association des maillons du système ou qu'il s'agisse de la création d'un appareil, la démarche de conception qui se veut rigoureuse part souvent d'un dogme établi dont les fondements sont discutables. Il apparaît la nécessité d'une philosophie de conception pour définir les orientations générales et préciser un objectif, et l'incapacité des mesures de laboratoire à qualifier et à fortiori quantifier l'approche de cet objectif.

Chapitre 2 : REFLETS

Ce chapitre présente le processus de reproduction musicale dans son ensemble et les limitations inhérentes. L'homme est remis à sa juste place à tous les stades de ce processus, afin de faire apparaître que les choix technologiques ne sont que les résultats des décisions, des intentions, orientées par les besoins de l'expression artistique. Le mélomane lui-même, et son matériel, sont mis en situation au sein du processus, et le phénomène sonore est présenté comme transformation d'un matériau, le silence.

Chapitre 3 : ACTE D'ECOUTER

Un retour aux sources permet d'inscrire l'homme à sa vraie place dans l'univers sonore, et redonne toute sa dimension au sens de l'audition. En établissant une classification et une hiérarchie des perceptions dans la reproduction sonore, il apparaît que nous ne percevons pas seulement des notes ou des sons mais surtout des sources sonores, mises en œuvre par des mouvements générateurs de sons, c'est-à-dire que nous percevons des causes et non des effets.

Chapitre 4 : CROIRE SES OREILLES

Ce chapitre donne quelques outils simples mais assez efficaces pour prendre, ou reprendre contact intime avec l'univers sonore dans son ensemble, afin de se trouver en relation directe avec ses perceptions, totalement ouvert aux sensations, sans intervention d'un processus intellectuel conscient ou non. Il y apparaît l'importance de se libérer, de s'ouvrir aux perceptions sonores, sans interprétations ni décodage.

Chapitre 5 : ANALYSE GLOBALE

Le système de reproduction est présenté dans son ensemble, et les énergies et échanges qui prennent place. La représentation schématique de type SADT est utilisée. Cette approche fait ressortir la prépondérance de la mécanique et des transductions d'énergie, de la mécanique vers d'autres domaines, dans les deux sens et à tous les stades du processus. Elle fait apparaître des couplages parasites entre les éléments constitutifs du système, et précise les nombreuses limitations de celui-ci, en particulier les bruits de toutes origines. Une hiérarchie dans le traitement, le dépassement de ces limites, et surtout des contraintes d'antériorité incontournables sont mises en évidence. L'influence primordiale des dimensions temporelle et dynamique en est dégagée, au-delà de la simple dimension fréquentielle. Le son est présenté comme phénomène temporel, avec sa répartition énergétique particulière, essentiellement discontinue, imposée par le dessin rythmique. Des seuils déterminants, fondamentaux, pour les grandeurs physiques mises en jeu, sont définis ainsi que leurs relations avec les perceptions.

Chapitre 6 : LE LIEU D'ECOUTE

Les notions fondamentales de l'acoustique des salles sont présentées, ainsi que l'influence des phénomènes de propagation du son dans un espace clos sur les perceptions auditives. L'importance relative des champs sonores direct et réverbéré est discutée, et les phénomènes de résonance, de réflexion et de réverbération sont expliqués. L'établissement et la répartition des ondes stationnaires sont mis en relation avec les proportions de la salle, et des moyens de traitement par panneaux perforés et persiennes sont décrits, ainsi que les dispositions préférables des sources et auditeurs.

La notion de distance critique liée à la directivité des sources et à l'amortissement acoustique de la salle est présentée, ainsi que le bilan acoustique établi à partir des surfaces et coefficients d'absorption des matériaux de construction et de traitement. La confusion entre isolation et correction acoustique est levée, et un exemple complet d'aménagement d'un local destiné à la reproduction musicale est proposé.

Les moyens d'action contre les réflexions sont décrits, puis les principes de la correction active numérique et leurs limitations sont présentés. Enfin une approche plus spirituelle de l'aménagement harmonieux de la salle est tentée.

Chapitre 7 : OPTIMISATION

Les couplages indésirables par le réseau du secteur sont étudiés en détail, en commençant par les boucles de masse se refermant par la terre, et les moyens de les supprimer. Les courants d'équilibrage des potentiels de masse sont expliqués, ainsi que leur cheminement à travers les câbles de liaison audio. La suppression de ces courants par la mise en œuvre d'un filtrage secteur de structure appropriée, et de liaisons à isolement galvanique, est détaillée. Un exemple de réalisation de filtre secteur est donné, et les composants requis sont présentés.

Les câbles de modulation et les liaisons de masse entre appareils sont exposés. Un exemple de réalisation de cordons très performants est exposé.

Les couplages acoustiques sont expliqués ensuite, ainsi que les voies de propagation aérienne et solide des vibrations parasites. Les moyens d'éliminer ces vibrations par amortissement, rigidité et masse inerte sont détaillés. Les systèmes de couplage et de découplage sont présentés pour aboutir à la description de différents supports massifs, inertes et suspendus, adaptés aux appareils de lecture, aux amplificateurs et aux enceintes acoustiques. La protection des lampes, des haut-parleurs et de leur filtre contre les vibrations est abordée. Les caractéristiques vibratoires des matériaux, densité, raideur et amortissement sont récapitulées. Leur combinaison harmonieuse fait l'objet d'une approche plus intuitive.

Le délicat couplage entre amplificateur et haut-parleur, faisant intervenir l'effet microphonique, conduit à légitimer les pratiques du bi-câblage et de la bi-amplification, présentée sous diverses formes. Un exemple de câble haut-parleur très performant est proposé.

Des précisions suivent concernant le positionnement des enceintes dans la salle.

Enfin un bilan est établi, indispensable pour situer les évolutions avant de passer aux chapitres suivants, en rappelant que la démarche globale d'amélioration suit un cheminement sous contraintes d'antériorité.

Chapitre 8 : ENCEINTES ACOUSTIQUES

À partir de ce chapitre, l'approche est beaucoup moins globale et le propos plus technique. Les principes fondamentaux et l'analyse physique complète ne sont pas

détaillés, d'autres ouvrages étant très complets sur ce sujet. Le but de ce chapitre est de faire ressortir des critères de choix, des seuils de décision.

Le premier point abordé concerne le haut-parleur de grave :

L'aspect mécanique est mis en avant pour faire ressortir les limitations sévères imposées par la technologie des haut-parleurs sur les critères de rendement et de puissance acoustique rayonnée, l'accent étant mis sur la médiocrité des valeurs courantes pour ces deux grandeurs. La nécessité d'excursions et de vitesses faibles dans les déplacements des membranes aux basses fréquences fait l'objet d'une étude détaillée qui aboutit à des conclusions précises à propos des diamètres de haut-parleur et de leur directivité. La discussion des qualités du circuit magnétique introduit la notion de facteur de qualité Q et d'amortissement.

Le deuxième point concerne la charge du haut-parleur de grave :

La nécessité d'un compromis entre rendement et fréquence de coupure basse apparaît, et les solutions à base de pavillons sont exposées brièvement. L'étude de la charge par enceinte Bass-Reflex commence par une classification des alignements selon le type de réponse temporelle, se poursuit par la définition des paramètres électro-acoustiques du haut-parleur et des équations qui s'y rattachent, et se termine par le calcul de la charge, volume de l'enceinte et dimensions des événements, illustré par un exemple de caisson grave supportant une correction active de l'extrême-grave.

Le troisième point concerne les voies supérieures :

Il fait apparaître la nécessité d'utiliser des pavillons et de maîtriser les lobes de directivité. Les notions d'indice de directivité et d'angle de dispersion sont introduites, et leur influence sur le choix des fréquences de séparation est précisée. Les compromis de conception d'un pavillon sont exposés à travers quelques exemples, puis des outils mathématiques sont présentés et illustrés par un exemple de réalisation.

Les points suivants abordent la voie de bas-médium, dont quelques exemples apparaissent, et la voie aiguë en précisant les technologies requises.

Le dernier point entre en détails dans les problèmes posés par la sommation acoustique des ondes émises par les différents haut-parleurs, sommation qui subit les déphasages aux sorties des filtres séparateurs. Les incohérences temporelles qui en résultent sont exposées, ainsi que les lobes de directivité irréguliers ou inclinés. Des moyens de contourner en partie ces problèmes, et d'aligner temporellement le système de haut-parleur, sont présentés ensuite. Des recommandations suivent concernant le choix des composants de filtrage, et les modifications accessibles à l'amateur.

Chapitre 9 : AMPLIFICATEURS

De même ce chapitre ne présente pas les analyses complètes des montages fondamentaux, pas plus qu'une liste exhaustive des montages existants ou un historique de l'évolution des circuits. D'autres ouvrages cités en bibliographie sont très complets sur ces sujets. Le but de ce chapitre est de définir des orientations de conception, de faire ressortir des critères de choix et surtout de les hiérarchiser, afin de dégager une progression cohérente vers le réalisme de la restitution. L'ordre dans lequel les points sont abordés révèle cette hiérarchie.

Le premier point aborde la charge de l'amplificateur :

Les besoins de gain en tension et en courant étant remis en situation, l'aspect motionnel de l'impédance du haut-parleur est rappelé et son effet sur la boucle de contre-réaction est exposé. Le principe de la contre-réaction appliqué à un amplificateur est présenté, et débouche sur des considérations précises concernant le gain, l'impédance de sortie, la stabilité et les distorsions du circuit. La nécessité d'une impédance de sortie stable amène à justifier le fonctionnement en classe A et la notion de puissance est remise en question.

Le deuxième point concerne les alimentations :

En partant des effets produits par le partage d'une impédance commune et les phénomènes parasites des condensateurs, la nécessité d'utiliser des alimentations surdimensionnées, séparées, à plusieurs étages, suivies ou non de régulateurs est légitimée. Des moyens de calcul permettant le dimensionnement sont donnés et illustrés. Les irrégularités de l'impédance de sortie des régulateurs sont montrées, ainsi que les effets sur la réponse temporelle. Cela aboutit à la définition de circuits d'alimentation particuliers. La gestion des masses est détaillée.

Le troisième point concerne le schéma :

La simplicité du schéma et l'absence de compensations diverses est mise en avant. Un exemple est donné pour chacun des trois étages habituels d'un amplificateur à transistor, avec quelques références de composants réputés. Ce paragraphe donne seulement des orientations, en précisant les contraintes liées à chaque étage et aux relations entre ces étages. Quelques recommandations concernent le choix des composants.

Le quatrième point aborde les limitations inhérentes aux semi-conducteurs :

Le retour à un schéma de type simple-étage est légitimé, et aboutit à un retour aux lampes, pour lesquelles le montage push-pull habituel est présenté. Amplificateurs de tension à triodes, en SRPP ou à pentodes, puis déphaseurs de Schmitt, paraphase et cathodyne sont rappelés, ainsi que les montages de sortie Ultra-Linéaire, pentode et triode. Les limitations du transformateur de sortie sont étudiées. Le montage monotriode à chauffage direct termine cette quête, avec des considérations sur l'alimentation des filaments. Un exemple de montage monotriode est proposé, avec une sélection de composants, et le couplage idéal triode/haut-parleur est démontré. La multi-amplification est détaillée avec les choix préférables d'amplificateurs pour chaque voie. Les étages préamplificateurs ligne sont abordés ainsi que leur alimentation. Une approche comparative à partir des modifications spectrales apportées par chaque type d'amplificateur fait ressortir leurs caractères subjectifs.

Chapitre 10 : INSTANTS MAGIQUES

Quelle perspective découvre-t-on après avoir parcouru tout ce chemin ? Le son perdu a-t-il retrouvé son réalisme ? Quelles sont les voies de progrès encore possibles ? Et si à partir de là nous écoutions tout simplement un peu de... Musique ?

1. PERSPECTIVES

« Tout ce que nous pouvons faire, c'est rechercher ce qu'ont de faux nos meilleures théories. »

Karl Popper

LA PHILOSOPHIE

Le manque de pensée structurée me paraît assez gênant dans ce vaste domaine de la reproduction musicale, situé au carrefour des Arts, de la science, des technologies nouvelles et plus anciennes réunies, des savoir-faire techniques et pratiques donnés par l'expérience. Cette absence laisse la porte ouverte à tous les excès mercantiles, elle laisse aussi la place à tous les soi-disant maîtres-à-penser (audio-gourous) ardents défenseurs de la pensée unique – la leur – et enfin laisse l'amateur empêtré dans une jungle inextricable, sans aucune perspective où s'engager.

Il me semble que le plus urgent est de remettre un peu d'ordre dans ce paysage, en partant de la vue la plus large possible du philosophe pour aller vers la vision très pointue du technicien.

C'est cette réflexion rationnelle sur les principes généraux qui permet d'appréhender le rôle essentiel de l'homme, en tant qu'être créatif conscient, au cœur du processus de la reproduction sonore.

Cette philosophie est basée autant sur l'empirisme, nécessaire à l'expérience, puis à la compréhension de nos perceptions sonores, que sur le rationalisme indispensable ensuite à une démarche scientifique de conception ou de remise en cause.

LA SCIENCE À SA PLACE

Prendre conscience de la hiérarchie montrée figure 1 me semble indispensable. Il est admis que la technologie est entièrement asservie à la science, suspendue à ses décisions, et qu'elle en constitue le bras armé, le serviteur : aucun technicien, même bricoleur talentueux, ne pourrait à l'heure actuelle réaliser un appareil ou même un sous-ensemble sans avoir au préalable posé au minimum un brouillon de schéma, quelques calculs, une vague simulation informatique... finalement une ébauche de démarche scientifique.

Par science, j'entends à la fois théories et modèles : théories des phénomènes physiques mis en jeu, c'est-à-dire connaissance des rapports de cause à effet, et

modèles mathématiques décrivant ces phénomènes de manière idéalisée, dans des hypothèses bien précises mais trop souvent oubliées.

Il est admis également que la technologie réduit souvent le champ des possibilités ouvertes par un progrès scientifique, soit pour des raisons budgétaires, soit parce que les procédés ne sont pas encore maîtrisés. Elle fixe donc un cadre, des limites, aux moyens mis en œuvre.

Par contre, il est moins évident, sauf pour certains concepteurs de matériel haut de gamme, que la science soit au service d'une philosophie. La démarche de conception s'appuie parfois sur des choix et des décisions à priori, sacrifiant aux lois du marché, aux modes passagères, au pire avec pour seul objectif de mettre en œuvre une technologie innovante. Dans ce cas, à aucun moment la question de l'intention première n'est soulevée, pas un seul instant le besoin à satisfaire, en terme de perception, n'est reconnu ni exprimé... Il me semble pourtant que la démarche scientifique se doit de relier l'intention à l'objectif, et qu'elle risque sinon de se perdre dans une direction sans issue. En effet, dans ce domaine où règne le subjectif de l'expression artistique, la pensée rationnelle, cartésienne ne peut que s'appliquer à des connaissances empiriques, acquises par une expérience préalable, mais en aucun cas s'y substituer. L'histoire des sciences et techniques est semée de ces "inventions géniales et révolutionnaires" et qui pourtant sont tombées aux oubliettes quelques années plus tard. Leurs concepteurs, sans doute très doués, n'avaient pas pris le temps (mais leur a-t-on laissé ?) de se poser les bonnes questions.

Également en ce qui concerne les mesures, et plus généralement les moyens et méthodes de contrôle mis en œuvre, je trouve assez étrange que la même démarche scientifique permette de concevoir un appareil en visant un objectif précis, et qu'elle définisse elle-même, avec les mêmes outils, les moyens d'évaluer si cet objectif est atteint ! Le scientifique est donc juge et partie... Mais cela n'a pas d'importance, il n'a pas

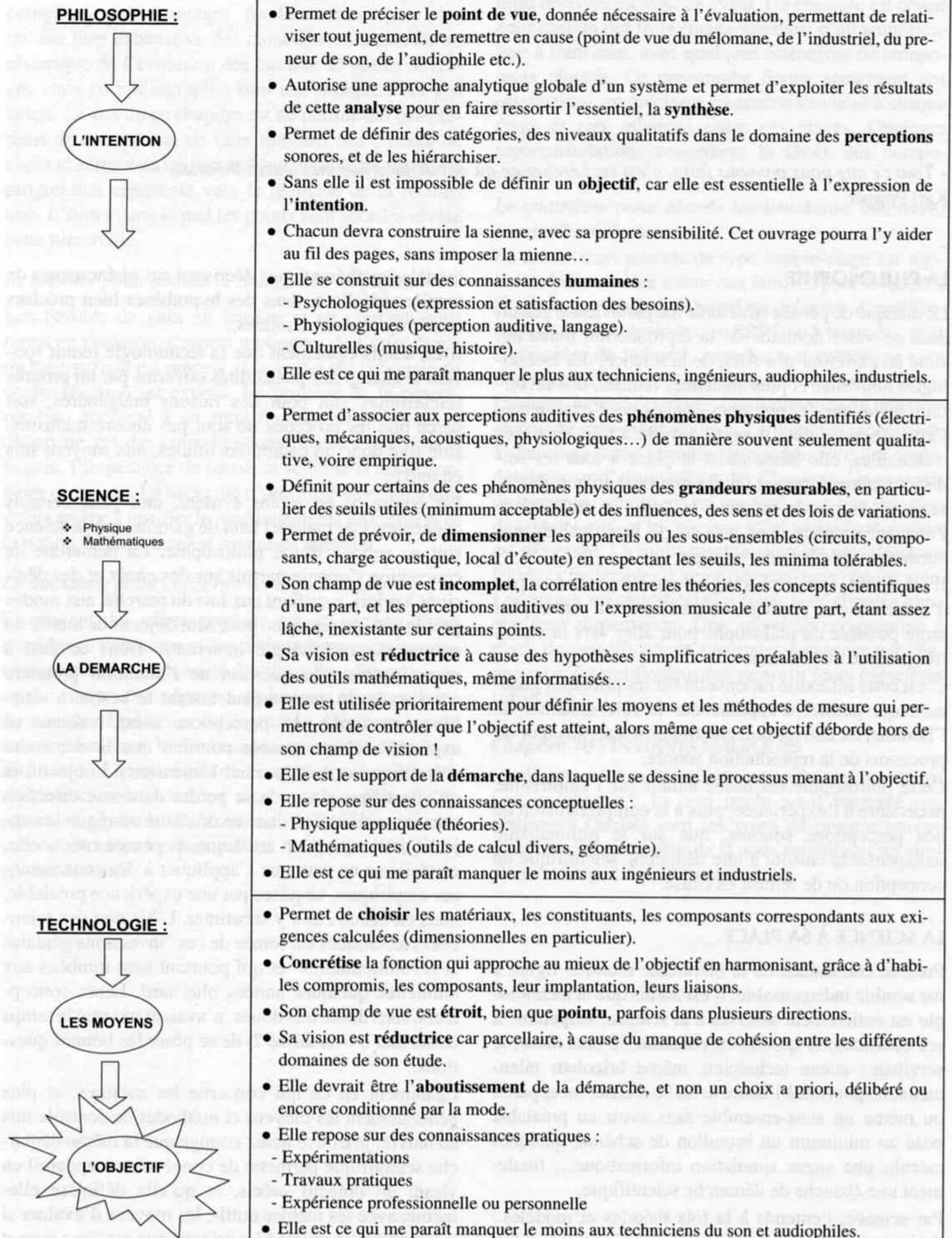


Figure 1 - Au départ, la philosophie...

demandé au philosophe de préciser son intention ni de définir l'objectif, il ne va pas plus lui demander une évaluation !

Alors on mesurera les performances du produit avec les outils qui l'ont conçu, et on trouvera par conséquent un écart proche de zéro entre l'objectif fixé et celui réellement atteint (le contraire serait inquiétant, surréaliste !) bref, le serpent se mord la queue...

Je sens la nécessité de remettre la mesure, au sens large, à sa juste place : elle ne constitue jamais une fin en soi, **ni une partie de l'objectif**, mais seulement une vérification, superflue à la limite si visiblement le besoin est satisfait. En ce sens, elle doit permettre de poser une valeur – un ordre de grandeur suffit pour commencer – sur un écart déjà détecté subjectivement (écart par rapport à l'objectif) pour le confirmer. Elle constitue un guide qui m'accompagne et me renseigne lorsque j'en éprouve le besoin, mais en aucun cas un rail, une ornière qui m'oblige à la suivre et dont je ne pourrais sortir. Pourquoi regarder l'aiguille de la boussole et la suivre lorsque le refuge est en vue ?

C'est bien la philosophie qui doit fixer le cadre extérieur, l'horizon panoramique du paysage, à l'intérieur duquel prendront place les objectifs de chacun. Ce cadre est le plus large, il ne devrait être limité que par l'imagination !

Les limites fixées par les connaissances scientifiques et les outils de modélisation utilisables sont bien évidemment beaucoup plus serrées, bien que parfois assez floues, au point que beaucoup de scientifiques n'ont pas conscience de leur existence. Il est si facile de confondre le phénomène physique avec son modèle mathématique, sa représentation, dont la portée semble illimitée si j'oublie les hypothèses de départ... (voir figure 2).

Les barrières imposées par la technologie sont encore plus étroites, mais très bien cernées. C'est pourquoi la conception d'un objet industriel part souvent d'un choix technologique à priori. Il faut admettre que ce point de départ est extrêmement réducteur et ne donne pas une perspective très ouverte, en fixant un objectif dont la portée me paraît bien faible.

Bien sûr il n'est aucunement indispensable d'avoir une philosophie, un système de pensée. Il est possible de se faire plaisir en s'équipant de matériels de plus en plus sophistiqués, performants, ou bien en enrichissant ses connaissances techniques et en les mettant à profit pour améliorer ou concevoir de nouveaux appareils. Tout cela sans jamais se poser la question de la finalité, de l'orientation ou de la motivation profonde de cette activité. Les questions "comment ?" ou "combien ?" ou encore "avec quoi ?" ont tellement de réponses toutes faites qu'il suffit de trouver dans un livre ! Alors que la question "pourquoi ?" débouche souvent sur un

vide inquiétant... Elle ne trouve sa réponse qu'en moi-même, avec toute l'absence de certitude, de référence ou d'exemple tout prêt.

Objecter qu'il ne sert vraiment à rien de définir un but – en relation avec une intention – si celui-ci tombe en dehors du cadre des possibilités d'étude ou de réalisation, constitue également une fuite face aux vraies questions. L'objectif n'est pas là pour être atteint à 100 % mais seulement pour définir clairement une direction de travail, une orientation de recherche. Le fait qu'il soit apparemment inaccessible ne constitue pas un empêchement ni même un handicap ! Au contraire, un objectif très élevé est souvent motivant car il constitue un challenge.

Maintenant, à vous de trouver les bonnes questions et les vrais objectifs :

1. Je voudrais un ampli de 2 fois 100 W.
2. Je vais acheter un nouveau lecteur de CD en 24 bits.
3. Est-ce qu'un ampli à lampes me donnerait de meilleurs résultats ?
4. J'aimerais des enceintes donnant un son plus ample, plus plein.
5. Quel est le maillon faible de mon système ?
6. Est-ce que moi aussi je peux entendre des différences de prise de son entre deux disques ?
7. Les câbles Machin en argent isolé Téflon sont-ils plus transparents que les Trucs en polypropylène ?
8. Je vais disposer mes enceintes différemment et mettre des tentures aux fenêtres.

Faisons le point, cela nous permettra de préciser intention, objectif et démarche :

1. Il s'agit d'un désir, à mon avis sans fondement, lié simplement à un besoin d'exprimer sa puissance. Je n'y vois aucune intention au sens artistique, ni démarche. Et je soupçonne une méconnaissance (fréquente) des grandeurs physiques essentielles, ainsi qu'une absence d'analyse préalable de la valeur du système, de ses points faibles.
2. Matérialiste, plaisir de consommer, avoir... (le point faible d'une immense majorité de systèmes reste le haut-parleur, dont la dynamique – inférieure à 60 dB sauf très rare exception – correspond à un codage sur environ... 10 bits !
3. Plus difficile : sacrifice à une mode ? Influence d'un gourou ? Ou bien intention réelle d'accéder à une écoute plus sensuelle ? Une réflexion s'impose quand aux motivations.
4. Voilà un objectif précis qui ne peut être que le résultat d'une démarche : le manque exprimé ici renseigne complètement sur l'intention.
5. Très bonne question ! ... Y-en a-t-il un ?

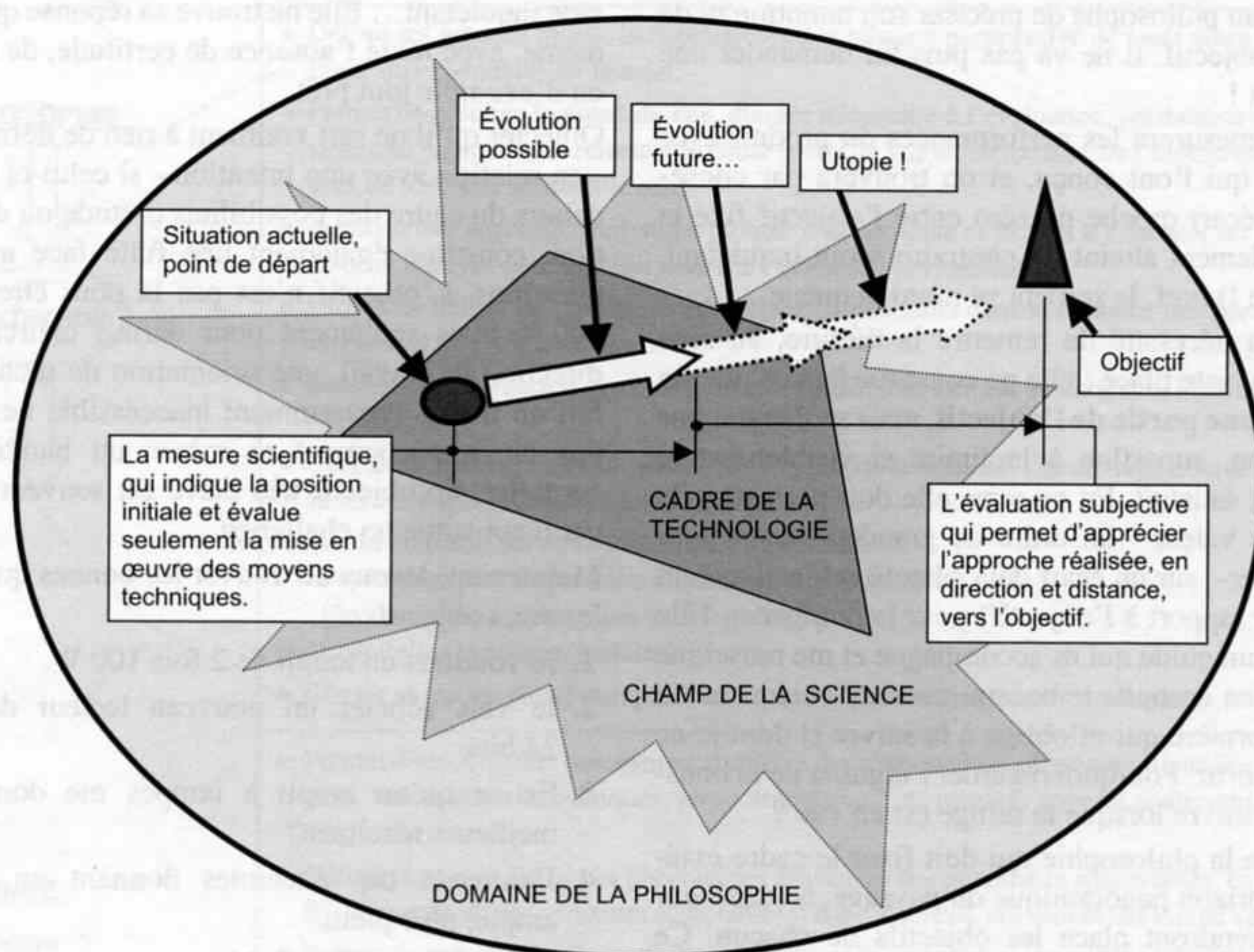


Figure 2 - La finalité – objectif ultime – de tout système de reproduction est de créer l'illusion de l'événement sonore. Elle peut se décliner en objectifs intermédiaires ou partiels situés pour la plupart hors du champ de la science actuelle. Par conséquent aucune mesure de type scientifique – puissance, distorsion, réponse en fréquence etc. – ne peut renseigner sur l'approche de ces objectifs, même pas sur la direction d'évolution. La

mesure telle qu'elle est pratiquée actuellement permet seulement d'évaluer la qualité de mise en œuvre des moyens techniques, et en particulier la précision avec laquelle ces moyens respectent les modèles mathématiques utilisés pour la conception ! Ces modèles rendent-ils compte de nos perceptions sonores ? Je ne le crois pas, et je pense même qu'ils en sont vraiment très loin.

6. Excellente question... Cela dépend de vous, car écouter s'apprend, et de votre système : impression d'espace, de matière et d'énergie sonore.
7. Oui mais ce n'est qu'un détail ! Mauvaise question... à moins qu'elle n'arrive à la fin d'une démarche.
8. Objectif très clair qui apparaît derrière cette démarche, où l'auditeur s'implique complètement, ce qui sous-entend qu'il a une intention précise : celle de respecter l'espace sonore voulu par le preneur de son, en rendant sa pièce d'écoute plus neutre.

L'OBJECTIF

L'objectif pourrait se définir, d'une manière générale, en termes de "beau" au sens esthétique, harmonieux ou de "vrai" au sens réaliste, conforme à l'intention artistique. Ces deux définitions peuvent paraître opposées et inconciliables, la recherche du beau relevant d'une démarche à priori différente de la recherche du vrai, et

les critères d'appréciation de ces deux qualités étant complètement distincts. Cette dualité apparente tient à mon avis au fait que je ne suis pas prêt à accepter toute vérité telle qu'elle se présente, et que je préfère choisir une vérité particulière, partielle et qui me convient ou me satisfait. Ainsi je pourrai considérer belle l'expression de cette vérité. De la même manière je pourrai considérer vraie l'expression artistique lorsque je la trouve belle selon mon appréciation personnelle. J'aurai ainsi l'impression d'être en relation à la fois avec le beau et avec le vrai, et d'avoir concilier deux exigences contradictoires en un compromis idéal, où aucune concession n'aura été faite !

Cette impression est évidemment trompeuse. La vérité n'est ni belle, ni laide, elle est. Tout simplement. La beauté n'existe que dans l'esprit de l'observateur, et ne peut être définie que par rapport à sa propre sensibilité. L'expression artistique jugée belle, ne l'est qu'au sens

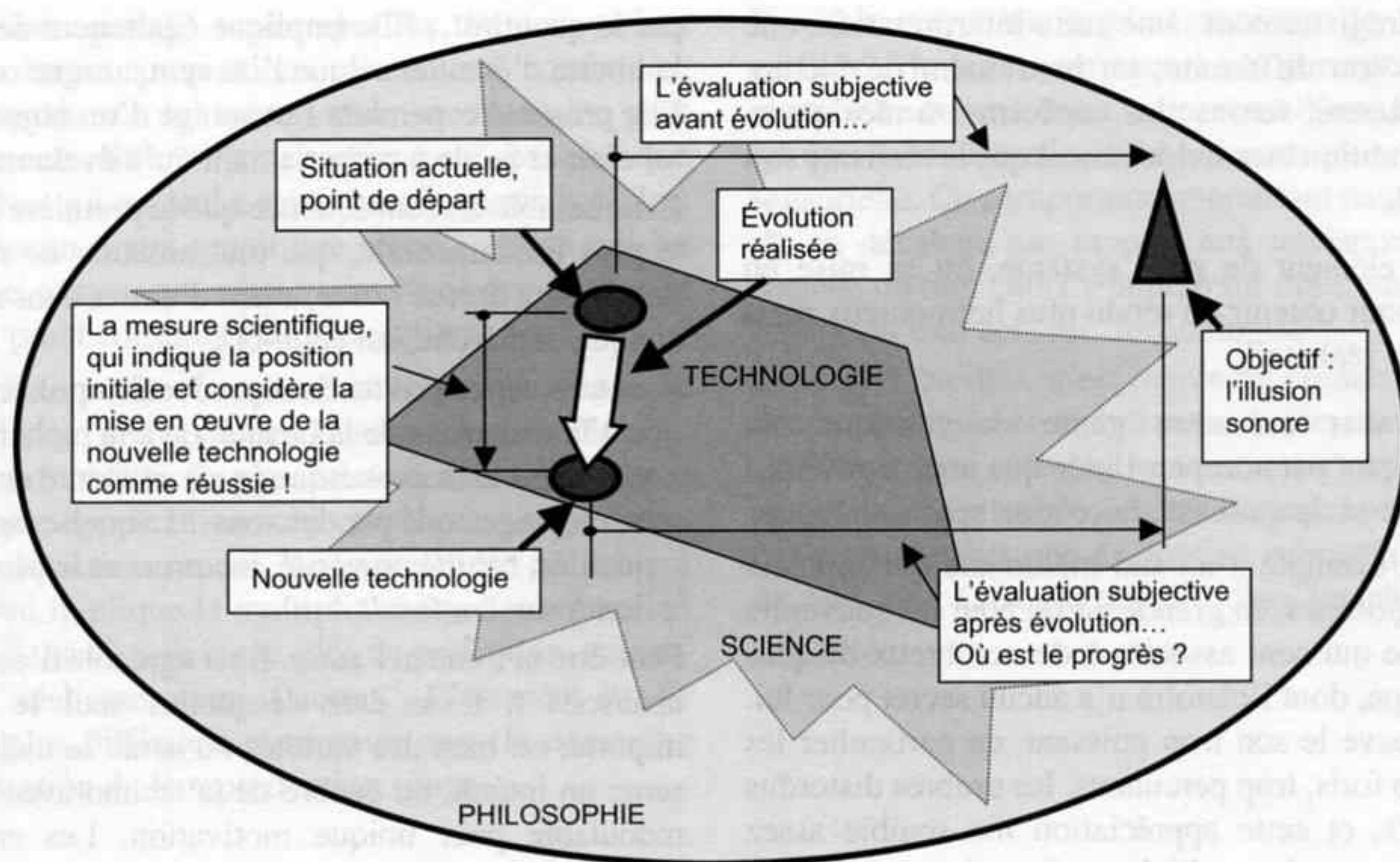


Figure 3 - Le progrès technologique vise parfois un objectif complètement masqué à l'utilisateur : réduction des coûts de production, simplicité d'assemblage, absence de réglages, standardisation, décentralisation ou délocalisation de la production etc. La nouvelle technologie ne fait pas plus de musique que l'ancienne ! Les lampes, les haut-parleurs à membrane papier, et les disques microsillons sont quelques rappels fla-

de l'auditeur, qui n'a aucun moyen de savoir si cette représentation de l'expression serait trouvée belle par l'interprète, ou le compositeur.

Par conséquent, mon choix personnel est de définir un objectif en terme de "vrai" au risque de trouver parfois ce vrai inesthétique, inharmonieux, ou simplement déplaisant. C'est un parti pris délibéré qui me permet de satisfaire un besoin profond d'authenticité dans ce que je vis ou fais. Ce besoin est à mon avis d'un ordre supérieur à celui du simple plaisir musical, ce qui n'interdit nullement de satisfaire les deux à la fois !

Le principal critère d'appréciation permettant d'évaluer l'approche de cet objectif sera la sensation de **réalisme** de la restitution sonore, apportée essentiellement par les impressions d'espace, de relief sonore d'une part, et de matière, de texture sonore d'autre part. Ces points seront développés plus complètement dans les chapitres suivants. Les critères d'exactitude des timbres et des nuances, et d'harmonie de ceux-ci, passent pour moi en second plan. Non pas que je les considère comme moins importants, mais parce qu'ils ont une incidence plus faible sur l'impression de réalisme sonore, en l'absence de référence mémorisée du timbre de tel instrument dans telle salle, et sont par contre prépondérants dans l'appréciation de l'esthétique.

grants que sur certains points le "progrès" ne constitue aucunement une amélioration dans la satisfaction du besoin de plaisir auditif...

Ce n'est pas la nouvelle technologie qui est critiquable, mais seulement le fait qu'elle soit mise en œuvre avec un objectif industriel quelquefois éloigné des exigences de l'expression artistique.

L'auditeur qui fera le choix d'un objectif défini en terme de "beau" prendra le risque de trouver ce beau parfois "trop beau pour être vrai" c'est-à-dire qu'il aura conscience de percevoir un son plus doux que nature, ou bien trop ample ou trop léger selon le cas. Une comparaison peut être faite avec la photographie, où la netteté des arrières plans n'est pas forcément intéressante, où le flou peut renforcer une ambiance, où le fondu peut harmoniser les teintes, alors que toutes ces interprétations sont plus ou moins éloignées de l'impression visuelle obtenue lors de la contemplation de la scène réelle. Une photographie prise le plus sincèrement possible ne présentera pas nécessairement un intérêt esthétique, ses qualités étant alors de l'ordre du témoignage, du compte-rendu. La question reste ouverte sur la valeur relative de ces deux approches.

Recherchant l'authenticité, si par exemple j'estime le rendu d'un concerto pour clavecin très réaliste quant à la sensation d'espace et de matière sonore, mais que je juge les sonorités inesthétiques car trop légères, trop éthérées, aériennes et frêles, cela signifie que je dois trouver une amélioration en changeant :

- Soit l'enregistrement : une autre interprétation, une prise de son différente, un instrument de facture plus ancienne, seront plus conformes à mes attentes, à condition bien évidemment que le réalisme soit conservé.
- Soit un élément de mon système, ou sa mise en œuvre, pour obtenir un rendu plus harmonieux mais tout aussi réaliste.
- Soit écouter un autre genre de musique, en commençant par accepter l'idée que je ne trouve pas dans celle-ci de quoi satisfaire mon sens esthétique.

Je citerai l'exemple d'un ami mélomane qui apprécie les Rolling Stones, en grande partie pour les souvenirs de jeunesse qui sont associés à de nombreux disques de ce groupe, dont l'histoire n'a aucun secret pour lui. Mais il trouve le son trop puissant, en particulier les graves trop forts, trop percutants, les timbres distordus et agressifs, et cette appréciation me semble assez exacte. Pourtant lorsqu'il les a écoutés en concert, à plusieurs reprises, il s'est rendu compte que cette impression était réaliste ! Cependant, dans son salon, pour écouter un disque CD de son groupe fétiche, il atténue nettement les graves, remonte un peu les aigus, et écoute à volume sonore plutôt modéré, tout ceci afin d'adapter, de déformer l'œuvre pour qu'elle corresponde à son sens esthétique personnel. Lorsqu'il m'a demandé mon avis pour améliorer le rendu de son système, je lui ai fait remarquer que selon mon estimation, il ferait mieux d'écouter autre chose... ou alors d'écouter autrement.

En poussant la discussion un peu plus loin, il m'est apparu que ce n'était pas le genre musical, ni le style d'interprétation, qui présentaient un quelconque intérêt pour ce mélomane, mais simplement l'aspect historique, associé à son propre passé, et à des souvenirs d'événements liés aux concerts de sa jeunesse. Seulement, ce genre musical exprime avec force une certaine rébellion. Ce style d'interprétation procure des sons projetés et agressifs.

Une guitare électrique produit, si l'interprète le désire, un son métallique bourré de distorsion et fortement saturé. Une batterie tape réellement fort, et sa proximité est difficilement supportable. Et Mick Jagger chante vraiment trop près du micro ! C'est comme cela. Le son des Stones est celui-là et pas un autre et fait partie intégrante de leur expressivité.

Le respect de l'artiste passe par cette acceptation pure et simple de sa forme d'expression, autant que du message. Écouter les Stones à volume modéré est à mon sens une aberration. Cette prise de position implique de se donner les moyens nécessaires pour obtenir un niveau sonore réaliste avec une qualité sonore conservée, car il ne s'agit pas non plus de remplacer la qualité

par la quantité... Elle implique également de sacrifier la liberté d'écouter ce que l'on veut comme on le veut. Elle présente cependant l'avantage d'un objectif général clair et facile à cerner autant qu'à évaluer.

Il me semble en conséquence que la première question, la plus fondamentale, que tout amateur de reproduction sonore doit se poser, avant d'entrer dans une quelconque démarche, est celle-ci :

- « Dans cette activité de reproduction musicale, suis-je à la recherche de la beauté, ou à la recherche de la vérité, ou bien est-ce que je me contente de recevoir un message codé par des sons ? Laquelle de ces deux qualités, beauté ou vérité, me procure le plus d'émotion à son contact ? »

Peut-être ni l'une ni l'autre. Il est agréable d'écouter des chansons à texte dans lesquelles seul le message importe, ou bien des variétés où seule la mélodie présente un intérêt, ou encore de la techno avec le punch redoutable pour unique motivation. Les enregistrements du début du siècle présentent eux aussi un intérêt, purement historique cette fois. Aucune de ces situations ne correspond à une quête de vérité ou d'esthétique, mais seulement à la recherche de plaisir musical.

Quant à l'envie de partir à la poursuite des deux à la fois, c'est évidemment un objectif extrêmement intéressant. Cependant, autant il me paraît naturel de chercher le beau dans le vrai, autant le contraire, chercher le vrai dans le beau, me semble voué à l'échec. Le vrai ne peut être que complet, alors que le beau peut être partiel. Je peux trouver ce qu'il y a de beau dans un ensemble déplaisant, alors que je ne ressens rien de vrai s'il y a ne serait-ce qu'une petite part de faux dans l'ensemble. Le vrai est plus fragile à mon sens, d'où la nécessité de l'obtenir d'abord avant de prétendre y trouver une part de beau.

Et si la solution était tout simplement de trouver beau, naturellement beau, je veux dire "de la beauté de la nature", toute chose qui serait simplement et naturellement authentique, vraie ? Et de l'accepter telle quelle...

Dans cette quête de vérité, l'absence de référence absolue ne doit pas constituer un obstacle, et tenter d'évaluer les progrès accomplis en répondant à une question du genre : "Le résultat obtenu maintenant est-il plus proche du son original ?" relève d'un comportement perfectionniste. Cette question ne doit pas se poser, car il n'existe aucun son de référence. Si l'auditeur avait été présent lors de la prise de son, il aurait pu constater qu'il existe autant de perceptions sonores possibles de l'événement qu'il y a de points d'écoute possibles. En changeant de place latéralement, de position, assis ou debout, en s'approchant ou s'éloignant de la scène sonore, la perception obtenue est à chaque fois très différente, mais tout aussi réelle ! Pourtant

l'impression spatiale autant que les timbres varient dans de larges proportions. Dans ces conditions, l'ingénieur du son lui-même, dans sa cabine, ne peut prétendre connaître "le son de référence", pas plus que l'interprète, qui est seul à capter son instrument de derrière. Chacun d'eux reçoit une représentation qui lui est propre, toutes sont aussi vraies l'une que l'autre, et leur seul point commun est... le réalisme !

L'audiophile préfère se rattacher à quelque chose de mesurable, qui demande par conséquent une référence, et il est parfois difficile pour lui de devoir se contenter de sa propre appréciation subjective, quant au réalisme de la reproduction sonore. Accepter l'idée qu'il n'y a pas d'idéal implique la multiplicité des "possibles" et entraîne l'abandon de toute idée de perfection, au profit d'un "réalisme parmi d'autres". C'est peut-être le point le plus difficile à surmonter dans la démarche d'amélioration de la reproduction sonore.

Franchir cet obstacle, c'est accepter de "croire ses oreilles", de faire confiance à ses perceptions, d'être réceptif à ses sensations, en passant d'une écoute analytique, intellectuelle, à une écoute plus subjective, sensorielle. Ce comportement pourtant naturel est plutôt en décalage par rapport aux tendances de notre société, où tout choix s'appuie sur des critères scientifiques, où tout acte est "technologisé".

Croire ses oreilles, c'est reprendre contact en profondeur avec l'univers sonore naturel : l'espace sonore, la matière sonore et le mouvement qui s'exprime par le son. La perception de ces trois composantes, au-delà des sons, permet une évaluation subjective du degré de réalisme. Cela est détaillé dans les chapitres qui suivent.

2. REFLETS

« La beauté des choses existe dans l'esprit qui les contemple. »

David Hume

Considérer la reproduction musicale comme un simple loisir technique, si évolué soit-il, est terriblement réducteur. C'est un piège qui ne guette pas seulement l'audiophile débutant, qui pour schématiser serait fraîchement sorti d'études scientifiques ou techniques, peu ouvert à ses propres émotions et assez peu réceptif à l'expression artistique. Le mélomane lui aussi se fourvoie, en portant un regard critique sur ce qu'il estime n'être qu'un passe-temps de technicien, et en se privant d'un plaisir qu'il ne croit accessible qu'au concert. L'un et l'autre n'y voient qu'une activité technologique prétexte à dépenser son temps, son argent et ses compétences.

La reproduction musicale doit être appréhendée comme une activité artistique. Elle est en ce sens, d'un bout à l'autre du processus, depuis l'événement sonore réel – le concert – jusqu'à sa représentation virtuelle – le disque écouté – le moyen d'expression de la créativité de chacun des hommes qui interviennent dans ce processus complexe. Tout d'abord le compositeur, puis l'interprète, le facteur d'instruments, s'expriment à travers l'œuvre musicale. Puis l'ingénieur du son, l'architecte en tant qu'acousticien de la salle, le technicien du mixage, apportent leur représentation, leur transposition, sous forme d'un enregistrement. Ensuite le constructeur d'appareils haute-fidélité, l'installateur, le fournisseur d'accessoires, l'architecte de la salle d'écoute donnent leur interprétation de cette représentation. Enfin l'auditeur fait l'expérience de la perception sonore, au travers de l'image sensorielle qui lui est transmise.

Il s'agit bien d'une expression de la sensibilité des acteurs successifs de cette représentation, et c'est bien l'homme qui est au cœur du processus, dans lequel il choisit d'utiliser l'un ou l'autre outil technologique, et le met en œuvre en correspondance avec son sens esthétique. La technique doit être ici au service de l'expression artistique.

Cela est tout à fait différent d'une activité purement technique, dans laquelle au contraire c'est l'homme qui est au service de la fonction technique, lorsqu'il se

plie aux exigences de mise en œuvre de la machine, ou encore aux contraintes de sa maintenance, comme c'est le cas dans nombre de métiers du secteur industriel.

Ce point de vue apporte une perspective intéressante, dans laquelle il apparaît nettement que les choix effectués à tous les stades du processus par chacun des acteurs, y compris et surtout l'auditeur, doivent être guidés par des considérations d'ordre esthétique en premier lieu, les aspects techniques et pratiques étant pris en compte par la suite, subordonnés autant que possible aux exigences artistiques.

Cette condition me paraît beaucoup mieux respectée au début du processus, sans doute parce que les acteurs intervenant lors des premières étapes disposent d'une sensibilité artistique indéniable. C'est heureusement le cas du compositeur, créateur de l'œuvre, ou organisateur de l'événement, ainsi que du ou des interprètes. On peut considérer que les choix techniques effectués à ce stade font partie intégrante de la création artistique, et n'en constituent pas une limite : le guitariste qui choisit ses cordes, ses micros, les lampes de son amplificateur, a pour objectif l'obtention d'une sonorité particulière, lui permettant de valoriser son expression. Malheureusement, ces qualités sont parfois masquées par les limitations successives qui interviennent lors des étapes suivantes.

Le facteur d'instrument réalise un compromis un peu plus délicat entre, d'une part les possibilités offertes par les matériaux et les techniques de mise en œuvre, et d'autre part les exigences en timbre, texture, harmonie et accord imposées par l'interprète. La technique est ici un peu plus limitante, mais toujours au service de l'expression.

À l'étape suivante, où l'on considère que l'événement musical prend place dans un lieu, c'est l'architecte de la salle de concert, du théâtre ou du studio d'enregistrement, qui doit réaliser un difficile compromis entre des exigences contradictoires : d'un côté, une acoustique parfaitement adaptée au style musical, où la qualité de la réverbération des sons, en durée, en direction

et en couleur sonore, participe à l'harmonie, à la spatialisation, et de l'autre côté des impératifs fonctionnels, de confort physique et visuel, de sécurité, de modularité de la salle, d'accès etc. La technique essaie de ne pas trop entraver l'expression artistique, elle n'est que partiellement à son service.

Au stade de la prise de son, du mixage et du transfert, le directeur artistique, l'ingénieur du son et ses divers assistants doivent opérer des choix techniques importants : prise de son "live" ou en studio, musiciens captés individuellement ou ensemble, réverbération naturelle ou artificielle en cabine, type nombre et position des micros, égalisation et balance etc. C'est sans aucun doute l'étape de la création artistique où la technique, malgré les fantastiques progrès effectués en un siècle, reste la plus limitante, ceci d'autant plus que des impératifs commerciaux s'y ajoutent : la radiodiffusion par exemple impose une compression dynamique.

Plus le processus avance et plus les limitations techniques se resserrent.

Bref, à ce stade le disque est à peine créé qu'il n'est, parfois, déjà plus qu'une pâle représentation de l'expression artistique.

Ce disque se veut pourtant le miroir, le porteur du reflet de l'événement sonore. Le processus de re-création de cet événement se continue dans votre salon, lieu d'écoute dont la qualité technique – formes, dimensions, matériaux – ne doit en général absolument rien à des considérations d'esthétique musicale de la part de l'architecte !

On touche ici, à mon avis, le point le plus restrictif dans l'ensemble des moyens technologiques intervenant dans ce processus de reproduction sonore. Les étapes suivantes sont moins limitantes, mais le résultat final ne dépend que du maillon le plus faible.

Au stade suivant le fabricant de matériel haute-fidélité apporte son interprétation, avec des moyens techniques parfois beaucoup moins limitant que l'espace dans lequel ils sont installés.

Et l'auditeur, à l'extrémité de ce processus, possède sans aucun doute une sensibilité artistique suffisante pour constater qu'au bout du compte, le reflet obtenu, perception sensorielle un peu trouble et voilée, ne révèle qu'en partie l'intention de l'artiste.

La reproduction musicale vue comme activité artistique exige par conséquent, de la part de l'acteur final du processus, c'est-à-dire l'auditeur, des remises en cause profondes de chacune des étapes, débouchant sur des choix délibérés quant aux moyens techniques mis en œuvre.

L'ordre dans lequel ces remises en cause doivent s'effectuer découle directement de la position, sur l'échelle de considérations artistiques, des différents acteurs. Dans la figure 4, le haut de l'échelle correspond aux acteurs situés en haut du dessin, compositeur et interprète en premier lieu.

Dans la plupart des cas, le bas de l'échelle revient à l'architecte qui a conçu l'habitat de l'auditeur, sans la moindre considération musicale. Sa seule préoccupation acoustique concerne l'isolation du logement par rapport aux nuisances extérieures, ce qui n'a malheureusement aucune incidence positive sur les qualités de diffusion du son à l'intérieur du local. (voir le chapitre 6 « Le lieu d'écoute », page 62).

Le deuxième point important est souvent lié à l'installation, non optimale, des moyens techniques dans ce local d'écoute.

Ensuite, une erreur très fréquente consiste à remettre en cause le matériel haute-fidélité utilisé, alors que les disques écoutés ne reflètent parfois que peu de considérations artistiques de la part des techniciens (mixage, transfert, pressage...).

Enfin, l'auditeur lui-même et ses pratiques sont peut-être plus critiquables que le matériel employé.

C'est pourquoi beaucoup d'audiophiles considèrent par expérience que les deux maillons les plus importants d'un système haute-fidélité sont la salle d'écoute et le disque !

Ils en oublient pourtant un autre : moi-même en tant qu'auditeur faisant partie intégrante de l'événement ou de son reflet, car je ne peux me séparer du monde lorsque je le perçois. Ma première priorité va par conséquent à l'éveil des perceptions sensorielles auditives, qui sera développé dans le chapitre suivant.

Lorsque je considère le disque comme le reflet de l'événement musical, reflet est à prendre au sens propre du terme : la prise de son constitue bel et bien un moyen d'obtenir une "image" sonore virtuelle, à partir d'une image sonore réelle, et de la projeter en un point éloigné dans l'espace et dans le temps, de la même manière qu'un miroir de verre étamé produit une image de la scène visible et la renvoie au loin vers l'observateur.

Il s'agit bien d'un miroir et non d'une photographie. Cette dernière propose une image statique, ou le relief est seulement suggéré, le mouvement immortalisé. Le miroir produit au contraire une image animée, possédant un relief perceptible, tel qu'en me déplaçant devant, je peux constater la présence d'un premier plan mouvant par rapport aux arrières plans, fixes. La photographie produit une image réelle mais incomplète de l'événement, alors que le miroir renvoie un événement complet mais virtuel. Les sons issus du système de

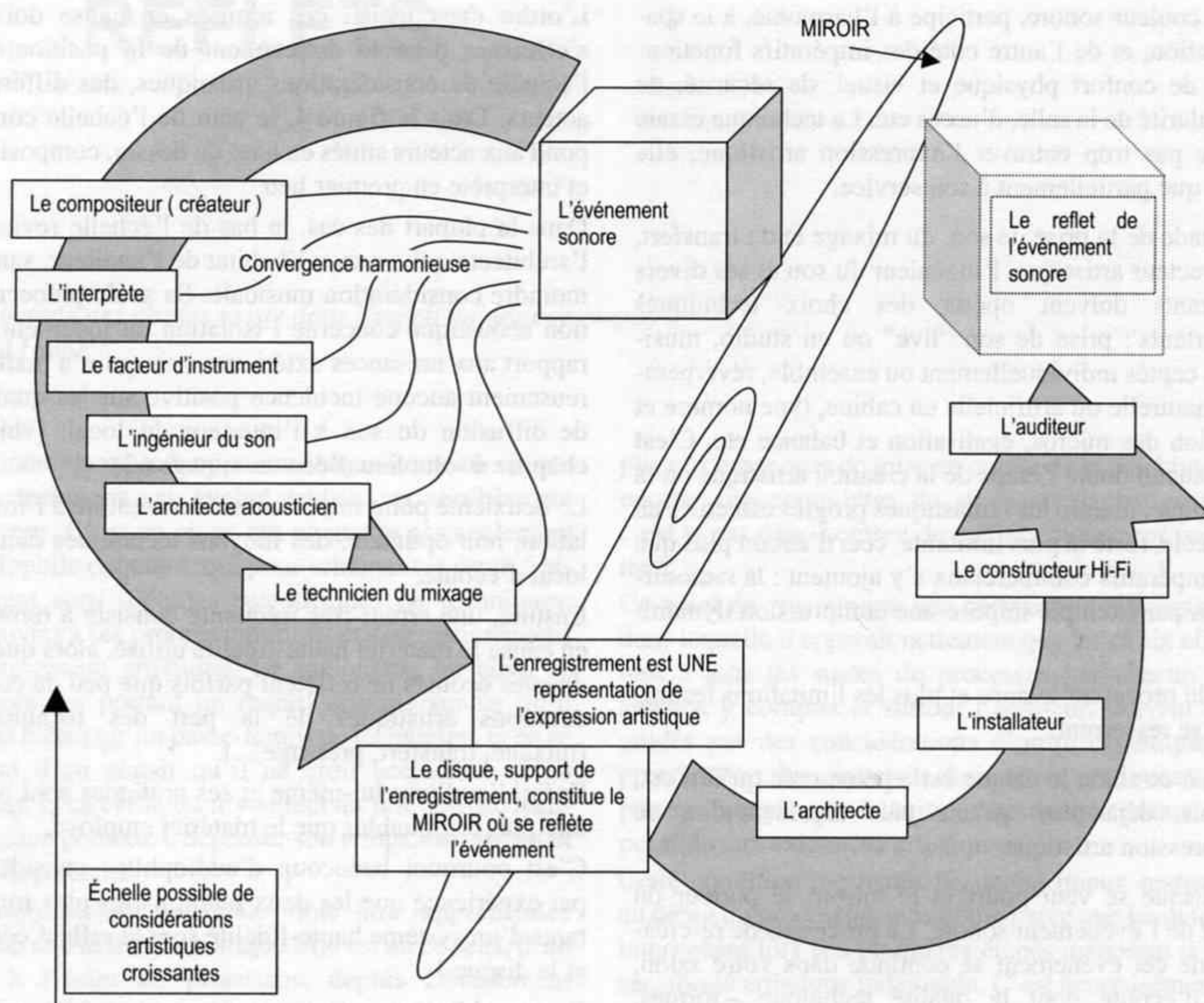


Figure 4 - Processus de la reproduction musicale, et ses acteurs.

reproduction ne constituent donc pas une représentation de l'événement musical, mais un nouvel événement musical, clone du précédent si possible, et le champ sonore diffusé dans la pièce d'écoute est bien réel. L'événement reste incomplet bien évidemment car les perceptions visuelles sont absentes. Par contre, les perceptions par le corps tout entier des vibrations de très basses fréquences sont possibles, et apportent un réalisme saisissant à la restitution.

Le disque en tant que support mécanique de l'enregistrement doit donc être considéré comme une représentation, alors que sa lecture donne lieu à une "re-création", incomplète et imparfaite. Si cette re-création atteint un niveau de réalisme suffisant, une écoute en aveugle donne l'illusion que l'espace sonore est recréé et que les sources sonores sont présentes. Le champ sonore, diffusion des ondes à travers la salle de concert, qui existait au moment de la prise de son, a bien été reproduit à l'identique grâce à quelques artifices de prise de son, comme cloné, lors de la reproduction. C'est en cela que l'enregistrement d'un événement sonore diffère totalement de l'enregistre-

ment d'une image, même mobile comme un film. La contemplation d'une image ne donne pas de perception du relief, car la représentation est réalisée sur deux dimensions alors que l'original en possédait trois. Il y a donc perte d'une dimension lors de la reproduction. L'utilisation d'un stéréoscope, système binoculaire présentant aux deux yeux deux photographies prises avec deux points de vue et deux angles différents, permet de donner une représentation du relief, mais pas un relief réel dans lequel l'observateur pourrait se déplacer. En effet, s'il tourne la tête, le champ visuel tourne également avec le paysage observé, alors que ce dernier devrait rester fixe dans l'espace ! De plus, l'observateur est dans l'impossibilité de changer de point de vision, et de constater ainsi les déplacements relatifs du premier plan par rapport à l'arrière plan. Le cinéma en "trois dimensions" fait de même, en créant une illusion du relief.

Au contraire, la reproduction d'un enregistrement sonore crée dans la pièce d'écoute un "relief" sonore réel – bien que très limité et orienté dans la seule direction des micros – dans lequel l'auditeur peut se dépla-

cer légèrement, s'approcher quelque peu d'une source, tout en conservant une illusion réaliste. S'il tourne la tête, le champ sonore reste en place. Tant que l'auditeur reste dans une zone d'écoute correspondant à la position et à la direction de capture du champ sonore, l'objet sonore recréé dans sa salle d'écoute est invariant, et par conséquent réaliste. C'est en cela que je considère le disque comme un miroir, qui exige évidemment d'être observé de face ! L'écoute au casque ne permet absolument pas de recréer cet espace sonore indépendant de la position et des mouvements de l'auditeur.

Pour que ce champ sonore puisse être cloné, il importe que toutes ses dimensions soient reproduites. La dimension fréquentielle est la plus évidente, car elle reproduit la hauteur et le timbre de la note entendue. Elle est la plus facile à appréhender, donc à mesurer et à respecter. L'intensité du son est plus difficile à traiter car sa perception ne suit absolument pas une loi linéaire, et est étalée sur une gamme immensément étendue, dans un rapport de 1 million entre le son le plus faible détectable, seuil d'audition 0 dB, et le son le plus fort supportable, seuil de douleur 120 dB. La plupart du temps elle n'est pas respectée lors de la reproduction, qui perd alors une part importante de réalisme, cependant les rapports d'intensité sont correctement transcrits. Enfin la dimension temporelle, qui me paraît la plus importante pour l'obtention du relief, est en général maltraitée par le système de reproduction, en particulier par les haut-parleurs et leurs filtres associés. Comme pour la photographie qui fait perdre une dimension à la perception visuelle, la reproduction des sons sans le respect de cette dimension temporelle donne un objet sonore plat, sans relief. Une image plane au lieu d'un reflet profond...

Le travail du preneur de son est absolument essentiel à une recreation correcte de ce relief. Le sens de la vue, qui est prépondérant dans la perception de l'espace, est actif lors de l'écoute de l'événement réel, mais inopérant lors de la reproduction, qui se passe en aveugle. La perception de la direction de la source sonore, de sa distance, de sa taille n'est plus assistée, corrigée, ré-étalonnée par la vision. La cartographie mentale de l'espace, construite par le déplacement du regard, n'existe plus pour aider au repérage des sources. L'estimation de la distance, lorsqu'elle est basée sur les perceptions sonores seules, par les différences d'intensité entre sources proches et lointaines, est faussée par la décroissance rapide, en $1/d^2$ de l'intensité sonore avec l'éloignement d . La perspective entendue est exagérée, mais rétablie, corrigée par la perspective vue, prédominante. L'orientation du champ de perception dans la direction de vision (cône de présence) est absente dans cette écoute aveugle, et

avec elle l'effet de focalisation des sources sonores frontales, qui les fait émerger d'environ +15 dB du champ diffus, enveloppant, de la réverbération, lorsque l'écoute est assistée de la vision. La localisation des sources est d'autant plus difficile que les sons issus des haut-parleurs arrivent à l'auditeur avec un angle d'incidence invariable, fixé par la disposition des enceintes, de 30 ° environ de chaque côté, contrairement au champ sonore réel, multidirectionnel. Le manque de résolution du système de reproduction entraîne une séparation insuffisante des signaux relevant de l'onde directe et de ceux correspondant au champ diffus, aux réflexions. Ces signaux naturellement décorrélés par leur spatialisation se trouvent noyés lors de la reproduction par manque d'émergence dynamique, dû au local et aux haut-parleurs.

La prise de son doit par conséquent tenir compte de ce handicap, en élargissant la perspective droite/gauche, en l'étalant pour mieux séparer les sources, mais également en diminuant le flou afin de mieux focaliser chacune d'elles, de les rendre plus ponctuelles. La profondeur de la perspective est ramenée à une dimension plausible, comprimée comme elle le serait par la perception visuelle. L'intensité du champ réverbéré est minimisée, comme elle le serait par l'orientation du champ visuel, pour améliorer la netteté en augmentant l'émergence des attaques hors de la masse sonore, et la perte d'énergie qui en découle pour les sons graves est compensée, corrigée par le mixage.

La reproduction de l'événement sonore, perçue sans l'aide de la vision, sans cartographie ni correction spatiale, constitue donc un miroir déformant, qui donnerait une image floue et à la perspective fuyante, si l'enregistrement n'était pas pré-déformé de manière exactement inverse. De même que le peintre cache dans sa toile une image anamorphosée, dont l'apparence normale est retrouvée lorsque je l'observe avec le bon angle ou le miroir adéquat, le preneur de son transpose l'événement sonore dans l'enregistrement, afin que son aspect originel soit rétabli quand j'écoute la reproduction à travers le miroir déformant du système stéréophonique.

Pour qu'un miroir optique fonctionne, il faut de la lumière, l'énergie indispensable à toute transformation, et un observateur, sans lequel la notion d'image est dénuée de sens.

De la même façon, le disque, miroir de l'événement, nécessite la mise en œuvre d'une énergie électro-acoustique, et la présence d'un auditeur.

Malheureusement ce miroir est très imparfait, un peu comme la surface de l'eau, qui reflète le ciel et une partie du paysage. Lorsque l'eau est profonde et parfaitement lisse, la lumière riche et intense, l'air calme et

transparent, alors le paysage et son reflet sont étrangement semblables, comme sur ces photos qu'on ne sait dans quel sens observer.

Quand le reflet des nuages paraît aussi loin sous la surface que les véritables nuages sont hauts dans le ciel, la sensation d'espace est exactement rendue. Quand le reflet des arbres paraît aussi immobile, solide, et élancé que les arbres eux-mêmes, l'impression de matière est surprenante. L'image reflétée exprime-t-elle aussi bien que le paysage réel la beauté naturelle du lieu ? Il m'arrive de penser qu'elle le fait parfois mieux encore, en nous présentant la perspective retournée, les contrastes accentués par la brillance de l'eau, la profondeur du champ de vision augmentée de celle de l'eau. J'ai une vision du lieu que je ne pourrais jamais obtenir sans la présence du reflet. Je n'irai pas jusqu'à dire que je préfère le reflet à la réalité, car je considère qu'il fait partie intégrante de la réalité que j'observe : en effet, cette réalité n'existe qu'au travers des perceptions que je peux en avoir, et ce reflet en est une.

J'ai envie de pousser encore plus loin cette comparaison du disque, reflet sonore, avec le reflet sur l'eau, car l'analogie entre ces deux phénomènes permet de faire ressortir de manière simple les manques et les limitations dans la reproduction sonore. La surface de l'eau, parfaitement immobile par endroit et seulement pendant de brefs instants, correspond au silence absolu, fugitif, incertain, caché entre les sons. Les ondulations, frémissements, vaguelettes couvrant habituellement la surface de l'eau sont comme les bruits de fond de l'enregistrement et de la chaîne de reproduction. Ce sont plus leurs irrégularités, leurs instabilités, que les perturbations elles-mêmes, qui troublent le plus le reflet, qui empêchent de percevoir le silence indispensable à l'illusion d'espace. De même que des clapotis courts et pointus détruisent toute la cohérence de l'image reflétée, des bruits de fond crépitants et scintillants, même imperceptibles, sont plus gênants que de grandes ondulations calmes, qui ne feront que déformer lentement la perspective du reflet, sans altérer l'impression d'espace ni de matière.

Dans ce silence respecté, les notes sont des ronds sur l'eau, comme lorsque je jette un caillou : elles se propagent en s'amenuisant, déformations locales, passagères, du silence, et finissent par disparaître. Si la berge en renvoie une partie, irrégulièrement, les ronds de départ et ceux de retour vont se mélanger jusqu'à la confusion. Il en va de même dans ma salle d'écoute, où les murs renvoient les sons. Et lorsque plusieurs ronds se propagent depuis des points séparés, avec chacun une amplitude stable et bien précise, j'obtiens parfois des figures particulières, à la géométrie aussi exacte

qu'éphémère. Mais il suffit que l'un des ronds n'arrive pas à l'instant précis, avec la force requise, ou bien que des vaguelettes s'en mêlent, pour que la combinaison échoue. Si en faisant ces ronds, par manque de précision, j'éclabousse, j'obtiens alors un clapotis sans aucune qualité. De même dans mon salon, les attaques de notes fortes éclaboussent en saturant brièvement, et si je ne perçois pas cette distorsion en tant que telle, elle trouble pourtant complètement ma perception.

Maintenant, je crois préférable que chacun fasse sa propre expérience, alors si vous en avez l'occasion, amusez-vous comme moi à faire des ronds dans l'eau, assez longtemps pour avoir la chance d'observer des phénomènes intéressants. Avec un bâton dans chaque main et un peu de patience, vous en apprendrez sans doute plus sur la propagation des ondes en général et des sons en particulier que dans des livres de physique indigestes. Vous constaterez surtout combien les sons, comme les ronds sur l'eau, peuvent être fragiles, fugitifs, toujours les mêmes mais jamais rigoureusement identiques. Et en regardant bien, vous pourrez voir entre les vaguelettes, que le miroir silencieux est toujours là, dessous.

C'est un jeu que nous avons tous fait étant enfant, et qui nous a apporté une expérience irremplaçable, un savoir empirique de la mécanique ondulatoire. Le système scolaire est passé là dessus et les études scientifiques ont apporté un savoir rationnel, bardé de modèles mathématiques idéalisés, avec leurs cortèges d'équations, et qui pourront tout prévoir sauf l'essentiel : le résultat sera-t-il beau ?

Et puis vous pourrez également expérimenter différents points d'eau, pour constater que la taille et la profondeur – volume d'eau disponible – doivent respecter un minimum en dessous duquel le jeu perd tout son intérêt : les ronds ont besoin de l'étendue et du calme pour dessiner des rosaces, de même les sons ont besoin de place et de silence pour dessiner des notes.

Avec un peu d'habitude, en revenant souvent au même endroit à différentes heures, à différentes saisons, vous découvrirez que la surface de l'eau est extrêmement changeante et que les ondes qui l'animent n'empêchent pas de percevoir par instants le miroir, toujours là. De la même manière, le silence d'un lieu est tout à fait perceptible entre les sons, et lui aussi est invariant. Il est le révélateur de l'espace du lieu.

La musique est finalement une transformation, une sculpture, éphémère et fugitive du silence.

Deux vers de Lalla Romano pour conclure ce chapitre :

« Les musiques naissent et meurent... seul le silence est vivant ».

3. L'ACTE D'ÉCOUTER

« Percevoir finit par n'être plus qu'une occasion de se souvenir. »

Henri Bergson

Il m'est arrivé plusieurs fois de me trouver en difficulté pour expliquer à de nouveaux amis le sens du terme audiophile. Je crois qu'il sont repartis avec l'idée que je suis une sorte de bricoleur passionné amateur de sonorisation, ce qui me paraît non seulement incomplet mais également réducteur ("Alors tu fais des haut-parleurs en kit ?"). C'est donc le sentiment de ne pas avoir été compris qui m'incite à exposer la philosophie de cette activité ainsi que ses fondements.

Mais pourquoi me prendre la tête, mettre mon intellect à contribution au risque de compliquer les choses les plus évidentes ? Pourquoi conceptualiser, à travers un texte aride, peut-être confus, un acte aussi simple que d'écouter de la musique ? Alors qu'il me serait plus agréable de m'installer dans mon auditorium et de savourer un bon disque.

Je crois que je souhaite partager les expériences profondes et les prises de conscience que cette activité m'a apportées depuis mon plus jeune âge. Pour cela je pourrais vous inviter à une séance d'écoute, ce serait peut-être plus efficace (on n'apprend rien par le discours, mais tout par l'exemple). J'ai déjà tenté l'expérience, et j'ai constaté que des personnes non préparées ne sont pas réceptives à ce que je souhaite leur faire découvrir, car elles n'écoutent que des sons et veulent y découvrir une nouveauté, une qualité qu'elles pensent ne pas connaître, et ne sont généralement pas prêtes à me consacrer l'après-midi entier, à entendre mes explications et à écouter des morceaux choisis.

C'est pour ces raisons que je crois nécessaire de conceptualiser, par écrit, l'acte d'écouter. Globalement, mais aussi sous différents points de vue plus partiels. Je vous rassure : ces concepts intellectuels sont exposés dans un but didactique. Lorsque j'écoute du jazz, je ne conceptualise pas, et comme vous le comprendrez plus loin, l'écoute est pour moi plus une libération de l'esprit qu'une activité intellectuelle. Je vois d'ici un mélomane qui hausse les sourcils : "Pas intellectuelle ? ? ?".

Et bien non ! Et ce n'est pas parce que je suis un audiophile...

Un dictionnaire définit l'audiophile comme "amateur d'électro-acoustique". Quelle ineptie ! Un ébéniste est-il "amateur de rabotage" ? Je préfère une autre définition : amateur de perceptions auditives, intéressé par les sensations qu'elles produisent, à la recherche des émotions qu'elles induisent.

ON NE S'ENTEND PLUS

Comment se fait-il que le mélomane et l'audiophile soient si rarement d'accord ? Surtout lorsque tous deux existent dans un même individu... Car on peut être les deux, mais à priori difficilement au même instant. Ce sera plutôt une sorte d'alternance entre deux modes de pensée, deux sensibilités, deux réceptivités différentes. Lorsque les champs de perception de ces deux spécialistes ne se recouvrent pas, au moins en partie, chacun d'eux reste sur ses positions, étranger aux arguments adverses. Il m'est arrivé de lire, sur un site Internet que je ne citerai pas, un jugement du mélomane sur l'audiophile : "L'audiophile est quelqu'un qui n'a pas compris à quoi servait un système haute-fidélité, et pour qui la musique n'est qu'un prétexte pour vérifier que son matériel fonctionne...".

Je pourrais facilement établir un jugement aussi élogieux dans le sens opposé, mais je m'en garderai bien, étant moi-même à la fois l'un et l'autre. Je trouve très difficile de cerner ce qu'un autre n'a pas compris, encore plus ce qu'il a compris – à sa manière – et si je ne partage ni ses motivations, ni ses arguments, je m'efforce de les respecter.

La querelle ne date pas d'hier. Suffirait-il d'entendre ce que chacun souhaite expliquer de ses pratiques, de ses attentes, de sa sensibilité musicale pour faire apparaître un espace commun, lieu de compréhension et d'acceptation ? Je ne pense pas, je crois plutôt que le mélomane et l'audiophile sont chacun d'un côté d'une même montagne. Chacun contemple la vue qui s'offre à lui, et ils décriront deux paysages fort différents. Ce n'est que lorsque tout deux seront arrivés au sommet, qu'ils seront forcés de constater qu'il n'y a qu'une

seule montagne, et qu'il pourront alors contempler l'ensemble du paysage, dans toute sa variété, dans toute son étendue et dans toute son unité.

La musique et les sons ne font qu'un, ils sont les deux versants d'une unique montagne. Il n'existe qu'un seul et unique phénomène physique capable de produire une stimulation auditive. Notre éducation, dès l'éveil de l'enfant, nous apprend l'objet sonore, par le jeu souvent répété. Puis notre culture apporte ses codes, ses règles, ses apprentissages nécessaires au décodage. Alors le son se fait oublier derrière le message, de la même manière que je ne remarque plus la forme des lettres ou leur association lorsque je lis, car mon attention est dirigée vers le contenu codé.

Pourtant, la poésie n'existe pas sans les lettres qui en forment l'écriture. Forme et contenu sont indissociables. Chaque lettre participe modestement à la beauté du texte. Si j'en trace une, toute seule, avec l'intention d'y mettre un peu de poésie, je suis sûr que vous ne trouverez pas cette lettre innocente...

Les effets subjectifs de la calligraphie, mais aussi de la mise en page, c'est-à-dire plus généralement de la manière dont le texte prend corps et occupe l'espace, sont essentiels dans les impressions laissées au lecteur, au-delà du contenu sémantique. Un son seul peut contenir et résumer toute l'œuvre à venir.

LE SILENCE DES SOMMETS

L'audiophile – débutant – serait un peu comme l'enfant qui sait tout juste lire, s'attardant sur chaque lettre isolément, reconstituant une à une les syllabes, un à un les mots. Pourtant le sens de la phrase ne lui échappe pas, seul le rythme, la souplesse du texte, sa poésie, ne lui sont pas accessibles. Le mélomane est scandalisé que l'on puisse passer à côté d'un contenu si important, qui constitue pour lui la vie véritable de l'œuvre. Il n'a pas pris conscience que lui aussi est passé à côté de choses essentielles à l'expression artistique : en s'attachant au décodage du contenu, il n'a peut-être pas perçu la beauté simple de chaque mot, la rondeur ou l'élan du tracé de chaque lettre, les nuances dans l'épaisseur du trait. Toutes choses évidentes au lecteur hésitant, et qui révèlent l'auteur et son geste aussi clairement que son texte.

Chacun d'eux doit admettre que sa perception est incomplète, et qu'au lieu de nier la justesse de sensation de l'autre, il serait plus enrichissant de découvrir son champ de sensibilité, puis d'apprendre à le partager, afin d'élargir son propre domaine de perception.

C'est en cheminant vers le sommet de cette montagne à deux faces – sons et musique – que petit à petit, j'ai découvert un univers de plus en plus vaste. Tantôt

audiophile, coupeur de décibels en quatre, armé d'appareils de mesure, essayant de gravir la face "jungle" de cette montagne (jungle des concepts scientifiques, du vocabulaire technique, des composants électroniques) tantôt mélomane, avide de culture musicale, lecteur assidu des critiques de disques, essayant de progresser sur l'autre face, rocheuse, où aucun chemin n'est tracé.

Après plus d'un quart de siècle d'ascension, je peux regarder le chemin parcouru, et observer plusieurs niveaux. Un peu comme sur une véritable montagne, où la forêt fait place aux prairies, puis au pierriers et enfin aux glaciers quand l'altitude augmente.

J'ai appelé ces couches "niveaux de densité d'écoute" car elles correspondent à des perceptions de plus en plus profondes, précises, directes, immédiates et libres, de l'expression musicale.

Je crois que chacun peut accéder à ces couches successives, sans qu'il soit pour autant possible d'en sauter une, chacune étant un passage obligé pour arriver à la suivante. Il me semble aussi que le passage à un niveau d'écoute supérieur – plus profond, plus dense – ne peut être que le résultat d'une intention de la part de l'auditeur. Ce qui implique qu'il accepte des sacrifices (temps, disponibilité du local...) et qu'il se procure les moyens matériels afin de donner suite à cette intention. Mais cela demandera également une remise en cause personnelle plus ou moins profonde, une réflexion portant sur l'acte d'écouter, ses mécanismes, ses limitations, ses objectifs. Il s'ensuivra un apprentissage d'une nouvelle façon d'écouter, dans laquelle à la fois la qualité et la quantité d'éléments sonores perçus seront plus importantes. Cette pratique étant acquise, la profondeur d'écoute a progressé d'un niveau.

Dans cette progression, l'obstacle le plus couramment rencontré est évidemment matériel. Il est constitué par le disque, ou le support enregistré. La densité, la profondeur d'écoute possible à la reproduction sera celle définie par le preneur de son, le technicien du mixage, ou d'une manière générale par tous ceux qui interviennent dans la production avec leur propre profondeur d'écoute. Au cours de l'ascension, les bons disques se raréfient.

UN AIR QUE JE CONNAIS

Le niveau UN, à la base, est celui où je perçois les sons comme porteurs d'un message simple, dont le contenu est codé par la dimension mélodique, variation des fréquences au cours du temps (hauteur des notes, harmonie, composition).

Le premier mini-poste de radio venu permet cette prouesse technique devant laquelle plus personne ne s'émerveille aujourd'hui. C'est la profondeur d'écoute du plus grand nombre, qui aime reconnaître sa chanson préférée, celle sur laquelle il a dansé l'été dernier.

Le niveau **DEUX** permet d'accéder à la perception de l'espace sonore, de manière plus ou moins précise. Il est obtenu avec tout système Hi-Fi actuel, à condition qu'il soit correctement mis en œuvre, afin d'établir une répartition des sources sonores virtuelles en largeur et en profondeur devant l'auditeur, si la prise de son respecte cet espace.

Le niveau **TROIS** autorise la perception de la **matière** sonore, c'est-à-dire des différents matériaux, de leur résonance propre, de leur grain, leur dureté, leur souplesse, ainsi que de la taille de la source, de la place qu'elle occupe, de l'énergie qu'elle développe et qu'elle rayonne.

Le niveau **QUATRE** est celui où est senti le **mouvement**, chargé d'intention, cause première de la vibration entendue. À la pointe, au sommet de ce niveau, se situerait la perception de l'intention pure : d'infimes détails, de petits bruits émergeant du silence, révèlent la présence silencieuse de l'artiste qui s'apprête à placer la première note...

Il n'est pas indispensable d'avoir des oreilles d'or pour obtenir une bonne densité d'écoute. Il suffit de bien utiliser celles que la nature nous a données, c'est-à-dire de s'en servir de la manière initialement prévue, autrement dit de revenir à une écoute plus **primaire** (primitive ?) plus **sensuelle**.

Peut-être existe-t-il encore un autre niveau au-dessus de ce dernier ? Je ne l'ai pas encore atteint ni même aperçu.

AVEC QUOI ÉCOUTEZ-VOUS ?

Avec vos oreilles, sans aucun doute. Elles sont en effet les capteurs, les récepteurs premiers de l'information sonore, et à ce titre, je crois nécessaire de rappeler le rôle indispensable que la nature leur a attribué. Pour cela, il me paraît utile de replacer l'auditeur, en tant qu'être vivant, au sein de son milieu naturel, c'est-à-dire à la surface d'une planète dotée d'une atmosphère. Cette mise en situation, qui peut paraître superflue, permet de mettre en évidence la fonction primordiale de l'ouïe : c'est avant tout un capteur de **vibrations**, particulièrement sensible aux transitoires (changements rapides des conditions environnementales). Tout ce que la vue ne peut détecter, soit parce que situé en dehors du champ de vision, soit parce que masqué par l'obscurité ou le camouflage, et qui peut par conséquent présenter un danger potentiel, doit déclencher un état de vigilance, un mécanisme de protection

ou de défense, au minimum un réflexe d'orientation de la tête afin de mettre la source dans le champ visuel et de faciliter ainsi son identification. Ceci est indispensable à la préservation de l'espèce face aux prédateurs ou aux risques naturels.

L'objectif de l'évolution, qui a permis aux espèces primitives de se doter du sens de l'ouïe, était donc de permettre la **localisation** et l'**identification** de ce risque potentiel, par détection puis analyse des vibrations transmises par le milieu ambiant, c'est-à-dire l'air mais aussi le sol ou l'eau et tout ce qui est en contact avec le corps.

Cette fonction est fort différente de l'utilisation actuelle, qui est de communiquer, d'acquérir de l'information grâce à l'audition. En effet, dans l'acte d'écouter la parole, seule la fonction de détection est utilisée, et suivie d'une phase de décodage du langage, mais les fonctions de localisation et surtout d'identification sont inopérantes, tout simplement parce que la vision a apporté une information suffisante.

Dans cette activité d'audition, la concentration est orientée vers la forme entendue – mot, syllabe, note – et l'attention est portée sur le sens, c'est-à-dire sur la reconnaissance de cette forme entendue, par comparaison immédiate avec les formes mémorisées lors de l'acquisition du langage, qu'il soit parlé ou musical. Autrement dit, l'audition devient une activité mentale, analytique, et elle se coupe ainsi de ce qui est du domaine du ressenti. **L'écoute s'intellectualise.**

Il y a eu détournement de la fonction primaire de l'organe. L'intérêt qui se plaçait au départ sur la source, la cause de la vibration sonore, s'est déplacé sur l'effet, le résultat audible de cette vibration. Là où un être réceptif entend les feuilles frémir, un homme du vingt-et-unième siècle reconnaît le bruit du vent dans les arbres. Le premier s'est intéressé à la chose qui vibre (les feuilles) et au mouvement source de vibration, à la **cause** (frémissement) alors que le second ne s'est intéressé qu'à l'**effet** produit (onde sonore) et l'a identifié en le reconnaissant. Pour cela il n'a pas eu besoin de percevoir la présence des arbres, ni de sentir la force du vent. Il lui a suffi de faire appel à une image mentale, un souvenir ancien de ce bruit. Ce souvenir peut être associé à des émotions, des sensations plus ou moins intenses et profondes. Ceci peut laisser croire à l'auditeur qu'il n'est pas coupé de son ressenti.

C'est pourtant un peu le cas, la sensation qui surgit ne faisant pas partie intégrante du présent, du "ici et maintenant". C'est en quelque sorte une sensation parasite, souvent répétitive, qui ne laisse pas l'auditeur libre d'accueillir une sensation nouvelle, car un automatisme associé au stimulus sonore une réponse programmée. Cela s'appelle un ancrage stimulus/réponse.

Il y a dans cet acte de reconnaissance du son une part plus ou moins importante d'**interprétation**, basée sur des suppositions logiques (les feuilles sont supposées être sur des arbres même s'il ne les a pas vus). C'est donc un acte mental, et par conséquent l'auditeur n'est pas en prise directe avec son ressenti. Cet automatisme étant très rapide et la plupart du temps inconscient, cela demande une certaine attention pour, dans un premier temps l'admettre, puis dans un second temps évoluer au-delà pour parvenir à s'en passer.

Il résulte de ce mécanisme d'audition-décodage une pauvreté relative, peu de variété dans l'éventail des sensations ressenties, et surtout uniformisation, standardisation des sensations car différentes stimulations sonores appelleront la même image mentale et feront ressurgir le même ressenti ancien, solidement ancré. L'écoute d'un morceau de violoncelle, quel qu'il soit, doit-elle rendre l'auditeur mélancolique simplement parce que dans son vécu, il y a le souvenir d'un concert où les suites de Bach lui ont procuré cette émotion ?

C'est pourtant comme cela que beaucoup écoutent la musique enregistrée. Notre culture et notre éducation nous ont permis d'acquérir les connaissances et les savoir-faire indispensables au décodage du message musical, tant dans sa signification codée que dans son interprétation par l'instrumentiste. Dans ce cas, nous écoutons avec notre **mental**, en percevant et décodant des sons. L'hémisphère cérébral gauche, où siègent les fonctions de **décodage du langage** est mis à contribution, la reconnaissance des combinaisons étant aidée par la mémoire sémantique. Mais l'attention n'est pas entièrement portée sur ce qui est perçu, dans l'hémisphère cérébral droit, siège de l'attention et des perceptions. Nous ne sommes pas en prise directe avec la cause première de la vibration, nous ne cherchons pas à identifier la source autrement qu'en la reconnaissant par analyse et en la nommant (c'est un piano, un saxo ténor etc.) et nous sommes peu intéressés à la localiser avec précision en taille, position, distance, environnement – écho ou réverbération – de manière objective.

C'est ce qui rend difficile pour beaucoup la comparaison entre différents systèmes de reproduction du son. En effet, la plupart des produits haute-fidélité actuels sont capables de reproduire très correctement les sons, les ondes sonores, c'est-à-dire les **effets** produits par les sources, ceci sur une plage de fréquences et de niveaux très large, dans tout les cas très suffisante pour que les automatismes de décodage et de reconnaissance soient efficaces. L'écoute comparative de deux maillons haute fidélité concurrents aboutira alors à une sensation de différence très faible voire nulle entre les sonorités perçues, ou encore à une petite différence

appréciable des timbres instrumentaux ou des voix mais avec impossibilité de conclure quant à la véracité de l'un ou de l'autre.

Cette écoute relativement superficielle, à laquelle je pourrais attribuer le niveau 1, est malheureusement la seule accessible au plus grand nombre, soit pour de simples raisons technologiques qui font que l'autoradio, le combiné CD-K7 ou la micro-chaîne sont incapables de mieux (haut-parleurs trop petits et proches) soit pour des raisons culturelles, qui entraînent à préférer l'écoute intellectuelle, analytique, à l'écoute sensorielle, plus subjective.

Si le mélomane peut y trouver son compte, et consacrer son budget à l'achat de disques, l'audiophile ne saurait s'en satisfaire.

Accéder à un niveau d'écoute plus profond est pourtant tout à fait possible, sans nécessairement faire usage d'un matériel sophistiqué. C'est plutôt au niveau de l'intention, et de l'implication de l'auditeur dans l'événement sonore qu'il est souhaitable de chercher une possibilité d'évolution. Par "intention" j'entends : ce que l'auditeur est prêt à percevoir, la sensation qu'il accepte d'accueillir, ce qu'il accepte de découvrir, de ressentir, l'attention qu'il est prêt à apporter à la localisation, à l'identification directe des causes, c'est-à-dire des sources sonores. Cette intention devrait être libérée de toute influence culturelle, afin que la présence virtuelle de la source sonore soit **perçue** bien plus qu'imaginée, que l'instrument vibrant soit **senti** plutôt que reconnu.

Afin d'illustrer cela, je prendrai l'exemple du mélomane qui s'installe bien en face des haut-parleurs de sa chaîne Hi-Fi, ferme les yeux, écoute attentivement son morceau de musique préféré. Avec un peu de concentration il parvient à se transporter à travers l'espace-temps sur le lieu du concert ou de la prise de son, il localise les différents pupitres ou bien les participants, il reconnaît sans peine les instruments et peut même identifier la facture pour certains d'entre eux, car sa culture musicale s'étend non seulement aux œuvres, aux compositeurs, aux interprètes mais elle déborde également sur la technique instrumentale, et même sur l'histoire...

Mais notre mélomane est souvent frustré car son plaisir est très facilement perturbé : une personne qui entre dans la pièce, un bruit ambiant, ou tout autre événement qui le ramène dans le présent, le "ici et maintenant" lui fait immédiatement perdre la douce illusion du concert dans laquelle il se délectait...

Il lui faut donc parvenir à s'isoler, dans tous les sens du terme : se trouver entièrement seul d'une part, et à l'abri des stimulations extérieures d'autre part. C'est pourquoi il ferme les yeux, ou les volets, la lumière, et

il insonorise sa maison et en particulier sa pièce d'écoute. Mais malgré tout l'illusion reste fragile, et le ressenti n'est souvent qu'un rappel du passé.

Retenons que dans ce type d'écoute l'auditeur **ferme les yeux** pour se croire ailleurs.

Lorsqu'il va au concert, notre mélomane pourra adopter une démarche auditive différente, car l'identification des sources et leur localisation pourront être effectuées visuellement la plupart du temps. L'attention se portera alors sur les sensations souvent très fortes apportées par la présence réelle des instruments et des interprètes. L'intérêt de l'auditeur est à ce moment porté sur les causes et non sur les effets !

Cet exemple simple permet de faire clairement apparaître les attitudes différentes de l'auditeur face à l'objet sonore, dans deux situations habituelles.

Nous pourrions considérer que ces situations ne diffèrent que par le fait suivant : il y a contact visuel dans un cas et pas dans l'autre, qui nécessite par conséquent de faire appel à des images mentales pour pallier à l'absence de stimulation visuelle.

Une analyse plus complète révèle que l'illusion créée par la reproduction sonore ne procure pas des perceptions auditives aussi entières qu'en direct, au concert. L'image mentale n'est appelée que pour compenser le stimulus auditif incomplet, insatisfaisant, donc dans le seul but de l'enrichir (pour ceux qui manqueraient d'images mentales, il y a le Home-Cinéma).

À mon sens, ce qui manque, dans la reproduction de l'événement sonore, n'est pas du domaine de la forme codée sonore ou musicale mais bien du domaine de l'information contenue et perçue, plus précisément des sensations directes procurées par les sons, sans intervention d'un mécanisme intellectuel. Il s'agit donc bien du pouvoir des sons, de leur aptitude à véhiculer une information entre deux entités, à **rendre compte à distance de la présence, de la constitution, du mouvement d'un corps qui surgit, évolue dans l'environnement** : "là-bas" – localisation dans l'espace – "il y a quelque chose" – identification de la **matière** – "qui bouge" – reconnaissance du **mouvement**. Ainsi, au-delà de ce compte-rendu précis, les sons émis vont renseigner sur l'**intention**. C'est cette intention qui va pouvoir être sentie de manière quasi-immédiate et directe, et c'est cela qui est si difficile à obtenir dans la reproduction sonore.

Une voie simple et directe pour y accéder consiste à suivre le cheminement qui apparaît en gras ci-dessus : percevoir la **distance**, c'est-à-dire l'espace dans lequel se situe l'événement (unité de lieu) puis dans un deuxième temps percevoir la présence de la **matière** qui entre en vibration, sa constitution (qu'est-ce que c'est ?). Dans un troisième temps, percevoir les **mou-**

vements, les gestes (actions) que l'on suppose attachés à une **intention** qui apparaît derrière cette action, et qui correspond à l'expression personnelle de l'interprète.

L'ESPACE SONORE

Ce deuxième niveau d'écoute est bien moins superficiel que le précédent et assez facilement accessible à l'heure actuelle, depuis l'avènement de la stéréophonie. Toutefois, les récents progrès techniques – enregistrements multi-canaux en surround avec 5, 6, ou 7 haut-parleurs – vont parfois plus dans le sens d'un éclatement de l'espace sonore, de sa distorsion ou de sa dilution que vers sa recreation exacte en face de l'auditeur. La multiplication des sources et leur dispersion ne sait rendre compte que de leurs positions respectives, mais en aucun cas de l'espace qui les contient, de l'air qui les sépare. Ce rendu de l'espace tient à la qualité des sources et non à leur quantité... Cela peut convenir aux effets sonores du home-cinéma. La reproduction musicale réaliste demande que l'événement soit perçu frontalement, de même qu'au concert, ou la scène sonore fait face à l'auditeur. C'est sans doute plus la qualité de la salle et celle des haut-parleurs, en particulier leur rapidité de réponse temporelle, que leur nombre qui importe dans la restitution de l'espace.

Le fait de spatialiser le son en multipliant les haut-parleurs apporte une information de localisation de la source sonore, et non une perception de l'espace séparant l'auditeur et la source. Cette sensation de la distance et de l'air silencieux, c'est-à-dire non-générateur de son mais simplement médium passif de propagation, est rendue par le silence relatif qui sépare les sons directs et réfléchis. Ce "silence" est souvent rempli par une masse sonore réverbérée par le local, et par-dessus laquelle les ondes directes et les premières réflexions, indispensables à cette spatialisation, n'émergent pas suffisamment. Les canaux supplémentaires le remplissent encore davantage lorsqu'ils sont utilisés pour des effets spatiaux.

L'accès à ce niveau demande cependant une implication sérieuse de l'auditeur dans l'acte d'écouter, et donc un début d'intention réceptive. Il est indispensable en effet que soient respectés certains principes physiques de diffusion des sons à partir de deux sources en stéréophonie : les positions relatives des sources par rapport aux parois du local, les caractéristiques de ces parois, mais aussi la position de l'auditeur par rapport à ces sources obéissent à des lois incontournables. En particulier, l'espacement des haut-parleurs droit et gauche doit être suffisant (2 m ?) ce qui exclut d'accéder à ce deuxième niveau d'écoute à partir d'un

radio-K7-CD... Par contre la plupart des systèmes Hi-Fi actuels le permettent s'ils sont correctement mis en œuvre dans un local aménagé.

Une écoute comparative dans ce deuxième niveau fait apparaître, lorsque le local d'écoute est suffisamment neutre, des différences assez nettes entre les maillons, en particulier en ce qui concerne les enceintes acoustiques.

Ce niveau 2 est donc plus exigeant quant aux performances du matériel utilisé, mais aussi en ce qui concerne les efforts indispensables de mise en œuvre dans la salle d'écoute.

C'est la fonction de **localisation** de la source sonore qui est mise à contribution dans ce niveau. Cette fonction entraîne un réflexe d'orientation de l'attention dans la direction apparente de la source, ce qui se traduit par des mouvements oculaires automatiques et parfois la rotation de la tête, si le son émerge à plus de 30 ° latéralement, ceci afin de placer la source dans le champ visuel afin d'en faciliter l'identification. D'autre part, cette fonction permet de favoriser le repérage des sons transitoires au milieu d'une masse sonore en créant un cône de présence en face de l'auditeur, c'est-à-dire un espace dans lequel les sources sonores seront perçues avec plus d'acuité, de séparation, par rapport au champ diffus subjectivement atténué d'une quinzaine de décibels. C'est ce mécanisme qui permet de percevoir distinctement la partition d'un soliste en avant de la masse orchestrale.

Ce réflexe, qualifié d'archaïque car venu du fond des âges et non contrôlable, a l'énorme avantage de ne faire appel à aucun processus intellectuel conscient ou non. Il met donc l'auditeur en relation directe avec l'espace sonore, qu'il soit réel – le concert – ou bien virtuel – la reproduction – sans correction ou interprétation à l'aide de modèles culturels.

L'écoute au niveau 2 est donc un peu plus **sensorielle** qu'intellectuelle, plus **subjective** qu'analytique.

L'obstacle le plus gênant, et de très loin, est constitué par la salle d'écoute, qui substitue son propre espace sonore à celui de l'enregistrement. Le champ diffus, réverbéré par les parois du local, masque presque totalement par son niveau élevé et son **omniprésence temporelle** les informations d'espace du lieu de la prise de son. Le chapitre 5 « Approche globale du système », page 40, met ce problème en évidence.

Ici, les points de vue du mélomane, intéressé par la disposition, l'étalement et l'aération de la scène sonore, et de l'audiophile, attentif à la localisation précise de chaque source dans cette scène, et à sa taille apparente, commencent à se rejoindre, dans la perception de l'événement sonore.

LA MATIÈRE SONORE

Parvenir à percevoir la matière sonore, c'est tout simplement considérer le son comme aboutissement, manifestation finale, effet ultime et **fugitif** autant qu'**approximatif** d'une cause située au-delà, et par conséquent ne pas attacher une importance énorme au strict respect de sa forme, sachant que celle-ci dépend plus des conditions de diffusion et de réception à l'instant présent que de la source elle-même. Un piano (source) ne sonnera pas de manière identique dans toutes les salles, ou selon qu'il est seul ou accompagné, ou selon la position de l'auditeur. Pourtant la cause est toujours la même : vibration d'une corde frappée. Il est donc possible d'accepter différentes formes sonores, parfois assez distordues, dès l'instant que la cause invariante est reproduite de manière évidente, immédiate.

Considérer le son comme aboutissement, pour aller au-delà, à la recherche du "qu'est ce qui vibre" c'est rechercher la matière sonore, c'est sentir qu'un piano est constitué de 400 kg de bois dur verni, qui vibrent harmonieusement. C'est percevoir la présence virtuelle, dans un espace proche, des cordes en métal tendues à l'extrême, frappées avec fermeté.

Cette attitude d'écoute, attentive à la présence de matière sonore, est beaucoup plus directe, intuitive que l'écoute intellectuelle. Je la situerais au niveau 3 dans mon échelle de densité d'écoute. Elle fait appel à la fonction d'**identification** de la cause, qui permet de reconnaître avec une certitude immédiate le ou les éléments mis en jeu : c'est un bruit d'eau qui coule, le son de deux bouts de bois frappés, un pas sur des feuilles mortes...

Non seulement le matériau est discerné, mais au-delà, la masse, les dimensions et l'énergie diffusée par la source sont clairement perçues. L'oreille ne nous trompe pas, ni sur la taille de la source de vibration ni sur sa force : petite proie ou gros prédateur ? L'identification doit être immédiate, exacte.

C'est ce qui fait que je reconnais aisément, en passant devant une maison dont une fenêtre est entr'ouverte, si on joue d'un véritable piano, ou si l'on écoute un disque : dans le premier cas, je sens vibrer plusieurs centaines de kilos de bois verni, de métal rigide, avec une énergie considérable à la frappe de chaque corde, même si le volume sonore reste modéré. Dans le second cas, le résultat est très loin du compte... Comment en serait-il autrement lorsque l'enceinte acoustique pèse 2 kg, mesure 25 cm et développe une énergie mécanique ridiculement faible, de l'ordre de quelques dizaines de milliwatts (alors qu'elle reçoit

une puissance électrique pouvant atteindre plusieurs dizaines de Watts !) Ces valeurs peu flatteuses sont passées sous silence par les industriels...

Admettre ce fait amène à comprendre pourquoi l'audiophile donne souvent dans le gigantisme, avec des enceintes jugées massives et volumineuses, pourtant bien acceptées dans les années 50/60. Depuis, la mode de la miniaturisation est passée par-là !

Cette perception de la matière sonore semble quasi-immédiate, pourtant il y a bien un processus intellectuel inconscient lors de la reconnaissance du matériau, faisant appel à une multitude de formes sonores mémorisées. En effet, dès avant sa naissance l'enfant perçoit des sons et mémorise des sensations associées. Ensuite les jeux et découvertes continuent ce travail d'association et de mémorisation, en mettant à contribution l'ensemble des sens. En particulier les informations visuelles et tactiles, puis kinesthésiques de l'objet manipulé, sont associées intimement aux perceptions sonores recueillies lors de sa manipulation dans le jeu, par des chocs, des frottements, des chutes sur différents supports. Une immense bibliothèque, ou plutôt mémothèque sonore est ainsi constituée, dont l'accès est presque instantané.

Ce processus de reconnaissance ne devrait donc pas faire appel à l'interprétation, aux suppositions, afin d'être le plus simple et direct possible. L'accès à ce niveau n'est pas si facile car notre culture nous a donné tellement d'éléments de décodage qu'il est presque impossible d'en faire abstraction. Un moyen simple consiste à écouter des musiques issues de cultures différentes de la notre, exécutées sur des instruments inhabituels, par exemple des percussions orientales ou encore des instruments à cordes exotiques. Cela empêchera la reconnaissance de la forme par un automatisme ancré, et permettra par conséquent un éventuel accès à la matière sonore : si je reconnais le métal d'une corde, même d'un instrument inconnu, la peau d'un tambourin, le bois d'une flûte, que je peux indiquer leur position précise et situer les limites de l'espace qui les contient, alors je perçois la matière sonore. Parfois je peux même sentir l'air vibrer à l'embouchure de l'instrument.

Ce troisième niveau d'écoute est extrêmement exigeant quant aux performances du matériel utilisé, en particulier la rapidité de réponse des haut-parleurs doit être exceptionnelle afin de rendre exactement les différents grains de matière sonore, des plus épais aux plus fins, des plus denses aux plus légers, des plus rugueux aux plus lisses.

Cette rapidité de réponse ne peut être perçue que si le local lui-même présente une réponse temporelle très brève, c'est-à-dire une faible réverbération.

Lorsque le système de reproduction le permet, l'accès à ce niveau d'écoute procure une jubilation, un plaisir direct assez rare. Ici, notre mélomane, au lieu de fermer les yeux va les ouvrir, et chercher du regard la **présence** des interprètes, en étant à chaque fois étonné de ne pas les trouver !

L'écoute dans ce niveau est incontestablement plus **sensuelle**, et elle demande un entraînement permettant de se libérer de l'intellect pour laisser place complètement au sensoriel. Le passage du niveau 2 au niveau 3 me semble le plus laborieux.

Ici les points de vue du mélomane et de l'audiophile sont assez proches, tous deux étant sensibles à la variété des textures et à la facture de chaque instrument.

LE MOUVEMENT ET L'INTENTION

Un quatrième niveau est atteint lorsque, encore un pas au-delà, est senti "le mouvement" à l'origine de cette vibration, et "l'intention qui s'y rattache". Ce niveau est le plus difficile à cerner car il concerne des nuances très fines, des variations subtiles, voulues par le compositeur et restituées par la technique de l'interprète.

Il me semble que la clé de l'accès à ce niveau est tout simplement le respect du silence : cette sensation qu'après que la corde soit frappée, après avoir perçu la matière sonore et l'espace qui m'en sépare, je sens la présence de l'atmosphère, de l'air qui continue à vibrer dans l'espace sonore, et qui redevient silencieux entre deux notes.

Cette aération des sons leur apporte la légèreté indispensable à la perception de ces nuances, révélatrices du geste.

Dans ce "silence meublé" la présence de l'instrumentiste devient palpable même lorsqu'il ne joue pas, grâce à une multitude de petits bruits légers et discrets (froissements de tissu, respiration) alors je peux sentir que l'artiste est présent, et percevoir sa préparation, son **intention** de placer une note (et d'y mettre son expression) et qu'il prend son souffle juste avant qu'il ne s'exécute.

La dynamique du système, en particulier les variations rapides de niveau des formants sonores lors des attaques de notes, départs des gestes, sont essentiels à la perception du mouvement, mais facilement masqués par la masse sonore du champ réverbéré dans la salle d'écoute.

La sensation d'être parfaitement réceptif ici et maintenant à l'expression – extériorisation, communication – de l'artiste n'est pas un acte intellectuel gouverné par un ancrage ou un apprentissage, c'est une **sensation profonde et puissante**.

Aussi difficile à créer artificiellement avec un système de reproduction qu'elle est facile à trouver au concert. Ici il n'y a plus de mélomane ni d'audiophile mais seulement un **homme qui entend**.

LE SON VECTEUR D'ÉMOTION

C'est parce que chacun de nous a sa façon très personnelle d'écouter un enregistrement, avec parfois des changements rapides, inconscients et incessants du niveau de profondeur d'écoute – passant allègrement de l'audition de la phrase mélodique, niveau 1, à la perception du geste, extériorisation de l'artiste, niveau 4 – qu'il est difficile de tirer des généralités sur telle ou telle technologie de reproduction sonore (lampes ou transistors ?) ou sur tel ou tel maillon, tel type de câbles. Les différences ne se situent pas forcément dans un niveau d'écoute accessible par tous les auditeurs, soit parce que leur matériel, en particulier leur local, ne leur permet pas un accès à ce niveau, soit parce que leur sensibilité n'est pas éveillée à ce niveau, et qu'ils n'ont alors même pas idée de l'existence, de la possibilité de ces niveaux inconnus.

Mettre en œuvre un matériel coûteux, encombrant, lourd ne suffit pas à ouvrir l'accès à ces différents niveaux : une indispensable harmonie doit exister entre les maillons, y compris le local, l'auditeur et le disque, afin d'apporter une cohésion à l'ensemble.

Mais une fois la clé trouvée, les chiffres, les techniques n'ont plus autant d'importance, car les performances **mesurables** ne traitent que des caractéristiques acces-

sibles au **premier** niveau. En effet, aucun appareil de mesure ne permet de chiffrer la perception de l'espace sonore, bien que celui-ci n'ait rien de virtuel, pas plus celle de matière sonore, plus subjective, ou de mouvement, complètement abstraite.

C'est pourquoi les audiophiles qui utilisent des lampes, des haut-parleurs à pavillons, très sensibles mais pleins de défauts mesurables, et qui choisissent les composants à l'oreille (!) sont en désaccord avec le marché, et l'industrie audio en général. L'audiophile n'écoute pas de la même manière, ne perçoit pas les mêmes choses, est attentif à un autre contenu dans le message sonore, car sa manière d'écouter est beaucoup plus profonde.

Cette réceptivité est un état actif et conscient, et non passif, qui amène à sentir ses émotions au lieu de les penser.

Elle ouvre la voie à la réception de sensations plus directes, plus authentiques, plus profondes, et permet de trouver dans l'activité d'écoute un plaisir sans cesse renouvelé, ainsi qu'une grande curiosité à découvrir de nouvelles formes sonores, en libérant l'auditeur des conventions d'esthétique musicale.

Des relations plus ou moins précises entre, d'une part les perceptions subjectives d'espace sonore, de matière sonore et de mouvement, et d'autre part les grandeurs physiques mesurables décrivant le phénomène sonore que sont l'intensité, la fréquence et le temps, seront établies au chapitre 5 « Approche globale du système », page 40.

4. CROIRE SES OREILLES

« La connaissance d'un homme ne peut aller au-delà de son expérience. »

John Locke

Comme tout apprentissage, celui de l'écoute ne peut commencer qu'une fois la non-connaissance admise, la méconnaissance reconnue. Aux personnes qui s'inquiètent de ne pas entendre la même chose que moi, qui pensent être incapables de discerner les sonorités de deux appareils différents, de percevoir l'espace ou la matière sonore, je fais faire un exercice très simple : les yeux fermés, il s'agit d'énumérer tout ce qui est entendu, pendant deux minutes. Répéter cet exercice à l'extérieur, dans un lieu calme, autant que possible.

Les réponses recueillies montrent que le champ de conscience de l'environnement sonore est souvent réduit. D'un point de vue spatial, ce champ s'étend, dans un espace intérieur tel qu'une pièce d'habitation, entre environ 0,5 m et 5 m, dans une zone limitée par deux lignes fictives à peu près circulaires, autour de nous. C'est-à-dire qu'en l'absence d'événement sonore surgissant hors de cet espace, nous filtrons automatiquement, inconsciemment, toutes les perceptions issues de sources très proches ou trop éloignées.

Les sons qui me sont propres, constants, tels que ma respiration, le froissement de mes vêtements, un léger frottement de ma main sur la table, sont ignorés. Le simple fait de lire cette phrase vous a-t-il fait prendre conscience de ces sons proches ? Les seuls sons issus de sources très proches qui sont cités correspondent à des événements qui émergent, qui perturbent la continuité, tels que les sons émis par le corps (toux, geste rapide).

De même, les sons lointains mais invariants sont eux aussi filtrés, et seules les perturbations sont relevées. La rumeur de la route distante est ignorée mais pas le coup de klaxon qui s'y est produit. À une plus courte distance, le faible ronronnement d'un réfrigérateur est oublié mais pas la vibration entendue lorsqu'il s'arrête. Notre oreille détecte ce qui change dans l'environnement extérieur proche, le reste des perceptions est tenu hors du champ de conscience, immédiatement, parce que non vital. Curieusement, il

semblerait que les sons venant de sources situées en haut ou en bas par rapport à l'auditeur soient moins filtrés, sans doute parce que moins habituels.

En extérieur, ce champ de perceptions auditives est un peu plus large, il me semble qu'il s'étend approximativement entre 0,5 m et 20 m, 50 m pour certaines personnes, et qu'il prend une forme de coupole.

Nos habitudes de vie en société, dans le travail quotidien, dans les transports, et même à la maison, ont fini par privilégier cette zone de l'espace, dans laquelle se situe l'éventuel interlocuteur, l'appareil que nous utilisons – ordinateur, téléviseur etc. – ou encore le danger potentiel.

Du point de vue de l'intensité sonore, le champ de conscience des perceptions est également réduit, et seuls les sons émergeant brusquement du bruit de fond sont nommés. Ce phénomène est surtout sensible en extérieur, par exemple en forêt, où les bruits de fond sont nombreux mais plutôt stables. Le chant des oiseaux est cité en premier car il émerge très nettement au-dessus du bruit de fond, avec une intensité sonore étonnamment élevée, pouvant dépasser 100 dB en crêtes à 1 m. Puis vient ensuite le bruit des pas. Par contre, le bruissement des arbres dans le vent n'est perçu qu'à partir d'une intensité non négligeable, nettement supérieure au seuil d'audition. Le bruit de fond du lieu, sorte de rumeur sourde, n'est pratiquement jamais cité, et il est nécessaire de s'éloigner de quelques centaines de mètres, jusqu'à un lieu où cette rumeur est différente, pour qu'elle soit enfin perçue, par comparaison quasi-immédiate avec le lieu précédent. Un retour sur ce premier lieu permet alors de prendre conscience de l'existence de cet élément important de notre environnement sonore.

Par exemple, entre le fond du vallon, boisé et abrité du vent, et le sommet de la colline, plus dégagé, il existe une grande différence d'ambiance sonore. Avec un peu d'habitude, il est facile de sentir que le vallon est un espace plus fermé, dans lequel un cri ou un bruit sec, violent, va se réverbérer, résonner, s'enfler légèrement et brièvement, amorti par l'épaisseur des arbres.

Le vent lui-même va produire des résonances douces et graves dans cet espace. Par contre, sur le sommet, l'espace est perçu comme beaucoup plus ouvert, il ne présente pratiquement pas de résonance, ni de réverbération, et le vent produit un son plus vif et léger.

À chaque fois que cette prise de conscience a eu lieu, il y a eu élargissement du champ de perceptions sonores, à la fois dans l'espace, vers les sons proches ou lointains, et dans l'intensité, vers les sons stables de faible niveau. Une fois le champ élargi, il reste ouvert aussi longtemps que l'habitude ne lui fait pas reprendre ses dimensions quotidiennes. Si vous pratiquez régulièrement la promenade ou d'autres activités en forêt, il est probable que votre perception soit déjà assez large, parce que c'est une chose naturelle.

Par contre, la vie citadine et sédentaire réduit petit à petit votre champ de perception. L'activité mentale, qui occupe une grande partie du champ de conscience, laisse peu de place libre pour les perceptions. La priorité étant donnée au champ visuel, les perceptions sonores sont reléguées au second plan, la conscience de l'environnement acoustique est ponctuelle, portée sur le son émergeant dans l'instant, et l'attention se porte de point en point, suivant les apparitions d'événements sonores.

Un effort de concentration particulier est nécessaire pour amener à la conscience la sensation de l'espace qui englobe les différentes sources, les contient et les relie, et dans lequel se développe l'évolution temporelle des sons. C'est seulement quand l'activité mentale diminue ou cesse que le son perçu est remis en situation dans l'espace-temps. Il est alors possible de percevoir simultanément mais séparément une grande variété de sons, chacune des sources étant distincte, tant dans sa position et son déplacement, que dans son évolution dynamique et temporelle.

Quelques exercices simples permettent cependant de se "déboucher les oreilles" :

EXERCICE 1

- Le premier exercice permet d'ouvrir le champ de perception sonore. Il demande environ 5 à 10 minutes et peut être effectué tous les jours dans votre jardin ou même sur le balcon faute de mieux. Il est possible qu'il ne vous apporte rien au début, soit parce que votre champ de perception est déjà développé, ou au contraire parce qu'il est "verrouillé".
- Dans la forêt ou dans un grand parc, de préférence tôt le matin à une heure où vous ne risquez pas de rencontrer des passants, choisissez un endroit propice, par exemple une clairière. Il est impératif que cet endroit soit silencieux, assez éloigné d'une route fréquentée, d'une usine, d'une gare etc.

- Debout, pieds légèrement écartés, yeux fermés, faire quelques respirations profondes et lentes, par la bouche.
- Sentir le contact des pieds sur le sol, apprécier sa souplesse, sa rugosité, sa planéité. Il n'est pas nécessaire d'être pieds nus.
- Toujours les yeux fermés, prendre conscience des bruits émergents : chants d'oiseaux par exemple.
- Puis avec quelques respirations profondes, s'intérioriser le plus complètement possible, jusqu'à avoir une sensation complète de son corps. Poser les mains sur le ventre.
- Sentir l'activité corporelle et les bruits intérieurs qui s'y rattachent : respiration, battement du pouls, mouvements à peine perceptibles nécessaires à l'équilibre.
- L'attention va d'abord se porter sur le bruit de la respiration (le souffle au niveau des narines) dont la perception devrait être conservée tout au long de l'exercice.
- Laisser l'attention descendre lentement jusque dans les pieds, dans le contact avec le sol, la surface de la planète, tout en conservant la perception du souffle.
- Sentir la présence, la continuité du sol, en déplaçant lentement l'attention, en partant des pieds et en la portant jusqu'à un arbre assez proche. Il n'est pas nécessaire d'ouvrir les yeux, car vous avez conscience de la présence de cet arbre et du sol qui vous relie. Le souffle est toujours perçu.
- Laisser l'attention monter lentement le long du tronc, puis dans les branches.
- Sentir la présence de l'arbre, des habitants de l'arbre, oiseaux ou autres, par leur bruits, leur chants.
- Porter l'attention sur la source du son, en essayant de la localiser le plus précisément possible. Le souffle est toujours perçu, et par conséquent l'espace qui vous sépare de la source sonore.
- Sentir la multitude des feuilles de l'arbre, par leur bruissement, leur frémissement, plus ou moins intense selon la force du vent, ainsi que le mouvement des branches si le vent est fort.
- Laisser votre attention monter au-dessus de l'arbre, dans l'atmosphère, et sentir l'ouverture que cela produit dans l'espace sonore.
- Sentir cet espace immense au-dessus de la forêt, et la rumeur très faible qui le remplit. Cette rumeur est faite d'une somme de bruits très lointains, de ville ou village, de route, de courants d'air dans les ramures. Elle est perceptible par courts intervalles,

dans les pauses de la respiration, dans les haltes du vent. Un bruit continu tel qu'un ronronnement de moteur même lointain empêche de la percevoir.

- Recommencer cet exercice en un autre lieu pas trop éloigné du précédent, une centaine de mètre en marchant lentement suffiront.
- La perception de la rumeur sera sans doute différente en ce nouveau lieu, ce qui aidera à en prendre conscience.
- Il n'y a aucune contre indication ni effet secondaire, il est donc possible de recommencer cet exercice très souvent jusqu'à ce que le champ de perception soit grand ouvert, en distance et en intensité.
- Lorsque c'est le cas, il est possible de percevoir simultanément mais séparément des sons internes faibles, des sons extérieurs forts, et un bruit de fond presque imperceptible. Par exemple ma respiration, le chant des oiseaux, et la rumeur ambiante, sorte de silence imparfait entre les sons.
- Il n'y a rien à réussir dans cet exercice, seule l'intention compte.

Cet exercice apparemment très facile peut poser pourtant des difficultés. L'attention doit se porter sur l'espace environnant, sur les entités présentes, arbres, rochers etc. et sur les sources sonores qui s'y trouvent. Autrement dit la conscience doit "s'extérioriser" ou plutôt s'étendre, depuis l'intérieur du corps jusqu'à son environnement, sans se fixer longuement en un point précis de l'espace. Si ce cas se présente, il est possible d'étendre, à partir de ce point de fixation – qui est en général une source sonore particulière, un oiseau par exemple – la conscience de l'espace, en commençant par sentir la distance qui m'en sépare, puis nos deux présences sonores simultanées dans cet espace qui nous sépare et nous contient, puis enfin sur l'entière-été de l'espace environnant. Le chemin d'extériorisation passe par le seul contact physique avec cet environnement, qui est le contact des pieds sur le sol, et dont la conscience, ainsi que celle du souffle, ne devrait pas être perdue au cours de cet exercice. Un chemin plus direct passant par le contact de la peau avec l'air est sans doute possible, je ne l'ai pas expérimenté.

L'important est de centrer son intérêt sur la cause distante des vibrations sonores, et non sur la perception, au niveau de l'oreille. Le fait de fermer les yeux facilite cette ouverture de la conscience auditive.

EXERCICE 2

Le deuxième exercice, plus difficile, permet une expérience directe de l'espace sonore et de la matière sonore, c'est-à-dire qu'il amène à un "contact auditif"

direct avec les sources sonores. Il est recommandé de le pratiquer avec une autre personne, qui devra rester aussi silencieuse que possible :

- La première partie permet de sentir l'espace sonore :
 - Dans la forêt ou dans un grand parc, de préférence tôt le matin à une heure où vous ne risquez pas de rencontrer des passants, choisissez un endroit propice, de préférence un chemin. Il n'est pas indispensable que l'endroit soit silencieux.
 - Demander à votre ami de vous bander les yeux, avec un foulard par exemple.
 - Debout, pieds légèrement écartés, yeux fermés, faire quelques respirations profondes et lentes, par la bouche.
 - Sentir le contact des pieds sur le sol, apprécier sa souplesse, sa rugosité, sa planéité. Il n'est pas nécessaire d'être pieds nus.
 - Demander à votre ami de vous donner la main et de vous guider sur le chemin.
 - Marcher lentement, pas à pas dans la direction qui vous paraît convenable. L'autre personne est là pour vous éviter de trébucher.
 - Votre attention se portera automatiquement sur le contact de vos pieds avec le sol de la planète, parce que c'est indispensable à votre équilibre en l'absence de vision.
 - Elle se portera également de manière automatique sur vos perceptions sonores, parce que c'est indispensable à votre déplacement dans l'espace qui vous entoure, en l'absence de vision.
 - Au bout de quelques dizaines de mètres, il est en général obtenu une conscience très aigüe de l'environnement sonore. Pour certaines personnes, la présence ou l'absence d'arbres est parfaitement perceptible même en l'absence de vent.
 - Si vous pouvez vous déplacer sur quelques centaines de mètres, vous pourrez peut-être sentir si vous vous trouvez dans un vallon ou une futaie, espace fermé, ou bien dans une clairière ou encore sur un sommet, espace ouvert.
 - Si la bordure du chemin change, passant d'un rideau d'arbre à une clairière, l'ouverture de l'espace, parfois d'un seul côté, est clairement perceptible. Si le chemin débouche dans des champs ou des prairies, le changement d'ambiance sonore est facilement perçu.
- La suite de l'exercice permet un contact avec la matière sonore :
 - En portant votre attention sur les bruits de votre marche, aussi bien ceux de vos pas sur la terre, les brindilles, les cailloux, que ceux de vos mouve-

ments, de vos vêtements, apprécier la cohérence qui existe entre les sensations kinesthésiques ou tactiles et les perceptions sonores.

- Porter l'attention à chaque pas sur le bruit émis, craquement de brindille, crissement de gravier, et accueillir l'information que ce bruit apporte sur la taille, la dureté, la résistance, le mouvement de ces éléments sous les pieds.
- Porter l'attention à chaque pas sur les sensations transmises par le contact des pieds avec le sol, et accueillir les informations apportées.
- Sentir l'étroite relation et la cohérence qui existe entre cette information apportée par les sons et les informations kinesthésiques (mouvements) ou tactiles (contact) transmises par la plante des pieds.
- Si nécessaire, verbaliser les sensations, en décrivant à l'accompagnateur l'image mentale de l'objet, ou du sol sous les pieds, obtenue à la fois par le son et le toucher.

Pendant cet exercice, l'attention doit se porter sur la matière des sources sonores avec lesquelles il y a contact, et non sur les sources distantes, car il s'agit de mettre en relation la sensation auditive avec une autre sensation, apportée par le mouvement et le contact physique, et qui renseigne précisément sur la matière. Au besoin, l'objet sonore sur lequel le pied s'est posé est ramassé avec l'aide de l'accompagnateur et palpé, soupesé, afin de percevoir sa masse, sa dureté, sa forme, avant d'être lâché, et non posé, dans le but d'entendre sa chute.

Avec un entraînement suffisant, il est possible de réaliser cet exercice seul, sans donner la main à l'accompagnateur. Cependant sa présence reste indispensable pour des raisons de sécurité. La marche en aveugle, pratiquée régulièrement, permet d'acquérir une sensibilité auditive très développée, apportant une sensation beaucoup plus immédiate de l'espace et de la matière sonore. Cependant elle n'améliore pas l'acuité auditive, car son action n'est pas physiologique, elle agit seulement sur le champ de conscience, c'est-à-dire sur le filtrage des perceptions sonores.

C'est grâce à ce phénomène que les personnes non-voyantes parviennent à compenser leur déficit sensoriel, et à recréer une perception totale de l'espace, jusqu'à une conscience aiguë des obstacles tels que murs ou portes, avec lesquels une collision est évitée.

EXERCICE 3

- Le troisième exercice a pour but d'identifier à distance la matière sonore et le mouvement. Il demande quelques accessoires préparés en secret

par un accompagnateur. Il est important que ces accessoires restent absolument inconnus avant l'exercice.

- Dans les mêmes conditions que les exercices précédents, yeux bandés et après quelques instants de relaxation.
- L'accompagnateur produit un son à l'aide d'un objet de son choix, qu'il a apporté ou qu'il a trouvé sur place.
- Indiquer de la main la direction précise d'où semble venir le son.
- Indiquer oralement la distance apparente.
- L'accompagnateur répond oralement pour préciser l'exactitude des réponses, la voix humaine étant plus facile à localiser en direction et distance qu'un son inconnu.
- Indiquer le type de matière utilisée : bois, métal, pierre, tissu etc.
- Indiquer la taille de l'objet sonore, en donnant des éléments de comparaison : caillou de la taille du poing, baguette de bois grosse comme le doigt etc. Ainsi que sa masse approximative.
- Indiquer le mouvement qui est à l'origine du phénomène sonore : frottement, souffle, choc, grattement, secousse etc. En précisant sa vitesse, sa régularité, ses variations les plus infimes.
- Préciser un qualificatif qui décrit l'intention ressentie derrière ce mouvement : doux, léger, violent, sec, fuyant, glissant, hésitant, lourd, libérateur etc. Ainsi que l'énergie rayonnée par ce geste sonore.
- L'accompagnateur essaiera de varier la distance, la force, la nature des matériaux, afin d'élargir l'éventail des perceptions.
- Il peut également générer des sons à l'aide de son propre corps, en effectuant des gestes, des actions, des déplacements, que l'auditeur devra repérer et identifier en les nommant, et en les qualifiant.

Cet exercice peut être extrêmement déroutant au début, ce qui montre combien la vue est prépondérante dans l'identification. Cependant, les matériaux naturels, réagissant à des mouvements qui leur sont habituels, sont facilement identifiés. Deux branches de bois mort qui s'entrechoquent légèrement, un caillou qui tombe ou de l'eau qui coule ne doivent pas poser de problème.

De même les mouvements d'un être vivant sont assez facilement identifiés, en particulier les activités manuelles, mais aussi les déplacements de l'ensemble du corps ou les changements de position, accroupi, assis etc.

Vous serez peut-être le premier étonné de la quantité de renseignements qu'il est possible de donner sur la source d'un son, autant que surpris de l'incapacité à nommer ni matière, ni mouvement pour des sons parfois très simples.

Après une matinée en forêt passée à jouer avec ces quelques exercices (n'hésitez pas à en inventer d'autres) les perceptions auditives montrent en général une évolution positive : l'ambiance sonore, l'environnement acoustique des lieux ne sont plus "filtrés", masqués comme auparavant.

Cela présente tout d'abord l'inconvénient de rendre plus gênantes les diverses nuisances sonores, celles que nous sommes habitués à "oublier" car faisant partie du quotidien : les brouhahas habituels se mettent à perturber notre conversation !

En revanche l'écoute de musique enregistrée, avec un équipement ordinaire, laisse dès les premières secondes une impression peu naturelle. Les défauts de restitution qui sautent aux oreilles concernent en pre-

mier lieu l'espace sonore, qui manque énormément d'aération, de profondeur, et qui semble rempli d'un silence opaque, épais, sorte de pâte sonore peu transparente.

Le réalisme de la matière sonore semble également peu convaincant, et les sons apparaissent comme synthétiques. Quant au mouvement, son absence est indéniable...

Les différences de rendu entre deux appareils, en particulier les enceintes acoustiques, deviennent flagrantes maintenant que l'attention auditive est orientée sur ces critères d'espace, de matière et de mouvement.

Lorsque l'oreille, et avec elle le sens de l'ouïe, a retrouvé sa fonction première (localiser-identifier) et les qualités qui en découlent, l'audition devient sensuelle (liée au sens) et non plus intellectuelle, et les sensations perçues deviennent aisément qualifiables de réaliste ou non, au-delà de toute considération esthétique ou artistique.

5. APPROCHE GLOBALE DU SYSTÈME

« Tous crient à la vérité, mais peu savent y jouer. »

Georges Berkeley

La littérature scientifique et technique est abondante sur les sujets qui passionnent les audiophiles. De nombreux ouvrages traitent des différents types de haut-parleurs, ou des enceintes acoustiques. D'autres encore, sans doute plus nombreux, décrivent les circuits électroniques, qu'ils soient à tubes ou à transistors. Des revues spécialisées présentent des appareils, des disques, des accessoires, ou encore de nouveaux composants, des méthodes de conception. Mais curieusement, il existe à ma connaissance peu d'ouvrage dans lesquels le système de reproduction sonore est abordé dans sa globalité, avec pour objectif d'en faire apparaître la fonction d'usage, la matière d'œuvre, les énergies mises en œuvre, les échanges qui interviennent, et surtout les limitations.

Chaque maillon fait l'objet d'études distinctes, dans lesquelles il est systématiquement isolé du reste du système, lequel est considéré comme idéal. Par exemple, pour étudier les défauts de linéarité de réponse d'une enceinte acoustique, il est d'usage d'effectuer des mesures sur cette enceinte dans une chambre sourde, et de mettre en œuvre des solutions technologiques afin d'obtenir une réponse optimale dans ces conditions. Pourtant, à aucun moment l'enceinte ne sera appelée à fonctionner, en situation réelle, dans une chambre sourde. Cette pratique de mesure hors contexte, qui peut aider à mettre en évidence certains phénomènes indiscernables en salle réverbérante, comme l'existence de lobes de diffusion pour certains haut-parleurs, ne devrait jamais être considérée comme un outil de validation des performances du produit. Il ne s'agit que d'un moyen d'investigation. De la même manière, l'étude des circuits d'amplification est établie en considérant la charge que représente les haut-parleurs comme constante, c'est à dire invariable avec la fréquence ou le niveau du signal, et non-réactive. Les mesures indiquées dans les notices sont d'ailleurs réalisées dans ces conditions idéales de

charge. Les mêmes circuits d'amplification sont également étudiés, et souvent représentés, indépendamment de leur circuit d'alimentation en énergie, ce qui entraîne de grossières erreurs, comme oublier que cette alimentation est branchée en série avec les circuits de sortie de l'amplificateur et que par conséquent ses caractéristiques vont s'ajouter à celles de ces circuits.

L'approche globale permet de remettre les divers éléments du système chacun à sa juste place, et de faire apparaître clairement et complètement les interactions qui existent au sein de ce système et qui en définissent les performances, et surtout les limitations, bien plus que les caractéristiques séparées de chacun des maillons.

Pour mener cette analyse globale, j'ai choisi un outil couramment utilisé lors de la conception de produits industriels. Cette méthode graphique, reposant sur une analyse descendante, de type SADT (Structured Analysis and Design Technic) consiste à découper chaque fonction en plusieurs sous-fonctions élémentaires, en faisant apparaître clairement à chaque niveau, les échanges entre ces éléments, ainsi que les circulations de matière d'œuvre, que celle-ci soit concrète, ou abstraite comme l'information ou l'énergie. Par étapes successives, il est possible d'arriver à un découpage très fin de la fonction globale, découpage qui fait parfois apparaître une répartition inadéquate des sous-fonctions, ou une mauvaise gestion de la distribution de l'énergie.

Afin de faciliter la compréhension des schémas présentant cette analyse, il est nécessaire de rappeler quelques définitions s'y rapportant, ainsi que quelques exemples pour les illustrer.

- **Fonction globale** : C'est l'action nécessaire à la satisfaction du besoin. Son expression, qui fera appel à un verbe d'action à l'infinitif, doit permettre de cerner l'intention.

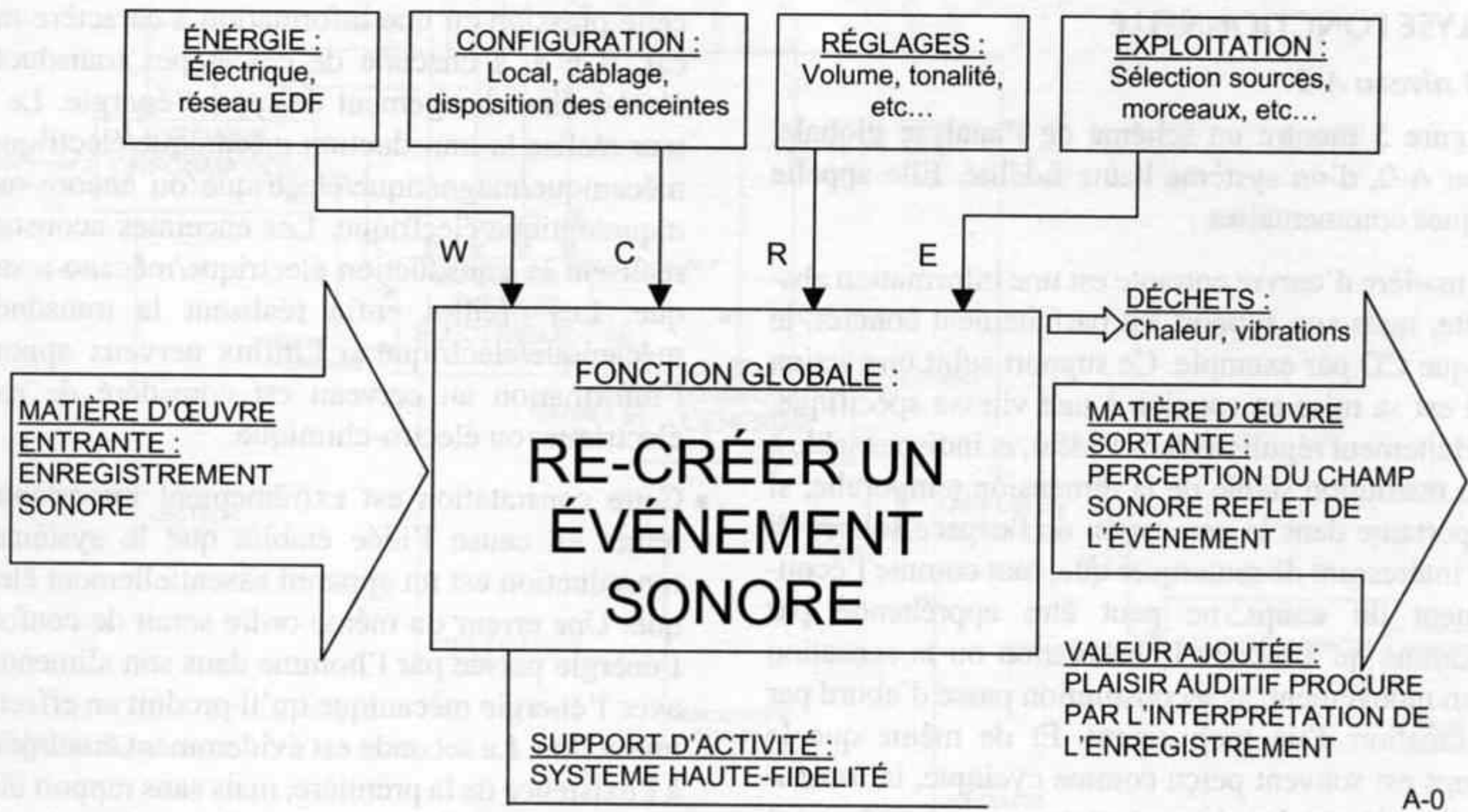


Figure 5 - Analyse fonctionnelle globale de la reproduction sonore.

- **Niveau :** La première étape de découpage de la fonction globale est appelée niveau A0, niveau d'analyse zéro. Les sous-fonctions qui y apparaissent sont numérotées 1, 2, 3... et sont détaillées dans les niveaux A1, A2, A3... La fonction globale non découpée apparaît dans le niveau A-0, A moins zéro.
- **Support d'activité :** C'est l'appareil ou l'équipement qui réalise cette fonction.
- **Matière d'œuvre (M.O.) :** C'est ce sur quoi agit cet appareil. Elle peut être concrète, comme un objet ou de la matière première, ou bien abstraite, comme une énergie, une information véhiculée par un signal, ou encore un service. On distingue la matière d'œuvre entrante M.O.E., celle sur laquelle le système va agir, de la matière d'œuvre sortante M.O.S., sur laquelle le système vient d'agir, et à laquelle on attribue par conséquent une valeur ajoutée. Par exemple, le disque est la MOE du lecteur de CD, alors que sa MOS, le signal codé qu'il délivre devient la MOE du convertisseur numérique/analogique.
- **Valeur ajoutée (V.A.) :** C'est la transformation, la modification qu'a subie la matière d'œuvre afin de présenter un intérêt plus grand pour l'utilisateur. Généralement, $MOS = MOE + VA$.
- **Energie (W) :** Nécessaire au support d'activité pour assurer son fonctionnement, elle est consommée et par conséquent évacuée, mais ne fait pas partie de la matière d'œuvre sortante, quoique celle-ci puisse en

contenir une partie. Par exemple l'énergie électrique consommée par un amplificateur, et qui dans l'idéal ne dépend pas du signal transmis. Une faible partie de cette énergie est dissipée lors de la transmission de la matière d'œuvre. L'énergie peut également être la matière d'œuvre d'un appareil, tel qu'un générateur par exemple, mais elle est distincte dans ce cas de l'énergie nécessaire à son fonctionnement, bien qu'elle soit parfois de même nature.

- **Configuration (C) :** C'est l'ensemble des actions réalisées par l'installateur ou le fabricant du système pour en fixer les paramètres de fonctionnement. Elle n'est généralement pas accessible à l'utilisateur. C'est par exemple la disposition des enceintes acoustiques, qui relève de l'installation et non de l'utilisation.
- **Réglages (R) :** C'est l'ensemble des actions réalisées par l'utilisateur afin d'exploiter le système de manière adéquate, par rapport aux circonstances et à l'environnement. Par exemple le réglage de volume.
- **Exploitation (E) :** C'est l'ensemble des consignes données par l'utilisateur au système. Par exemple les boutons de marche/arrêt ou la sélection de la source.
- **Déchets :** Tout ce que le système évacue et qui doit être éliminé car sans intérêt pour l'utilisateur. Par exemple la chaleur produite lors du fonctionnement de l'amplificateur.

ANALYSE FONCTIONNELLE

SADT niveau A-0

La figure 5 montre un schéma de l'analyse globale, niveau A-0, d'un système haute fidélité. Elle appelle quelques commentaires :

- La matière d'œuvre entrante est une information abstraite, mais son support est parfaitement concret, le disque CD par exemple. Ce support subit une action qui est sa mise en rotation à une vitesse spécifique, parfaitement régulière dans l'idéal, et indispensable à une restitution stable de la dimension temporelle, si importante dans la perception de l'espace sonore. Il est intéressant de remarquer que, tout comme l'écoulement du temps ne peut être appréhendé par l'homme qu'à travers l'observation ou la sensation d'un mouvement, sa reconstitution passe d'abord par la création d'un mouvement. Et de même que le temps est souvent perçu comme cyclique, la reconstitution de son écoulement passe par un mouvement cyclique, c'est-à-dire une rotation. Ceci est vrai pour le cinéma, l'enregistrement magnétique, et les divers formats de cylindres, rouleaux ou disques utilisés depuis l'aube des techniques audio et vidéo.
- Quant à l'information abstraite, elle contient sous forme codée les deux autres dimensions, fréquentielle relative à la hauteur, et dynamique relative à l'intensité. Ce codage peut être réalisé de manière mécanique (gravure d'un sillon de disque), magnétique (orientation des particules d'oxyde sur la bande), optique (micro-cuvettes gravées sur une surface réfléchissante) et de manière continue, en analogique ou bien discrète, par échantillons, en numérique.
- La matière d'œuvre sortante n'est rien d'autre qu'une information, contenue dans la modulation de la pression acoustique, c'est-à-dire une énergie mécanique, distribuée sous la forme d'un champ de pression acoustique. La transformation est donc très complexe puisqu'il y a passage d'un objet-support concret à une information abstraite extraite de celui-ci, puis à une énergie, d'abord électrique, puis mécano-acoustique, ensuite à une perception, récupération par les oreilles, le capteur, des vibrations contenant l'information véhiculée par les ondes sonores, enfin restitution d'une sensation.
- Il découle des deux points précédents que c'est à partir de la résolution de problèmes mécaniques que la re-création de l'événement sonore peut être réalisée. Le premier problème mécanique est l'animation du support de l'enregistrement. Le deuxième est la création d'un champ de pression acoustique dans la salle d'écoute. Le troisième est la transformation de

cette pression en une information à caractère musical. Il y a, à chacune de ces étapes transduction, c'est-à-dire changement de type d'énergie. Le lecteur réalise la transduction mécanique/électrique ou mécanique/magnétique/électrique ou encore mécanique/optique/électrique. Les enceintes acoustiques réalisent la transduction électrique/mécano-acoustique. Les oreilles enfin réalisent la transduction mécanique/électrique si l'influx nerveux apportant l'information au cerveau est considéré de nature électrique, ou électro-chimique.

- Cette constatation est extrêmement importante, et remet en cause l'idée établie que le système de reproduction est un appareil essentiellement électrique. Une erreur du même ordre serait de confondre l'énergie puisée par l'homme dans son alimentation avec l'énergie mécanique qu'il produit en effectuant une action. La seconde est évidemment conditionnée à l'existence de la première, mais sans rapport direct, ni temporel ni d'aucune sorte. Le système de reproduction utilise effectivement l'énergie électrique pour s'alimenter, mais son fondement est mécanique. Dire d'un sportif qu'il a absorbé beaucoup de calories au petit déjeuner ne renseigne absolument pas sur la performance dont il est capable. Dire d'une automobile qu'elle consomme X litres au 100 kilomètres n'indique rien concernant l'agrément de conduite qu'elle procure. De la même manière, dire d'une "chaîne Hi-Fi" qu'elle fait tant de watts n'a strictement aucun sens, et ne renseigne même pas sur le niveau sonore dont elle est capable.

SADT niveau A0

L'analyse au niveau A0, figure 6 page 43, met en évidence ces particularités.

- Au niveau A0, apparaissent cinq sous-fonctions dévolues chacune à un appareil spécifique :
- Le lecteur, au sens large, qu'il soit de CD, de cassette, de disque microsillon, est chargé d'extraire l'information contenue dans le support concret, il effectue donc une première transformation. Toute approximation à ce niveau est irréversible par la suite. Le respect de la dimension temporelle est conditionné à la précision mécanique du mouvement donné au support, exactement comme pour une horloge. D'ailleurs une fréquence d'horloge est extraite de ce support en mouvement dans le cas d'un codage numérique. La précision et surtout la stabilité de cette horloge dépendent à la fois de la stabilité du mouvement de rotation du support, et de la qualité de l'enregistrement de cette fréquence d'horloge (régularité des crêteaux). Une copie d'un disque numérique peut donc être irréprochable d'un point de vue

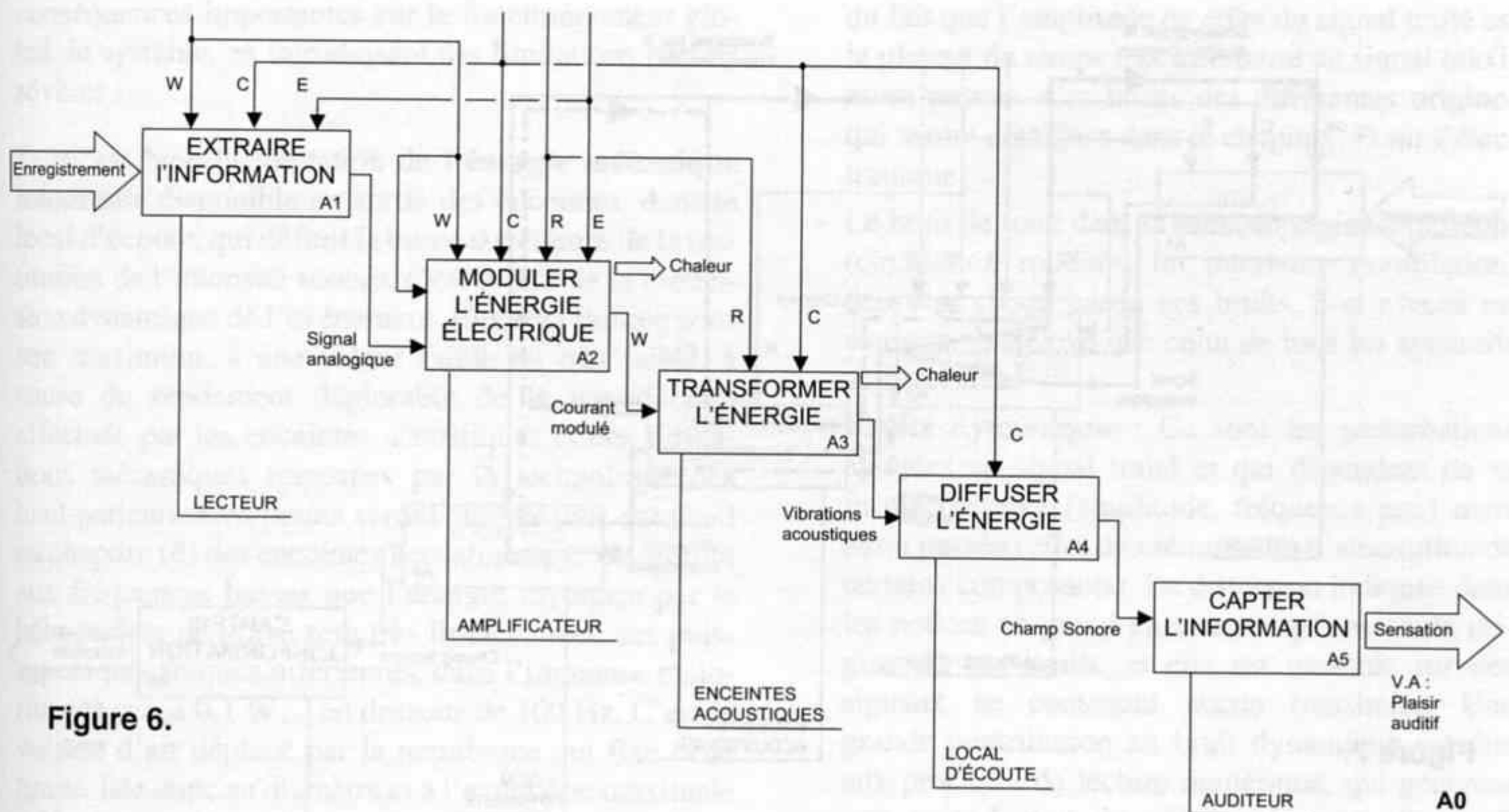


Figure 6.

numérique, c'est-à-dire en ce qui concerne l'exactitude des codes numériques gravés, mais très imparfaite en ce qui concerne la régularité de la fréquence d'horloge, c'est-à-dire de la forme et de la taille des créneaux correspondant. C'est pourquoi la perception de l'espace sonore est parfois moins bonne sur la copie, en particulier si l'appareil ayant réalisé cette copie, ou bien le support utilisé, ne sont pas d'une précision mécanique suffisante. Le respect de l'artiste et de l'expression artistique impose à mon sens l'utilisation d'enregistrements originaux.

- L'amplificateur qui vient ensuite apparaît comme un modulateur vis à vis de l'énergie électrique. Celle-ci, en plus de l'alimenter, est donc sa matière d'œuvre au même titre que le signal d'entrée fourni par le lecteur. Ce signal est la grandeur modulante, celle qui pilote, alors que l'énergie fournie par le réseau est la grandeur modulée, souvent asservie à la précédente. Le circuit d'alimentation de l'amplificateur est donc plus important que son circuit de gain ! C'est pour cette raison que les audiophiles accordent une importance capitale aux circuits d'alimentation des appareils, et ne les dissocient jamais des circuits de gain, ni dans les schémas ni lors des mesures ou des évaluations. Une partie de l'énergie consommée sert au fonctionnement interne de l'amplificateur et n'est pas transmise à sa sortie, elle est évacuée en chaleur.
- Les enceintes effectuent une conversion, avec d'énormes pertes, du courant électrique en mouvements –énergie mécanique– puis en radiation d'ondes sonores –énergie acoustique. Quel que soit le prin-

cipe de transducteur utilisé, l'énergie mécanique obtenue à la sortie de l'enceinte dépend du courant modulé fourni par l'amplificateur, et non de la tension électrique présente à l'entrée de l'enceinte. Ces deux grandeurs sont liées, mais de manière non univoque, à cause des réactions induites par le champ de pression sur les haut-parleurs. C'est pourtant la tension de sortie de l'amplificateur et non son courant de sortie, qui est asservie, dans la plupart des cas, au signal modulant... Je ne peux m'empêcher de me demander pourquoi les constructeurs persistent à asservir le fonctionnement de leurs appareils à une grandeur qui n'est pas fondamentale pour le fonctionnement de l'enceinte, ni même révélatrice. Cet asservissement procure la stabilité, l'amortissement des phénomènes indésirables et la protection nécessaires à un fonctionnement sans problème. Je préfère l'absence d'asservissement, c'est-à-dire l'amplificateur sans contre-réaction, qui impose cependant l'utilisation d'enceintes acoustiques à l'amortissement idéal !

- Le local reçoit le champ de pression, ainsi que l'auditeur, et les contient, assurant la position relative indispensable. Il ne devrait pas exercer de transformation sur ce champ de pression, sinon il risque de perturber la transmission de l'information. Il devrait être seulement un vecteur, assurant le transport de l'information sans déformation vers l'auditeur. Malheureusement, il a la plupart du temps une action dans les domaines fréquentiel et dynamique, sous la forme de résonances plus ou moins marquées, et d'absorptions variables avec la fréquence,

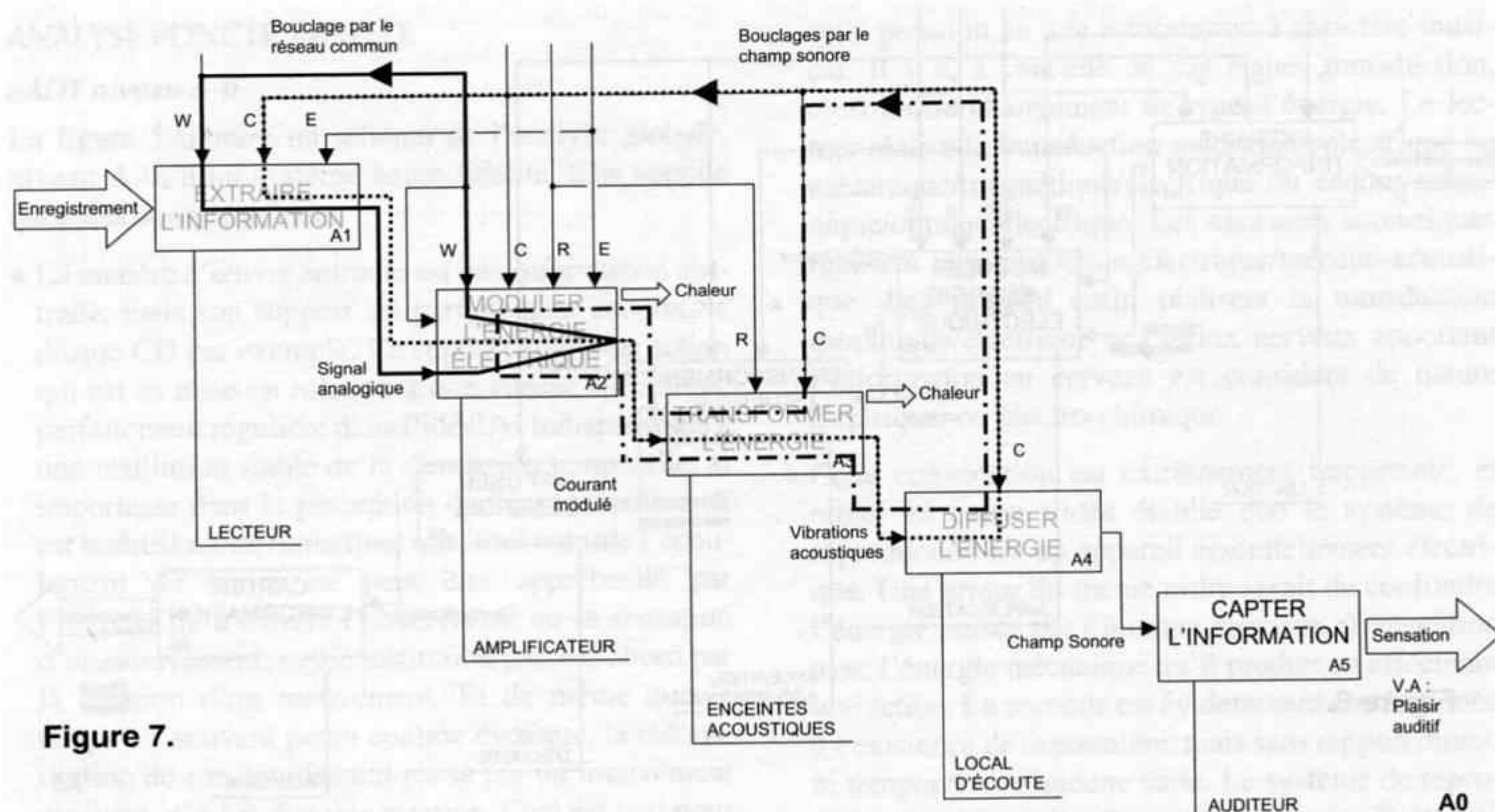


Figure 7.

ainsi que dans le domaine temporel, avec des réverbérations et des réflexions, créant des reflets retardés du champ sonore. Comme expliqué plus haut, il est sans doute le point le plus faible de la reproduction, à moins qu'il n'ait subi un traitement approprié. Des éléments de réflexion sur ce sujet sont donnés dans le chapitre suivant.

- L'auditeur reçoit la sensation auditive et en extrait une information sonore et musicale. Le plaisir qui en découle est entièrement subjectif, mais complètement subordonné à la réalisation de chacune des sous-fonctions. Celles-ci interviennent en série dans le processus, et toute approximation faite à une étape n'est pas réparable par la suite. L'homogénéité des performances subjectives de chacun des sous-ensembles, en particulier du point de vue du respect de la dimension temporelle, est donc indispensable, c'est-à-dire que le résultat final dépend exclusivement du maillon le plus faible. C'est dans une immense majorité des cas le local d'écoute.

SADT avec bouclages parasites

Sur ce schéma (ci-dessus), plusieurs bouclages parasites peuvent être mis en évidence :

- Bouclage par l'alimentation à partir d'un réseau commun, le secteur EDF, de plusieurs appareils reliés également entre eux par les câbles indispensables à la transmission du signal modulé. C'est par exemple le cas du lecteur et de l'amplificateur. Ce bouclage apparaît en trait gras continu sur la figure 7.

- Bouclage acoustique à partir du champ sonore qui arrose l'ensemble des appareils, et les soumet à des vibrations parfois intenses, pouvant perturber leur fonctionnement, ou induire des signaux indésirables. Ce type de rétro-action, appelé effet Larsen lorsqu'il se produit aux fréquences élevées et induit un accrochage, est surtout sensible sur les appareils effectuant une transduction mécanique/électrique, comme les microphones, les platines pour disques microsillons, mais aussi les lecteurs de CD, et les étages d'entrée des amplificateurs à lampes, car certains tubes présentent un effet microphonique suffisamment important, ou encore entre les différents haut-parleurs d'une enceinte acoustique. Ce bouclage apparaît en trait gras pointillé sur la figure 7.

- Bouclage acoustique encore, entre les sons réverbérés par les parois du local et les haut-parleurs, qui reçoivent avec un certain retard les ondes de pression réfléchies et les transforment en un signal électrique qui est renvoyé à la sortie de l'amplificateur. Ce dernier, s'il est asservi, fera tout son possible pour freiner l'action parasite du haut-parleur, ce qui sera sans effet, voire nuisible, la cause n'étant pas le haut-parleur lui-même mais le local d'écoute. Ce bouclage apparaît en trait gras mixte sur la figure 7.

LIMITATIONS ET BRUITS

Les particularités mises en évidence par la présentation de cette analyse globale ont une portée beaucoup plus grande qu'il n'y paraît. Elles entraînent des

conséquences importantes sur le fonctionnement global du système, en introduisant des limitations parfois sévères :

1. C'est bien la limitation de **l'énergie mécanique maximale** disponible en sortie des enceintes, dans le local d'écoute, qui définit la borne supérieure de la restitution de l'intensité sonore, c'est-à-dire de la dimension dynamique de l'événement. Elle sera limitée pour son maximum, à une valeur faible ou très faible, à cause du rendement déplorable de la transduction effectuée par les enceintes acoustiques et des limitations mécaniques imposées par la technologie des haut-parleurs. Ces points seront étudiés plus en détail au chapitre (8) des enceintes acoustiques. C'est surtout aux fréquences basses que l'énergie rayonnée par le haut-parleur de grave sera très limitée, avec des puissances mécaniques inférieures, dans l'immense majorité des cas, à 0,1 W... en dessous de 100 Hz. C'est le volume d'air déplacé par la membrane qui fixe cette limite, liée donc au diamètre et à l'excursion maximale du haut-parleur. La puissance électrique n'a rien à faire ici. À titre de comparaison, un simple piano d'étude rayonne environ 0,5 W acoustique.

Le local d'écoute intervient également sur ce niveau maximal, car les résonances qui s'y produisent, en "amplifiant" certains sons jusqu'à la limite de tolérance, obligent à diminuer le niveau d'écoute, et empêchent d'y établir un volume sonore réaliste. Le local intervient encore, par l'intensité de la réverbération, qui a pour effet d'augmenter le niveau sonore moyen, sans modifier le niveau de crête défini par l'onde directe, et par conséquent de diminuer la dynamique du signal.

2. C'est l'ensemble des **bruits indésirables** qui définit la borne inférieure de la restitution de cette dimension dynamique. Ces bruits peuvent être classés en deux grandes catégories :

- Les **bruits intrinsèques**, propres aux appareils eux-mêmes et inhérents aux procédés et aux composants utilisés. Ils se décomposent eux-mêmes en bruits statiques et bruits dynamiques :

- **Bruits statiques** : Ce sont les bruits indépendants des signaux d'entrée et de sortie de l'appareil. Ils sont en général stables et assez faibles pour ne pas représenter une limitation sévère. Les notices des appareils indiquent généralement la valeur efficace de ce bruit par rapport au signal utile maximum, sous la forme d'une indication du rapport signal/bruit. Cette mesure est obligatoirement effectuée en l'absence de signal, ce qui fait qu'elle ne tient pas compte des bruits induits par le traitement du signal. Elle ne tient pas compte non plus

du fait que l'amplitude de crête du signal traité est la plupart du temps très inférieure au signal maximum permis. Ces bruits ont différentes origines qui seront détaillées dans le chapitre (9) sur l'électronique.

- Le bruit de fond dans la salle, d'origine extérieure (circulation routière) ou intérieure (ventilation) doit être classé parmi ces bruits. Son niveau est souvent plus élevé que celui de tous les appareils audio réunis.

- **Bruits dynamiques** : Ce sont les perturbations ajoutées au signal traité et qui dépendent de sa forme présente (amplitude, fréquence etc.) mais aussi passée (effet de mémoire ou d'absorption de certains composants). La distorsion indiquée dans les notices ne prend en compte qu'une seule origine de ces bruits, et elle est mesurée sur des signaux ne contenant aucun transitoire. Une grande contribution au bruit dynamique est due aux procédés de lecture numérique, qui génèrent une perturbation dite "bruit de quantification" capable de noyer complètement les signaux faibles, porteurs des informations d'espace. Les haut-parleurs génèrent également des bruits dynamiques, en particulier sur les sons transitoires à fort niveau, tels que les attaques de notes, ou les percussions.

- Le local, par le champ réverbéré (voir chapitre suivant) apporte s'il n'est pas traité une grande contribution au bruit dynamique, toutes les ondes réfléchies formant une masse sonore, comparable à un bruit, et capable de noyer les informations de faible niveau, ou d'intermoduler gravement avec l'onde directe pour former des interférences brouillant la perception de l'espace sonore.

- Les **bruits induits**, ou interférents, qui sont dus au couplages entre appareils par les bouclages vus précédemment, ainsi qu'à d'autres influences électromagnétiques s'exerçant sur les appareils mais aussi sur les câbles qui les relient, entre eux et au secteur commun :

- **Bruits couplés électriques** : Ce sont des signaux parasites créés par un retour d'une partie du signal traité et transmis à un autre élément du système. Ils reviennent dans l'appareil soit par son câble d'alimentation secteur, soit par un câble de liaison signal, ou les deux. La diaphonie entre les canaux droits et gauche en est un bon exemple.

- **Bruits couplés acoustiques** : Ce sont des signaux parasites créés par une influence aérienne directe des ondes sonores sur des composants sensibles aux vibrations mécaniques, ou indirecte par voie solide à travers les supports (table) les parois ou les

circuits de ces appareils sensibles. Les tables de lecture, les tubes électroniques et certains condensateurs sont concernés par ce phénomène de type microphonique. Il semble également que dans certains cas un lecteur de CD puisse en être victime.

- **Bruits couplés par impédance commune** : Ces perturbations apparaissent lorsque des courants modulés par deux circuits séparés, par exemple le convertisseur numérique-analogique d'une part et le circuit de sortie d'un lecteur de CD d'autre part, se referment en traversant un composant, une alimentation, un câble ou même une simple piste de circuit imprimé, commune aux deux circuits. Ces deux courants traversant une portion de circuit commune vont alors se moduler l'un l'autre. Toute portion de piste ou de câble de masse risque de constituer une impédance commune si plusieurs courants y circulent, provenant d'étages ou de composants différents. La disposition des points de masse et l'étude des courants de masse sont des points essentiels dans toute conception audiophile.

- **Bruits induits par le secteur** : Ce sont des bruits dus aux courants pulsés circulant dans les enroulements des transformateurs d'alimentation, dans les redresseurs, les câbles et les condensateurs de tête de filtre des alimentations en courant continu indispensables à tout appareil de reproduction sonore. Ces courants pulsés rayonnent des champs électromagnétiques qui sont captés par d'autres composants, ou d'autres câbles sensibles véhiculant le signal modulé, auquel un signal parasite sera ajouté. Ils se traduisent par des ronflements à basse fréquence, souvent superposés à des grésillements ou crépitements, audibles en l'absence de signal. Le circuit magnétique d'un transformateur rayonne également un puissant champ magnétique très polluant, lorsqu'il est saturé transitoirement, à chaque alternance du secteur, par les forts courants pulsés qu'absorbent les grosses capacités de filtrage.

- **Bruits induits par le signal** : La circulation normale du signal dans certains composants entraîne la circulation de courants modulés au travers des circuits d'alimentation et de sortie de certains appareils, amplificateurs en particulier. Ces courants eux aussi rayonnent un champ électromagnétique qui peut perturber d'autres composants et circuits proche, ou le circuit perturbateur lui-même (auto-induction).

La contribution de chacune de ces perturbations au bruit total est particulière à chaque système. Les bruits dus au local sont la plupart du temps les plus importants, par leur intensité, par les difficultés rencontrées

dans leur traitement, et surtout par la contrainte d'antériorité qui leur est liée. Traiter les autres bruits avant ceux du local est tout simplement un non-sens.

En ce qui concerne les autres sources de bruit, d'une manière générale, les bruits couplés sont les plus importants, mais ils ne peuvent être mis en évidence qu'en présence d'un signal, et sont donc impossibles à isoler et à mesurer.

Ceux d'origine mécanique, tels que les vibrations parasites des parois des enceintes, ou de certaines parties des haut-parleurs (suspension, châssis, dôme etc.) ont un pouvoir perturbateur important. Ces bruits ne se contentent pas de s'ajouter au signal, ils le modulent, c'est-à-dire qu'ils se combinent avec lui pour créer des signaux supplémentaires, tout comme deux notes de musique de hauteurs légèrement différentes vont en créer une troisième sous la forme d'un battement à fréquence plus basse. Leur suppression rend la restitution plus transparente, plus libre, plus dynamique, ouverte. C'est bien évidemment le respect du silence qui se trouve grandement amélioré.

Les bruits induits sont moins intenses mais plus difficiles à traiter car ils tiennent au dimensionnement des composants, à leur implantation, et au cheminement des câbles ou pistes de circuit. Les éliminer demande parfois de reconsidérer toute la conception de l'appareil, en particulier de ses circuits d'alimentation.

Les bruits intrinsèques d'origine électrique sont les plus faibles et ne posent que très rarement problème. Ce sont pourtant les mieux documentés dans la littérature. On distingue le bruit thermique, appelé bruit de Johnson, dont la tension dépend de la valeur résistive des composants, le bruit de Schottky dû au passage de courant dans une jonction de semi-conducteur, le bruit de Flicker, prépondérant aux basses fréquences avec une distribution en $1/f$ et lié aux imperfections et discontinuités des conducteurs (résistances au carbone en particulier) et enfin le bruit de pop-corn, crépitement erratique, typique des circuits intégrés de qualité courante.

3. La source de l'information musicale, c'est-à-dire le lecteur, ainsi que le local d'écoute interviennent tous deux sur la restitution de la dimension temporelle :

- Les perturbations temporelles rapides dues à la source sont plutôt irrégulières, imprévisibles et de fréquence élevée (instabilité d'horloge ou "jitter" de période inférieure à 1 ms), ce qui peut rendre le son scintillant et flou à la fois, ce qui perturbe généralement la stabilité de position et de taille des sources sonores dans l'espace, ainsi que la perception correcte de la matière sonore.

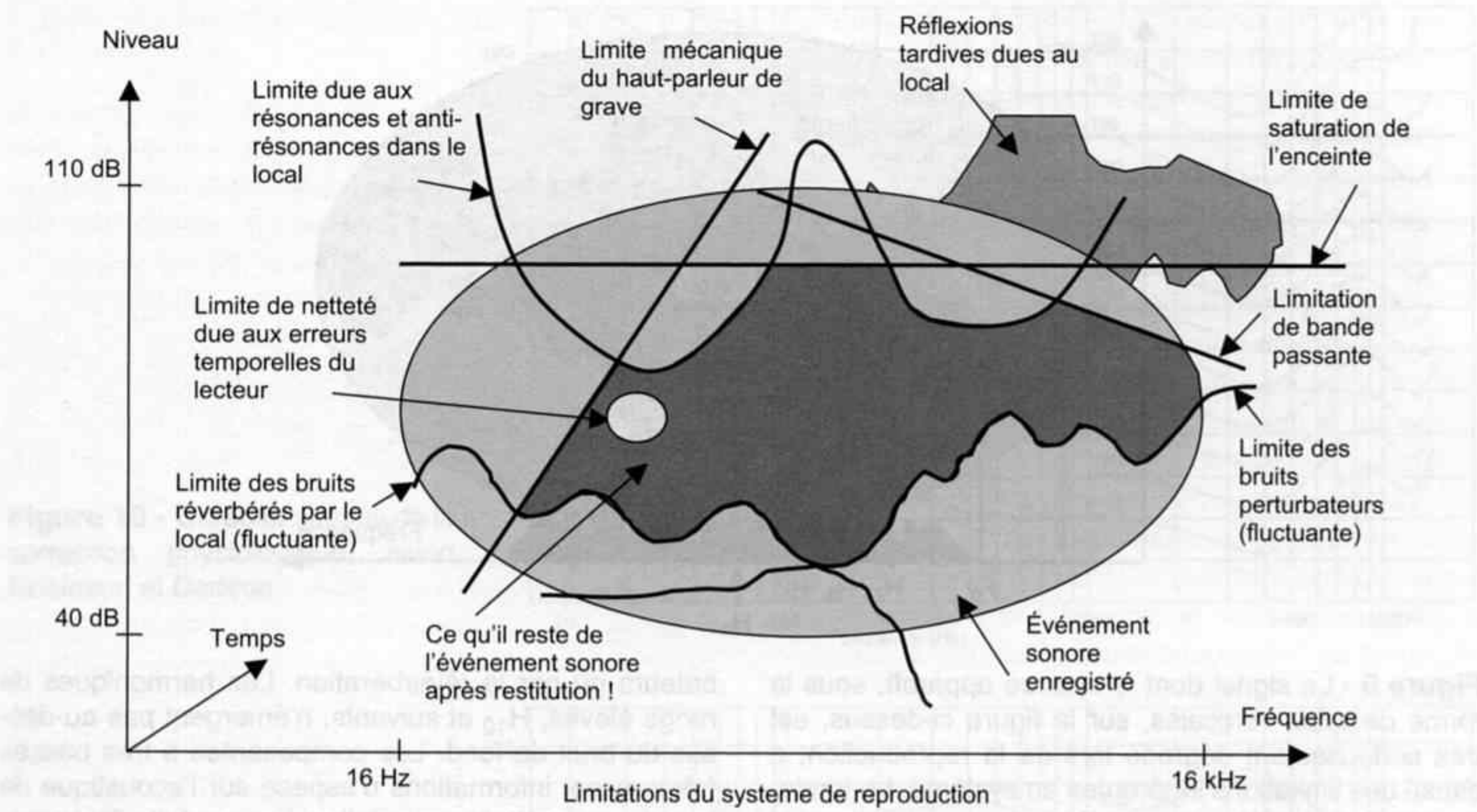


Figure 8 - Le dessin ci-dessus montre, sur un diagramme niveau sonore/fréquence/temps, les limitations subies lors de la reproduction musicale. L'événement original occupe la zone en gris clair, comprise entre 16 Hz et 16 kHz environ sur l'échelle des fréquences, et entre 40 dB (bruit de fond du concert) et 110 dB (crêtes de fortissimo) sur l'échelle de niveau. Les divers bruits masquent les informations de faible niveau, en bas, aux alentours de 60 dB. Le niveau maximal à la reproduction dépasse rarement 100 dB, à cause de la saturation des enceintes. La dynamique atteint donc 40 dB seulement,

contre 60 à 70 dB pour le concert réel. À certaines fréquences, le local résonne et oblige à baisser le volume sonore. Dans le grave, la dynamique est très sévèrement tronquée. Les sonorités qui parviennent à traverser ces masques manquent de netteté, et sont entachées d'écho, de réverbération, de traînages divers. Une estimation réaliste montre que la moitié des informations sont perdues : les sons de très faibles niveaux (informations d'espace), ceux de forts niveaux (attaques) ainsi que les graves (espace et matière sonore, énergie rayonnée) et les extinctions de note.

- Les perturbations temporelles lentes dues au local sont régulières, prévisibles et de fréquence basse ou très basse (période supérieure au dixième de seconde), ce qui provoque un déplacement de certaines sources sonores pour certaines notes jouées, et parfois un dédoublement de la source, par réflexion du champ sonore de cette source contre une paroi. Le temps d'établissement du signal, pour les sons graves, dépendra grandement de l'amortissement des résonances du local, ainsi que de l'amortissement mécanique du système de haut-parleurs. Des variations de ce temps d'établissement avec la fréquence constituent une perturbation de la dimension temporelle.

4. Les perturbations fréquentielles sont principalement dues au local, qui peut produire des résonances très marquées, capables de multiplier par 10 l'intensité sonore, et des anti-résonances responsables de trous

dans la réponse en fréquence. Certaines notes, dont un formant correspond à l'un de ces phénomènes, seront amplifiées ou atténuées, si c'est le fondamental qui est touché, ou bien détimbrées ou faussées selon le rang des harmoniques perturbés. Les causes de non-linéarité de la réponse en fréquence dues aux enceintes acoustiques sont souvent beaucoup moins importantes, quoique la mode de la miniaturisation entraîne des réponses plutôt écourtées dans le registre grave. À l'heure actuelle les électroniques sont toutes très performantes sur ce point, qu'il s'agisse des lecteurs, des amplificateurs ou d'autres appareils.

L'effet de ces limitations sur les deux dimensions, dynamique d'une part et fréquentielle d'autre part, de la restitution est très net, particulièrement pour les sons graves à niveau élevé, aux fréquences où le local résonne ou présente une forte réverbération (figure 8 et 9).

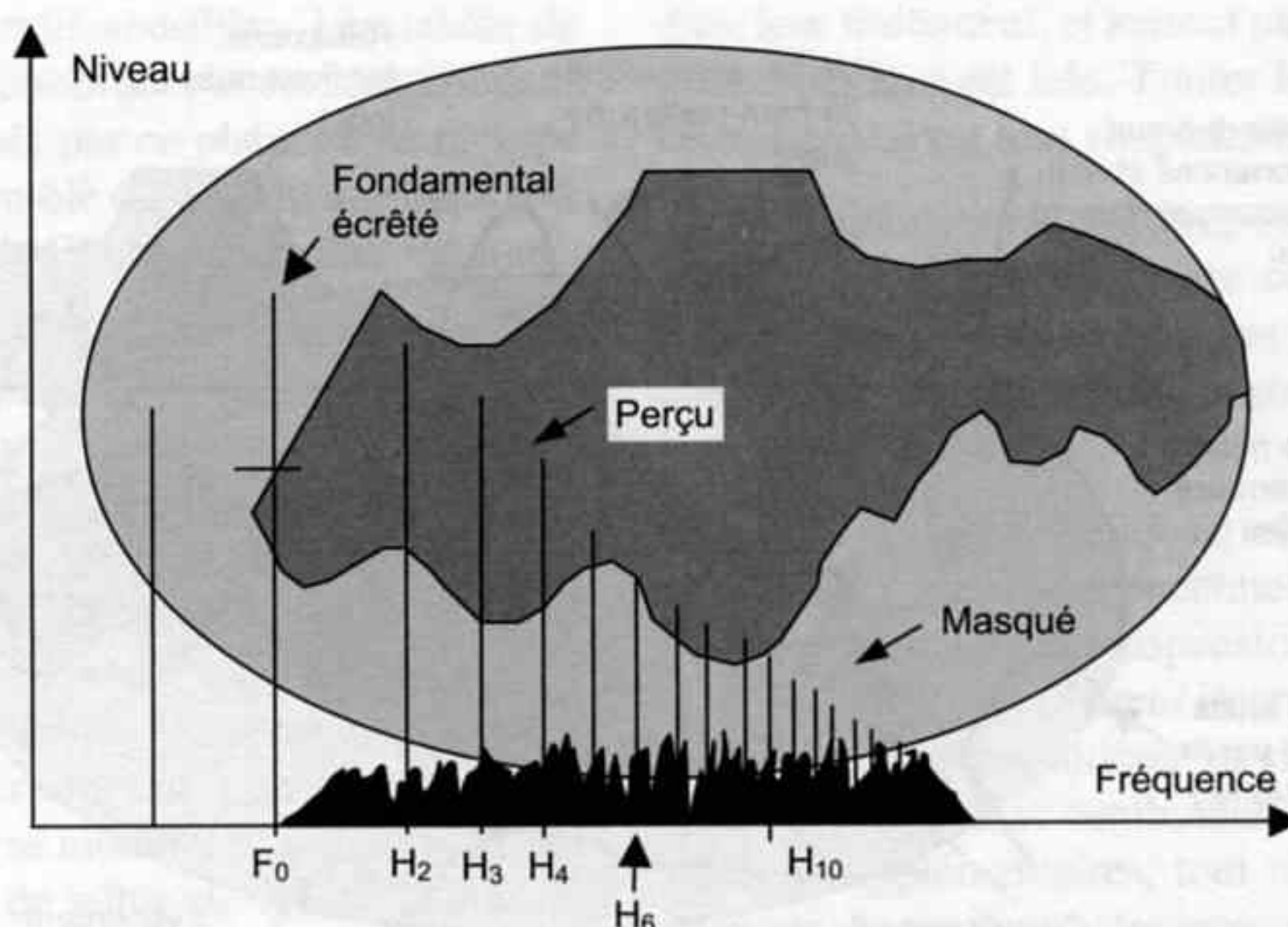


Figure 9 - Le signal dont le spectre apparaît, sous la forme de raies verticales, sur la figure ci-dessus, est très sérieusement dégradé lors de la reproduction, à cause des limitations inhérentes au système. Le fondamental est écrêté, de manière douce, simplement compressé, par le haut-parleur grave. Certains formants, comme H_6 sont masqués par des bruits pertur-

bateurs ou par la réverbération. Les harmoniques de rangs élevés, H_{10} et suivants, n'émergent pas au-dessus du bruit de fond. Les composantes à très basses fréquences, informations d'espace sur l'acoustique de la salle, ne sont pas reproduites. Les produits d'intermodulation, qui apparaissent sous la forme d'une zone noire, ne sont habituellement pas audibles.

LOIS DE L'OUÏE

Le simple fait d'écouter la reproduction à un volume sonore plus faible que le volume réel, ce qui revient à diminuer l'intensité de toutes les raies spectrales, fera inmanquablement disparaître sous le niveau des bruits perturbateurs les raies les plus faibles, celles de fréquences élevées, qui donnent au son sa clarté, sa légèreté et sa vivacité. Le timbre paraîtra lourd, assourdi, épais et en même temps dur et projeté car les basses fréquences sont compressées, limitées par les possibilités mécaniques du haut-parleur grave. Le fait de monter le volume sonore ne fait qu'empirer ce phénomène, le niveau de crête ne pouvant augmenter. Par contre, le niveau sonore moyen sera plus élevé, et la dynamique par conséquent réduite. C'est le phénomène de tassement de la dynamique à fort volume sonore, auquel s'ajoute l'augmentation des produits d'intermodulation, qui deviennent audibles.

D'une manière générale, on peut considérer que la plus forte cause de distorsion du signal audio consiste en "distorsion de niveau" induite par une reproduction des sons à un niveau sonore différent de celui de l'exécution. En effet, la perception par l'ouïe des variations d'intensité n'est absolument pas linéaire, et dépend fortement à la fois de la fréquence et de l'intensité des sons perçus, ce que montrent les courbes bien connues de Fletcher et Munson. Ces perceptions dépendent

également de la durée des signaux. D'autres études plus récentes ont été menées depuis afin de préciser les résultats obtenus, établis statistiquement.

Quels que soient les réseaux de courbes pris en référence, il en ressort que la sensibilité de l'oreille est maximale aux fréquences médium, de part et d'autre de 2 kHz environ, et que le seuil d'audition est beaucoup plus élevé pour les sons graves, ainsi que pour les fréquences aiguës. Autrement dit, trois sons de fréquences différentes, grave, médium et aiguë, par exemple à 50 Hz, 1 kHz et 10 kHz, tous trois produits avec la même intensité sonore, mesurée au sonomètre linéaire à 100 dB, ne seront pas perçus avec la même sensation d'intensité sonore : si l'on prend pour référence la sensation d'intensité (sonie) procurée par le son médium à 1 kHz, le son grave à 50 Hz paraîtra plus faible, proche de 88 dB, et donnera donc une sensation environ 12 dB inférieure. C'est à dire qu'en augmentant son niveau physique de 12 dB, il produira la même sensation d'intensité que le son médium. Quant au son à 10 kHz, il produira une sensation d'environ 95 dB, et semblera donc plus faible de 5 dB par rapport au médium.

Cet effet naturel est fort utile, car il permet d'apprécier la distance apparente d'une source sonore connue. En effet, lorsque la distance augmente, l'intensité perçue diminue (-6 dB pour un doublement de la distance) mais elle diminue plus vite pour les sons aigus, et encore plus vite pour les sons graves. Une source éloi-

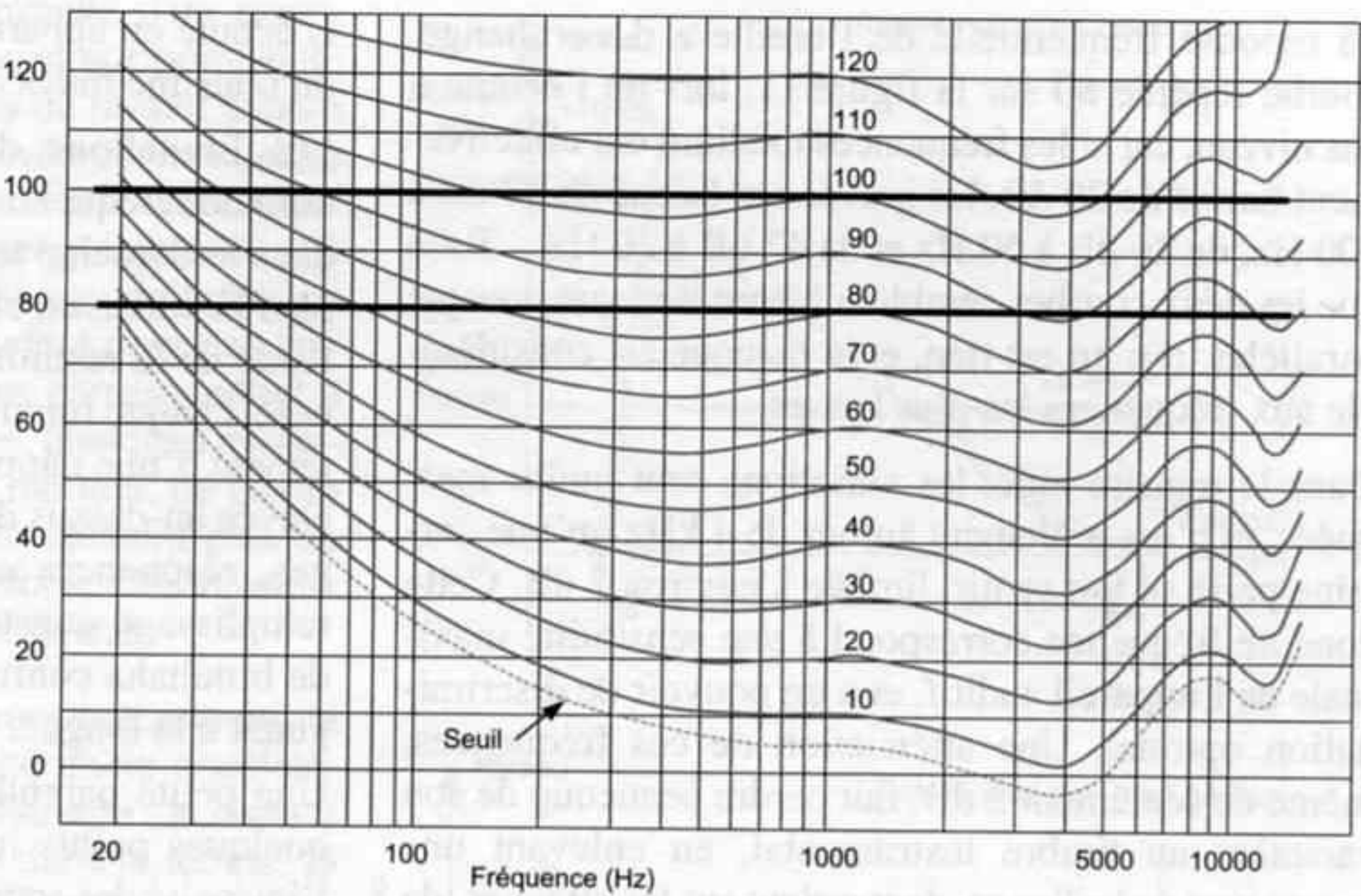


Figure 10 - Caractéristiques de la correction physiologique, selon Robinson et Dadson.

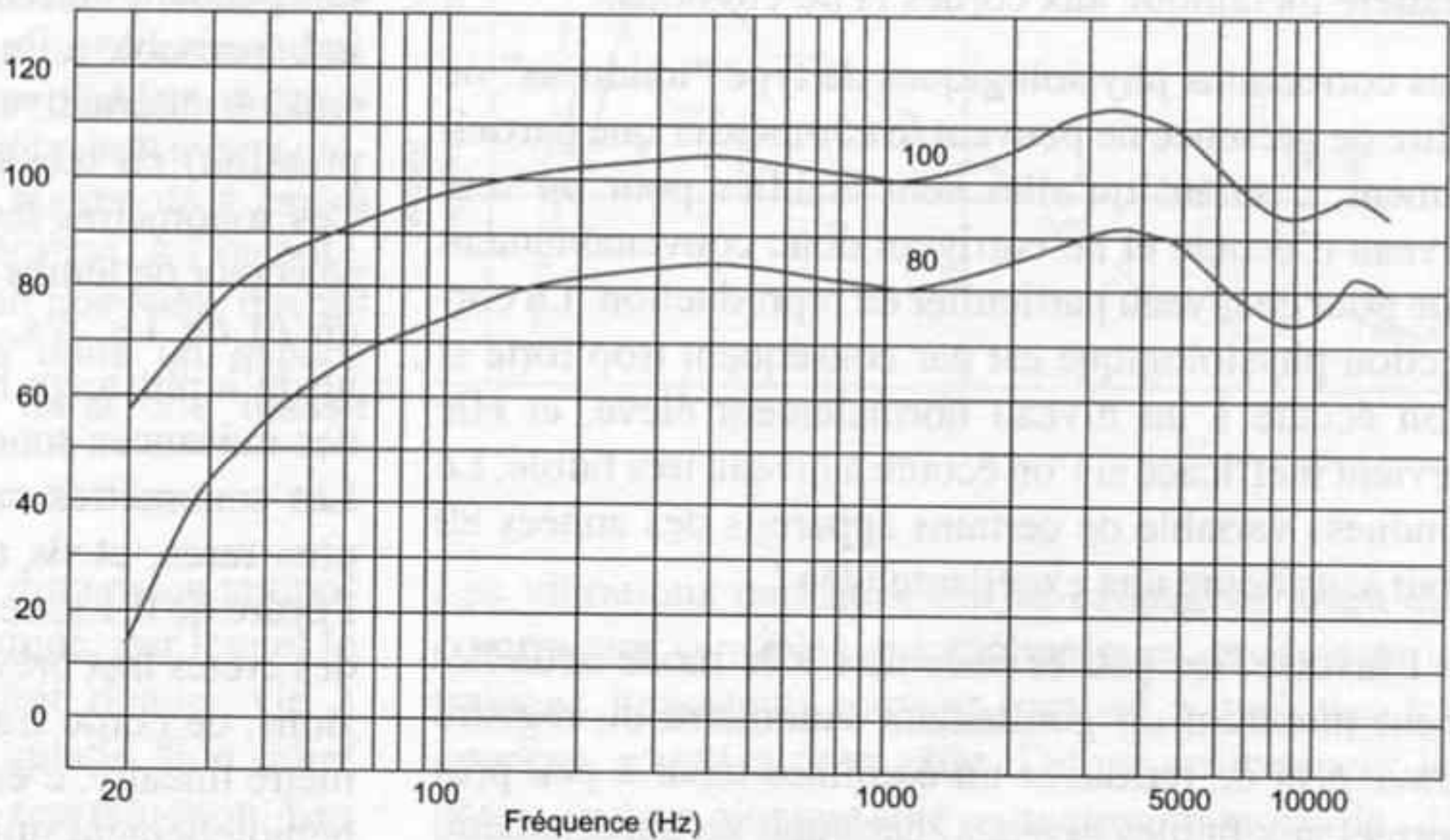


Figure 11 - Courbes de réponse en fréquence subjective de l'oreille, pour deux intensités physiques.

gnée donne par conséquent l'impression de procurer un son constitué presque exclusivement de fréquences médium.

La reproduction musicale effectuée à un niveau sonore plus faible que l'exécution procure alors une impression de distance, d'éloignement de la scène sonore. Cette sensation d'éloignement est en général incohérente avec la recreation de l'espace voulue par le preneur de sons : les solistes sont enregistrés de manière à donner une illusion de proximité, faisant ressortir les bruits mécaniques ou d'exécution, tout comme l'écoute de l'instrument réel à 2 ou 3 m de distance.

Si la reproduction à faible volume sonore fait apparaître l'instrument virtuel à 10 m de distance apparente, alors ces bruits d'exécution sont trop présents, la dynamique est trop forte, et la précision de localisation spatiale ainsi que la taille apparente de l'instrument sont trop grandes.

Au-delà de cette incohérence des impressions spatiales, le timbre lui-même est distordu, car le spectre de fréquences est profondément modifié, comme le montrent les diagrammes figure 10 et 11 :

L'audition de sons d'intensité 100 dB sur toute la gamme de fréquences (trait gras supérieur) procure une impression de 100 dB à 1 kHz, mais de seulement 96 dB à 100 Hz, 88 dB à 50 Hz, et 57 dB à 20 Hz. Entre 2,5 et 4 kHz, la sensation atteint plus de 110 dB, alors qu'elle n'est plus que de 95 dB à 10 kHz. La réponse fréquentielle de l'oreille n'est pas linéaire, mais ressemble à la courbe repérée 100 dB tracée sur le schéma figure 11. La perte de sensibilité pour les sons graves atteint environ :

–3 dB à 100 Hz, –12 dB à 50 Hz et –43 dB à 20 Hz.

Si maintenant ces sons sont reproduits au niveau de 80 dB, toujours sur l'ensemble des fréquences (trait gras inférieur) la perte (par rapport à 80 dB) atteint :

–5 dB à 100 Hz, –18 dB à 50 Hz et –65 dB à 20 Hz !

La réponse fréquentielle de l'oreille a donc changé, courbe repérée 80 sur la figure 11, lors de l'écoute à bas niveau, car si les fréquences médium ont effectivement baissé de 20 dB, les graves ont baissé de 22 dB à 100 Hz, de 26 dB à 50 Hz et de 42 dB à 20 Hz... Bien que les deux courbes semblent à première vue presque parallèles, il n'en est rien, et le manque est considérable aux fréquences les plus basses.

Dans le registre aigu, les variations sont moins marquées, et c'est seulement autour de 4 kHz qu'une certaine perte se fait sentir, limitée à environ 2 dB. Cette zone de fréquence correspond à une sensibilité maximale de l'appareil auditif, et à un pouvoir de discrimination optimal. Une atténuation de ces fréquences, même de seulement 2 dB, fait perdre beaucoup de son caractère au timbre instrumental, en enlevant une bonne part de brillance, de mordant sur les attaques, de matière métallique aux cordes et percussions.

Les corrections physiologiques de type "loudness" ou filtre de présence ne peuvent le compenser que partiellement, d'autant qu'elles sont établies pour un seul niveau d'écoute et ne corrigent donc convenablement que pour ce niveau particulier de reproduction. La correction physiologique est par conséquent trop forte si l'on écoute à un niveau normalement élevé, et elle devient inefficace si l'on écoute à niveau très faible. Le loudness variable de certains appareils des années 80 était sans doute une excellente idée !

A l'inverse, les petites enceintes à la mode actuellement montrent un gonflement volontaire du registre grave afin de retrouver un équilibre tonal à peu près correct aux faibles niveaux, habituels en appartement, et produisent par conséquent un niveau de grave excessif lorsqu'on les utilise au niveau acoustique normal ! Il est impossible d'obtenir un quelconque réalisme à partir de matériel conçu avec une précorrection de ce type, destinée à faire illusion lors d'une écoute rapide au moment de l'achat. L'utilisateur est condamné à écouter au niveau sonore prévu par le concepteur, sous peine d'obtenir une réponse fréquentielle absolument pas linéaire... malgré les annonces publicitaires et les caractéristiques flatteuses de la fiche technique.

Une reproduction réaliste impose par conséquent un niveau d'écoute assez proche du niveau de l'exécution, ce qui ne pose aucun problème particulier pour les musiques de chambre, ou les récitals d'instruments seuls. Par contre, un concert de rock en plein air ne pourra être reproduit "en grandeur réelle" qu'à la condition de disposer d'une grande salle, bien isolée et bien traitée, d'un système capable de reproduire les crêtes de niveau, et surtout d'un voisinage très... tolérant, ou à défaut très éloigné !

L'écoute en appartement limite sérieusement la quête du réalisme musical...

Les limitations détaillées ci-dessus, concernant le domaine fréquentiel, sont assez sévères. Pourtant c'est dans le domaine temporel que ces limitations sont les plus insidieuses, et nuisent le plus sévèrement au réalisme de la restitution. Au lieu que chaque attaque de note, chaque impulsion, chaque vibrato, émergent nettement d'une nappe sonore transparente, légère et peu élevée au-dessus du silence, les réverbérations, traînages, résonances et autres perturbations forment un remplissage constant de l'espace sonore, une espèce de brouhaha confus, à l'effet masquant puissant, fatigant à la longue.

Une petite parenthèse est nécessaire afin de préciser quelques points importants concernant la mesure de l'intensité des sons. La mesure des niveaux sonores se fait pendant un temps Δt , appelé temps d'intégration, indispensable à l'appareil de mesure pour convertir la tension alternative issue du microphone (capteur de pression) en tension continue destinée à l'afficheur. Les sonomètres les plus perfectionnés disposent d'un sélecteur de temps d'intégration, permettant de choisir un Δt de 1 s, 5 s, 10 s ou bien de quelques minutes jusqu'à plusieurs heures, ce qui convient à la mesure des nuisances sonores en milieu urbain ou industriel. Les sonomètres capables de détecter des crêtes sont plus rares, et ils utilisent un temps d'intégration de l'ordre de 0,1 s, ce qui écrase quelque peu les mesures des crêtes très brèves, telle que les attaques de percussions, de corde frappées ou pincées. Seul un décibel-mètre linéaire, c'est-à-dire sans la pondération A ou C habituellement utilisée pour la mesure des nuisances, et avec indication du niveau vrai de crête permet cette mesure.

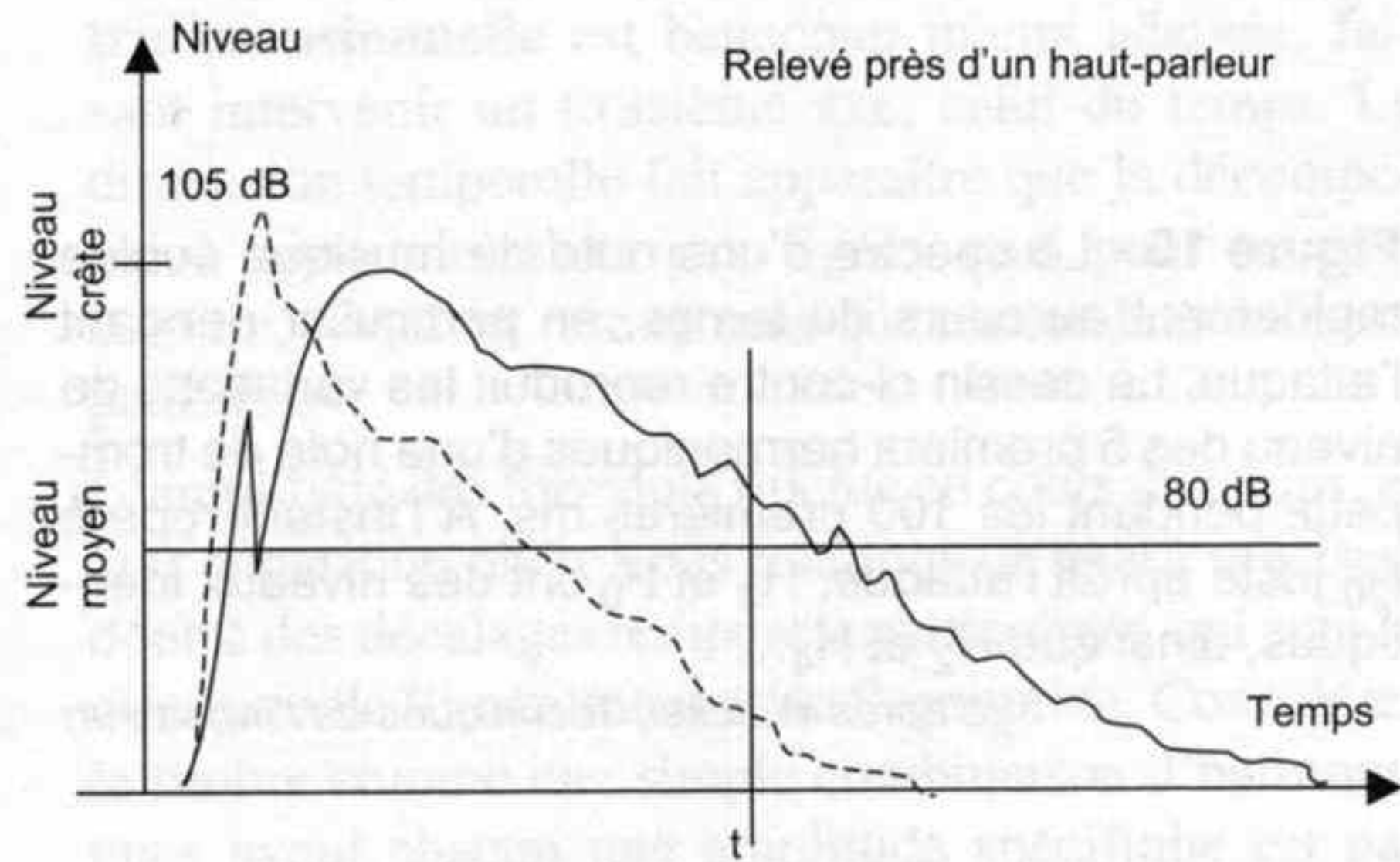
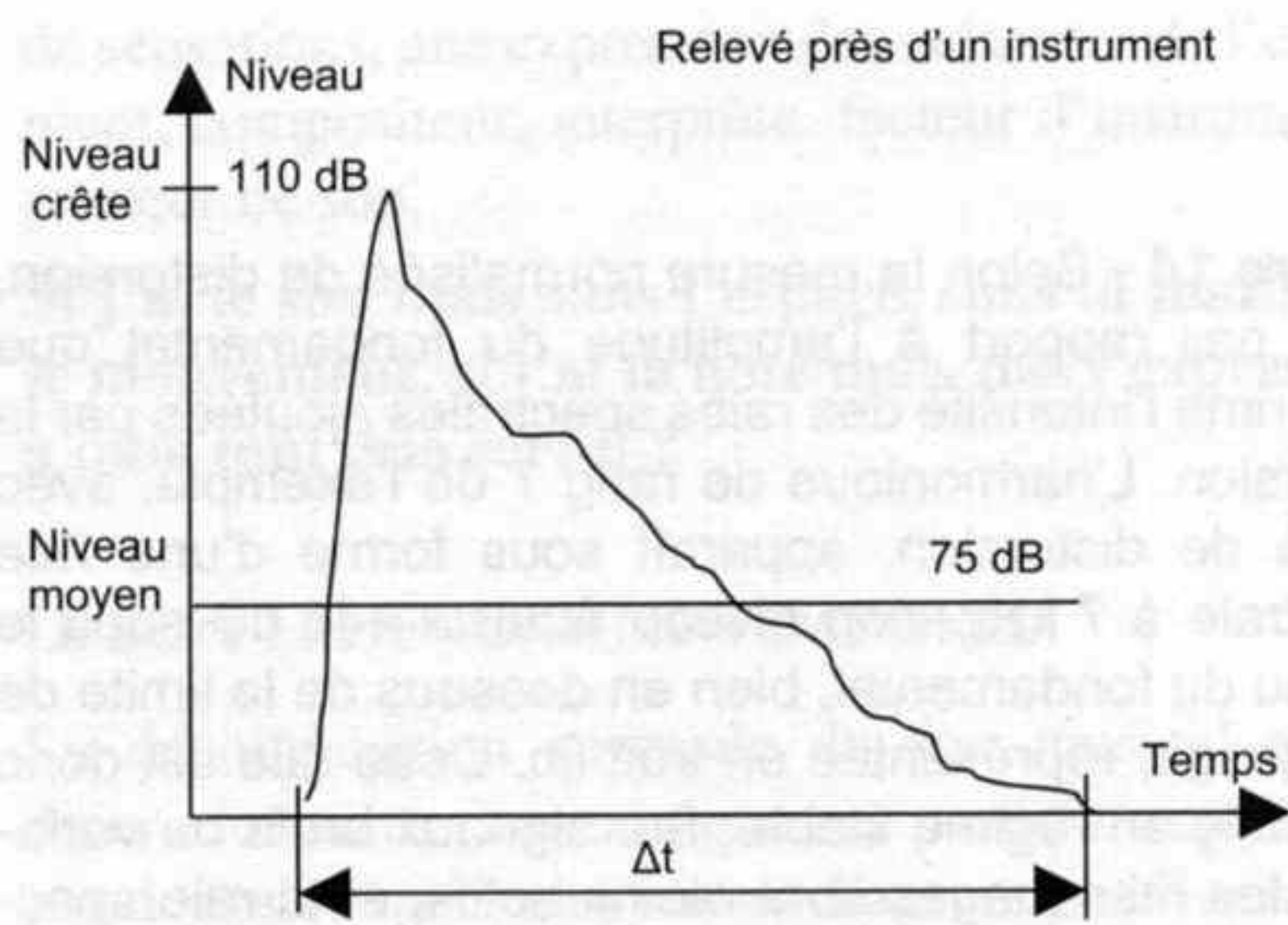
Une distinction doit être établie en ce qui concerne les niveaux sonores maximaux supportables par l'appareil auditif. Il est communément admis que le seuil de douleur auditive se situe vers 120 dB SPL (Sound Pressure Level, niveau de pression acoustique) et qu'une exposition prolongée à un niveau supérieur à 90 dB provoque une fatigue auditive, puis des lésions irréversibles si l'exposition se prolonge. Les niveaux dont il est question ici sont des **niveaux de pression acoustique continus équivalents**, appelés L_{eq} . Un même niveau équivalent, de 80 dB par exemple, peut être obtenu avec un bruit d'amplitude constante égale à 80 dB, tel qu'un bruit de machine tournante, ou avec un bruit intermittent, égal à 110 dB en crêtes répétitives séparées par des silences, tel qu'un martèlement. La musique peut donc être écoutée sans danger à un niveau L_{eq} maximal de 90 dB pendant plusieurs heures, ce qui correspond à des crêtes de l'ordre de 105 à 110 dB selon la dynamique du système.

Figure 12 - Ce relevé, établi à proximité d'un piano, avec un sonomètre de crête à enregistreur graphique, montre l'évolution au cours du temps du niveau sonore d'une note isolée. Après une crête élevée au moment de l'attaque de la note, le niveau décroît d'abord rapidement puis plus lentement, avec des irrégularités dues à des résonances ou des échos. Le niveau de crête est difficile à mesurer avec précision, surtout pour des instruments de percussion, où les crêtes correspondant à des impacts sont extrêmement brèves, quelques millisecondes. Pour un niveau moyen très modéré, de l'ordre de 75 dB, les niveaux crête peuvent atteindre plus de 100, voire 110 dB pour des percussions. Ces niveaux sont mesurés à 1 m sauf indication contraire.

Figure 13 - Note de piano de la figure précédente, le relevé est établi cette fois à proximité d'une enceinte. L'évolution au cours du temps est différente : la crête a été compressée, à 105 dB et étalée dans le temps. Si l'amplitude crête peut sembler finalement "pas si mal", elle correspond cependant à une puissance acoustique presque 4 fois trop faible !... L'attaque est moins sèche, moins vive, dédoublée par le décalage dû à la non cohérence temporelle des H-P. L'instrument paraît moins présent. Par contre le niveau moyen a augmenté à cause du traînage provoqué par la réverbération. À l'instant t, où l'extinction de la note, rappelée en pointillés, devrait être perçue parfaitement détachée dans un espace aéré, transparent, elle est noyée dans une masse sonore confuse.

Les figures 12 et 13 montrent que la dimension temporelle, indispensable au dessin rythmique, par lequel le mouvement est exprimé, et qui doit donner vie à l'expression musicale, est écrasée, aplatie. Son relief est comme érodé par le système de reproduction. Les impulsions sont étalées sur l'axe du temps, et si l'énergie de départ est conservée, par contre sa distribution temporelle est très différente. Au lieu d'une énergie hautement concentrée dans des espaces de temps courts, séparés par des instants d'énergie faible, il y a dilution, dispersion temporelle de cette énergie. L'impression de présence des instruments, et surtout l'aération, la sensation de l'air qui environne les interprètes, sont absentes. La musique paraît indéniablement moins vivante, et perd beaucoup de sa spontanéité.

Le champ réverbéré par les parois du local porte une lourde responsabilité dans cette dégradation, mais la non-cohérence temporelle des filtres séparateurs d'une écrasante majorité d'enceintes acoustiques, nuit également pour une grande part au réalisme, en particulier sur les attaques. Ce sujet est très controversé, tant il est vrai que la cohérence temporelle n'apporte aucune amélioration à des haut-parleurs de faible diamètre (17 cm) et de faible rendement (90 dB), utilisés dans un local très réverbérant. Décidément les modes permettent de cacher bien des faiblesses.



Les vibrations parasites, qui se propagent jusqu'aux composants sensibles, microphoniques, produisent un traînage important, souvent localisé à quelques fréquences, et qui a pour effet d'étirer en longueur les notes, en leur ajoutant une extinction monocorde. Au premier rang de ces composants sensibles se trouvent les parois des enceintes acoustiques, rayonnant parfois plus d'énergie que le haut-parleur lui-même !

Les effets de mémoire des isolants, ceux des câbles, des cordons mais aussi des condensateurs, interviennent également sur la répartition temporelle de cette énergie. Une partie de l'énergie est absorbée par l'isolant lors des crêtes du signal, puis est restituée ensuite, d'une manière assez imprévisible, sous forme de signaux à large spectre, contenant des fréquences audibles.

Les mesures habituelles de distorsion ne rendent aucun compte de ces phénomènes, car elles sont établies sur des signaux parfaitement stables, et la dimension temporelle n'est absolument pas prise en compte. D'autre part, cette distorsion mesurée est exprimée en pourcentage par rapport au signal fondamental, alors qu'une expression par rapport aux niveau existant, dans la bande de fréquence considérée, dans le signal original serait plus révélatrice. Autrement dit il conviendrait de mesurer l'amplitude des harmoniques

Figure 14 - Selon la mesure normalisée de distorsion, c'est par rapport à l'amplitude du fondamental que s'exprime l'intensité des raies spectrales ajoutées par la distorsion. L'harmonique de rang 7 de l'exemple, avec 0,5 % de distorsion, apparaît sous forme d'une raie spectrale à 7 kHz, son niveau étant à -46 dB sous le niveau du fondamental, bien en dessous de la limite de masquage, représentée en trait fin. Cette raie est donc inaudible en régime stable. Sur signaux brefs ou variables, les masquages sont moins actifs, et la raie spectrale à 7 kHz est parfois audible.

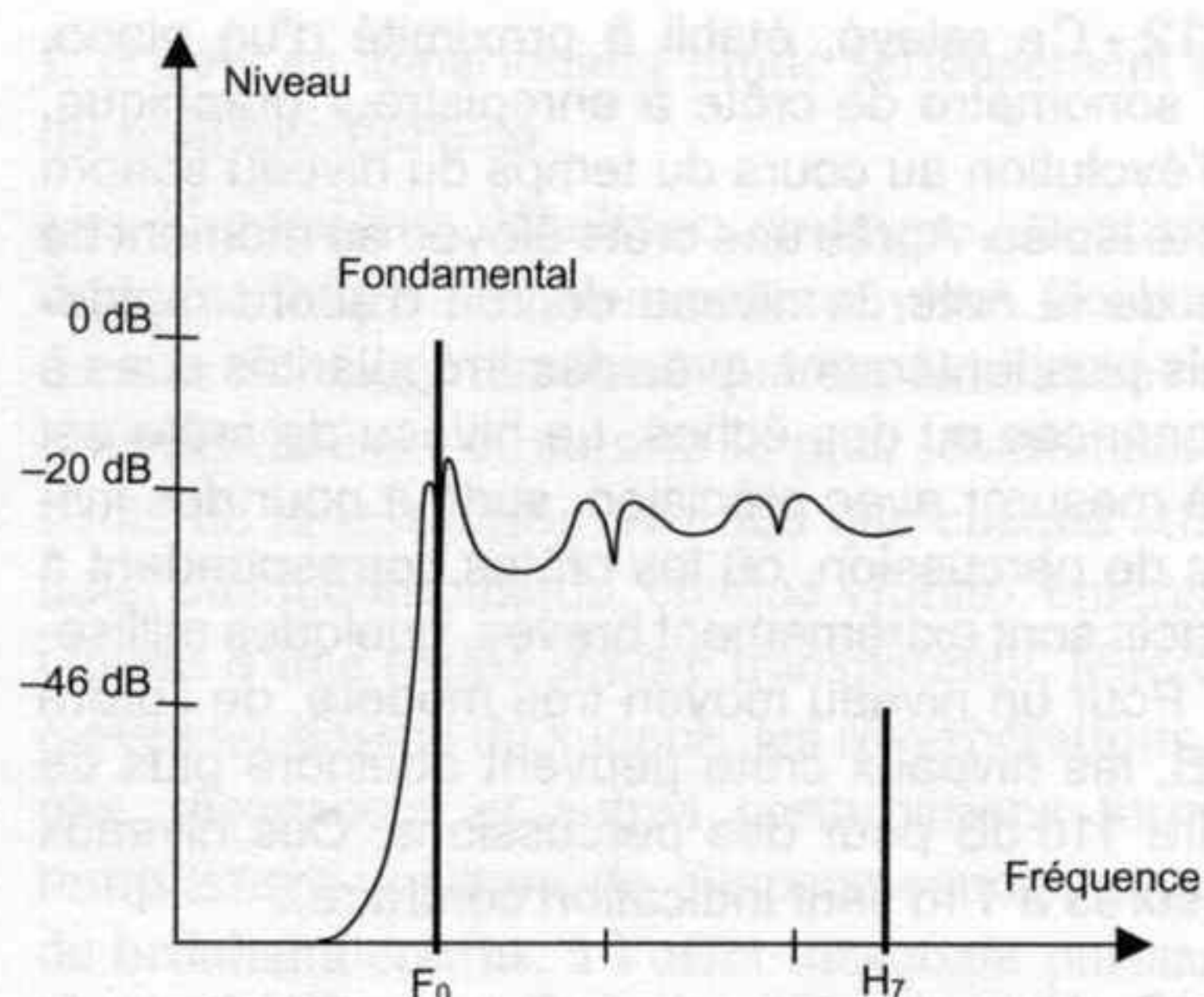
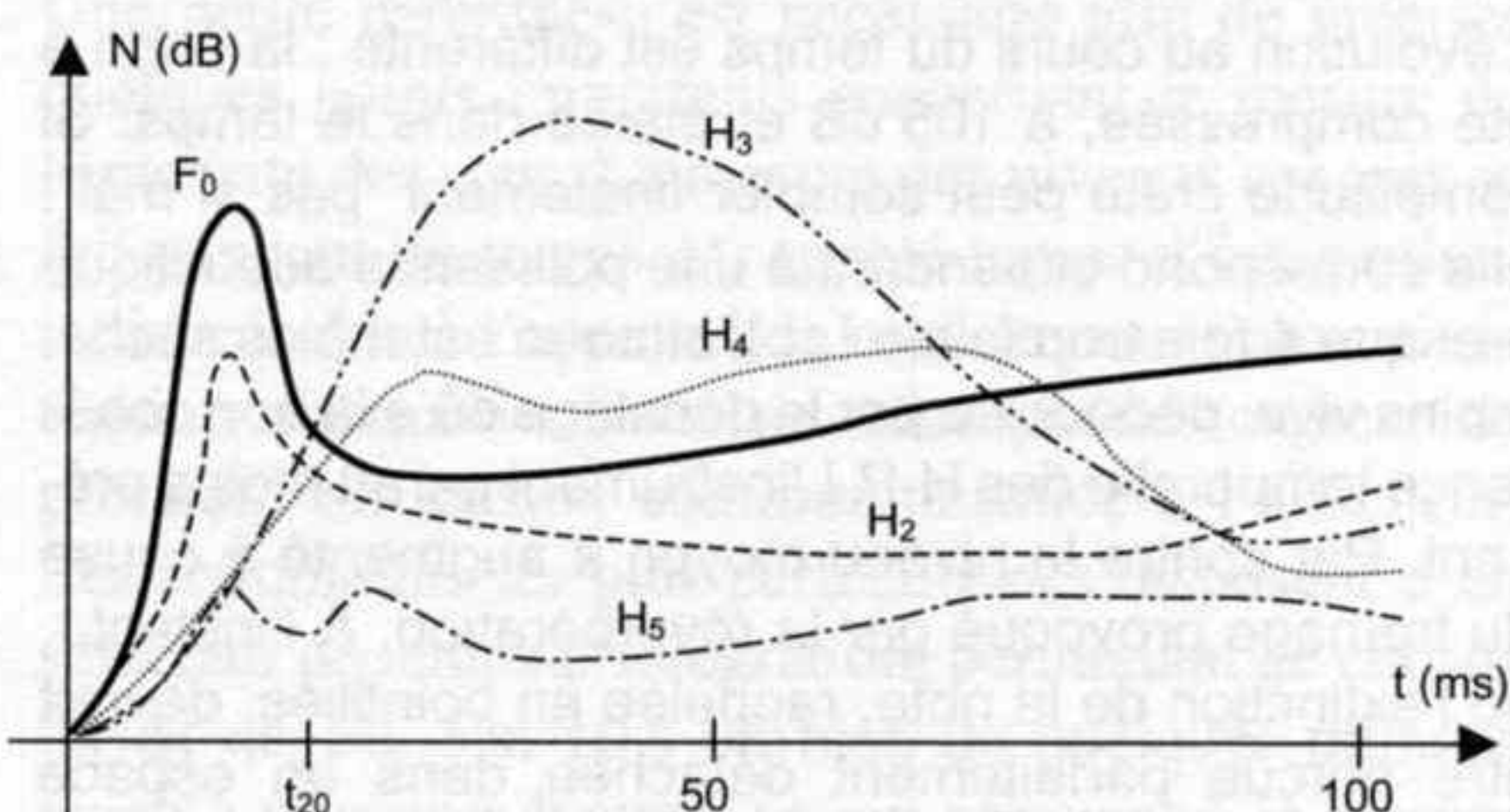


Figure 15 - Le spectre d'une note de musique évolue rapidement au cours du temps, en particulier pendant l'attaque. Le dessin ci-contre reproduit les variations de niveau des 5 premiers harmoniques d'une note de trompette pendant les 100 premières ms. À l'instant repéré t_{20} juste après l'attaque, H_3 et F_0 ont des niveaux identiques, ainsi que H_2 et H_4 ...

(d'après Winkel, *Techniques de l'Ingénieur*)



non seulement pendant mais aussi juste **après** l'extinction du signal – complexe, de préférence – et d'indiquer l'amplitude de chaque raie spectrale par rapport à l'amplitude qu'il devrait y avoir à cette fréquence si la distorsion était absente. Par exemple, pour un son pur à 1 000 Hz, de niveau 100 dB, une distorsion constituée exclusivement de l'harmonique de rang 7, correspondant à 0,5 % de distorsion, se trouve à -46 dB sous le niveau du signal, et à la fréquence de 7 kHz. Or à cette fréquence de 7 kHz il ne devrait y avoir aucun signal (figure 14) !

En régime stable, avec des sons purs, de fréquence et de niveau constants, un effet de masquage important fait que le fondamental est perçu seul, d'autant plus que son niveau est élevé. La méthode de mesure habituelle, en prenant pour référence le niveau du fondamental, considère donc que les produits de distorsion sont masqués, non audibles, sans importance. Pourtant en régime musical, le fondamental arrive tantôt avant, tantôt après les harmoniques, qui eux-mêmes s'établissent dans un ordre typique du timbre de l'instrument. Ce fondamental ne présente un niveau élevé que pendant un temps parfois très bref, insuffisant pour produire un effet de masque, mais tout à fait capable d'induire des distorsions, c'est-à-dire d'ajouter des raies spectrales se combinant avec les formants du timbre, par addition si elles se trouvent en phase, ou soustraction lorsqu'elles sont en opposition de phase. Le

timbre résultant sera faussé, surtout sur l'attaque de la note, et donnera une impression peu réaliste, alors que le chiffre de distorsion annoncé est faible et digne d'éloges !

L'exemple concret d'une note de trompette (figure 15) montre combien la dimension temporelle est essentielle. Les variations d'intensité des harmoniques sont la signature de l'instrument, autant que du jeu de l'interprète, et aucune raie spectrale ne peut prétendre constituer une référence pour évaluer le niveau des autres, surtout pas en valeur moyenne sur un laps de temps étendu.

Les distorsions indiquées par les constructeurs et mesurées selon la norme ne rendent pas compte des phénomènes temporels, ni les traînages dus aux réverbérations ou aux résonances diverses (local, parois d'enceintes) ni les vibrations captées par effet microphoniques, ni les effets de mémoire des isolants. Bien sûr, dès que ces sujets sont abordés, les partisans de la mesure normalisée rétorquent avec conviction que ces effets sont négligeables puisqu'ils n'apparaissent pas aux mesures !

Ces effets sont très loin d'être négligeables, c'est la mesure actuelle qui est incapable de les mettre en évidence, car elle est basée sur un modèle mathématique qui les ignore superbement...

En attendant un progrès dans ce domaine, il est préférable de se fier à ses oreilles, à leur perception très fine, car le système auditif détecte parfaitement les distorsions harmoniques impaires de rang élevé, même lorsque leur niveau est faible. Les signaux musicaux aux fréquences élevées étant eux-mêmes très faibles, comment devrait-on définir le taux de distorsion ? Et par rapport à quoi ? Le définir par rapport au niveau du fondamental est un non-sens évident !

L'ensemble de ces limitations ampute l'événement sonore d'une partie essentielle de son contenu. Les informations d'**espace** étant soit de très faible niveau pour ce qui est des réverbérations naturelles du lieu de la prise de son, soit de très basse fréquence pour ce qui est des résonances, indicatrices des dimensions de ce lieu, ces informations sont souvent inexistantes à la reproduction, masquées car remplacées par celles du lieu d'écoute.

La **matière** sonore est également absente, sauf dans une bande de fréquence située dans le médium, où tous les instruments semblent fait du même matériau à la sonorité assez synthétique. Le "grain" qui révèle autant la matière de l'instrument que le mode de vibration, lié au jeu de l'interprète, est associé à des variations très rapides et intenses du niveau de chaque harmonique. Le manque de rapidité et l'incapacité du système à reproduire ces variations tend à produire un grain lisse et uniforme. La non cohérence temporelle, en particulier au niveau des filtres séparateurs de fréquence des enceintes acoustiques, produit également un effet de lissage, de flou sur le rendu du grain, flou qui n'a rien d'artistique.

La **taille** de l'instrument et l'**énergie** rayonnée sont deux grandeurs liées à l'amplitude des sons graves, à leur dynamique. Ces informations manquent également, car compressées par le haut-parleur de grave et l'enceinte, tous deux nettement trop petits. La mollesse des sons graves, le traînage par manque d'amortissement autant que par résonances, ont tendance à étaler cette énergie sur l'axe du temps, au lieu de la conserver concentrée en des instants brefs. L'instrument se répand au lieu d'occuper un emplacement précis, s'étale au lieu de rayonner.

Le **mouvement** est ramolli, ralenti, artificiellement adouci par le manque de dynamique, par l'écrasement des niveaux de crêtes des attaques de notes, départs de gestes, autant que par l'étalement temporel de l'énergie.

Au final, je serais tenté de dire que ce qui reste de l'événement musical lors de sa reproduction, est le moins important : la note jouée (que je reconnais sur une simple radio) qui n'est qu'un prétexte, qu'un support ou plutôt un vecteur de communication, chargé de transporter jusqu'à moi une quantité d'informations,

de sensations, une expression des créateurs de l'événement, compositeur, interprète, facteur d'instrument et preneur de son.

Si j'ai le son mais sans l'espace, sans la matière ni le mouvement, si j'ai la note mais pas l'expression, à quoi tout cela sert-il ?

LE SON : PHÉNOMÈNE TEMPOREL

La décomposition spectrale du son musical en ses divers formants, harmoniques et partiels, représentés par des raies spectrales sur un diagramme Niveau/Fréquence est tout à fait insuffisante pour décrire correctement le phénomène sonore. Une représentation **tridimensionnelle** est beaucoup mieux adaptée, faisant intervenir un troisième axe, celui du temps. La dimension temporelle fait apparaître que la décomposition spectrale n'est pas figée, sauf pour un son continu, ce qui est rare en musique car totalement inexpressif...

L'amplitude des formants fluctue au cours du temps, et leur apparition obéit à des relations de phase précises, donc à des décalages temporels particuliers, qui sont la signature de l'instrument et de l'interprète. Considérer le timbre comme une simple combinaison d'harmoniques ayant chacun une amplitude spécifique est par conséquent très réducteur.

Cette représentation tridimensionnelle (voir figure 16), comporte alors 3 axes, Intensité, Fréquence, Temps, et 3 plans de projection, Mélodique (Fréquence/Temps), Harmonique (Intensité/Fréquence), et Dynamique (Intensité/Temps).

Le plan harmonique est le plus souvent utilisé pour caractériser les résultats obtenus avec le matériel audio, soit par des courbes Niveau/Fréquence dites courbes de réponse, soit par des spectres de bruit ou de distorsion. C'est le traditionnel diagramme Amplitude/Fréquence universellement utilisé, mais qui ne peut rendre compte que du fonctionnement sur signaux stables, continus, donc dépourvus de transitoires ! Cette hypothèse est hélas souvent oubliée.

Le plan mélodique est plus utilisé par les musiciens ou les facteurs d'instruments car il permet la représentation des évolutions spectrales des notes, pendant l'attaque, le maintien, puis l'extinction. Ces évolutions sur l'axe du temps montrent les instants d'apparition des différents formants sonores, sur un graphique appelé **sonagramme**.

Le plan dynamique est très peu utilisé. Certains fabricants d'enceintes acoustiques en font usage, sous forme de courbes énergie/temps appelées CET, ou bien présentent des courbes tridimensionnelles CSD – pour "cumulative spectral decay" ou décroissance

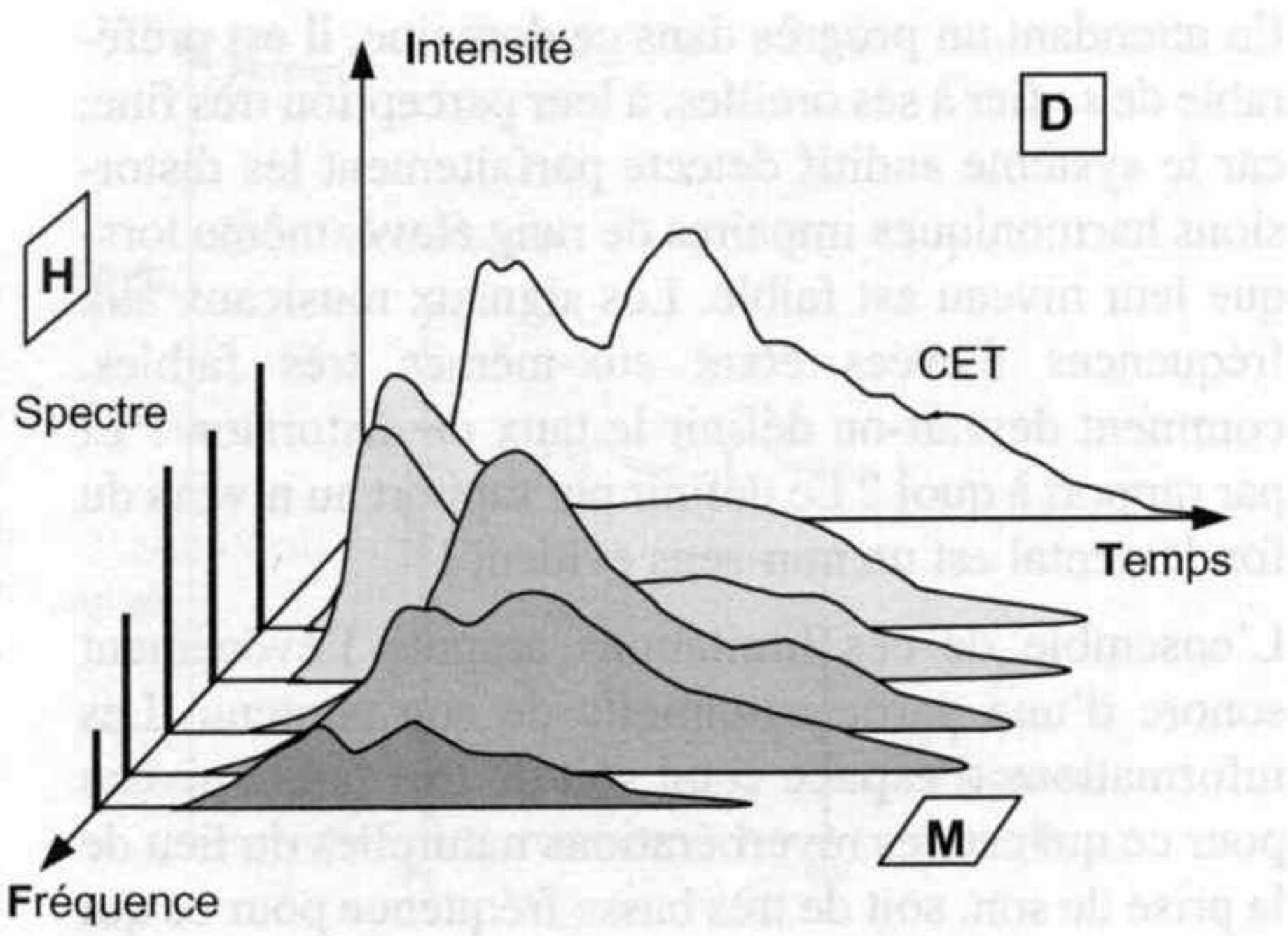
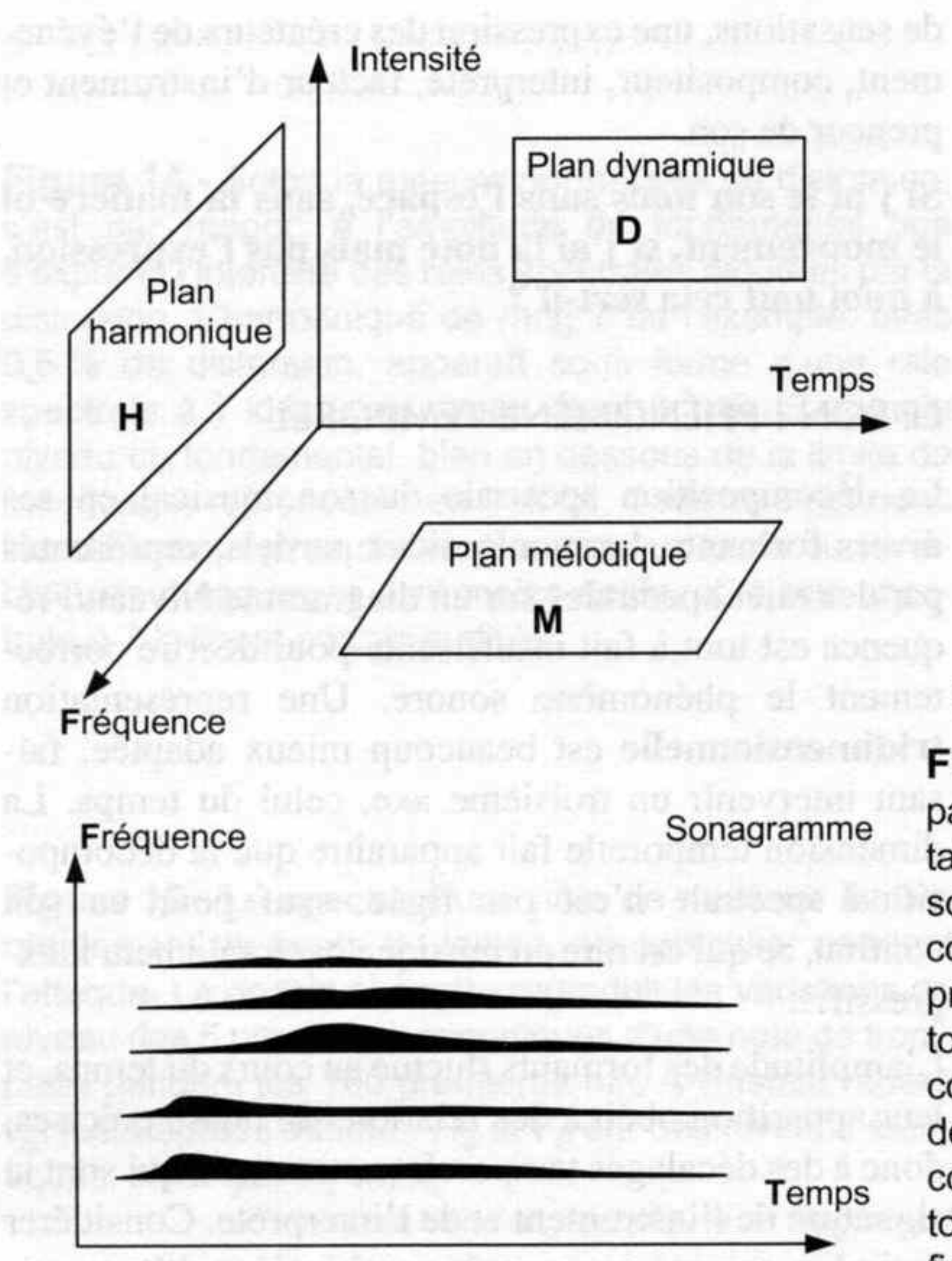


Figure 16 - Le phénomène sonore est décrit physiquement par 3 grandeurs fondamentales, ce qui impose une représentation tridimensionnelle. Les représentations habituelles que sont le spectre de fréquence, projection du phénomène complet dans le plan harmonique, ou la courbe énergie/temps, projection dans le plan dynamique, ne rendent pas compte totalement et clairement du phénomène. Le sonagramme ci-contre, projection dans le plan mélodique, avec représentation de l'intensité sonore par l'épaisseur du tracé, est un peu plus complet. Son utilisation permet de faire apparaître les transitoires d'attaque et leur contenu fréquentiel, ce que le spectre, figé dans le temps, ne peut représenter.

globale du spectre – dites “waterfall” faisant apparaître les traînages, résonances et réflexions internes de l'enceinte après extinction du signal à large bande.

Le même diagramme à l'attaque d'une note, ou pire encore dans une salle d'écoute, serait sans doute très instructif !

L'importance de la période **transitoire** a été démontrée par Stumpf, qui a mis en évidence que sa suppression empêche la reconnaissance de l'instrument, et parfois même sa classification en vent, corde ou autres.

La durée de ce transitoire est très variable, souvent inférieure au temps d'intégration généralement admis pour le système auditif. En effet, cette “constante de temps” de l'oreille est évaluée sur des signaux stables, lesquels entraînent une augmentation de ce temps, rendue nécessaire pour détecter un éventuel changement du contenu fréquentiel. Sur signaux musicaux il semblerait que le système auditif soit capable de déceler des variations rapides du contenu spectral, sur des durées transitoires très inférieures à la milliseconde.

Assez longue pour les instruments à vent, avec une durée de l'ordre de 20 ms par exemple pour la trompette, ou les cuivres d'une manière générale, 50 ms pour la clarinette ainsi que d'autres bois, 200 ms pour la flûte traversière, réputée pour son absence d'attaque, et jusqu'à 800 ms pour les notes les plus basses de

l'orgue, cette phase transitoire est beaucoup plus brève pour la parole, avec moins de 6 ms pour les consonnes non vocales, et encore plus courte pour les instruments de percussion, ainsi que ceux à cordes frappées ou pincées, avec des durées pouvant descendre en dessous de la milliseconde.

La décomposition spectrale, dans le plan harmonique, de cette phase transitoire, fait apparaître un bruit **grave** à spectre continu dont l'étendue fréquentielle Δf se déduit directement de la durée T du transitoire :

$$\Delta f = 1 / T$$

C'est par exemple le bruit puissant, percutant, entendu à l'attaque des consonnes “plosives” (P, B, T...) et dont le niveau transitoire est assez élevé pour saturer les microphones ou leurs préamplis !

Ce bruit de transition, de niveau très élevé, est très souvent atténué lors de la reproduction, à la fois par la compression dynamique du système de reproduction, en particulier le haut-parleur de grave, et par la chute de niveau naturelle aux basses fréquences des enceintes acoustiques courantes.

La rapidité du phénomène transitoire laisse faussement penser que ce sont les hautes fréquences qui le reproduisent. Ce bruit correspond en fait à un échange brutal d'énergie, la plus grande part de cette énergie étant véhiculée par les basses fréquences, comme dans tout phénomène ondulatoire. C'est donc la rapidité

d'établissement des sons graves à fort niveau qui permet la retranscription correcte des attaques, et autorise par conséquent l'identification immédiate de la source sonore.

Pendant cette phase transitoire, les raies spectrales apparaissent, superposées au bruit de transition, puis se développent au cours du temps. La même note jouée plusieurs fois de suite, autant que possible de manière identique, montre des variations d'amplitude de ces raies peu reproductibles. Par contre les instants d'apparition et d'extinction des formants semblent obéir à des décalages temporels précis, ce qui laisse penser que le spectre de phase a plus de signification que le spectre d'amplitude, et que la représentation par sonagramme décrit l'objet sonore mieux que l'analyse spectrale.

Les partisans des théories de Fourier, basées sur cette décomposition spectrale, assurent que l'oreille est réputée insensible à la phase. Cela est tout à fait exact pour un son pur unique. Un déphasage n'est rien d'autre qu'un retard temporel, or un son écouté après déphasage, c'est-à-dire "plus tard", reste identique à lui-même, fort heureusement...

Par contre, il n'en va pas de même si deux sources sonores sont entendues simultanément :

- La forme d'onde résultante dépend de la phase relative des deux formants :
 - L'amplitude crête, et le facteur de crête, dépendent du déphasage.
 - La répartition énergie/temps, en particulier au moment de l'attaque, varie également avec le déphasage.
- La localisation spatiale est fonction du déphasage, en particulier aux fréquences basses :
 - Le repérage angulaire est lié au déphasage des signaux droite / gauche.

- La position en profondeur est révélée par le déphasage entre onde directe et premières réflexions.

Ainsi pour un son complexe, présentant une évolution spectrale rapide, l'oreille est très sensible aux déphasages entre composantes spectrales.

L'expérience acquise par les audiophiles ayant travaillé la mise en phase de systèmes de haut-parleurs multi-amplifiés, amène à établir les conclusions suivantes :

- Un décalage temporel de 1 ms d'une partie du spectre modifie sensiblement la perception du timbre transitoire, en particulier des bruits de chocs et de percussions.
- Un déphasage inférieur à 0,1 ms et jusqu'à 0,06 ms chez certaines personnes modifie :
 - La perception de l'étendue et de la distance apparente d'une source, ainsi que sa focalisation.
 - L'identification de la matière sonore.
 - L'impression de durée, de rapidité, du mouvement.
 - La ponctualité, précision de localisation du point d'impact, pour un son de percussion.

De tels essais sont faciles à mener en écoutant seulement les voies aiguës droite et gauche et en introduisant un décalage temporel, qui fera nettement varier les perceptions liées à l'espace. D'autres essais en introduisant des déphasages entre voies grave et médium, ou médium et aiguë, feront varier la sensation de matière et la transparence de l'espace.

La prise en compte de cette dimension temporelle fait apparaître également des particularités concernant la **spatialisation** du son. Ce sont en effet les réflexions des ondes sonores sur les parois du local de prise de son qui, en atteignant l'auditeur avec un décalage temporel particulier, apportent les informations d'espace, mettant la source en situation dans un volume, dans un lieu, aux caractéristiques acoustiques reconnaissables.

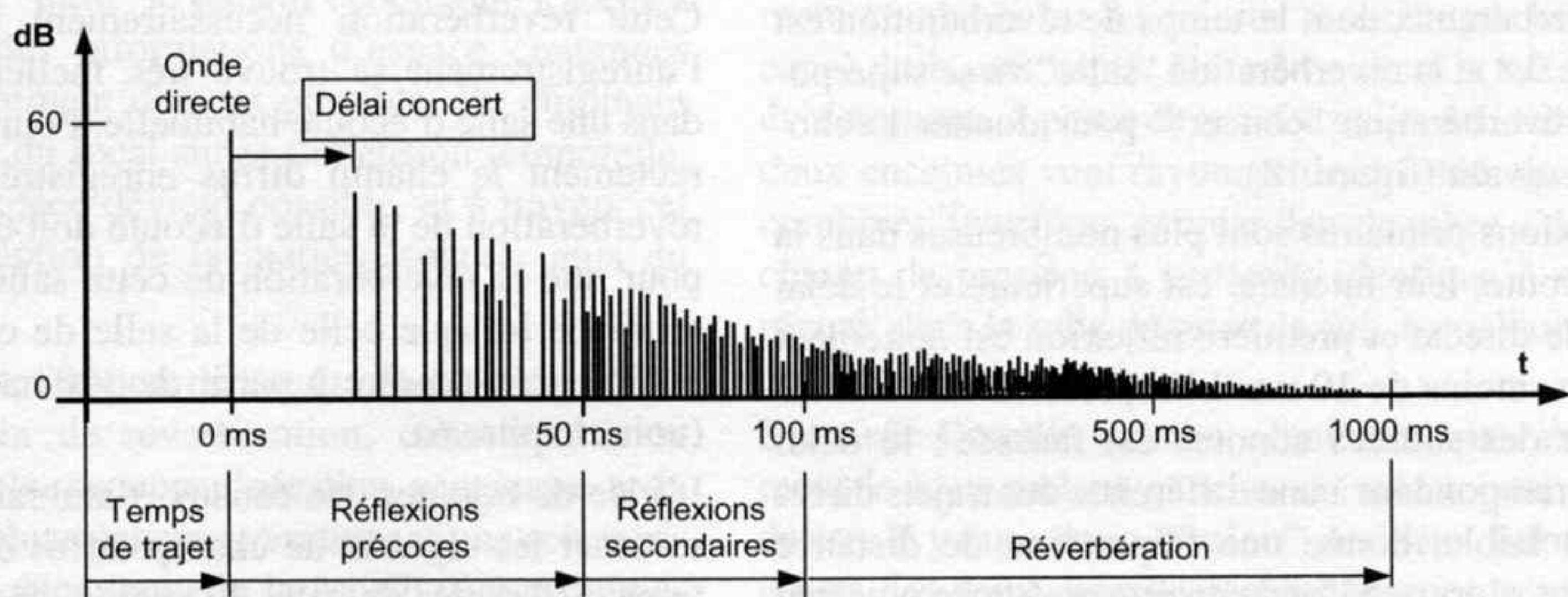


Figure 17 - Échogramme d'une salle de concert.

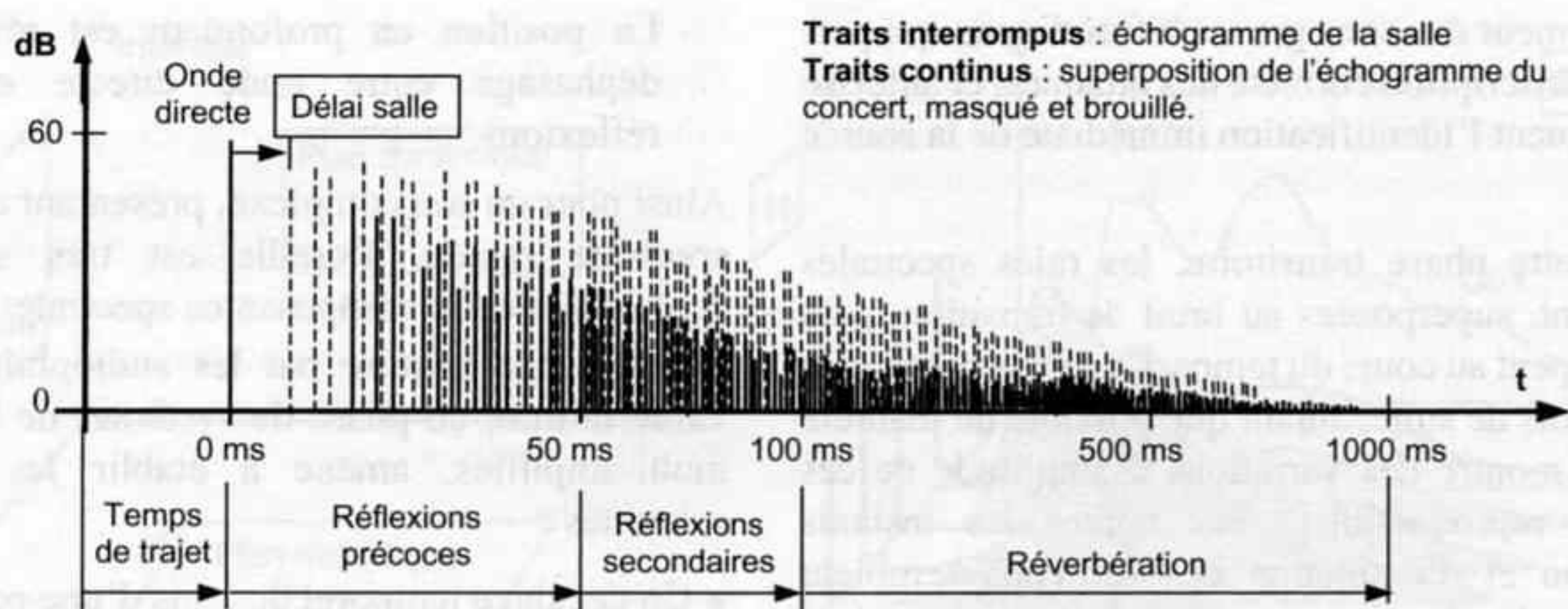


Figure 18 - Échogramme d'une salle d'écoute.

On distingue généralement les premières réflexions, celles qui apparaissent dans un délai inférieur à 50 ms, et le champ diffus plus tardif et décroissant lentement entre 150 et 300 ms.

Les premières réflexions fusionnent avec l'onde directe et ne sont pas perçues séparément. Elles en renforcent l'intensité, sans perturber la localisation angulaire qui se fait grâce au premier front d'onde, cet effet dit de précession ayant été décrit par Haas qui lui a donné son nom. Ces réflexions apportent selon leur intensité, leur délai et leur contenu spectral une information de **distance apparente** de la source sonore.

Le champ diffus apporte des informations sur le volume de la salle, les sons enveloppants renvoyés par les parois présentant une décroissance d'autant plus lente que la salle est grande et ses parois étendues.

Un échogramme typique d'une grande salle montre ces différentes réflexions (figure 17 page précédente). Cet échogramme fait apparaître un délai entre l'onde directe et la première réflexion d'environ 20 ms, le nombre de réflexions précoces étant relativement faible dans les premières 50 ms. La décroissance est à peu près régulière jusqu'à 1 s, valeur approximative du temps de réverbération de cette grande salle.

Si maintenant le son enregistré dans cette salle est reproduit par des haut-parleurs dans une petite pièce, assez réverbérante, dont le temps de réverbération est d'environ 0,8 s, la réverbération "salle" va se superposer à la réverbération "concert" pour donner l'échogramme suivant (figure 18).

Les réflexions primaires sont plus nombreuses dans la salle d'écoute, leur intensité est supérieure et le délai entre onde directe et première réflexion est nettement plus court, moins de 10 ms. L'impression de distance apparente des sources sonores est faussée : le délai réduit, correspondant à une différence des trajets direct / indirect faible, donne une impression de distance importante, alors que l'onde directe renforcée plus que nécessaire par les réflexions précoces, donne par son

niveau plus élevé une impression de distance faible. L'**incohérence** de ces deux perceptions se traduit par une sensation d'étalement en profondeur des sources sonores, d'étirement artificiel vers l'arrière, comme si la perspective était accentuée.

La vraie impression de profondeur de la scène sonore est différente, et se traduit par des perceptions de sources ponctuelles, non étalées même lorsque situées en arrière-plan.

D'autre part la réverbération réelle de la salle de concert est masquée par celle de la salle d'écoute, prépondérante. La réverbération est dosée au mixage à un niveau généralement plus bas que nature, car l'absence de la vision pendant l'écoute de l'enregistrement, effectuée en "aveugle", diminue la focalisation auditive, par absence du cône de présence dans le champ visuel. Cet effet d'orientation du champ de perceptions auditives diminue d'environ 15 dB les sons perçus en provenance de directions hors du champ visuel, soit + ou -30° de part et d'autre de l'axe frontal, atténuant ainsi la perception du champ diffus dans la salle de concert. L'écoute en aveugle, sans cette atténuation, provoque une augmentation relative du champ réverbéré perçu, qui doit par conséquent être atténué à la prise de son, afin de conserver une focalisation correcte des sources sonores.

Cette réverbération nécessairement affaiblie dans l'enregistrement se trouve très facilement masquée dans une salle d'écoute habituelle. Pour percevoir correctement le champ diffus enregistré, le temps de réverbération de la salle d'écoute doit être assez court pour que la réverbération de cette salle d'écoute soit terminée lorsque celle de la salle de concert devient audible, c'est-à-dire à partir de 300 ms au maximum (voir chapitre 6).

L'idée de rajouter des canaux d'ambiance chargés de restituer les signaux de champ diffus dans des directions différentes de celle du champ direct, de manière entièrement décorrélée, ne solutionne absolument pas

le problème. Ces canaux doivent en effet diffuser les signaux de réverbération à un niveau assez élevé pour qu'ils émergent de la réverbération de la salle. Ce niveau élevé du champ diffus, qui devient alors prépondérant sur le champ direct, baigne l'auditeur dans une ambiance enveloppante où la focalisation des sources est très faible voire nulle, où le fondu est maître, créant un étalement peu réaliste, un grossissement des sources sonores.

Cette augmentation du niveau des sons diffus va exactement à l'encontre d'une recreation convenable de l'impression réaliste de l'espace.

Bien sûr, la reproduction en "multicanal" ajoute une illusion d'espace, de profondeur et de volume d'air qui manque d'habitude à la plupart des systèmes courants. Le passage de 2 à 5 canaux procure une impression spatiale nettement améliorée, et qui atteint – en apparence – pour une dépense infiniment moindre celle des gros systèmes 4 voies à pavillons multi-amplifiés.

Mais la restitution de la dimension dynamique est absente, car liée à la sensibilité et à la puissance acoustique rayonnée par les haut-parleurs, ces grandeurs étant ridiculement faibles dans une immense majorité de cas.

Sont également absentes la restitution de la matière sonore, de sa texture, ainsi que du mouvement, toutes deux liées à la rapidité de réponse temporelle et à l'émergence de petits signaux au-dessus de la masse sonore. Le niveau élevé du champ diffus produit un masquage de ces informations, la répartition temporelle de l'énergie étant encore plus étalée qu'auparavant.

La spatialisation de la source – localisation en direction – est donc améliorée au détriment de sa focalisation, de sa texture – identification – et de son aération.

La restitution de l'espace de manière réaliste passe obligatoirement par la recreation de la matière sonore qui emplit cet espace et le révèle : le silence !

C'est en faisant "taire" le local d'écoute que l'accès à la perception des informations d'espace contenues dans l'enregistrement devient possible. En éliminant l'action néfaste du local sur la dimension temporelle, le rendu de l'espace devient possible, et à travers cet espace la perception de la matière sonore, puis du mouvement.

Alors seulement, l'apport du "multicanal", en spatialisant les signaux de réverbération, conservés à un niveau très faible, procure l'aération nécessaire et la séparation des plans sonores, produisant une scène tridimensionnelle dans laquelle la focalisation est améliorée par la séparation nette des sources.

Un système stéréophonique à deux canaux, équipé de pavillons et mis en œuvre dans une salle traitée acoustiquement est capable de produire, sur une prise de son naturelle :

- Des sources centrales parfaitement ponctuelles, focalisées et aérées.
- Une répartition droite/gauche et avant/arrière de sources ponctuelles séparées, focalisées.
- Des sources latérales situées au-delà des enceintes, à droite et à gauche.
- Une sensation de profondeur variable selon la prise de son, jusqu'à une impression de très grande salle, les réflexions semblant venir de loin derrière ou au-delà des haut-parleurs.
- Des sources situées en avant du plan des enceintes, décrivant des mouvements parfaitement perceptibles.
- Des sources situées à des hauteurs différentes, lorsque la prise de son le permet (très rarement).
- Des perceptions de matières sonores "palpables".
- Des perceptions de mouvements très vivants.

Avant d'ajouter des canaux supplémentaires, mettons déjà correctement en œuvre les deux dont nous disposons !

La nature a en effet doté la plupart des êtres vivants de deux capteurs de vibrations acoustiques, et deux seulement. Il faut donc croire que deux informations, légèrement différentes bien entendu, sont suffisantes pour renseigner complètement sur la source sonore, en direction et distance – localisation – nature et cause – identification. De la même manière, deux yeux suffisent à la perception du relief, par analyse du champ visuel, ce qui exige un post-traitement par le cerveau après acquisition des perceptions.

Deux canaux sont suffisants pour recréer le champ sonore lors de la reproduction, à condition qu'aucune diaphonie même minime, ne viennent mélanger les signaux électriques droits et gauche envoyés aux deux haut-parleurs.

La voie droite ne doit en effet reproduire qu'exclusivement ce que le ou les micros associés par mixage au canal droit, ont capté. De même pour la voie gauche évidemment. À partir de ces deux signaux distincts, les deux enceintes vont rayonner deux ondes qui vont se combiner, interférer, et créer dans la pièce d'écoute un champ de pression à peu près identique à celui qui régnait dans la salle de prise de son, à quelques mètres des sources.

Bien sûr l'oreille gauche n'entendra pas exclusivement le haut-parleur gauche, de même pour l'oreille droite. Il y aura donc "fusion" des deux informations issues des deux canaux stéréophoniques, tout comme il y a fusion lors de l'écoute directe du concert. Les

deux oreilles entendent toutes deux le violon situé à gauche de la scène, et cela n'a jamais empêché de le localiser correctement à gauche, même avec les yeux fermés... Les différences d'intensité et de phase des deux ondes perçues par les deux oreilles sont indispensables au cerveau pour reconstituer l'espace de l'événement sonore, pour en dresser une cartographie mentale. De la même manière il y a fusion des deux images captées par les deux yeux afin d'obtenir une superposition idéale, suffisante à la cohérence de l'espace perçu, mais pas complète afin d'y percevoir un relief !

Cette fusion des deux ondes sonores droite et gauche, créant au final une diaphonie élevée des deux canaux, est vue par certains spécialistes comme un grave problème inhérent à la stéréophonie. Ils considèrent par conséquent que chaque oreille ne devrait recevoir que le signal sonore qui lui est a priori destiné, et avancent que seule l'écoute au casque peut recréer l'illusion correcte de l'espace sonore, à moins de disposer entre les deux enceintes une cloison séparatrice totalement étanche et inerte, se prolongeant jusqu'au point d'écoute !

Cette approche me semble erronée, car contre nature. Une expérience simple peut montrer que la fusion des ondes droite et gauche est nécessaire : pour cela un signal de test, enregistré avec différentes positions de la source sonore, est requis. J'ai effectué ce test, avec l'aide de plusieurs personnes, en utilisant le disque test volume 1 de Chesky Records, sur lequel la plage 10 fait entendre la voix de David Chesky, tout d'abord au centre de la scène sonore, ensuite à mi-chemin entre centre et droite, puis à droite, comme sortant du haut-parleur droit, et enfin au-delà de l'enceinte droite, pour finir avec le même parcours du côté gauche.

La position apparente de la source est obtenue lors du mixage par une balance particulière des niveaux droit et gauche – stéréophonie d'intensité – mais aussi par un déphasage correct des signaux droit et gauche, ce qui permet de situer la source avec une grande précision, même en dehors de l'espace compris entre les deux enceintes.

L'écoute en stéréo, sur un système correctement mis en œuvre, montre un étalement très cohérent de la scène sonore. En revanche, l'écoute avec une oreille complètement bouchée, par tampon d'ouate et oreillette de casque fermé, donne une impression entièrement différente. Dans ce cas, le son semble provenir uniquement du haut-parleur situé du côté de l'oreille active, pour toutes les positions de la source sonore, sauf lorsque seul le haut-parleur opposé est excité. Par exemple lorsque l'oreille droite est bouchée, le son est localisé en direction du haut-parleur gauche, aussi bien lorsque la voix est centrée, ou à mi-

chemin à droite ou à gauche, et bien sûr lorsqu'elle vient de gauche. Par contre lorsque la voix vient exactement du côté droit, le haut-parleur gauche ne reçoit pratiquement aucun signal, et la source est alors localisée du côté droit.

L'étalement droite-gauche a donc disparu, remplacé par une perception tout-ou-rien, la source **sautant brutalement** de la position gauche à la position droite. C'est l'effet de précession qui fait que la localisation de la direction apparente de la source est effectuée sur le premier front d'onde, même si son niveau est plus faible que celui des ondes suivantes, venant de directions différentes et qui ne font qu'augmenter l'énergie perçue. L'oreille gauche étant plus proche du haut-parleur gauche, la source est située dans sa direction, sauf lorsqu'il n'émet rien, c'est-à-dire pour une source située à droite.

Pour une source située au-delà à droite du haut-parleur droit, les deux canaux reçoivent deux signaux présentant un déphasage particulier – stéréophonie de phase – et la localisation se fait donc sur le front d'onde venant du haut-parleur gauche. La source virtuelle est là encore localisée à gauche !

Cette expérience montre que sans fusion binaurale, on obtient une **séparation stéréophonique totale**, avec un grand trou au centre de la scène. Seul un soliste rigoureusement centré produira, si les niveaux droit et gauche sont exactement balancés et l'auditeur exactement centré, une source sonore ponctuelle sans étendue au centre de la scène. Dans tous les autres cas, les sources virtuelles se formeront soit à droite, soit à gauche, mais en aucun cas en des positions angulaires régulièrement espacées, étalées devant l'auditeur.

Au contraire, la fusion des ondes droites et gauches, obtenue lors de l'écoute binaurale, permet, grâce au traitement des perceptions par le cerveau, de séparer avec une précision de quelques degrés un grand nombre de sources sonores. Cette séparation ne se limite pas à l'étalement droite-gauche mais porte également sur la localisation en profondeur, distance apparente de la source, et en hauteur, à condition que la prise de son le permette. Le même disque test contient une plage présentant une source sonore décrivant un arc de cercle montant entre les deux enceintes, attestant que la localisation en hauteur est tout à fait possible.

Vous pouvez donc écouter avec vos deux oreilles sans inconvénient, car cela est naturel !

CORRÉLATIONS

Les connaissances actuelles ne permettent pas d'établir des relations quantitatives entre des grandeurs physiques mesurables sur le phénomène sonore et des perceptions précises de l'espace, de la matière ou du

mouvement générateur de la vibration. Les études des effets de masque ont permis d'établir quelques points de repères, à partir de signaux stables monophoniques. L'étude du masquage d'un point de vue temporel me paraît très incomplète, et encore plus l'approche spatiale de l'effet de masque.

Lorsque les émissions sonores sont spatialisées, il est aisé de constater que des sons issus de sources occupant des positions distinctes dans l'espace n'ont qu'un effet masquant très limité les uns sur les autres. De même lorsque ces sources rayonnent avec un décalage temporel suffisant, l'évolution temporelle du niveau ou du timbre d'une des sources peut être suivie par l'auditeur indépendamment des autres sources.

L'écoute d'un enregistrement de duo d'instruments à vent aux timbres proches, par exemple deux saxophones, un ténor et un alto comme ceux de François Guell et Denis Reynier de Yllen 4, illustre parfaitement cela : une écoute en monophonie ne permet pas de distinguer constamment les deux lignes mélodiques superposées, parfois rigoureusement identiques (alors que l'écoute en direct le permet). Le masquage son sur son est voulu, avec des timbres semblables, et un auditeur même averti n'entend effectivement qu'un seul instrument, sur certains extraits. Au contraire, l'écoute en stéréophonie sépare entièrement les deux sources, situées de part et d'autre du centre de la scène stéréo, faisant apparaître que la ligne mélodique est par instant divisée en phrases, "tronçons" provenant alternativement d'une source, de l'autre ou des deux à la fois. Le jeu de chacun des deux interprètes peut être suivi séparément sans aucune confusion, bien qu'ils fassent tout leur possible pour obtenir une unique sonorité, un timbre commun, une continuité du phrasé.

D'autre part, les attaques de notes pourtant de niveau transitoire très élevé, n'ont qu'un effet masquant très passager sur le développement et l'extinction de ces notes. L'impact d'une baguette sur une cymbale, en produisant un formant à basse fréquence autour de 200 à 400 Hz, et de niveau crête supérieur à 100 dB, n'empêche aucunement de percevoir le timbre de métal et les éventuels mouvements de l'instrument, reproduits tous deux par des formants de niveaux beaucoup plus faibles, mais de fréquences plus élevées et apparaissant plus tardivement.

Il ressort de ces constatations simples que l'effet de masque, bien que très actif dans la dimension fréquentielle, n'intervient que très peu dans les dimensions dynamique et temporelle. Le respect de ces dimensions lors de la reproduction, en particulier de l'évolution temporelle de l'énergie sonore de chacune des sources, entraîne un démasquage important des petits signaux, porteurs d'informations capitales pour le rendu de l'espace, de la texture et du mouvement.

Les relations indiquées page suivante établissent des liens entre d'une part les dimensions physiques du phénomène sonore, dimensions fréquentielle, dynamique et temporelle repérées respectivement F, D et T et d'autre part les perceptions du champ sonore, le son en tant qu'effet, l'espace en tant que circonstance, la matière et le mouvement en tant que causes. Ces perceptions sont détaillées afin de mettre en évidence des relations simples. Malgré tout, les imbrications restent complexes, et en particulier la dimension temporelle semble intervenir sur l'ensemble des perceptions auditives.

Ce classement empirique fait ressortir pour chaque point la dimension la plus essentielle, sachant que les autres dimensions sont nécessaires également. Par exemple le dessin rythmique ne peut s'établir que dans la dimension temporelle, pourtant c'est bien l'accentuation des temps forts de la mesure, donc les variations d'**intensité** dans la dimension dynamique, qui lui donnent un sens, en le rendant vivant et non mécanique.

La dimension fréquentielle, qui est prépondérante dans le rendu aux plans mélodique et harmonique, situés au premier niveau d'écoute, est très peu active à ce qu'il me semble dans le rendu de l'espace et du mouvement, et son intervention dans le rendu de la matière sonore apparaît sous forme de rapports, et non de manière absolue. Cela correspond aux expériences de nombreux audiophiles qui obtiennent des résultats saisissants de réalisme avec pourtant des réponses Niveau/Fréquence assez peu linéaires, voire irrégulières.

Les dimensions dynamique et temporelle sont d'une importance décisive pour le réalisme de la restitution sonore, car elles apportent un contenu supplémentaire à celui du simple message musical. Elles contiennent des informations capitales pour la localisation et l'identification immédiate de la source sonore et du mouvement générateur, indispensables à la perception de l'expression artistique.

Le fondement de l'activité audiophile se trouve précisément dans cette recherche du contenu, de l'expressivité de la musique. Cette quête suit un cheminement qui passe par les différents niveaux successifs de profondeur d'écoute. Il en découle une hiérarchie, un classement par ordre de priorité, des différentes étapes de cette recherche, qui doivent suivre des contraintes d'antériorité évidentes.

- La première priorité doit être donnée à l'**espace** sonore sans lequel l'accès aux niveaux suivants est impossible. Retrouver l'espace c'est d'abord retrouver le silence qui l'emplit entre les sons, autrement dit éliminer le remplissage de cet espace, que produi-

❖ SON :		
• Hauteur / Timbre	_____	➔ F
• Intensité	_____	➔ D
• Modulation (trémolo, vibrato)	_____	➔ T
❖ ESPACE :		
• Orientation angulaire (localisation droite/gauche) :		
- Différence d'intensité Droite/Gauche ΔI , aux fréquences élevées	_____	➔ D
- Différence de phase Droite/Gauche $\Delta \phi$, aux fréquences basses	_____	➔ T
• Orientation angulaire (localisation haut/bas) :		
- Relations de phase des raies spectrales (hypothèse)	_____	➔ T
- Délai onde directe/première réflexion au sol	_____	➔ T
• Distance :		
- Différence d'intensité ΔI champ direct/champ réverbéré	_____	➔ T
- Délai des premières réflexions	_____	➔ T
- Atténuation des fréquences élevées avec l'éloignement	_____	➔ F
• Focalisation :		
- Émergence des attaques	_____	➔ D
- Netteté des attaques (absence de trainage)	_____	➔ T
- Stabilité de position (absence de réflexions)	_____	➔ T
- Constance de taille (timbre réverbéré)	_____	➔ T
• Acoustique de salle :		
- Réflexions, réverbération, résonances	_____	➔ T
• Aération, transparence de l'espace entre les sources :		
- Émergence des sons directs par rapport au bruit de fond	_____	➔ D
- Propreté spectrale du bruit de fond	_____	➔ D
❖ MATIÈRE :		
• Type ou texture :		
- Air	}	- Rapports de fréquences des raies spectrales ➔ F
- Eau		- Évolution d'intensité des raies spectrales. ➔ D
- Bois		- Évolution de phase des raies spectrales. ➔ T
- Métal		
- Voix / Chair		
- Corde / Archet		
- Membrane / Peau		
• Épaisseur, raideur ou souplesse	}	- Niveau des formants de très basses fréquences. ➔ F
• Masse, légèreté		- Rapidité d'établissement, absence de trainage des sons graves transitoires. ➔ T
• Taille, volume occupé		
❖ MOUVEMENT :		
• Type :		
- Frottement	}	- Rapidité d'établissement et d'extinction, ou de modulation des raies spectrales. ➔ T
- Pincement		- Émergence des raies spectrales de faible niveau par rapport à la masse sonore. ➔ D
- Choc / Frappe / Percussion		
- Souffle		
- Vibration d'une corde		
- Vibration d'une lame		
- Vibration d'une anche		
- Onde stationnaire (dans un volume d'air)		
• Énergie du geste :		
- Force, ampleur	_____	➔ D
- Vitesse, sécheresse	_____	➔ T
• Régularité, modulation	_____	➔ T
• Rythme, respiration	_____	➔ D

sent les réverbérations et résonances du **local**, ainsi que les vibrations parasites et les bruits divers. C'est dégager vers le bas les limitations schématisées figure 8, en intervenant principalement sur la dimension **temporelle**.

• La deuxième priorité est attribuée à la **matière** sonore, qui ne peut être perçue qu'à travers l'espace qui m'en sépare, lequel doit par conséquent être auparavant libéré. La recherche de la **rapidité** de réponse et de la dynamique des sons **graves**, liées

aux qualités des haut-parleurs ainsi qu'à l'absence de couplage mécano-acoustique, permet de retrouver les dimensions des instruments, leur taille et leur masse. Cette rapidité des sons graves, par absence de traînage, leur donne une légèreté et une transparence qui diminuent notablement leur pouvoir de masquage, révélant ainsi les textures et les grains des différents matériaux.

- Ensuite seulement l'expression du **mouvement** peut être recherchée, à travers le respect des niveaux crêtes, c'est-à-dire de la **dynamique** instantanée du signal audio, liée à une répartition correcte de l'énergie au cours du temps. À nouveau la réponse temporelle, cette fois celle des haut-parleurs mais aussi des autres maillons du système demande une grande attention. La sensibilité des haut-parleurs, leur absence de traînage, la cohérence temporelle du filtre sont autant de paramètres essentiels. Le trait musical, par sa trop forte épaisseur, ne permet pas de reproduire dans toute sa finesse le dessin rythmique, par lequel le mouvement est traduit. Affiner ce trait n'est possible qu'en simplifiant à l'extrême les circuits électroniques, en éliminant toute forme de contre-réaction bridant sa liberté, en préférant la souplesse du tracé à son exactitude, par des choix délibérés de topologie de circuits (tubes), de sché-

mas (triodes simple étage), de composants, orientés vers la recherche de légèreté, de rapidité, de vivacité de réponse.

Ces contraintes d'antériorité imposent de traiter d'abord le local, puis la mise en œuvre du système. Ensuite l'intérêt peut se porter sur les enceintes, et enfin sur les appareils électroniques.

Une démarche ne respectant pas cette hiérarchie fait perdre énormément de temps, en plus d'apporter de nombreuses déceptions, les actions effectuées dans le désordre ne portant pas les fruits escomptés. Là encore il ne s'agit pas d'une opinion personnelle, d'un point de vue particulier. Accepter que les choses sont ce qu'elles sont et non ce que je veux qu'elles soient demande longtemps, et chacun est tenté de redéfinir sa propre hiérarchie des données du problème, en mettant en avant ce qui l'arrange, ce qui le valorise, le domaine où il souhaite exprimer sa propre créativité, ou encore ce qui lui paraît le plus fiable car étayé par une modélisation mathématique.

Rien ne vous interdit de fabriquer un amplificateur à lampes avant de corriger l'excès de réverbération de votre salon. Je regrette simplement que vous ne puissiez en profiter pleinement dès qu'il sera construit, et j'espère que vous constaterez plus tard que votre système apporte beaucoup plus de satisfaction dans un local traité, et avec des enceintes de taille respectable.

6. LE LIEU D'ÉCOUTE

« *L'architecture c'est de la musique pétrifiée* ».

Friedrich Schelling

Cet espace privilégié devrait être digne de l'événement sonore qu'il va recevoir. Il est essentiel de prendre conscience des limitations très sévères que ce local va induire sur le réalisme de la restitution. L'audiophile débutant sera tenté de passer ce chapitre pour se précipiter vers les suivants, en quête de recettes miracles concernant les enceintes ou de modifications décisives à pratiquer sur son amplificateur. N'étant pas propriétaire de son logement, ou bien n'ayant aucune envie d'y pratiquer des travaux à priori lourds, coûteux et complexes, et ne possédant ni les compétences ni l'outillage requis, il se tourne vers des activités plus accessibles, quand ce n'est pas son conjoint qui l'y pousse. La plupart des amateurs ont commis cette erreur au début, pour ensuite, face à des échecs insurmontables ou fort d'une expérience grandissante, revenir à une plus forte considération pour ce maillon à part entière que constitue le local. L'importance que je lui apporte de manière insistante depuis le début de cet ouvrage n'est pas exagérée. D'ailleurs la plupart des gros défauts de restitution lui sont imputables, dans les trois dimensions des domaines fréquentiel, dynamique, et temporel. Tôt ou tard il devra être l'objet de votre intérêt, le plus tôt sera le mieux. Dépenser de fortes sommes dans l'achat de nouveaux éléments ou de câbles miraculeux, alors que le système est installé dans une pièce carrée d'appartement, aux murs de béton lisses et parallèles, est simplement inepte. Ce n'est pas un jugement établi selon mon estimation personnelle, c'est une constatation. Chacun pense bien sûr que sa salle n'est pas mauvaise. Mon expérience me fait pourtant dire ceci : « Toutes les salles sont mauvaises. Celles qui ont reçu un traitement superficiel encore plus. Celles qui ont bénéficié d'attentions laborieuses, un peu moins. Celles qui ont été pensées dès le départ pour la reproduction de la musique, nettement moins. »

Ce n'est pas sévère, c'est réaliste. Cela demande quelques explications, qui pour être comprises méritent un petit rappel afin de se remettre en mémoire les notions de base relatives aux ondes sonores et à leur propagation.

PROBLÈMES DE SALLE

La présence des six parois de la salle est à l'origine d'une réflexion des ondes sonores, sur chacune de ces parois, tout comme la lumière est renvoyée par une surface lisse et brillante. Le champ sonore à l'intérieur du local sera la somme du champ direct, rayonné par les sources sonores, et du champ réverbéré, renvoyé par les parois de la salle avec un certain retard. C'est seulement à proximité immédiate des sources, quelques dizaines de centimètres tout au plus, que l'on peut considérer recevoir le champ direct seul, prépondérant. À plusieurs mètres des sources, le champ réverbéré sera perçu exclusivement. Le champ réverbéré étant par nature diffus, l'auditeur ne peut y retrouver les informations d'espace et de position des sources. L'intensité du champ réverbéré dépend de la fréquence des sons, et de la directivité des sources, ces deux grandeurs étant liées. En effet, les haut-parleurs d'aigu, contrairement à ceux de grave, ont tendance à concentrer leur émission dans un faisceau sonore de plus en plus étroit quand la fréquence est plus élevée, un peu comme un spot qui concentre la lumière dans une direction privilégiée. La caractéristique de directivité du haut-parleur rend compte de ce phénomène. Ce faisceau étroit arrose moins les murs de la pièce, et par conséquent le champ réverbéré est d'autant moins intense que la fréquence est élevée. Les figures ci-dessous rendent compte de façon imagée (en vue de dessus) de l'existence de ces champs sonores.

Ces deux champs sonores vont interférer l'un avec l'autre, de la même manière que les ronds dans l'eau, issus de deux endroits distincts, vont se combiner et créer des séries de bosses et de creux importants. Les effets produits par le champ réverbéré sont de trois ordres, surnommés les trois R :

- réflexions,
- réverbération,
- résonances.

- Le terme de réflexion désigne tout d'abord les réflexions précoces, celles qui apparaissent lors du premier trajet de l'onde directe, et qui par conséquent vont arriver à l'auditeur dans un délai très bref

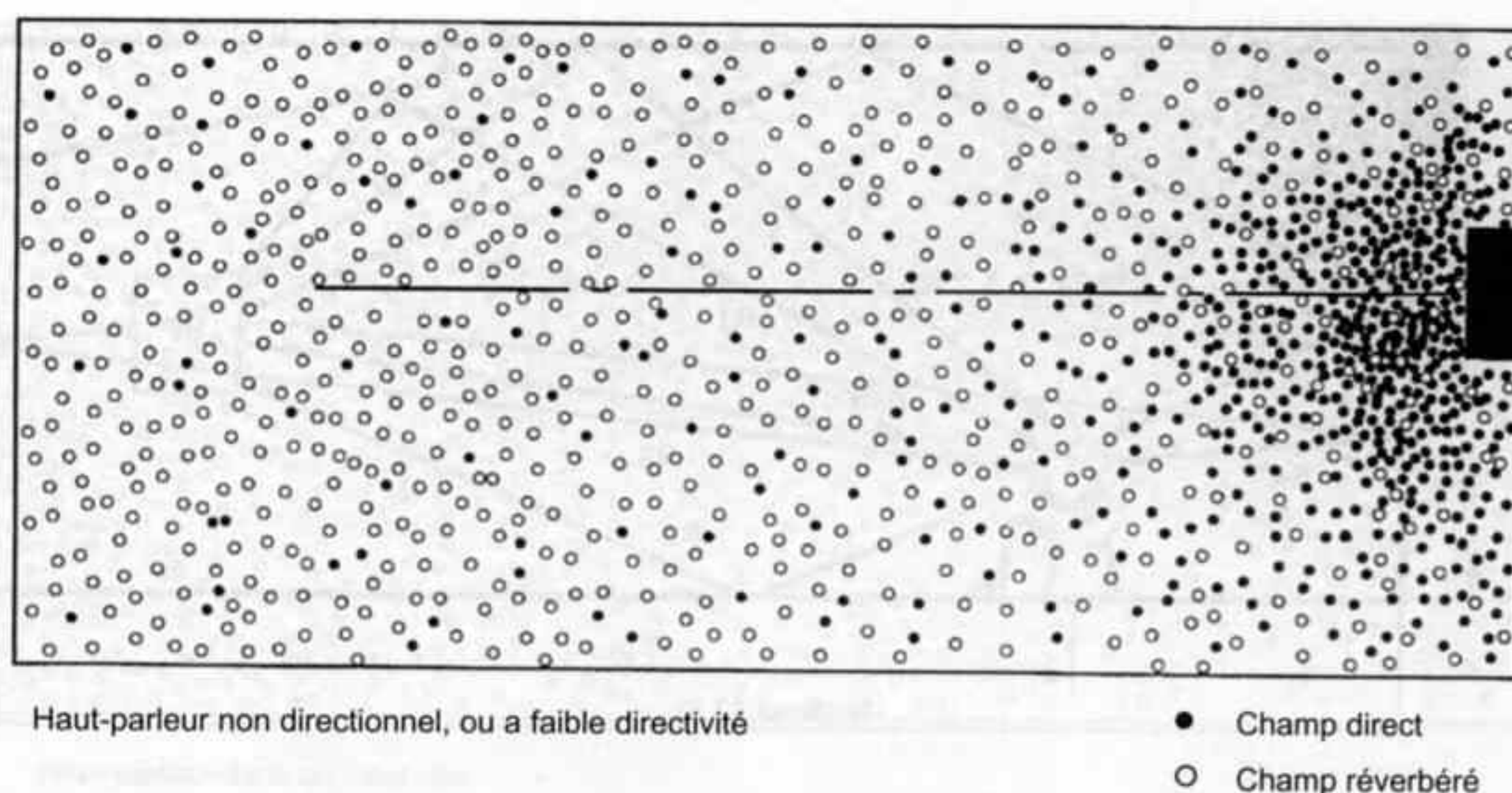


Figure 19 - La figure ci-dessus, tirée d'une documentation JBL, montre la répartition statistique des champs direct et réverbéré dans un local où la diffusion sonore est réalisée avec un haut-parleur non directionnel. La densité des points représente l'intensité sonore. Tous les haut-parleurs, quelle que soit leur technologie ou leur principe de fonctionnement, présentent une directivité croissante avec la fréquence, et qui devient gênante lorsque la longueur d'onde des fréquences émises est du même ordre ou plus petite que la dimen-

sion de la source vibrante (membrane). Le cas présenté ici correspond donc à un haut-parleur utilisé à des fréquences notablement plus basses que sa limite de directivité, ce qui est le cas des éléments graves de la plupart des enceintes acoustiques habituelles. C'est seulement dans la proximité immédiate des enceintes que le champ direct peut être perçu. Dans le registre grave, nous entendons par conséquent surtout le son du local...

(JBL Professional Sound System Design Reference Manual)

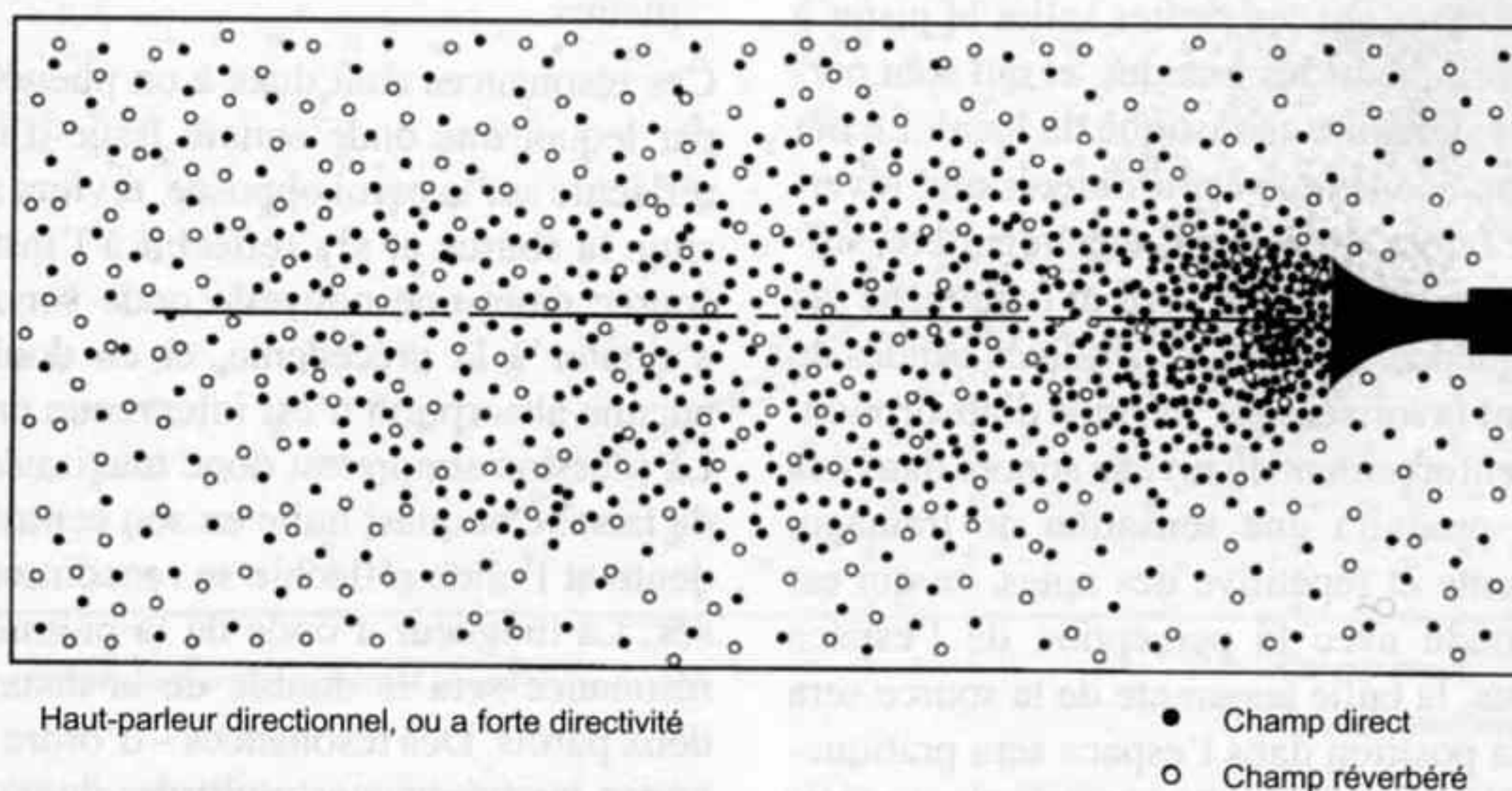


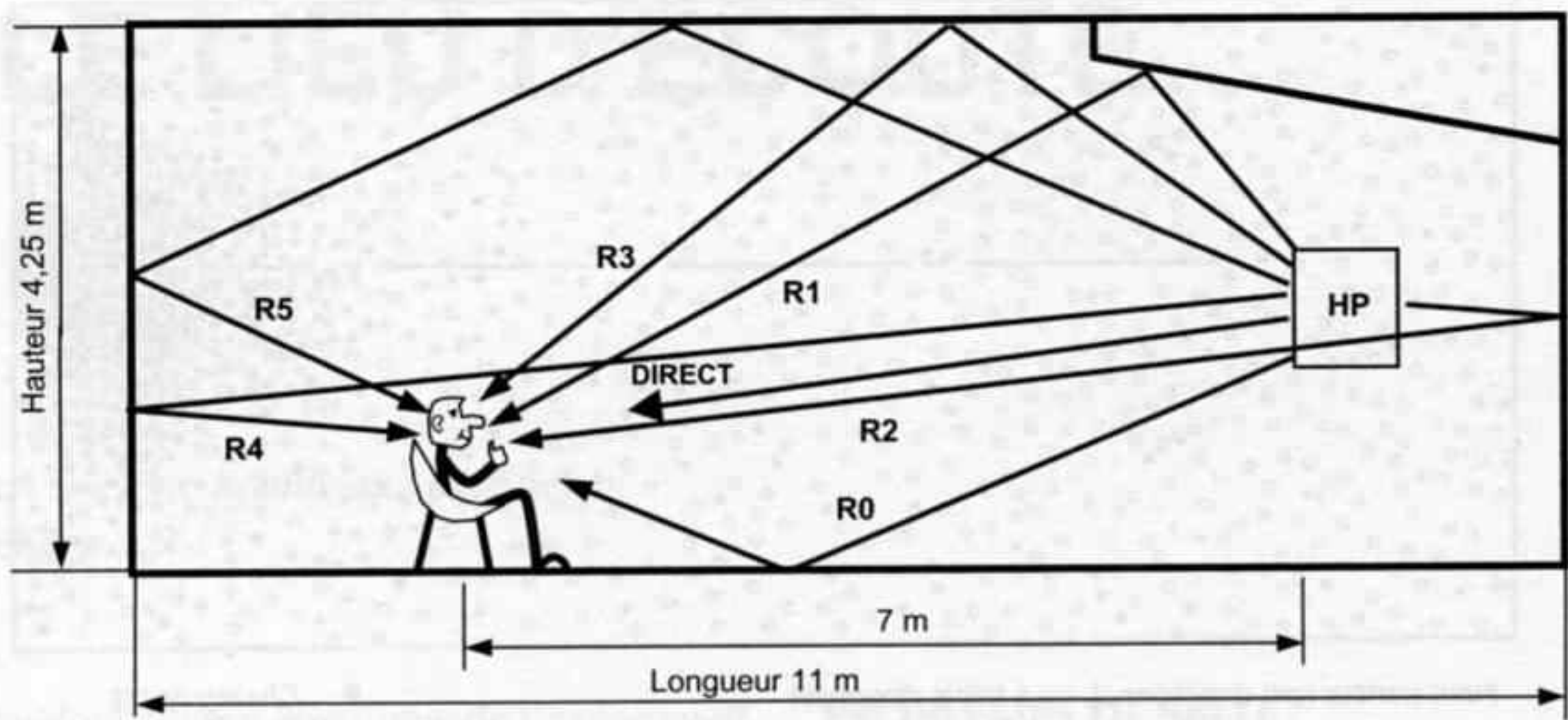
Figure 20 - Avec un haut-parleur directionnel, tel qu'un pavillon, le champ direct est focalisé vers la zone d'écoute, dans laquelle l'auditeur perçoit donc plus de champ direct et moins de champ réverbéré que dans le cas précédent. L'enrichissement habituel des sons gra-

ves, dû à une absorption faible des parois dans ce registre, se fait moins sentir dans ce cas, ce qui peut entraîner un déséquilibre tonal, et l'impression d'un son projeté attribué à tort au pavillon.

(JBL)

après que l'onde directe lui sera parvenue. Lorsque ce délai est inférieur à environ 30/50 ms, l'impression ressentie est un renforcement de l'onde directe, car les réflexions semblent se combiner au champ direct. Dans ce cas la localisation spatiale est faite sur l'onde directe (effet Haas). Si le délai est plus important, 50 à 200 ms environ, ces réflexions, dites

secondaires, sont gênantes dans la mesure où elles perturbent la sensation de l'espace sonore, en créant des reflets des sources sur les parois latérales d'une part, ce qui fausse la perception de l'étalement droite/gauche de la scène sonore, ou sur le sol et le plafond d'autre part, ce qui semble plutôt dégrader la perception de la profondeur de la scène sonore.



RAYON SONORE	DELAI ms
DIRECT	0
R 0	3,5
R 1	4,5
R 2	9,0
R 3	13,0
R 4	14,0
R 5	18,0

Figure 21 - Toutes les réflexions représentées sur ce dessin arrivent à l'auditeur dans un délai inférieur à 30 ms après l'onde directe, et sont appelées réflexions primaires. Les réflexions latérales, suivant la largeur non représentée ici, sont les plus gênantes pour le rendu de l'espace sonore. *(adapté d'un document JBL)*

audibles ont des valeurs comparables aux dimensions des pièces de séjour usuelles, soit quelques mètres.

Ces résonances sont dues à un phénomène cumulatif, par lequel une onde sonore issue d'une source, puis réfléchi sur la paroi opposée, revient sur la paroi où se situe la source et s'y réfléchit à l'instant précis où la source émet une nouvelle onde sonore, qui va donc s'ajouter à la précédente, et en doubler l'énergie si aucune absorption n'est intervenue dans le processus. La pression sonore est donc maximale aux extrémités de la salle et quasi nulle en son centre, où l'onde incidente et l'onde réfléchi se rencontrent en sens opposés. La longueur d'onde de la première fréquence de résonance sera le double de la distance séparant les deux parois. Des résonances – d'ordre n – existent pour toutes les fréquences multiples de cette première fréquence de résonance. Dans une salle rectangulaire habituelle, il existe des résonances longitudinales dans le sens de la longueur, latérales dans la largeur, et verticales dans la hauteur, mais aussi diagonales et même tridimensionnelles.

C'est surtout la répartition de ces résonances, en particulier en dessous de 250 Hz environ, qui donne à la salle son caractère sonore. Si les résonances, dans les trois directions, sont à peu près régulièrement distribuées et espacées sur l'axe des fréquences, elles ne s'additionneront pas, et le renforcement qu'elles procureront aux sons graves se fera de manière homogène, sans gonflement artificiel. En revanche, si plusieurs résonances, dans des directions différentes,

- Le terme de réverbération s'applique à l'ensemble des réflexions tardives, dont le délai d'arrivée est supérieur à 200 ms dans les petites salles et jusqu'à plusieurs secondes dans les grandes, et qui sont perçues comme la signature acoustique du local. Le but de la correction acoustique est d'obtenir une réverbération assez faible, de décroissance régulière, suffisamment courte en durée, et surtout homogène vis à vis de la fréquence. En effet, si certaines bandes de fréquences sont favorisées par manque d'absorption, en plus d'un renforcement du niveau sonore dans ces bandes, il se produira une sensation de traînage, d'extinction lente et répétitive des notes, ce qui est souvent confondu avec la perception de l'espace sonore. De plus, la taille apparente de la source sera exagérée, et sa position dans l'espace sera pratiquement impossible à localiser avec précision sur certaines notes jouées.
- Le terme de résonance concerne les phénomènes d'ondes stationnaires qui apparaissent aux basses fréquences, lorsque le champ direct et le champ réfléchi se combinent et s'additionnent de manière stable pour former des zones de pression et de dépression acoustique alternées dans le volume de la pièce. Ces phénomènes sont difficiles à combattre car ils ne dépendent que des dimensions de la salle. Ils peuvent seulement être minimisés grâce à un choix harmonieux des rapports de dimensions longueur/largeur/hauteur de cette salle. En effet, les longueurs d'onde des fréquences les plus basses

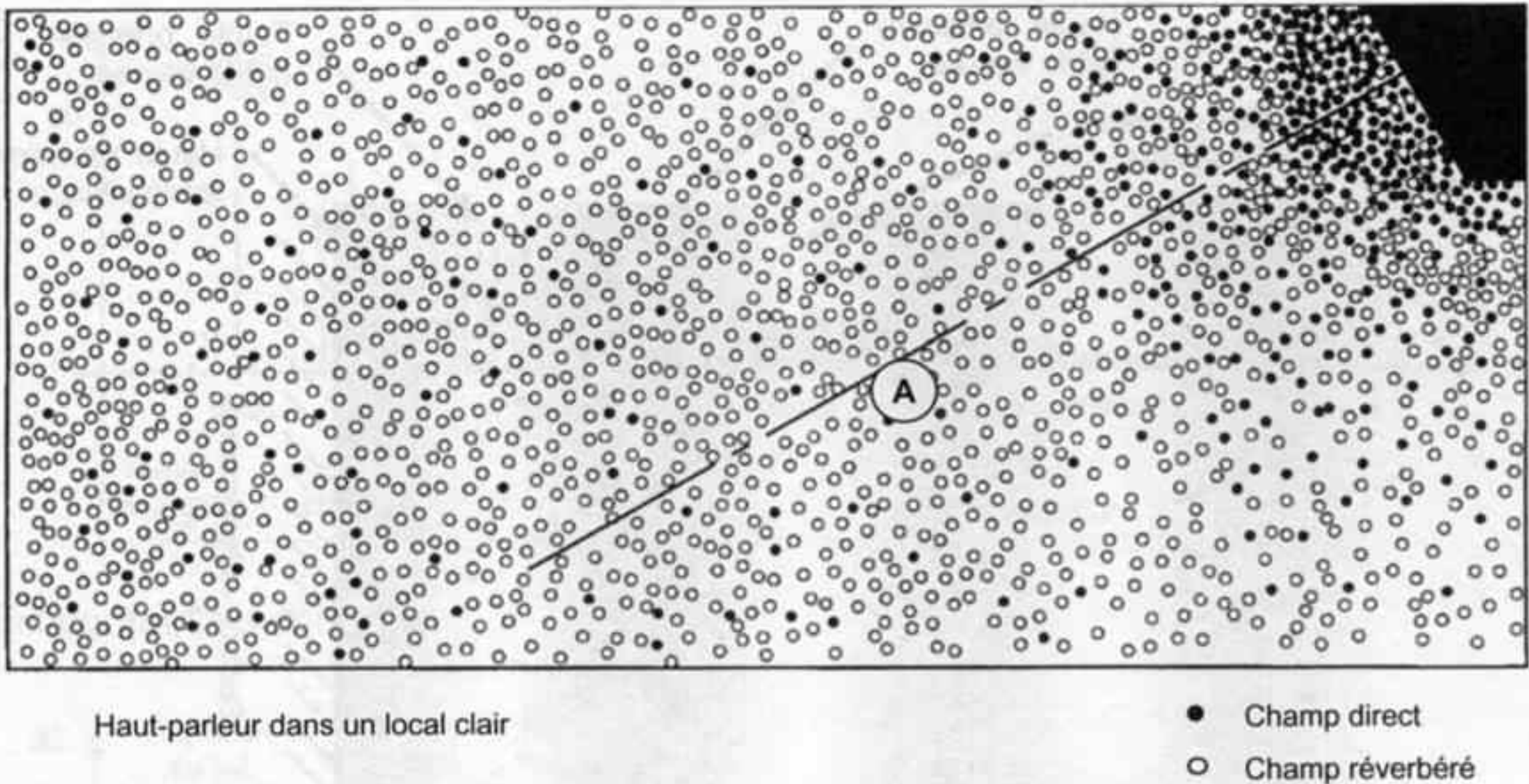


Figure 22 - Ci-dessus, le champ réverbéré est prépondérant sauf dans une zone grossièrement circulaire, proche de la source, et matérialisée sur le dessin par une agglomération des points noirs correspondant au champ direct. La distance mesurée depuis la source jusqu'à la limite de cette zone est appelée distance critique. Un auditeur placé à la distance critique perçoit les

champs direct et réverbéré au même niveau sonore. Cette distance critique augmente avec la fréquence, l'auditeur A sera donc en champ réverbéré pour les sons graves, et en champ direct pour les sons aigus. (d'après documents JBL Professional Sound System Design Reference Manual)

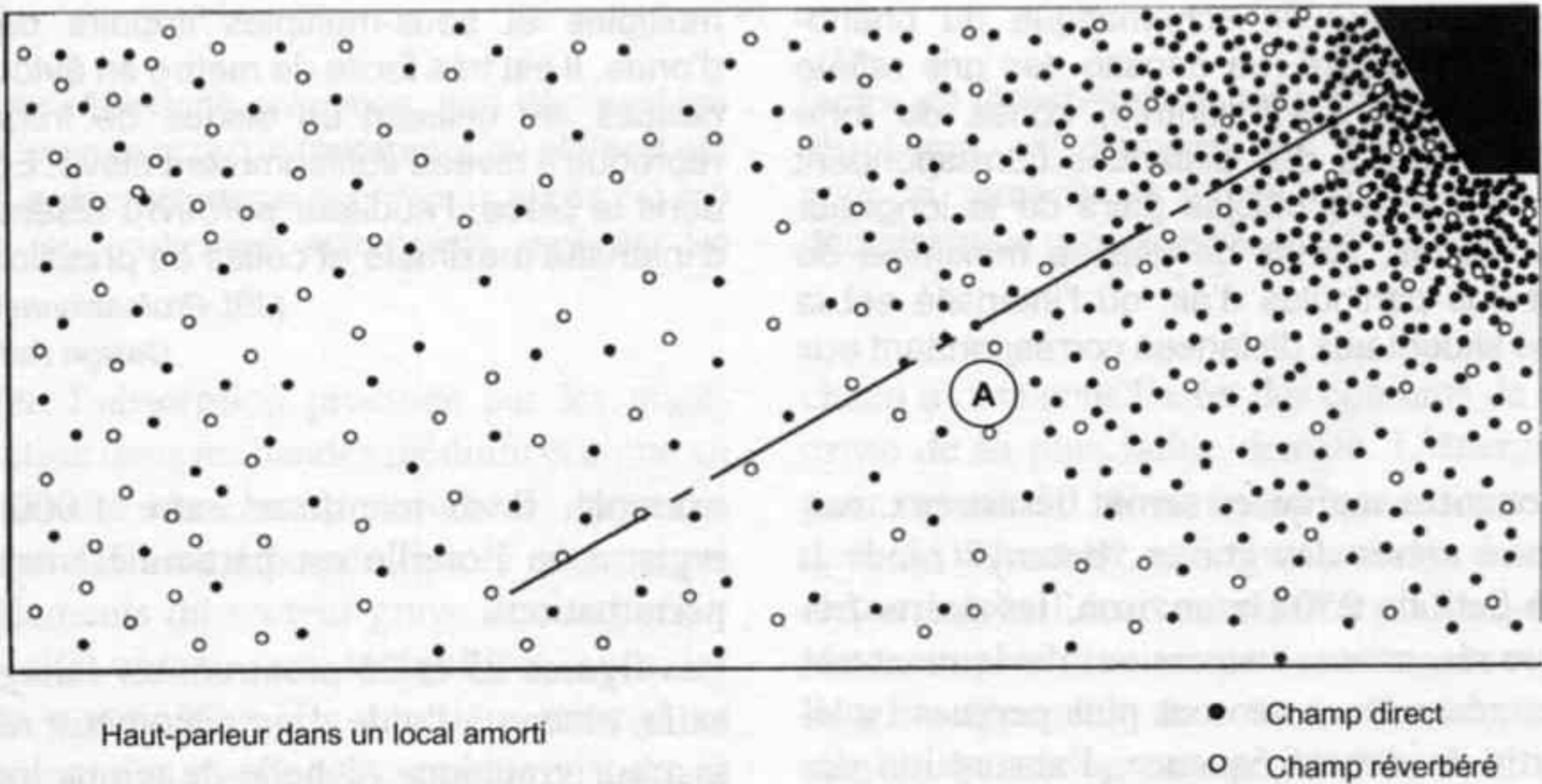


Figure 23 - Le champ réverbéré est beaucoup moins intense dans ce local ayant subi un traitement de correction acoustique. Placé dans l'axe de rayonnement de la source, un auditeur se trouvera dans le champ direct, c'est-à-dire en deçà de la distance critique, sauf au fond de la salle, dans le dernier tiers de sa longueur,

où la proximité de la paroi opposée à la source va produire un renforcement du champ réverbéré. Un canapé adossé au mur du fond ne constitue donc pas une bonne position d'écoute même dans un local traité. De plus le traitement du fond de la salle devra être particulièrement soigné. (d'après documents JBL)

s'accumulent autour d'une même fréquence, le niveau sonore dans cette bande sera renforcé. Une succession, dans le registre grave, de bandes renforcées et de bandes atténuées, procurant une réponse fréquentielle présentant des creux et des bosses importants, souvent 10 à 20 dB, est la signature des mauvaises salles disproportionnées.

Dans les très basses fréquences, premières octaves du spectre audible, ces résonances sont isolées, espacées les unes des autres et ne se cumulent donc pas. Leur effet est souvent profitable à une extension du registre extrême grave, en dessous de 50 Hz environ, ce qui compense un peu les manques des enceintes miniatures dans ce secteur. C'est entre 80 et 150 Hz que les

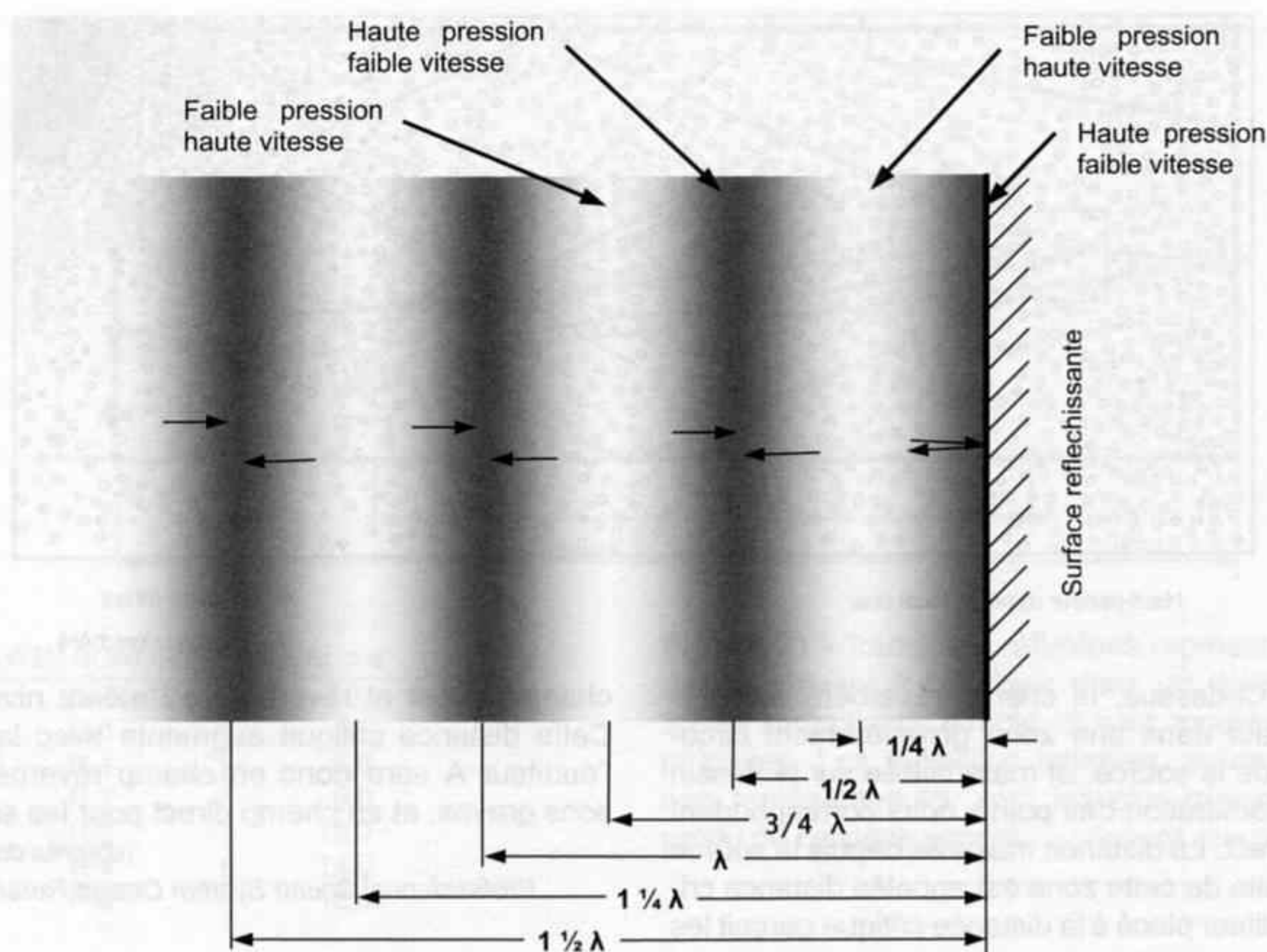


Figure 24 - Représentation schématique du phénomène d'onde stationnaire. La densité des gris reflète l'intensité acoustique. Des ventres, zones de forte intensité, sont situés à des distances correspondant aux multiples ou sous-multiples pairs de la longueur d'onde. Des nœuds, zones de vitesse maximale du déplacement des particules d'air, où l'intensité est la plus faible, se situent aux distances correspondant aux

multiples et sous-multiples impairs de la longueur d'onde. Il est très facile de mettre en évidence ces résonances, en utilisant un disque de fréquences pures reproduit à niveau suffisamment élevé. En se déplaçant dans la pièce, l'auditeur percevra aisément les zones d'intensité maximale et celles de pression nulle.

*(JBL Professional Sound System
Design Reference Manual)*

effets de résonances marquées seront désastreux, responsables entre autres des graves "boomy" ronds et traînants. Au-delà de 250 Hz environ, les écarts fréquentiels entre résonances successives deviennent très faibles, et les résonances ne sont plus perçues isolément. À partir de cette fréquence, l'absorption des parois et du mobilier commence à se faire sentir, surtout si un traitement de correction y a été appliqué.

Dans le registre médium, des ondes stationnaires apparaissent également entre parois parfaitement parallèles et lisses se faisant face. De faibles portions de surface nues, sur deux murs opposés, suffisent pour donner naissance à ce phénomène appelé "flutter" écho, littéralement écho palpitant. Les ondes donnent en effet l'impression de rebondir rapidement entre ces deux surfaces, en rendant un son qui ressemble à celui d'un ressort brusquement détendu. Ce phénomène désagréable, heureusement facile à traiter, apparaît souvent entre sol et plafond lorsque ces deux surfaces sont lisses et dures, plâtre au plafond et carrelages au sol par

exemple. Il se manifeste entre 1 000 et 2 000 Hz, registre où l'oreille est particulièrement sensible aux perturbations.

Les figures 25 et 26 montrent un échogramme d'une salle, obtenu à l'aide d'un sonomètre relié à un enregistreur graphique (échelle de temps logarithmique). Une impulsion sonore est émise, l'onde directe est reçue par le microphone, puis les réflexions successives, d'amplitudes décroissantes arrivent à leur tour avec un retard mesuré par rapport à l'arrivée de l'onde directe, instant $t = 0$.

TRAITEMENT DES RÉSONANCES

La première étape de l'amélioration du local d'écoute portera sur l'affaiblissement des résonances. Il est illusoire d'espérer les éliminer, mais le gain de qualité peut être significatif si seulement deux ou trois résonances parmi les plus nuisibles sont réduites de moitié en amplitude. Cette première étape ne saurait être oubliée, et effectuer un traitement de correction de la réverbération sans traiter les résonances est une erreur

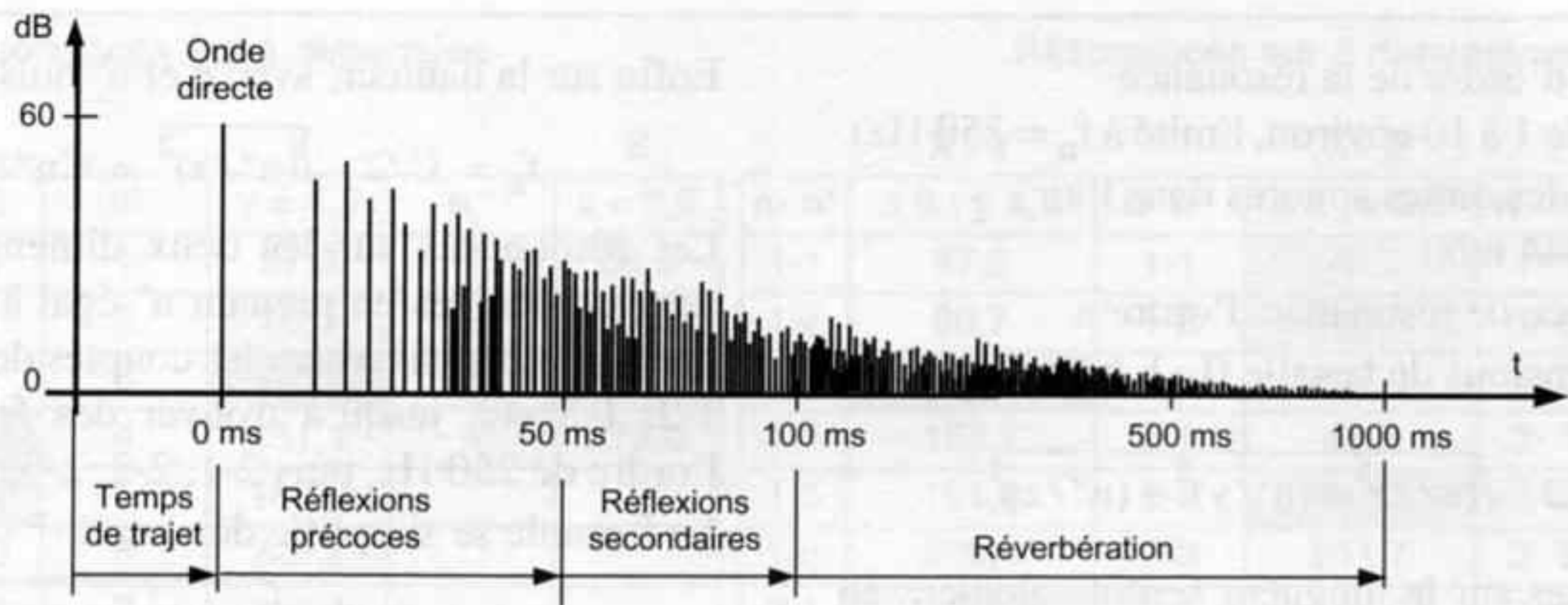


Figure 25 - Échogramme d'une salle.

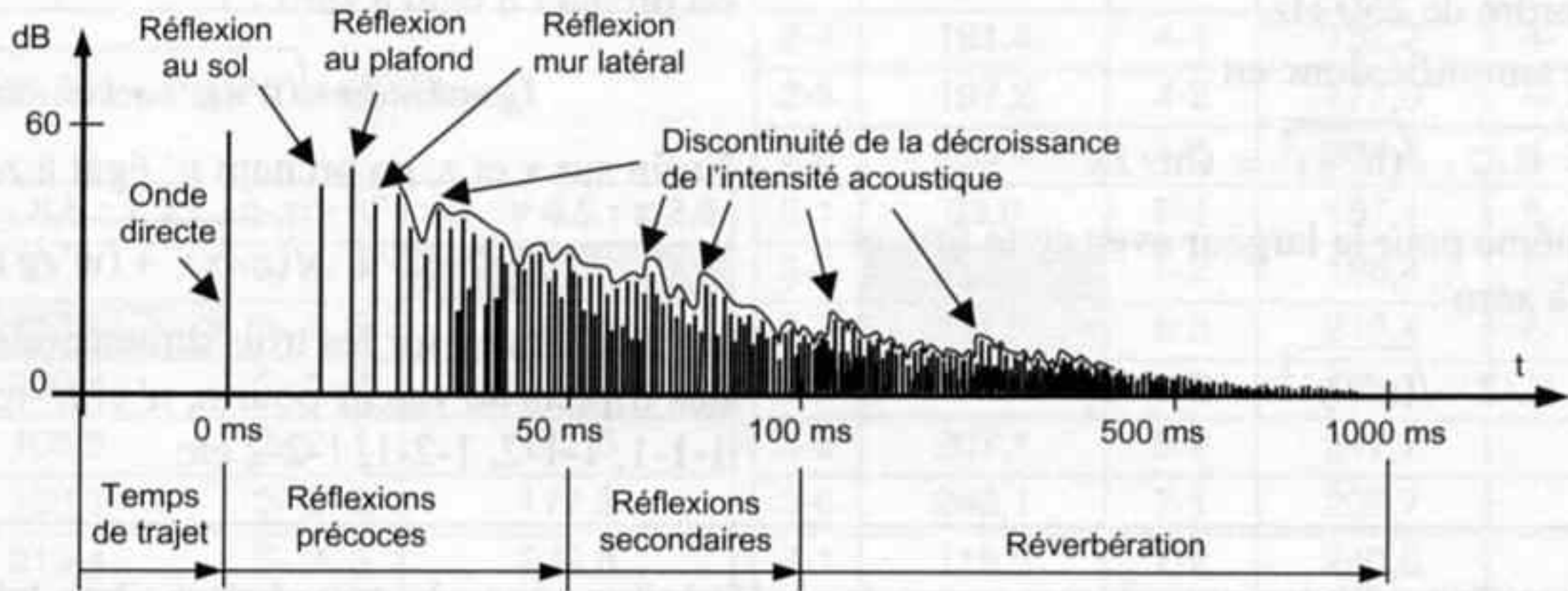


Figure 26 - Les réflexions précoces, non dégressives jusqu'à 50 ms, montrent qu'un traitement du plafond est à envisager. La décroissance du niveau après 50 ms est irrégulière en particulier aux points repérés. Le

temps de réverbération, défini par une baisse de 60 dB du niveau, est d'environ 1 s. Un traitement s'impose pour le ramener à moins de 0,5 s et obtenir une décroissance progressive de l'ensemble.

grave. En effet, l'absorption procurée par les matériaux de correction dans les bandes médium et aiguë va diminuer l'intensité du champ réverbéré dans ces registres, ce qui laissera émerger encore plus nettement les gonflements du secteur grave dus aux résonances. Le résultat obtenu sera déséquilibré, avec des basses lourdes et empâtées. La première priorité va donc au traitement des résonances, ensuite viendra la correction de la réverbération, enfin les réflexions primaires pourront faire l'objet de mesures spécifiques.

Un bilan préalable, sorte d'état des lieux, peut être effectué facilement avec quelques éléments de calcul simples. Les résultats présentés graphiquement feront apparaître clairement si les résonances sont bien distribuées. Dans le cas contraire, des solutions à base de résonateurs devront être envisagées. Les figures ci dessous présentent un exemple de bilan établi pour une pièce de dimensions courantes, de longueur 6 m, largeur 4,50 m et hauteur 2,50 m. La hauteur sous plafond a été volontairement choisie à la valeur courante rencontrée dans les habitations modernes. Cette hauteur est trop faible d'un point de vue acoustique. Elle a été définie dans un but d'économie d'énergie, car l'air

chaud monte sous l'effet des courants de convection, à cause de sa plus faible densité. L'énergie nécessaire pour obtenir 20 °C en partie basse d'une salle dépend donc de la hauteur, et il n'est pas rare de constater plusieurs degrés d'écart entre sol et plafond dans une salle haute, en plus d'un temps de mise en température plus long car dépendant du volume. Une hauteur de 2,75 m semble beaucoup mieux adaptée à la reproduction musicale, mais demandera une puissance de chauffage supérieure, ou bien une meilleure isolation... Les traitements acoustiques dont il va être question maintenant ont fort heureusement un effet bénéfique du point de vue thermique.

La modélisation acoustique des pièces non rectangulaires ne sera pas traitée ici. Leur étude demande l'utilisation de logiciels spécifiques, dont disposent beaucoup de cabinets d'architecture, mais qui ne sont pas à la portée de l'amateur. Cependant l'utilisation d'un disque de fréquences pures, de préférence par tiers d'octave, permet de détecter à l'oreille l'apparition de résonances et de localiser facilement les variations de pression acoustique en se déplaçant dans la pièce.

n : numéro d'ordre de la résonance
(entier de 1 à 10 environ, limité à $f_n = 250$ Hz).
C : célérité des ondes sonores dans l'air
(340 à 344 m/s).
 f_n : Fréquence de résonance d'ordre n.
x, y, z : dimensions de la salle (L, l, h).

$$f_n = C/2 \cdot \sqrt{(n/x)^2 + (n'/y)^2 + (n''/z)^2}$$

Les résonances sur la longueur seront calculées en prenant n' et n'' égaux à zéro, et n prenant successivement les valeurs 1, 2 etc. jusqu'à trouver des fréquences de l'ordre de 250 Hz.
La formule se simplifie donc en :

$$f_n = C/2 \cdot \sqrt{(n/x)^2} = Cn/2x$$

Procéder de même pour la largeur avec cette fois-ci n et n'' égaux à zéro :

$$f_n = C/2 \cdot \sqrt{(n'/y)^2} = Cn'/2y$$

Enfin sur la hauteur, avec n et n' nuls :

$$f_n = C/2 \cdot \sqrt{(n''/z)^2} = Cn''/2z$$

Les résonances sur les deux dimensions x et y seront calculées en prenant n'' égal à zéro, n et n' prenant successivement les couples de valeurs 1-1, 1-2, 1-3 etc. jusqu'à trouver des fréquences de l'ordre de 250 Hz, puis 2-1, 2-2, 2-3, etc.

La formule se simplifie donc en :

$$f_n = C/2 \cdot \sqrt{(n/x)^2 + (n'/y)^2}$$

Procéder de même pour les résonances en y et z, en prenant n égal à zéro :

$$f_n = C/2 \cdot \sqrt{(n'/y)^2 + (n''/z)^2}$$

Enfin sur x et z, en prenant n' égal à zéro :

$$f_n = C/2 \cdot \sqrt{(n/x)^2 + (n''/z)^2}$$

les résonances sur les trois dimensions demandent des triplets de valeur pour n, n' et n'' tels que 1-1-1, 1-1-2, 1-2-1, 1-2-2 etc.

Figure 27 - Impossible d'échapper à un peu de mathématiques ! Reléguer ces tableaux en annexe aurait été une incitation à les éviter, et à passer outre les questions de résonance du local. Une simple calculatrice et un peu de patience viendront à bout de ce petit problème de calcul, à la portée d'un élève de collège...

N'hésitez pas à sous-traiter. Le tableau suivant figure 28 présente les résultats obtenus avec une pièce rectangulaire standard de dimensions :
Longueur x = 6 m
Largeur y = 4,50 m
Hauteur z = 2,50 m

L'amortissement, même partiel, des résonances du local aura pour effet d'alléger grandement les sons graves, de leur donner une plus grande dynamique en diminuant le traînage qui les suit habituellement et les gonfle artificiellement. Les attaques paraîtront donc plus fortes car émergeant mieux d'une masse sonore moins envahissante. L'ensemble du registre grave sera plus délié, plus expressif, et les échos, les réverbérations, même de faible niveau réapparaîtront clairement. L'espace sonore prendra un relief beaucoup mieux marqué, et la matière sonore des instruments graves, tels que violoncelle, contrebasse, ou grosses percussions, ainsi que les notes basses des vents, gagnera énormément en naturel et en réalisme.
Le tableau figure 28 montre que la salle prise pour exemple type présente donc une première résonance, dans le sens de la longueur, mode unidirectionnel axe X, à la fréquence de 28,3 Hz. Le paramètre n égal à 1 signifie qu'il y aura 1 seul ventre de vitesse vibra-

toire, situé à la demi-longueur de la salle, zone sourde où la pression acoustique sera quasi nulle, nœud de pression.
On peut donc considérer qu'en dessous de 30 Hz (infra-grave) il n'y a rien à espérer dans cette salle. Le mode suivant, avec n égal à 2, indique une résonance à 56,7 Hz mais avec cette fois 2 ventres de vibrations, séparés par une zone forte de pression acoustique maximale située à la demi-longueur. Si l'auditeur se place dans cette zone, les sons de la bande 55-60 Hz lui paraîtront renforcés, ce qui peut compenser en partie une faiblesse des enceintes dans ce secteur. Toutefois, le temps requis pour que l'onde stationnaire s'établisse est relativement long, plusieurs périodes du signal étant nécessaires. Le renforcement des graves n'apparaîtra donc pas sur les sons brefs, comme les percussions ou les pizzicati de contrebasse, mais seulement sur les sons longs, durables, tels que les résonances de caisse d'instruments, ou de salle de concert.

Résonances sur 1 dimension

X		Y		Z	
n	x = 6	n'	y = 4,5	n''	z = 2,5
1	28,3	1	37,8	1	68,0
2	56,7	2	75,5	2	136,0
3	85,0	3	113,3	3	204,0
4	113,3	4	151,1	4	272,0
5	141,7	5	188,9		
6	170,0	6	226,7		
7	198,3	7	264,4		
8	226,7				
9	255,0				

Résonances sur 3 dimensions

n- n'- n''	x 6 ; y 4,5 ; z 2,5	n- n'- n''	x 6 ; y 4,5 ; z 2,5
1- 1- 1	82,8	3- 1- 1	115,2
1- 1- 2	144,0	3- 1- 2	164,8
1- 1- 3	209,4	3- 1- 3	224,2
1- 2- 1	105,5	3- 2- 1	132,5
1- 2- 2	158,1	3- 2- 2	177,3
1- 2- 3	219,4	3- 2- 3	233,6
1- 3- 1	135,2	3- 3- 1	157,1
1- 3- 2	179,3	3- 3- 2	196,4
1- 3- 3	235,1	3- 3- 3	248,4
1- 4- 1	168,1	3- 4- 1	186,2
1- 4- 2	205,3	3- 4- 2	220,4
1- 4- 3	255,4	3- 5- 1	218,0
1- 5- 1	202,7	3- 5- 2	247,8
1- 5- 2	234,5	3- 6- 1	251,4
1- 6- 1	238,3	4- 1- 1	137,5
2- 1- 1	96,2	4- 1- 2	181,0
2- 1- 2	152,1	4- 1- 3	236,4
2- 1- 3	215,1	4- 2- 1	152,2
2- 2- 1	116,4	4- 2- 2	192,5
2- 2- 2	165,6	4- 2- 3	245,3
2- 2- 3	224,8	4- 3- 1	174,1
2- 3- 1	143,8	4- 3- 2	210,2
2- 3- 2	185,9	4- 4- 1	200,8
2- 3- 3	240,2	4- 4- 2	232,8
2- 4- 1	175,1	5- 1- 1	161,6
2- 4- 2	211,0	5- 1- 2	200,0
2- 4- 3	260,1	5- 1- 3	251,2
2- 5- 1	208,6	5- 2- 1	174,4
2- 5- 2	239,6	5- 2- 2	210,4
2- 6- 1	243,3	5- 3- 1	193,7

Résonances sur 2 dimensions

X - Y		X - Z		Y - Z	
n- n'	x 6 ; y 4,5	n- n''	x 6 ; z 2,5	n'- n''	y 4,5 ; z 2,5
1-1	47,2	1-1	73,7	1- 1	77,8
1-2	80,7	1-2	138,9	1- 2	141,1
1-3	116,8	1-3	206,0	1- 3	207,5
1-4	153,7	2-1	88,5	2- 1	101,6
1-5	191,0	2-2	147,3	2- 2	155,6
1-6	228,4	2-3	211,7	2- 3	217,5
2-1	68,1	3-1	108,9	3- 1	132,2
2-2	94,4	3-2	160,4	3- 2	177,0
2-3	126,7	3-3	221,0	3- 3	233,4
2-4	161,4	4-1	132,2	4- 1	165,7
2-5	197,2	4-2	177,0	4- 2	203,3
2-6	233,7	4-3	233,4	4- 3	253,9
3-1	93,0	5-1	157,1	5- 1	200,8
3-2	113,7	5-2	196,4	5- 2	232,8
3-3	141,7	5-3	248,4	6- 1	236,6
3-4	173,4	6-1	183,1		
3-5	207,1	6-2	217,7		
3-6	242,1	7-1	209,7		
4-1	119,5	7-2	240,5		
4-2	136,2	8-1	236,7		
4-3	160,3				
4-4	188,9				
4-5	220,3				
4-6	253,4				
5-1	146,6				
5-2	160,5				
5-3	181,4				
5-4	207,1				
5-5	236,1				
6-1	174,1				
6-2	186,0				
6-3	204,3				
6-4	227,5				
7-1	201,9				
7-2	212,2				
7-3	228,4				
7-4	249,3				
8-1	229,8				
8-2	238,9				
8-3	253,4				

Figure 28.

L'impression subjective sera probablement celle d'un son lent, manquant de mordant, avec une sensation d'espace artificielle, répétitive. La notion de taille apparente des instruments graves, donnée par leurs

résonances, apparaîtra avec un certain retard, ce qui donnera une information de distance erronée, d'éloignement important. Cela contribuera sans doute à faire paraître la scène sonore en arrière des enceintes, plutôt

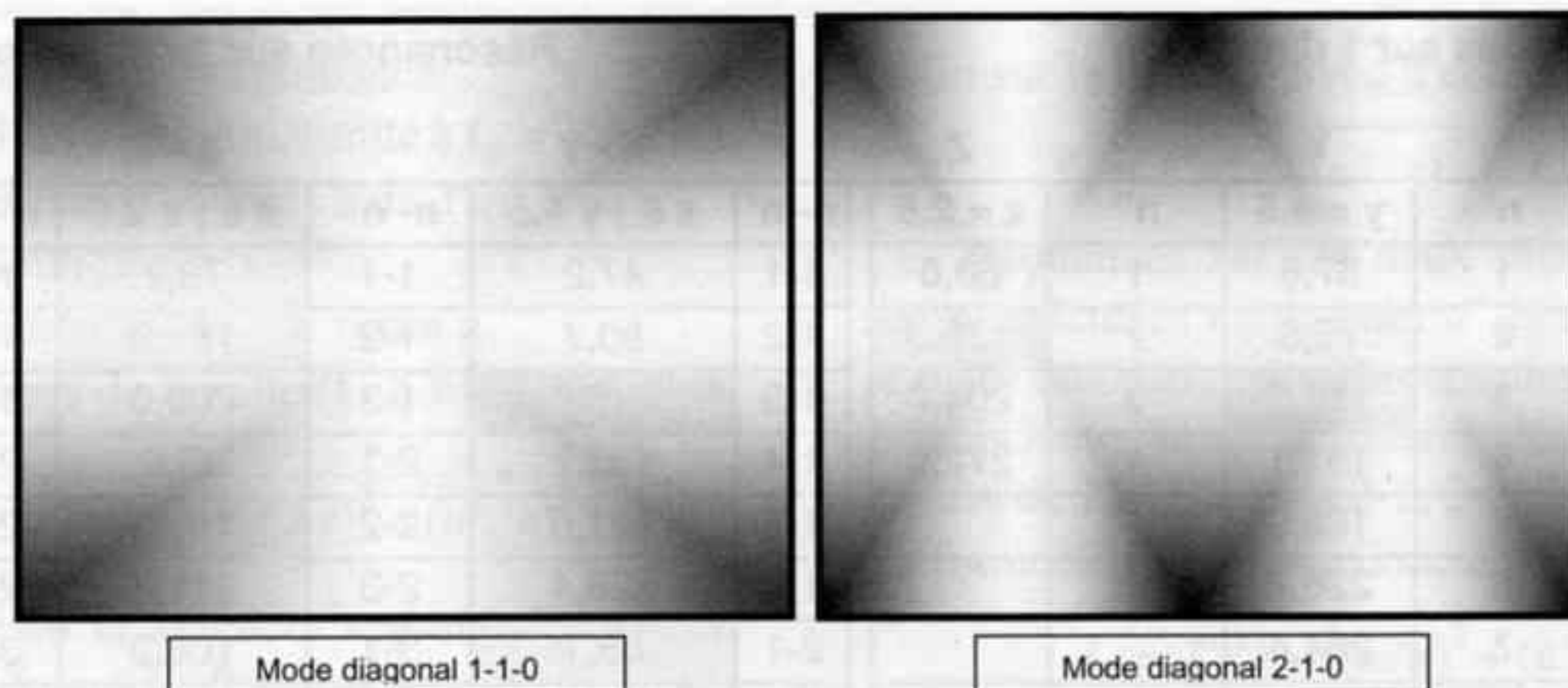


Figure 29 - Les modes de résonance bidirectionnels, ici en longueur/largeur de la salle, donnent naissance à des zones sourdes, claires sur la figure, où la pression acoustique est quasi nulle, ainsi qu'à des zones de pression maximale, noires. Ces zones fortes en forme de lobes se trouvent principalement dans les coins de la pièce, ainsi que le long des parois. L'intensité acoustique diminue progressivement d'une zone forte vers une zone sourde, comme le montrent les dégradés figurant la répartition de la pression. Le positionnement des enceintes ou de l'auditeur dans ces zones de forte

pression est à proscrire, sous peine d'exciter au maximum les résonances de la pièce. Certaines enceintes d'encoignure profitent de cet effet pour gagner en niveau dans le registre grave, en utilisant les parois comme prolongement d'un pavillon. Au contraire, les résonateurs, type "tube traps" ou "corner traps" sont prévus pour être placés dans ces zones. Ils présenteront une anti-résonance aux fréquences concernées, et absorberont en conséquence l'excès de pression acoustique.

reculée, avec une certaine profondeur factice. Si les transitoires d'attaque sont bien reproduits et donnent en conséquence une impression de présence proche de l'instrument, il n'y aura aucune cohérence de l'image sonore : Les cordes de l'instrument, par exemple, sembleront situées dans le plan des enceintes, alors que sa caisse semblera placée deux mètres derrière sur certaines notes, absente pour d'autres !

Si l'auditeur ne souhaite pas profiter de ce renfort dans cette bande de fréquences, il lui suffira de se placer non loin des trois quart de la longueur de la salle, zone où la pression acoustique autour de 55-60 Hz sera quasi-nulle.

Le mode longitudinal d'ordre 3 à 85 Hz donne 3 ventres avec pression nulle, et 2 noeuds de pression élevée situés au tiers et aux deux tiers de la longueur, et ainsi de suite pour les modes suivants.

La même analyse sur l'axe transversal Y montre que l'auditeur, qui se situe d'habitude dans l'axe médian de son local, sera placé dans une zone sourde vers 38 Hz, 113 Hz, et pour tous les modes d'ordres impairs, mais dans une zone forte vers 75 Hz et 150 Hz, modes d'ordres pairs.

Verticalement sur l'axe Z, la hauteur habituelle des plafonds produit, à mi-hauteur, une zone sourde vers 68 Hz et une zone forte vers 136 Hz. La tête de l'auditeur se trouve un peu en dessous de ces zones mais subit leur effet, qui souvent se cumule à d'autres per-

turbations. Ces résonances sont à mon avis les plus gênantes car l'auditeur ne peut déplacer son point d'écoute sur cet axe, à moins d'installer une estrade !

Les résonances bidirectionnelles, dites diagonales, forment cette fois dans la pièce des zones sourdes ou fortes qui ne sont plus réparties sur de simples plans parallèles aux murs, mais suivent des courbes plus ou moins complexes, telles que dans la figure 29.

Les résultats de calcul dans l'exemple choisi font ressortir quelques résonances particulières, susceptibles d'être excitées sur programme musical aux fréquences suivantes : 68 Hz, 76 Hz, 113 Hz, 142 Hz environ. Les cases concernées du tableau ont été repérées. L'expérience montre que ces bandes de fréquence sont à traiter en priorité. La figure 30 montre une présentation de la répartition fréquentielle de ces résonances, où chacune d'elle apparaît sous forme d'un point. Les différents mode axiaux, diagonaux ou tridimensionnels ont été représentés de manière distincte.

En dessous de 63 Hz, les résonances isolées, d'ordre faible vont créer des "trous" dans la réponse en fréquence pour un auditeur placé dans l'axe de la longueur de la pièce. Il n'existe aucun remède contre ces effets, ni acoustique, ni électronique, ni numérique. Les lois de la physique sont hélas incontournables. Le choix d'une pièce de grandes dimensions permet de placer ces résonances à des fréquences assez basses. La première ne devrait pas dépasser 30 Hz, ce qui impose une pièce de 6 m de long au minimum. Les suivantes devraient se répartir régulièrement sans former

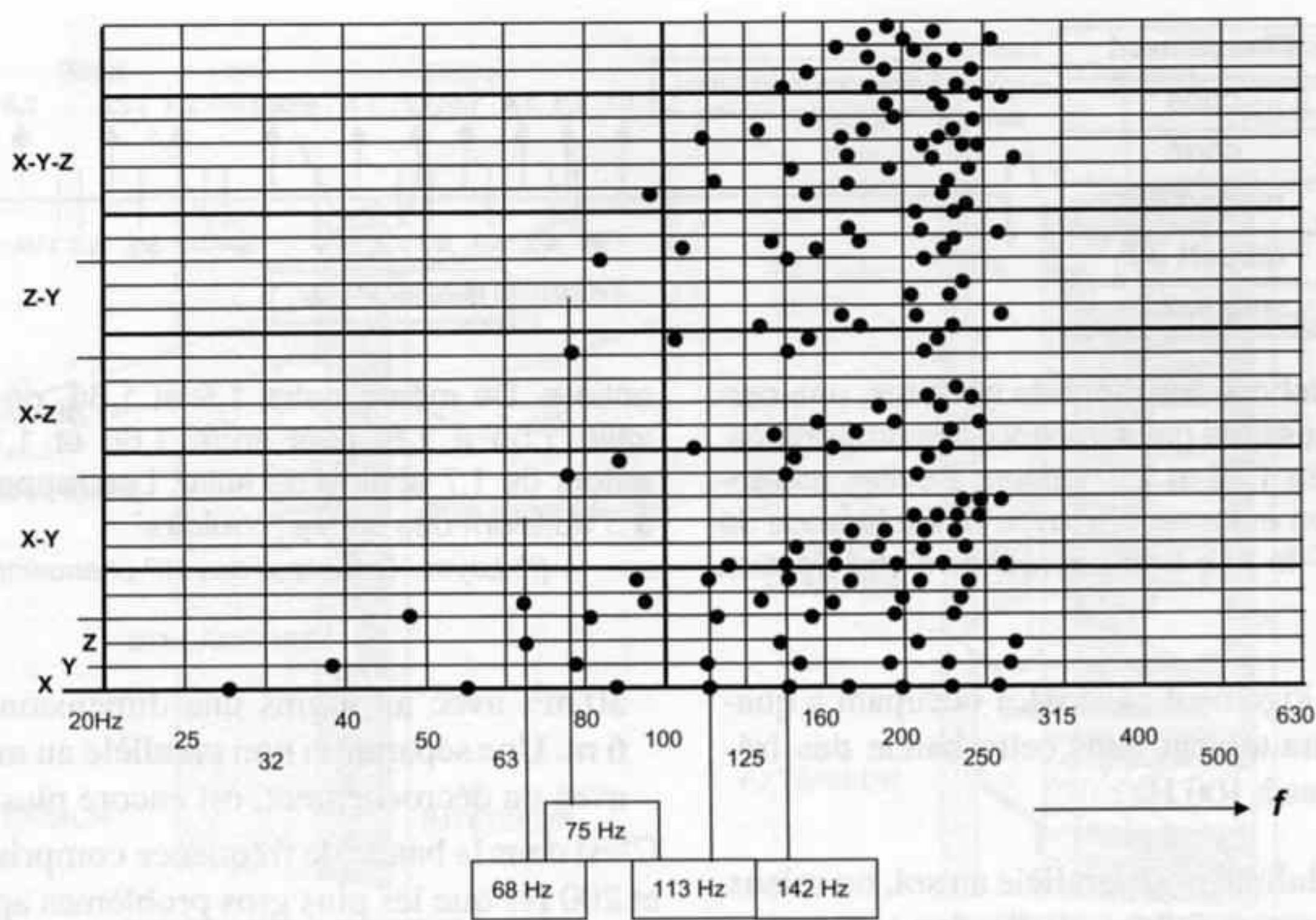


Figure 30 - Bilan des modes de résonances de la salle.

Classement	Proportions
1	1 – 1,4 – 1,9
2	1 – 1,3 – 1,9
3	1 – 1,5 – 2,1
4	1 – 1,4 – 2,2
5	1 – 1,2 – 2,5
6	1 – 1,4 – 2,1
7	1 – 1,1 – 1,4
8	1 – 1,4 – 1,8
9	1 – 1,6 – 2,1
10	1 – 1,2 – 1,4
...	...
66	1 – 1,6 – 2,6
74	1 – 1,5 – 2,5

Figure 31 - Classement établi par Louden du mérite acoustique des salles. En partant d'une hauteur sous plafond de 2,5 mètres, il apparaît que les 8 premiers rangs sont irréalisables car donnant des largeurs de salle de 2,75 à 3,75 m, c'est-à-dire plutôt étroites, en couloir si on respecte une longueur minimale. Par contre, avec une hauteur sous plafond de 3,50 m ou plus, il est possible d'imaginer une salle de 4,90 m de large et 6,65 m de longueur, qui respecte les proportions idéales. C'est donc la hauteur qui conditionne la qualité possible d'une salle. À partir de la contrainte de 2,50 m, imposée par souci d'économie de chauffage, ce sont les rapports de 1,5 à 1,8 puis de 2,1 à 2,8 qui donnent les meilleurs résultats. L'exemple précédent, avec 6 m/4,50 m/2,50 m respecte les proportions 1 – 1,8 – 2,4 qui entrent dans ces intervalles.

de groupe, ce qui impose que les dimensions de la pièce ne soient pas multiples l'une de l'autre. Dans l'exemple présenté, la répartition en dessous de 63 Hz est excellente. Les bonnes proportions de salle ont fait l'objet d'études poussées depuis plus d'un siècle, en particulier par Louden, Sepmeyer ou Pujolle. Les proportions idéales se situent autour de rapports de dimensions particuliers listés figure 31, les proportions du nombre d'or ne semblant pas faire l'unanimité.

Certains rapports de dimensions sont à préférer, et d'autres à proscrire absolument, car produisant des superpositions des modes de résonance. Ces rapports correspondent à des fractions simples comme 3/4, 4/3, 3/2 etc. et bien sûr les multiples entiers, figure 32.

Dans le cas d'une construction neuve, l'architecte responsable du projet devrait donc être informé de la destination de la salle, et décider en conséquence d'une

hauteur sous plafond augmentée, par exemple 2,75 m, ainsi que de proportions correctes aboutissant à une surface au sol convenable. Par exemple, la largeur pourrait s'établir à 5 m (rapport 1,8) ou 6 m (rapport 2,2) mais surtout pas à 5,50 m ! La longueur pourrait alors s'établir à 6,60 m, 7,20 m, ou 7,70 m mais pas 6,90 m ni 8,25 m. Cela aboutit à des surfaces de 33 m² à 46 m². Un salon plus grand n'est envisageable qu'à la condition d'une hauteur sous plafond supérieure. Avec 3 m, par exemple, la largeur sera de 4,80 m, 5,40 m, 6,60 m, ou encore 7,20 m, et la longueur, de 6,60 m, 7,20 m, 7,80 m ou 8,40 m. Les surfaces seront de 32 à 60 m². À l'inverse une pièce de 100 m² demandera une hauteur sous plafond de 4 m, avec largeur de 8,80 m, et longueur de 11,20 m par exemple, cette dernière valeur étant un maximum au-delà duquel se produit un écho franc, perçu séparément de l'onde directe et par conséquent très désagréable.

Proportions	Classement
1 - 1 - 1	cube
1 - 1 - 2	carré
1 - 1,33 - 1,75	rapport 4/3
1 - 1,5 - 2,25	rapport 3/2
1 - 2 - 2,33	rapport 2

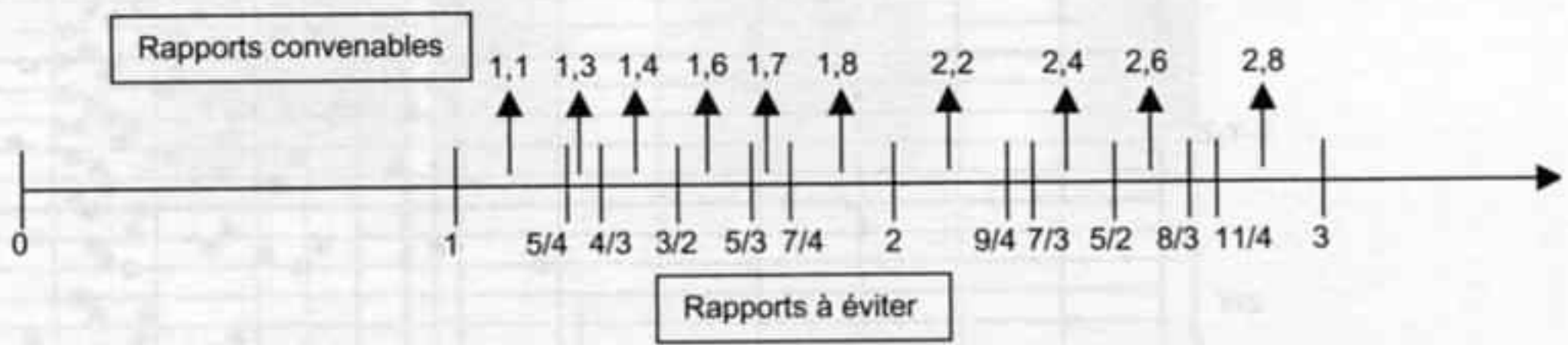


Figure 32 - En dehors des rapports néfastes, une certaine liberté est possible dans le choix des proportions. Par exemple, entre 1,33 et 1,5, valeurs à éviter, un rapport de 1,4 environ est possible, avec une tolérance de 1,38 à 1,45 pour ne pas trop approcher d'une fraction

entière. De même entre 1,5 et 1,66, on trouve l'intervalle 1,55 à 1,6, puis entre 1,66 et 1,75, l'intervalle autour de 1,7 et ainsi de suite. Les rapports supérieurs à 3 donnent des salles "couloirs".

(P. Loyez, *Technique des HP et enceintes acoustiques*)

Dans le cas d'un logement existant, l'occupant a quatre solutions de traitement dans cette bande des fréquences inférieures à 100 Hz :

- Créer un faux plafond non parallèle au sol, ou mieux en dièdre. Des pentes faibles, de l'ordre de 6 °, sont suffisantes pour décaler (mais pas supprimer!) la formation des ondes stationnaires verticales, ou diagonales en hauteur. Ce faux plafond peut également traiter les problèmes de réverbération par la même occasion.
- Créer un relief sur l'un des murs, de manière à s'éloigner du rapport de dimension néfaste. Par exemple, si la longueur vaut 2 fois la hauteur, une cheminée, ou un meuble massif, non vitré, et occupant au moins la moitié de la surface de la cloison, à une extrémité de la salle, augmenteront la diffusion des ondes en les réfléchissant à des instants décalés.
- Établir une ouverture large avec une pièce voisine, ce qui revient à supprimer une partie du mur posant problème, lorsque c'est possible. Cette solution est radicale et revient à agrandir la pièce d'écoute, ce qui impose de traiter également la surface supplémentaire ainsi obtenue. Eviter une simple porte, qui ne constitue pas une ouverture suffisante. Les deux pièces seraient alors couplées, et des résonances issues de la pièce contiguë reviendraient dans la salle d'écoute !
- Installer une cloison, éventuellement avec ouverture, séparant le volume en deux afin de ramener les dimensions utiles à des valeurs proportionnées. Eviter les cloisons légères, en plâtre de 13 mm, qui entreraient en vibration aux fréquences graves en ajoutant d'autres problèmes, et préférer une paroi double d'au moins 100 mm d'épaisseur, en carreaux de plâtre ou briques avec absorbant interne... Cette solution s'adresse aux pièces longues et assez grandes, la surface restante devant être supérieure à

30 m², avec au moins une dimension supérieure à 6 m. Une séparation non parallèle au mur opposé, ou avec un décrochement, est encore plus profitable.

C'est dans la bande de fréquence comprise entre 63 Hz et 200 Hz que les plus gros problèmes apparaissent, et que des moyens de traitement parfois lourds devront être mis en œuvre, ceci même si les proportions du local sont convenables. Dans cette bande se trouve habituellement la résonance d'ordre 1 entre sol et plafond, vers 68 Hz dans l'exemple calculé précédemment. Des superpositions de modes existent à cette fréquence : vertical Z plus diagonal X-Y, mode 2-1-0 vers 68 Hz, mais aussi axial Y mode 2-0-0, et diagonaux X-Z mode 1-0-1 et Y-Z mode 0-1-1, tous trois vers 75 Hz.

Un second problème apparaît autour de 115 Hz dans l'exemple, avec 6 modes superposés, puis une troisième bande accumule les résonances, autour de 142 Hz avec une dizaine de modes.

Au-delà de 200 Hz, les résonances sont suffisamment proches pour se fondre ensemble, et le traitement de la réverbération commence son effet.

Ces valeurs sont typiques des habitations modernes, dont l'exemple est tiré, et dans lesquelles un traitement des bandes centrées sur 70 Hz (63 à 80 Hz environ) et 110 Hz (100 à 125 Hz environ) s'avère indispensable. La bande centrée sur 140 Hz (125 à 160 Hz environ) bénéficiera quelque peu du traitement établi pour 70 Hz, qui par chance sera assez efficace pour les fréquences multiples.

Ces résonances ne peuvent être diminuées par les matériaux absorbants disposés aux murs, ou au plafond. En effet, pour être efficace, le matériau utilisé doit présenter une épaisseur au moins égale à 1/10^e de la longueur d'onde, et il n'a son plein effet qu'à 1/4 de longueur d'onde. C'est-à-dire qu'à 100 Hz, fréquence pour laquelle la longueur d'onde est de 3,40 m, il faudrait une épaisseur de 30 à 80 cm de laine minérale, sur au moins deux parois, et une épaisseur encore plus importante aux fréquences inférieures !

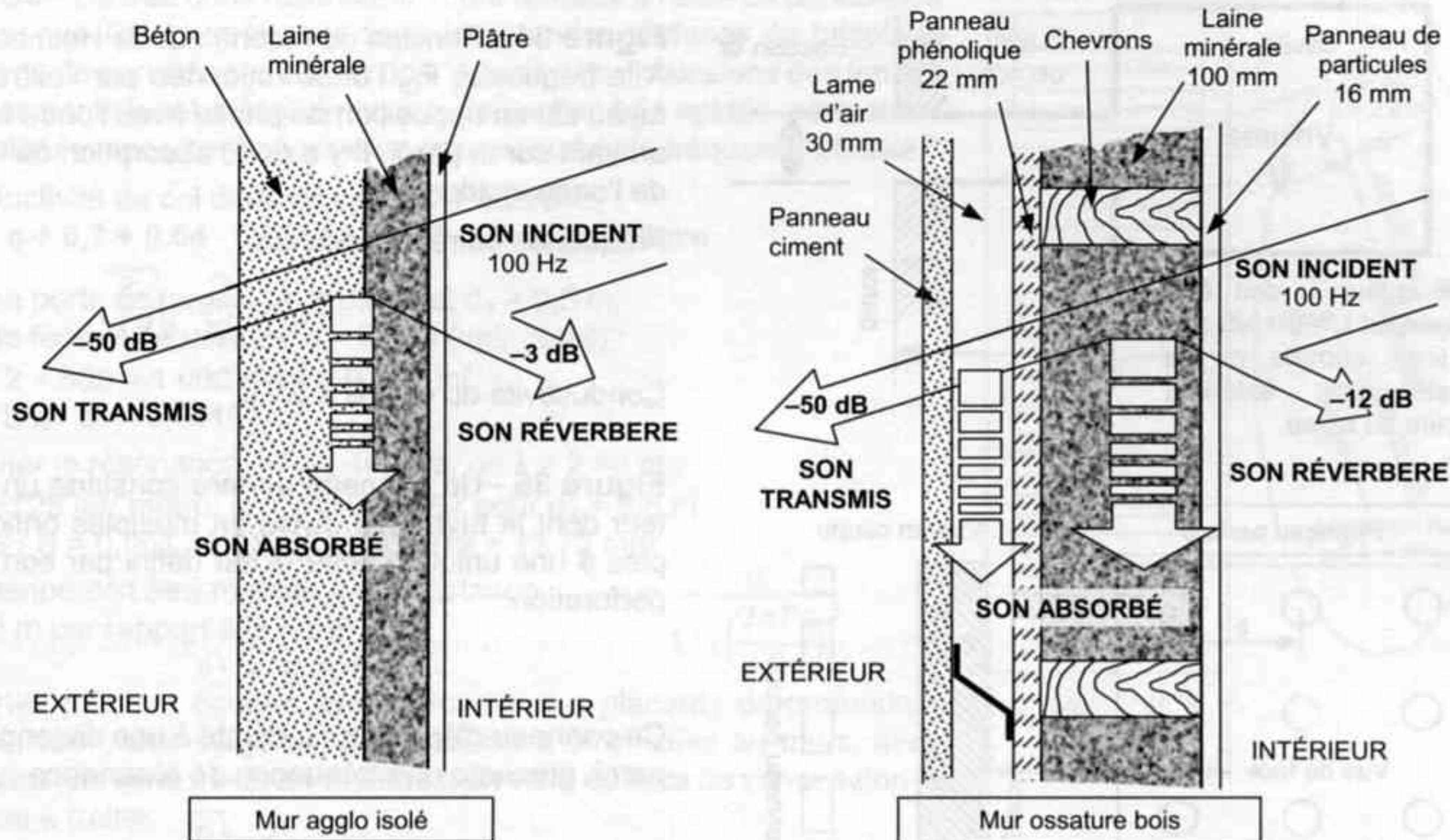


Figure 33 - Les murs à ossature bois, en plus d'une excellente isolation thermique, réfléchissent beaucoup moins les basses fréquences que les murs en dur, béton ou parpaings. L'isolement par rapport aux bruits extérieurs est obtenu par multiplication des parois, ce qui est plus efficace qu'une augmentation de la masse surfacique. Les parois doubles présentent l'inconvénient de transmettre les sons à la fréquence de leur résonance propre. Dans l'exemple ci-dessus, la combinaison de trois panneaux, de ciment (30 kg/m²), de bois traité (25 kg/m²), de particules (20 kg/m²) isole aussi

bien (R = 50 dB) qu'un mur de parpaings d'épaisseur 22 cm et de 250 kg/m², isolé par laine minérale ! Les masses différentes des trois panneaux provoquent un décalage des fréquences propres (84 Hz et 76 Hz). Cependant, l'énorme avantage de ces constructions réside dans la diminution de l'énergie réverbérée dans la pièce aux basses fréquences, justement là où les plus gros problèmes se rencontrent. Les résonances sont par conséquent moins fortes et l'acoustique plus agréable, plus neutre. Un traitement de correction léger suffit.

Seuls des résonateurs, travaillant en opposition avec la salle pour annuler les résonances, et basés soit sur le principe de membrane flexible soit sur celui de cavité accordée seront utiles.

- La membrane souple peut être un panneau de bois mince ou de contreplaqué monté sur cadre fixé non rigidement à quelques centimètres du mur. La fréquence absorbée se calcule simplement :

$$Fa = \frac{600}{\sqrt{m \cdot d}}$$

m étant la masse surfacique du panneau en kg/m², et d la distance entre mur et panneau en cm. Par exemple, un panneau de contreplaqué de 12 mm d'épaisseur, de masse surfacique égale à environ 7,8 kg/m², et monté à 10 cm du mur, absorbera la résonance située autour de 68 Hz. Une surface au moins égale à la moitié de celle du mur à traiter doit être utilisée. Ces panneaux peuvent recevoir une finition en vue de traiter la réverbération, avec des matériaux absorbants. Les panneaux muraux spéciaux pour correc-

tion acoustique réalisent une certaine absorption des résonances s'ils sont montés souples à quelques centimètres du mur. La masse surfacique ne figurant pas toujours dans les notices des fournisseurs, il est possible de l'estimer en pesant le panneau et en calculant son volume, ou en prenant la densité égale à environ 650 kg/m³ pour la plupart des dérivés du bois.

Les maisons à ossature bois, figure 33, dont les murs sont réalisés par panneaux de particules phénoliques, d'épaisseur comprise entre 16 et 22 mm, montés sur chevrons, présentent de bonnes caractéristiques acoustiques aux basses fréquences, en plus d'un confort thermique exceptionnel. Elles sont plus répandues en Europe du nord.

- La cavité accordée, appelée aussi résonateur de Helmholtz, est constituée d'un volume rempli d'air faisant office de ressort grâce à son élasticité, et d'un tuyau communiquant avec la salle à traiter. L'air dans le tuyau présente une certaine masse, l'ensemble est donc assimilable à un système masse-ressort,

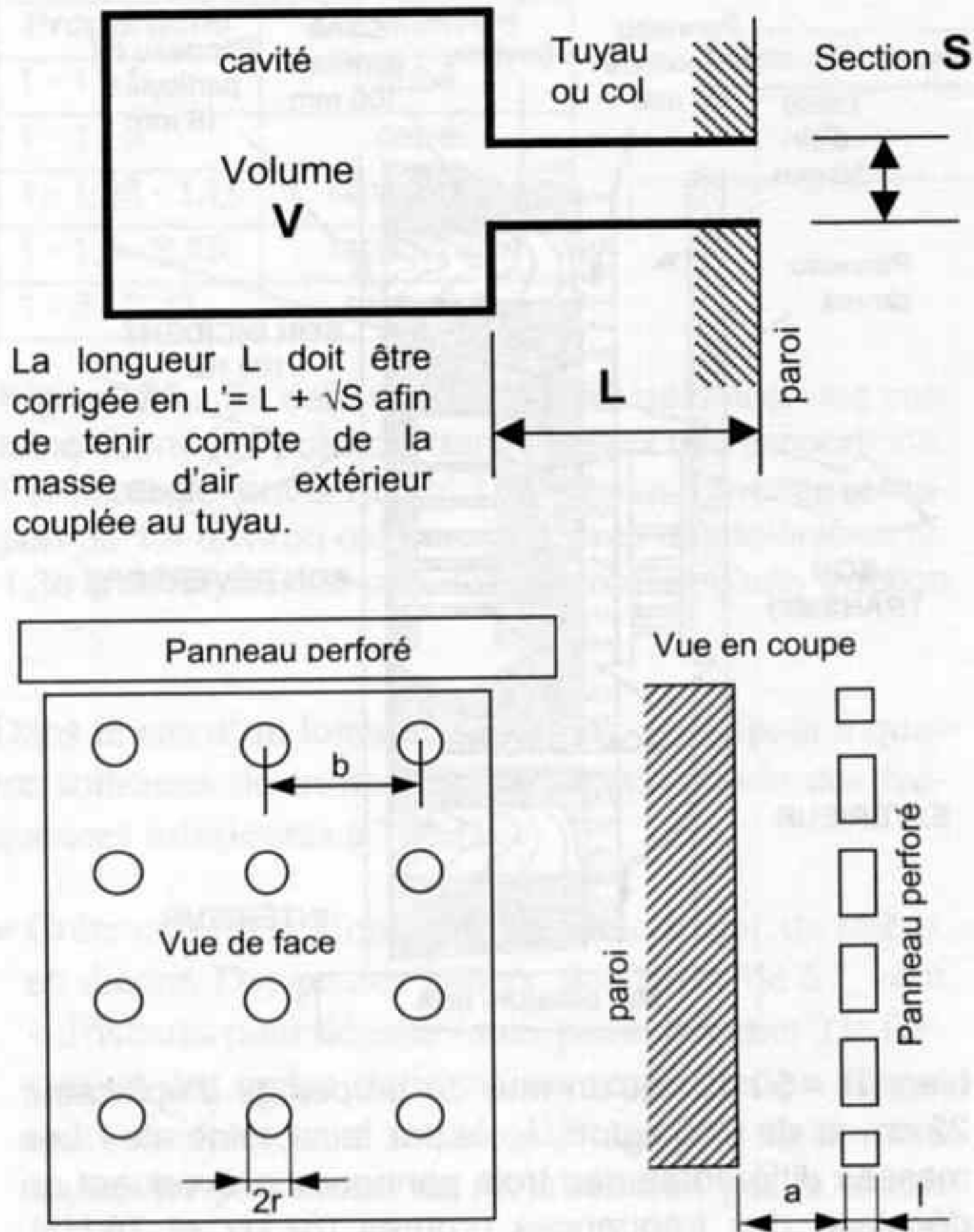


Figure 34 - Principe du résonateur de Helmholtz.

À la fréquence F_0 , l'onde rayonnée par l'extrémité du tuyau est en opposition de phase avec l'onde incidente arrivant sur la paroi. Il y a donc absorption de l'énergie de l'onde incidente.

Fréquence de résonance :

$$F_0 = \frac{C}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{VL'}}$$

Conductivité du col : $B = S / L'$

Figure 35 - Un panneau perforé constitue un résonateur dont le tuyau est divisé en multiples orifices couplés à une unique cavité. Il est défini par son taux de perforation :

$$\sigma = \pi \cdot r^2 / b^2$$

Ce panneau d'épaisseur l , monté à une distance a de la paroi, présente une fréquence de résonance :

$$F_0 = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{al'}}$$

Avec :

$$l' = l + \sqrt{\pi r^2}$$

et présente par conséquent une résonance. Dès l'antiquité, ce principe était utilisé sous la forme de vases, pour augmenter l'intelligibilité de la parole dans les théâtres. Certaines églises contiennent également des vases de poterie, en nombre suffisant pour atténuer les résonances et diminuer le traînage. Un moyen plus pratique consiste à réaliser une multitude de résonateurs, couplés à un volume commun, en perçant de nombreux trous dans un panneau. Le volume sera défini par la distance séparant le panneau du mur, auquel il devrait être fixé soûplement et de manière étanche. Les figures 34 à 36 rappellent quelques éléments de calcul d'un résonateur de Helmholtz, et des dimensions de panneaux perforés.

L'absorption obtenue concerne une bande étroite de fréquences autour de la résonance, cependant un effet sur une bande plus large peut être obtenu en interposant un matériau absorbant entre panneau et paroi, laine minérale non tassée par exemple, protégée par un voile de fibre de verre acoustiquement transparent. Des panneaux de ce type sont fournis par divers fabricants, par exemple Obersound. Une finition par pose de tissu agrafé apportera une esthétique plus agréable ainsi qu'une correction de la réverbération.

La réalisation de ce type de panneau par l'amateur est tout à fait possible : une calculette et une simple perceuse suffisent... ainsi qu'une bonne dose de patience

pour effectuer les centaines de perçages nécessaires ! En utilisant des panneaux de particules agglomérées, le prix de revient reste modéré.

Dans l'exemple précédent, la résonance vers 70 Hz sera très efficacement combattue avec un panneau d'épaisseur 20 mm, fixé à 100 mm du mur, et percé de trous diamètre 6 mm, espacés de 81 mm environ. Plusieurs panneaux, de hauteur 2,50 m et de largeur 1 m par exemple, seront disposés de préférence sur le mur du fond, derrière l'auditeur, ainsi que sur les murs latéraux dans la zone d'écoute. Compter au minimum 10 m², soit 4 panneaux, pour obtenir une efficacité suffisante. Si l'écartement par rapport au mur est limité à 50 mm, l'entraxe des trous devra passer à 116 mm. La surface total des trous sera alors plus faible et l'efficacité moindre, mais l'encombrement sera réduit.

La bande des 110 Hz sera traitée par des panneaux de même épaisseur et dimensions, montés de la même manière à 100 mm du mur, et percés au diamètre 6 mm mais avec un espacement de 50 à 51 mm cette fois entre les trous. Si l'écartement passe à 50 mm par rapport au mur, l'entraxe de perçage sera de 71 mm environ. La densité de trous étant supérieure lorsque la fréquence à traiter augmente, l'efficacité est meilleure. Il est possible de combiner les différents panneaux, en alternant sur le mur du fond des panneaux à entraxe 81 mm placé à 100 mm du mur, et des panneaux à entraxe 71 mm placés à 50 mm du mur. Le parallé-

Figure 36 - De très bons résonateurs sont réalisés à l'aide de persiennes ouvertes, que l'on peut trouver dans les grandes surfaces de bricolage sous forme de porte de placard en bois massif. Les dimensions des fentes, lesquelles constituent autant de tuyaux de section très aplatie, permettent de calculer l'espacement nécessaire pour absorber la fréquence choisie.

La conductivité du col dans ce cas est (Pedersen) :

$B = [L / e + 0,7 + 0,64 \cdot \log(\lambda / e \cdot \pi)]^{-1}$ par mètre linéaire.

Avec une porte de largeur $d_2 = 0,6$ m et $d_1 = 0,5$ m, munie de fentes d'épaisseur $e = 2$ mm (voir détail) :

$$S = 2 \times 500 = 1\,000 \text{ mm}^2 = 0,001 \text{ m}^2$$

$$\sigma = S/b \cdot d_2 = 0,04167 \dots$$

pour traiter la résonance à $F_0 = 140$ Hz, où $\lambda = 2,46$ m :

$B = 0,15725$ par mètre, soit $B = 0,07862$ pour $d_1 = 0,5$ m

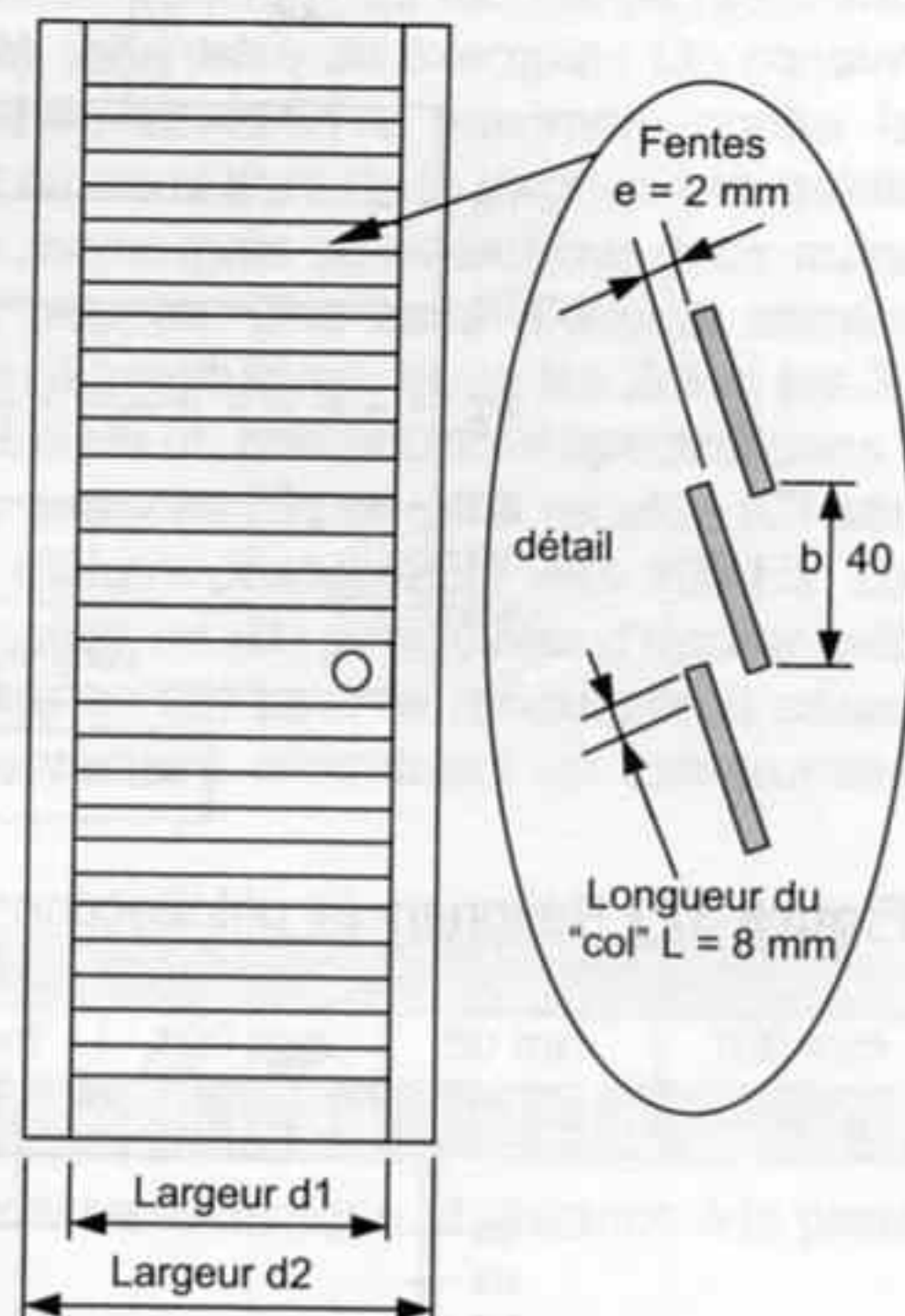
Et $L' = S / B = 0,001 / 0,07862 = 0,01272 = 12,72$ mm

La persienne doit être montée à une distance

$a = 0,50$ m par rapport à la paroi :

$$a = \frac{\sigma}{L' \cdot \left(\frac{2\pi F_0}{C}\right)^2}$$

Ces portes peuvent équiper avec efficacité des placards de profondeur 0,50 m environ, des étagères, ou simplement être fixées au murs, avec interposition de laine minérale revêtue d'un voile de fibre de verre, selon la fréquence à traiter.



lisme des parois sera ainsi brisé, de même que si les panneaux sont montés avec un léger angle de quelques degrés, ce qui a pour effet supplémentaire d'élargir la bande de fréquences traitée.

Une analyse un peu plus poussée des modes de résonance de la salle montre qu'à la fréquence de 113 Hz correspondent les modes suivants :

1. Transversal Y 0-3-0 : Il y a donc dans la largeur de la salle 3 ventres à pression nulle, et deux zones d'intensité maximale, au tiers et au deux tiers de la largeur. Si la zone d'écoute se situe dans l'axe de la salle, le renforcement dû à ce mode risque de passer inaperçu. Les auditeurs placés de part et d'autre de l'axe médian seront moins bien lotis.
2. Longitudinal X 4-0-0 : existence de trois zones fortes à 1/4, 1/2 et 3/4 de la longueur de la salle. Si la zone d'écoute se situe au 3/4 de la longueur, cette fréquence sera renforcée.
3. Diagonal X-Y 1-3-0 : Impair en Y donc même remarque qu'en 1).
4. Diagonal X-Y 3-2-0 : Il y aura renforcement pour un auditeur placé dans l'axe médian de la salle, excepté au 1/6, 1/2, et 5/6 de la longueur.
5. Tridimensionnel X-Y-Z 3-1-1 : Impair en Y donc même remarque qu'en 1).
6. Tridimensionnel X-Y-Z 2-2-1 : Pair en Y donc même remarque qu'en 4) avec renforcement sauf au 1/4 et 3/4 de la longueur.

Les figures 37 à 39 montrent en vue de dessus, de manière simplifiée, les zones sourdes (pointillés) et les zones fortes (traits forts) pour chacun des six modes considérés. La superposition de ces figures permet de

rechercher les zones favorables pour situer la zone d'écoute, et également les enceintes acoustiques. Sources et auditeur gagneront à être placés en dehors des zones fortes, afin de ne pas exciter ni recevoir les effets des résonances.

Seuls les axes X et Y ont été représentés pour les modes tridimensionnels, afin de faciliter la compréhension. Ces modes tridimensionnels étant d'ordre 1 en Z, il y aura donc une zone sourde à mi-hauteur de la salle pour cette bande de fréquence autour de 113 Hz. Les zones fortes apparaîtront au sol et au plafond. La position assise de l'auditeur situe sa tête un peu en dessous de la zone sourde, avec par conséquent une influence faible du mode vertical. Par contre, les modes uni et bidirectionnels vont se superposer, ce que récapitule la figure 40.

Dans certains cas, le positionnement judicieux des sources et de l'auditeur permet de retrouver un niveau apparent correct dans la bande de fréquence centrée sur 110 Hz environ, ce qui peut laisser croire qu'un traitement de cette bande est inutile. L'expérience montre cependant qu'une meilleure homogénéité de la restitution, ainsi qu'une plus grande rapidité des sons graves est obtenue après traitement, avec surtout une extinction plus brève, plus légère des notes, grâce à un traînage diminué. L'extrême grave se trouve révélé, libéré, alors qu'il était auparavant masqué par ces toniques répétitives dans la bande 100-125 Hz. Le rendu dans cette bande est primordial pour le réalisme de la restitution.

En ce qui concerne la bande de fréquence centrée sur 140 Hz, à nouveau des panneaux d'épaisseur 20 mm seront efficaces, percés au diamètre 6 mm, avec entraxe

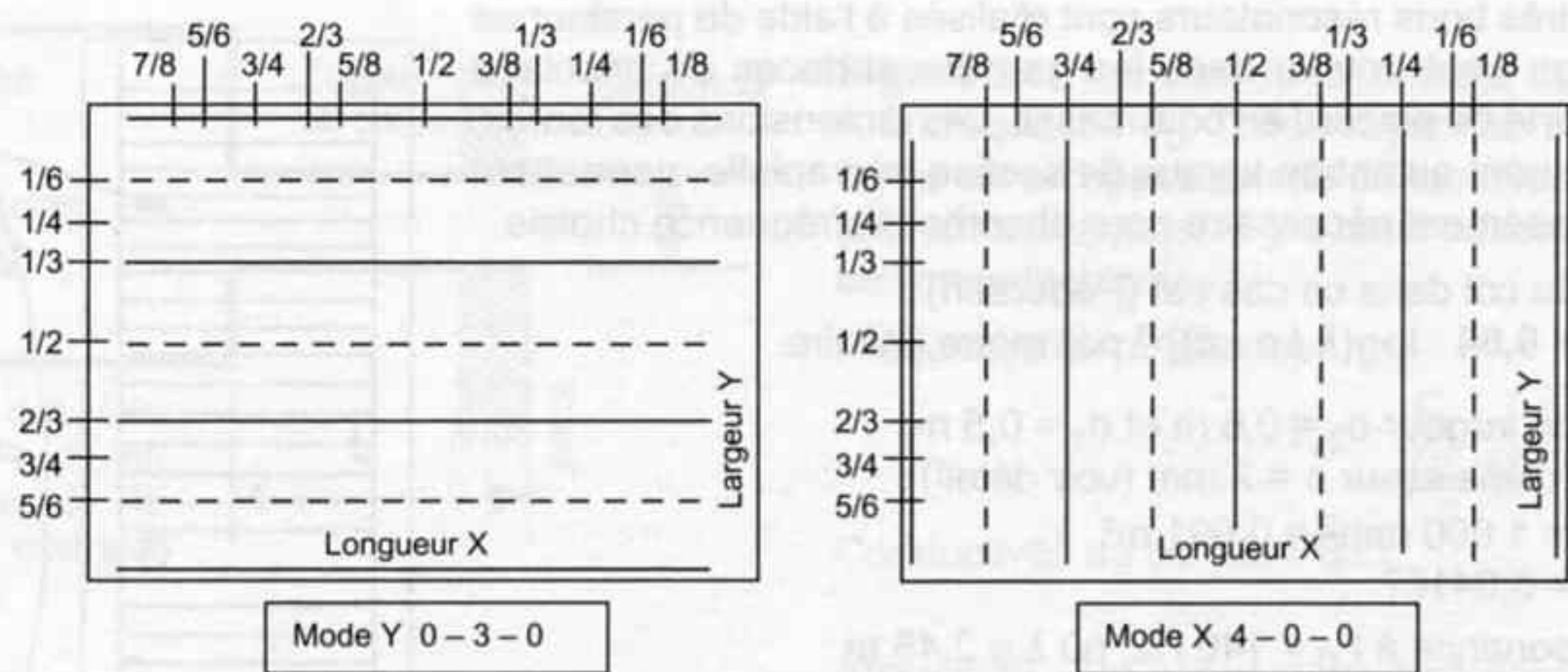


Figure 37 - Résonances unidirectionnelles à f = 113 Hz.

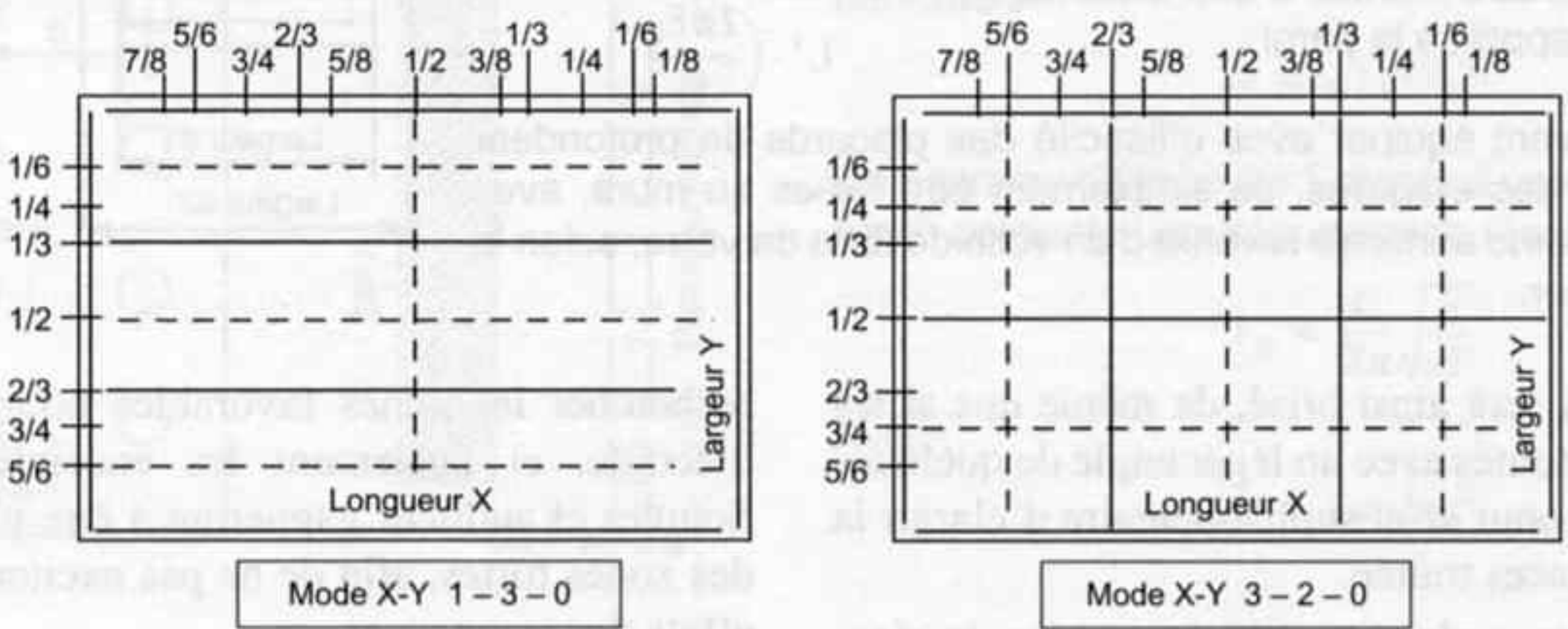


Figure 38 - Résonances bidirectionnelles à f = 113 Hz.

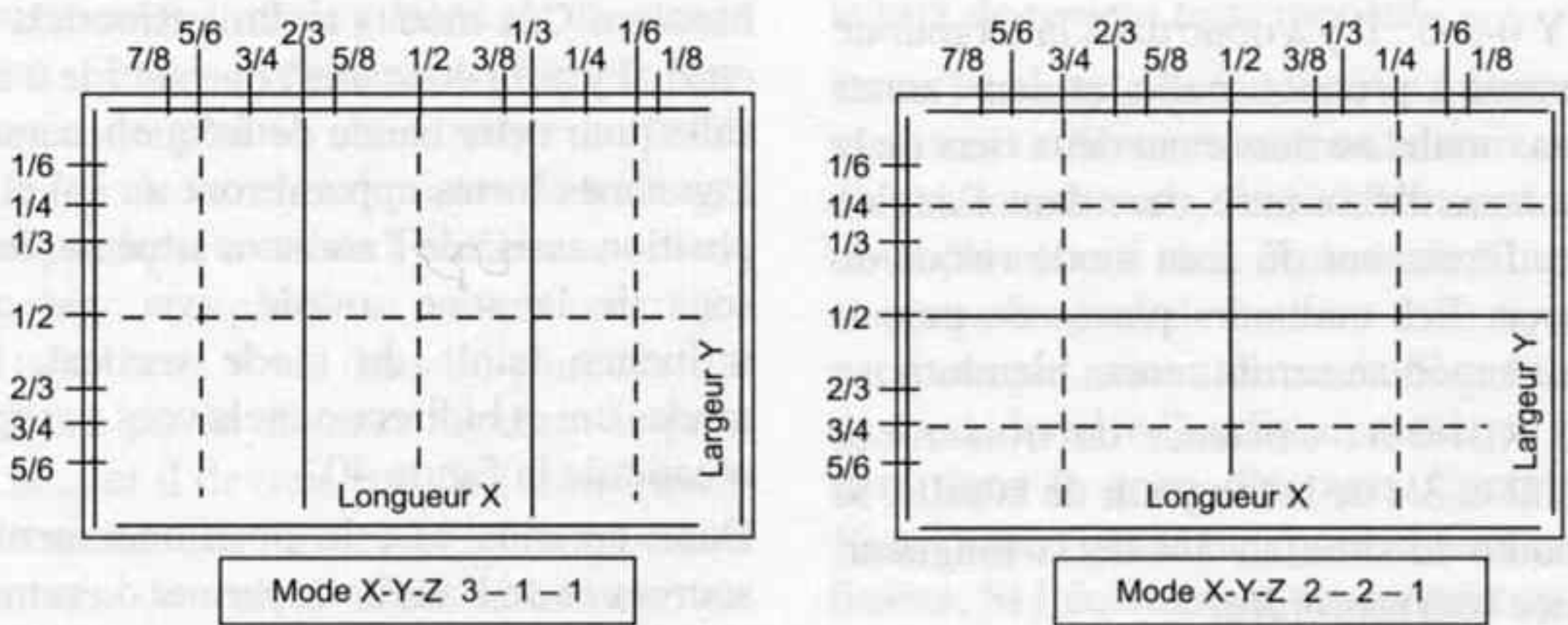


Figure 39 - Résonances tridirectionnelles à f = 113 Hz

de 40 mm s'ils sont montés à 100 mm du mur, ou entraxe de 57 mm s'ils sont à 50 mm du mur. Des persiennes peuvent également convenir (voir figure 36).
Tout les panneaux dont il a été question ici présenteront, s'ils sont réalisés en particules agglomérées, une masse surfacique de 10 à 15 kg/m², ce qui leur donnera un effet de membrane s'ils sont fixés souplement (interposition de rondelles caoutchouc entre panneaux et profils de fixation). Les résonances combattues par ces membranes se situeront autour des fréquences indiquées (figure 41), souvent 10 % plus haut à cause de la raideur des fixations.

En partant d'une pesée précise du panneau, il est aisé de déterminer à quelle distance du mur il convient de le fixer. Il ne reste plus ensuite qu'à calculer l'entraxe des trous connaissant leur diamètre. Deux valeurs standards sont l'épaisseur, autour de 20 mm (17 à 22 mm) afin d'avoir un panneau assez massif, et le diamètre des trous, souvent de 6 mm, parfois 8.
Un premier essai sera effectué avec des panneaux à faible densité de perçage, qui pourront être éventuellement reperçés pour un second essai. La distance idéale par rapport au mur n'est pas facile à établir en l'absence d'appareil de mesure de la pression acousti-

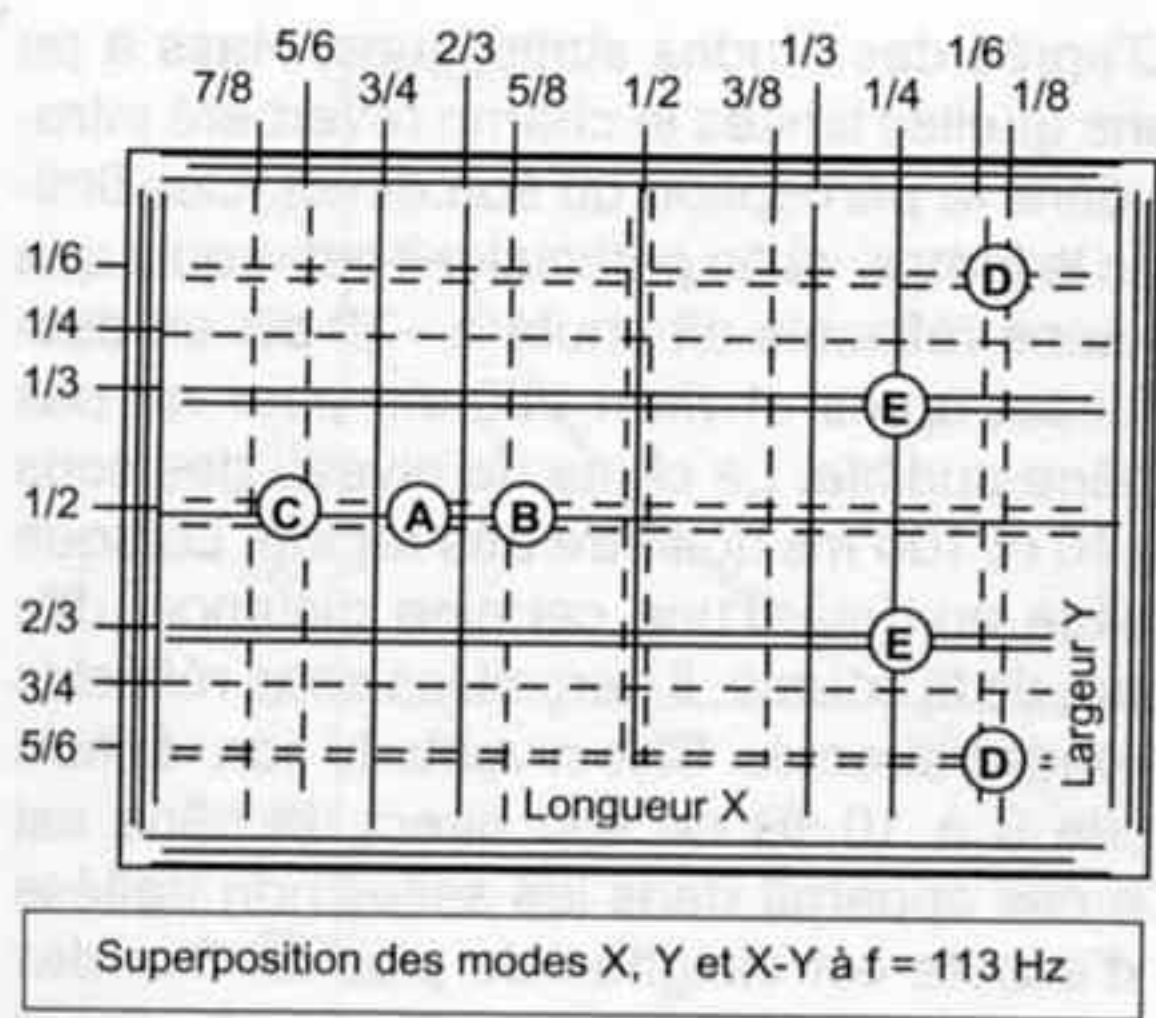


Figure 40 - Bilan de la superposition des modes de résonance autour de 113 Hz, dans la salle prise en exemple : On constate la présence d'une pression acoustique maximale contre les murs, ainsi qu'au tiers et au deux tiers de la largeur. Les médianes étant fortes pour un mode mais sourdes pour deux autres seront finalement assez neutres. Une zone d'écoute correcte peut être choisie dans l'axe longitudinal, entre les 2/3 et les 3/4 de la longueur (A). On y trouve un bon équilibre spectral dans le grave. Une position plus avancée (B) ou plus reculée (C) sera préférée pour éviter une tonique désagréable vers 100 Hz. Les enceintes seront positionnées en (D) pour éviter d'exciter cette fréquence, ou au contraire en (E) pour la rehausser si nécessaire, toute position intermédiaire constituant un compromis à rechercher.

Masse surfacique	10 kg/m2		12,5 kg/m ²		15 kg/m ²	
Distance au mur	50 mm	100 mm	50 mm	100 mm	50 mm	100 mm
Fréquence absorbée	85 Hz	60 Hz	76 Hz	54 Hz	70 Hz	49 Hz

Figure 41 - Fréquences absorbées par panneaux montés souples, selon masse surfacique et distance à la paroi.

que, mais avec un disque de fréquences pures écouté à niveau assez élevé, et en se promenant dans la pièce, l'auditeur détecte aisément les zones fortes ou sourdes. La différence perçue après pose provisoire de quelques panneaux est évidente, et la comparaison de différentes distances de pose est possible. Bien sûr le temps requis est important, mais le jeu en vaut largement la chandelle, et il est probable que cette amélioration sera une, sinon la plus importante réalisée sur le système ! L'efficacité de ces panneaux est évidemment proportionnelle à leur surface totale. Dans la plupart des cas, une réduction de 6 dB, c'est-à-dire de moitié, de l'amplitude d'une résonance gênante, procure déjà un gain appréciable de qualité. Une atténuation de 10 dB rend cette résonance pour ainsi dire imperceptible, ce qui peut être obtenu en couvrant complètement une paroi, de préférence le mur du fond. Si plusieurs résonances doivent être combattues, il sera nécessaire de combiner différents panneaux, en essayant diverses combinaisons, la réduction d'amplitude pour chacune des résonances sera moindre dans ce cas. Une surface traitée inférieure au quart de celle du mur n'est d'aucune utilité ou presque.

La fixation peut être faite par vissage dans des tasseaux eux-mêmes vissés dans le mur, l'interposition de cales souples, grosses rondelles de caoutchouc par exemple, améliore le fonctionnement de ces panneaux. Des joints de plomberie en néoprène peuvent convenir. Une bande de caoutchouc placée au sol sous la tranche du panneau est utile également. Les plinthes et corniches seront découplées du panneau par une bande de mousse adhésive par exemple.

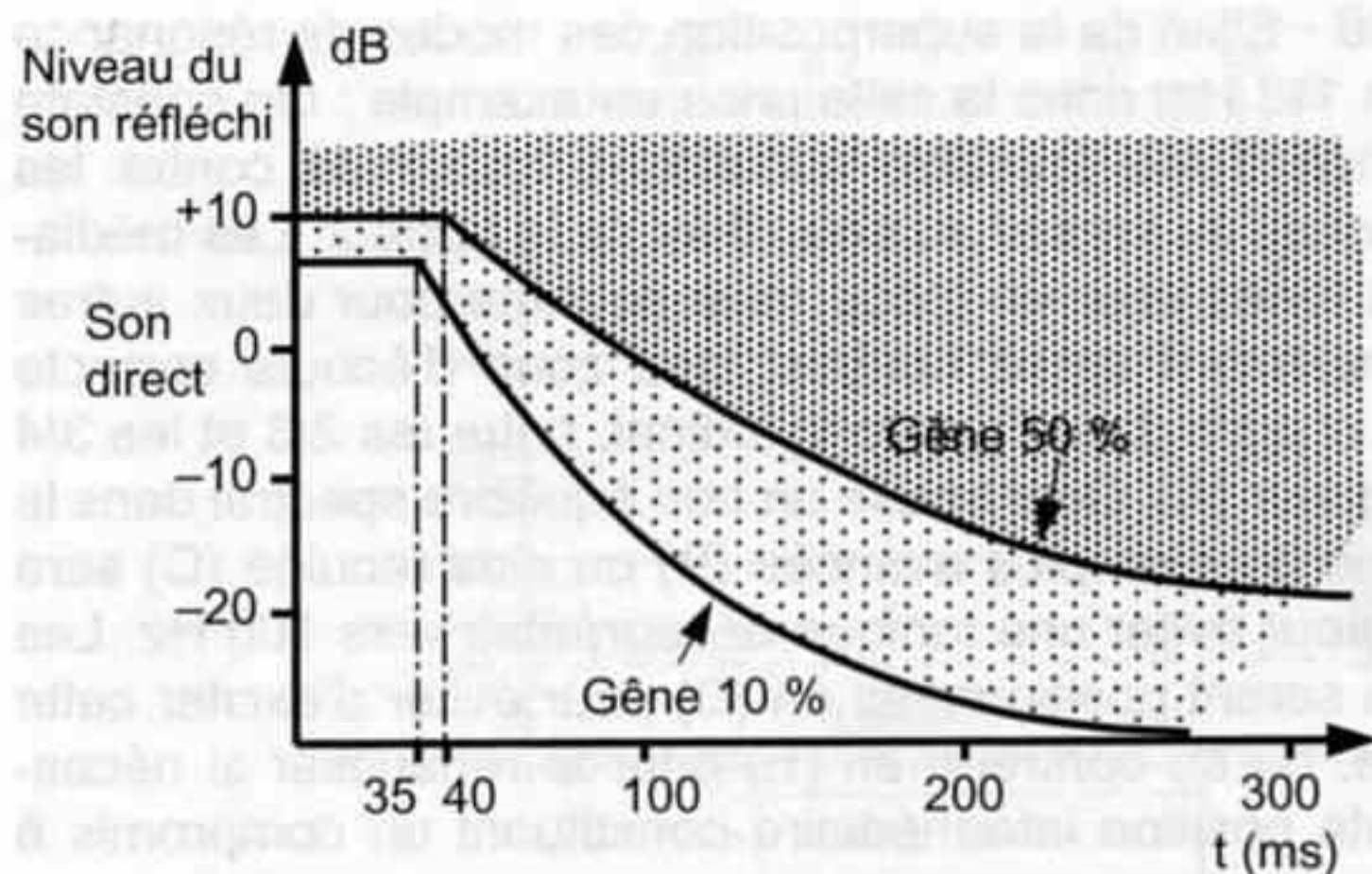
Il va sans dire que la finition ne doit en aucun cas masquer les trous. Seul un tissu acoustiquement transparent est possible, après avoir peint le panneau en noir mat afin que les trous soient invisibles après pose du tissu. Si les panneaux n'occupent que la partie basse des murs, une finition crépie semble idéale.

La priorité absolue devrait être donnée à la bande de fréquence 100-125 Hz, avec une contrainte d'antériorité telle que le traitement des autres fréquences est inutile avant celui de cette bande.

Il est souvent nécessaire d'associer plusieurs traitements sur la même paroi, absorption des résonances d'une part, correction de la réverbération d'autre part. Une solution intéressante consiste à disposer les panneaux perforés en partie basse des murs du fond et latéraux, et d'autres matériaux poreux, fibreux ou cellulaires en partie haute pour la correction du temps de réverbération. Il est possible également d'installer les différents traitements en bandes verticales alternées.

Enfin pour en terminer avec ces résonances, les accessoires baptisés "Bass-traps" sont constitués de cylindres à poser debout au sol, ou de demi-cylindres à fixer au mur, ou encore de quarts de cylindres à disposer en encoignure. Ils combinent les principes de membrane souple et de résonateur, et présentent l'avantage d'une solution amovible, modulaire et ne demandent ni travaux d'aménagement du logement ni talents de bricoleurs. Leur placement dans les coins impose par contre des contraintes de disposition du mobilier, et leur esthétique est discutable lorsque fixés aux murs.

Un dernier point, concernant les moyens à adopter pour éviter d'exciter une résonance gênante, sera abordé au chapitre suivant (7) lorsqu'il sera question du positionnement des enceintes, et du choix de la



La courbe de gêne 10 % donne la limite de bonne qualité
La courbe de gêne 50 % donne la limite d'intelligibilité

position d'écoute, ces deux paramètres permettant une optimisation finale quand l'acoustique de la salle est correcte.

TRAITEMENT DE LA RÉVERBÉRATION

L'objectif de ce traitement de correction acoustique est d'obtenir une intensité du champ réverbéré diminuant rapidement et régulièrement, en un temps limité, ceci afin de démasquer l'extinction des notes. La dynamique s'en trouvera augmentée, et les faibles signaux émergeront plus nettement d'une masse sonore moins dense. D'autre part cette décroissance doit être indépendante de la fréquence, autrement dit le champ réverbéré, défini en début de chapitre, doit conserver un timbre constant lorsque son intensité décroît. La valeur du temps de réverbération Tr couramment admise pour une grande salle de concert se situe au-delà de la seconde, alors que dans une salle de taille moyenne ou réduite destinée à la musique, elle se trouve dans l'intervalle de 0,5 à 0,8 s.

Prendre cette valeur pour cible dans un local destiné à la **reproduction** musicale constitue une **erreur** grossière : S'il est vrai que la musique directe, c'est-à-dire jouée par des instrumentistes présents, demande une certaine réverbération naturelle ou artificielle, telle que définie dans une salle de concert ou un studio de prise de son par exemple, en revanche la musique enregistrée comporte déjà des signaux correspondants aux caractéristiques acoustiques du lieu de la prise de son, à condition que celle-ci soit réalisée correctement et naturellement. La salle d'écoute pour la reproduction musicale ne devrait dans l'idéal **ajouter aucune réverbération** dépassant en niveau et en temps celle du lieu de prise de son.

Par conséquent, la valeur cible de Tr doit être choisie inférieure à 0,35 s, une valeur de 0,25 à 0,3 s semblant idéale. Ce point est fondamental dans l'obtention d'un très grand réalisme sonore. Toute valeur de Tr supé-

Figure 42 - D'après des études statistiques, Hass a pu déterminer dans quelles limites le champ réverbéré introduit une gêne dans la perception du son direct. Ces limites varient avec le temps, et en particulier il est requis que le niveau des sons réfléchis ait chuté à -30 dB en dessous du son direct après environ 250 ms pour ne pas introduire de gêne audible. La chute de niveau des sons réfléchis entre 40 et 100 ms doit être très rapide. Lorsque l'auditeur se situe au-delà d'une certaine distance, dite distance critique, de la source, il perçoit les sons réfléchis mieux que les ondes directes. Si le niveau du son réfléchi est supérieur de 6 à 10 dB au son direct, la gêne est importante. Ce cas apparaît dans les salles non traitées si la position d'écoute est éloignée de plus de 3 m des haut-parleurs. (*Techniques de l'Ingénieur, Electro-acoustique*)

rieure apportera une fausse sensation d'espace supplémentaire, ce qui peut satisfaire le goût esthétique de l'auditeur mais l'empêchera d'apprécier le rendu réel de l'espace sonore du lieu de l'événement. Une mode actuelle tend à imposer de petites enceintes dans une acoustique trop réverbérante aux fréquences graves. C'est le jeu des compensations, par lequel les fabricants adaptent leurs produits aux contraintes de l'habitat. Le nivellement des performances par le bas est assuré...

En pratique, la décroissance de niveau du champ diffus ne suit pas une loi rigoureusement linéaire en fonction du temps, car des réflexions et des résonances à basse fréquence viennent perturber l'absorption de l'énergie sonore. C'est pourquoi une petite marge de sécurité est prise en visant un temps de réverbération de l'ordre de **0,3 s** (voir figures 42 et 43). D'autre part il est important de noter que cette contrainte de $Tr < 0,3$ s doit être respectée à toute fréquence supérieure à 250 Hz environ, fréquence de transition moyenne des salles de séjour habituelles, au-dessus de laquelle il n'existe plus de résonances distinctes.

Dans de très nombreux cas observés, le Tr de la pièce avant traitement diminue lorsque la fréquence augmente, et encore plus après traitement superficiel par simple revêtement. C'est au contraire un Tr plus faible aux basses fréquences qui est recherché, avec par exemple 0,2 s à 250 Hz et 0,35 s à 4 kHz.

Évidemment un temps de réverbération aussi bref que 0,3 s peut faire paraître la salle plutôt sourde si les informations d'espace sont absentes de l'enregistrement, ou que le niveau d'écoute est trop bas pour qu'elles apparaissent. Ce point très important du niveau d'écoute sera abordé plus en détail au chapitre suivant (7), mais je tiens à préciser que les informations d'espace sont de faible niveau sonore comparées aux ondes directes rayonnées par les instruments. Elles se situent souvent entre -20 dB et -40 dB, et restent en grande partie en dessous du seuil d'audition, surtout

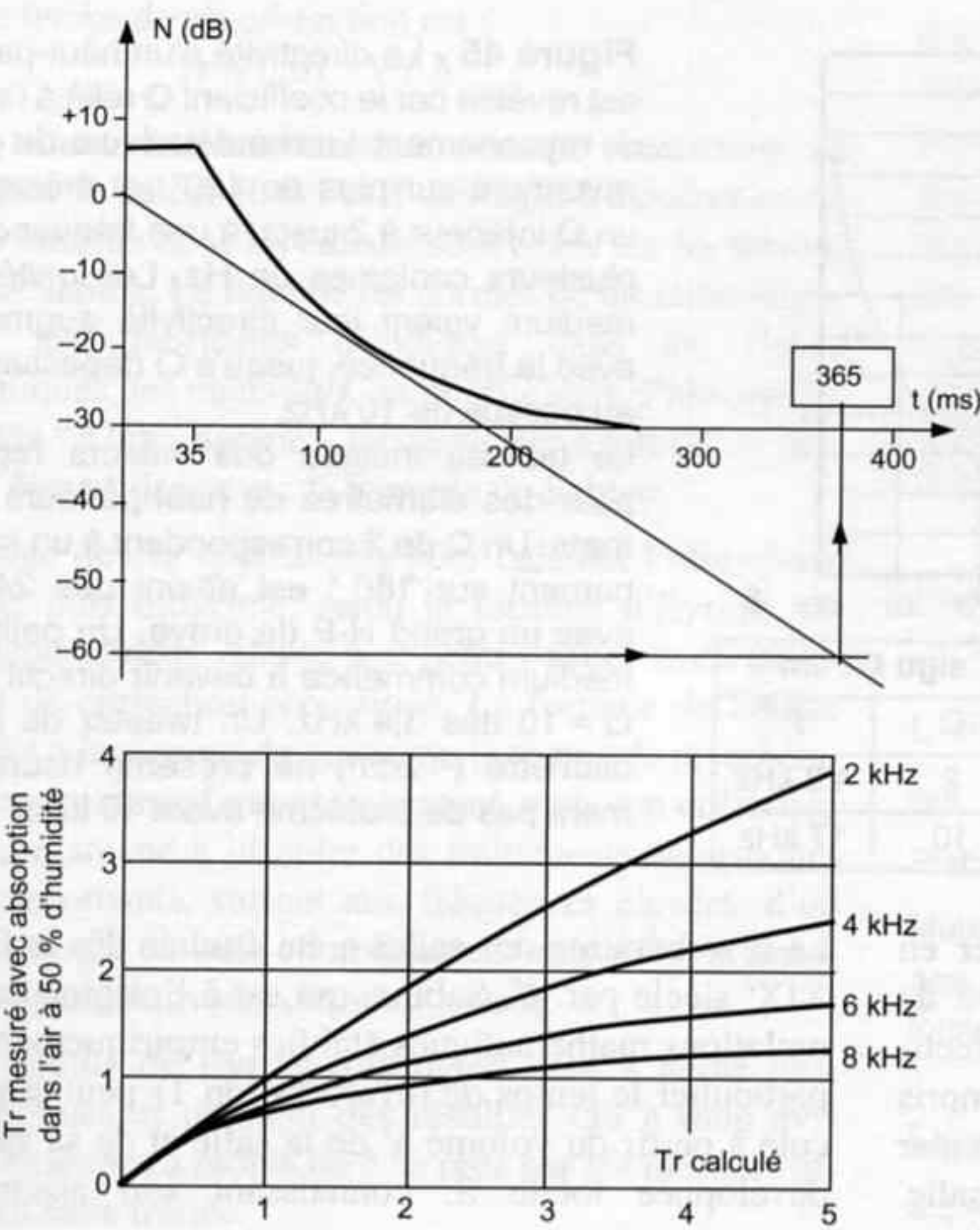


Figure 43 - Si la zone d'écoute est suffisamment proche de la source, c'est-à-dire en deçà de la distance critique, le niveau sonore du champ réverbéré est au plus égal au niveau sonore de l'onde directe, repéré 0 dB. À l'instant $t = 0$ où la source de son direct s'arrête, le niveau sonore du champ réverbéré commence à décroître suivant une fonction linéaire du temps. Pour que le niveau du champ réverbéré ne provoque aucune gêne, il est nécessaire que cette décroissance linéaire passe en dessous de la courbe de gêne de Hass, ce que montre la droite inclinée ci-contre. Le temps de réverbération, défini selon la norme pour une chute de 60 dB du niveau réverbéré, doit par conséquent être strictement inférieur à 365 ms.

Figure 44 - L'absorption dans l'air ne se manifeste que lorsque la salle est peu amortie, c'est-à-dire pour des Tr supérieurs à 0,5 s environ. Dans les grandes salles de concert, les sons aigus sont donc atténués par la distance, d'autant plus que leur fréquence est élevée. Dans les petites salles de séjour cet effet est négligeable, et sera ignoré dans la suite de ce chapitre. (doc JBL)

aux fréquences graves, si le volume sonore est trop faible (le seuil d'audition est élevé aux fréquences basses). Ne perdre aucune de ces informations d'espace suppose d'écouter au volume sonore réel (ce qui ne veut pas dire nécessairement fort), celui qu'il y avait lors de la prise de son, ce qui n'est possible que dans la cabine de monitoring d'un studio d'enregistrement, ou dans un auditorium aussi bien traité, autrement dit avec un Tr de 0,3 s environ à toutes les fréquences... Il ne s'agit pas ici d'obtenir une esthétique sonore particulière, et le "style monitoring" n'existe pas. Il s'agit simplement de réalisme, de naturel de la restitution. Un Tr aussi bas ne saurait être atteint dans une salle affublée de résonances de caverne.

Une deuxième notion importante est celle de distance critique, déjà signalée en début de chapitre. À cette distance de la source, l'auditeur perçoit les champs direct et réverbéré avec la même intensité. Cette distance dépend de l'absorption totale du local d'une part, et de la directivité de la source d'autre part (revoir les figures des champs réverbérés en début de chapitre). L'auditeur devrait se situer autant que possible à la distance critique de la source pour une plage de fréquences la plus large possible. Trop loin, le champ diffus noie les informations spatiales, trop près les instruments sont perçus avec grossissement. Pour les fréquences graves, les haut-parleurs sont peu directifs et la salle peu absorbante. Aux fréquences élevées au

contraire, les haut-parleurs sont plus directifs et la salle très absorbante. Sans correction, la distance critique est donc plus faible pour les sons graves, plus grande pour les aigus. Il est donc essentiel de respecter deux impératifs :

- obtenir une absorption bien répartie sur l'ensemble des fréquences, un peu **moins forte pour les aigus**,
- utiliser un système de haut-parleurs dont la **directivité** est **contrôlée** ou peu variable avec la fréquence.

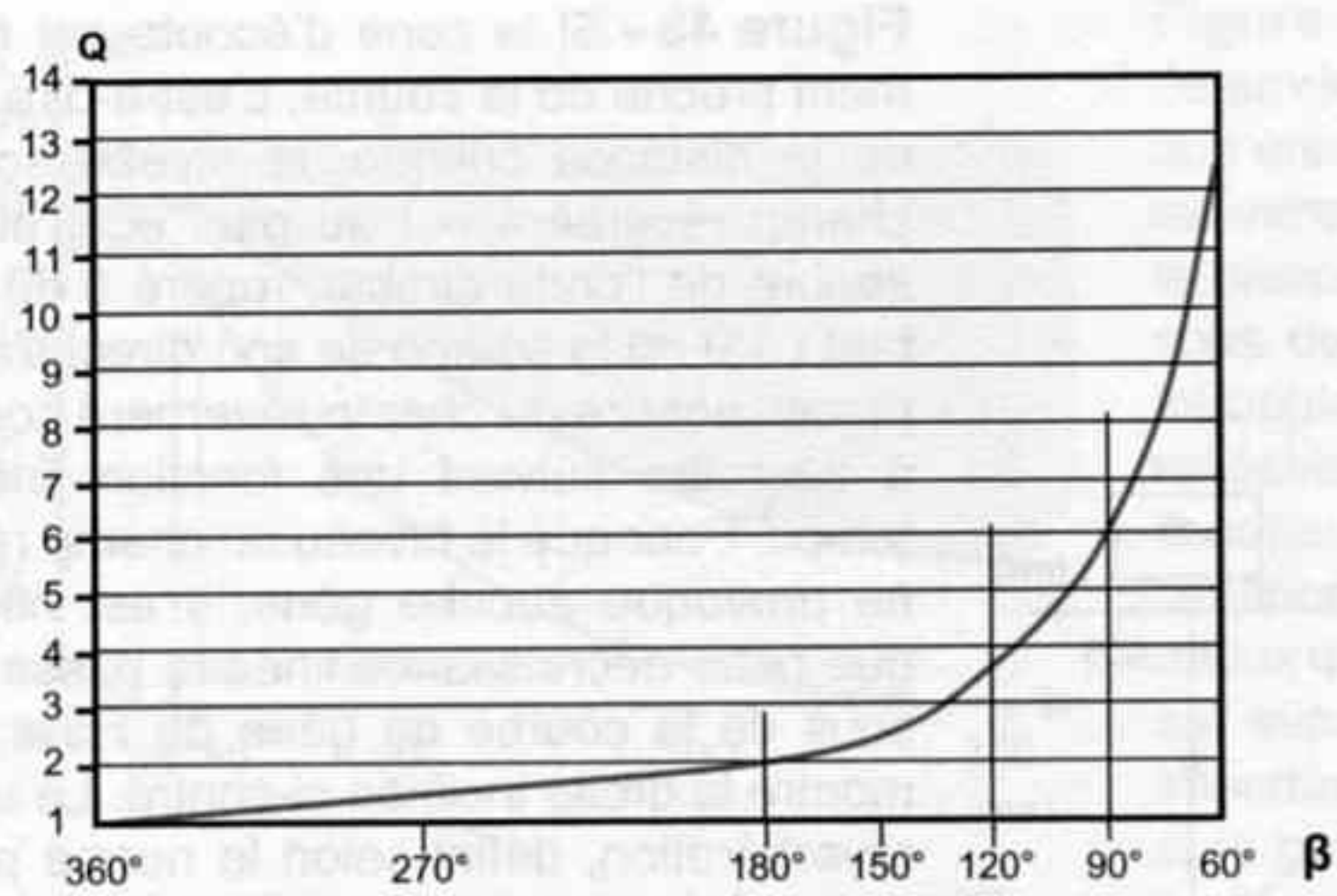
À moins d'accepter une position d'écoute à 50 cm des enceintes (!) il est illusoire d'espérer se situer en champ direct aux fréquences graves, typiquement en dessous de 500 Hz. Se fixer pour objectif une distance critique de 2,50 à 3 m pour les fréquences supérieures à 500 Hz est déjà assez ambitieux, et il est souvent plus efficace de rapprocher la position d'écoute que d'augmenter les traitements absorbants. Changer un canapé de place suffit !

Cette distance critique peut être estimée à partir de l'équation suivante :

$$Dc = 0,141 \cdot \sqrt{Q \cdot R}$$

avec Q coefficient de directivité du haut-parleur et R absorption totale du local, ces deux grandeurs étant relatives à la fréquence étudiée.

Ces considérations de directivité font apparaître que l'utilisation de haut-parleurs de petit diamètre, donc peu directifs, avec Q faible, fait diminuer la distance



H-P grave Ø38 cm		médium Ø10 cm		aigu Ø2 cm	
Q	F	Q	F	Q	F
2	240 Hz	2	850 Hz	2	4,3 kHz
10	971 Hz	10	3,4 kHz	10	17 kHz

Figure 45 - La directivité d'un haut-parleur est révélée par le coefficient Q relié à l'angle de rayonnement. Les haut-parleurs de grave rayonnent sur plus de 180°, et présentent un Q inférieur à 2 jusqu'à une fréquence de plusieurs centaines de Hz. Les unités de médium voient leur directivité augmenter avec la fréquence, jusqu'à Q dépassant 15 au dessus de 10 kHz. Le tableau indique des valeurs repères pour des diamètres de haut-parleurs courants. Un Q de 2 correspondant à un rayonnement sur 180 ° est atteint dès 240 Hz avec un grand H-P de grave. Un petit H-P médium commence à devenir directif avec Q = 10 dès 3,4 kHz. Un tweeter de faible diamètre (< 2cm) ne présente heureusement pas de problème avant 16 kHz.

critique et empêche ainsi l'auditeur de se situer en champ direct. L'adoption de haut-parleurs grave de grand diamètre et de médium à pavillon avec directivité contrôlée permet au contraire d'obtenir Q compris entre 4 et 6 à partir de 500 Hz environ, et d'augmenter ainsi la distance critique sans trop assourdir la salle. Les grands haut-parleurs plans, par nature plutôt directs, et bien que rayonnant en doublet, font de même. La même distance critique de 3 m peut en effet être obtenue aussi bien avec Q = 2 et R = 225 d'une part, qu'avec Q = 4 et R = 110, ou encore Q = 6 et R = 75. Une valeur de R supérieure à 100 étant difficile à obtenir, il est préférable d'utiliser des H-P légèrement directs. La directivité n'est pas un défaut en elle-même, c'est son irrégularité, en particulier l'existence de lobes de diffusion en pétales de marguerite, qui pose problème.

Les notions de directivité d'un haut-parleur sont décrites figure 45.

La grandeur R, appelée constante de la salle, est relative à l'absorption totale, pour l'ensemble des surfaces et mobilier de la salle. Elle dépend de la fréquence, et peut présenter des variations sensibles en différents points de la pièce, car il existe des zones réfléchissantes et d'autres absorbantes. Les surfaces parfaitement réfléchissantes qui renvoient les ondes sonores sans atténuation, se voient attribuer un coefficient d'absorption $\alpha = 0$. En revanche les surfaces parfaitement absorbantes qui ne renvoient rien du tout se voient attribuer un coefficient $\alpha = 1$, c'est par exemple le cas d'une fenêtre ouverte. Entre ces deux extrêmes, toute surface présente donc une absorption de coefficient α compris entre 0 et 1.

La réverbération des salles a été étudiée dès la fin du XIX^e siècle par W. Sabine, qui est à l'origine de formulations mathématiques établies empiriquement. En particulier le temps de réverbération Tr peut être calculé à partir du volume V de la salle et de sa surface développée totale S, connaissant son absorption moyenne α_m :

$$Tr = 0,16 \cdot V / S \cdot \alpha_m$$

Sabine a proposé une formule de calcul de l'absorption moyenne α_m basée sur une moyenne arithmétique des absorptions partielles A_i de chaque surface, l'absorption A_i procurée par cette surface étant le produit de son étendue S_i en m² par son coefficient α_i . L'absorption totale A de la salle est la somme des absorptions de chacune des surfaces :

$$A = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n = \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot S_i)$$

Et l'absorption moyenne : $\alpha_m = A/S$

Cette approche n'est pas rigoureusement exacte, et donne des résultats à peu près corrects seulement si l'absorption moyenne est faible, inférieure à 0,2 environ. Ces calculs aboutissent à des temps de réverbération irréalistes, beaucoup plus grands que ceux donnés par des mesures in-situ, lorsque la salle présente une absorption moyenne ou forte.

Eyring puis Millington en 1933/34 ont établi que le calcul de l'absorption moyenne de manière arithmétique est faux, l'absorption totale selon Eyring est :

$$A = S \cdot \log(1 - \alpha_m)^{-1} = \sum_{i=1}^n S_i \cdot \log(1 - \alpha_i)^{-1}$$

Les absorptions partielles procurées par chaque portion de surface sont donc obtenues par :

$$A_i = S_i \cdot \log(1 - \alpha_i)^{-1} \text{ ce qui s'écrit également : } A_i = -S_i \cdot \log(1 - \alpha_i)$$

Et le temps de réverbération est :
 $Tr = 0,07 \cdot V / A$

On trouve malheureusement encore beaucoup de feuilles de calcul Excel et d'ouvrages littéraires ou de sites Internet dont les calculs sont basés sur les formules de Sabine. Le fait que les normes de mesures imposent aux fabricants d'indiquer dans les fiches techniques des matériaux les coefficients d'absorption α_s , dits "Alpha-Sabine", laisse penser à tort qu'ils doivent être utilisés avec la formule de Sabine.

L'usage de ces coefficients pour calculer l'absorption totale, puis moyenne, selon la formule d'Eyring, est beaucoup mieux adapté aux petites salles avec traitement de correction acoustique. La formule de Sabine permet à la rigueur de connaître le temps de réverbération approximatif **avant** traitement, mais son utilisation abusive amène à installer des traitements acoustiques trop absorbants, surtout aux fréquences élevées, d'où une sonorité de salle complètement assourdie, la transformant en mauvaise chambre sourde.

Les calculs de Eyring-Millington sont à peine plus compliqués et donnent des résultats qui à mon avis sont recoupés à moins de 5 % près par les mesures in-situ en salle traitée.

Par exemple, pour une salle de dimensions 6 m x 4,50 m x 2,50 m, la surface totale de l'ensemble des parois est :

Sol :	$6 \times 4,5 = 27 \text{ m}^2$
Plafond :	$6 \times 4,5 = 27 \text{ m}^2$
Mur latéral droit :	$6 \times 2,5 = 15 \text{ m}^2$
Mur latéral gauche :	$6 \times 2,5 = 15 \text{ m}^2$
Mur du fond :	$4,5 \times 2,5 = 11,25 \text{ m}^2$
Mur de face :	$4,5 \times 2,5 = 11,25 \text{ m}^2$
Surface totale :	$S = 106,5 \text{ m}^2$

Supposons maintenant que les parois aient les coefficients d'absorption α_i suivant, à la fréquence étudiée :

Sol :	0,1
Plafond :	0,2
Mur :	0,25

L'absorption totale est :

Sol :	$-S_1 \log (1-\alpha_1) =$	$-27 \log 0,9 = 1,235$
Plafond :	$-S_2 \log (1-\alpha_2) =$	$-27 \log 0,8 = 2,617$
Murs :	$-S_3 \log (1-\alpha_3) =$	$-52,5 \log 0,75 = 6,559$
Absorption totale :	$A = \Sigma[-S_i \log (1-\alpha_i)]$	$= 10,41$

Le coefficient d'absorption moyen de la salle est :

$\alpha_m = 1 - 10^{-A/S} = 1 - 10^{-10,41/106,5} = 1 - 10^{-0,098} = \mathbf{0,202}$

(Le calcul selon Sabine donnerait $\alpha_m = 0,199$ soit seulement 2 % d'erreur environ, ce qui est normal avec une si faible valeur de α)

La constante d'amortissement de la salle est de :

$R = S \cdot \alpha_m / 1 - \alpha_m = \mathbf{26,96}$

MATÉRIAU	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000 Hz
Béton brut	0,01	0,01	0,01	0,02	0,05	0,07
Crépi grossier	0,01	0,03	0,04	0,04	0,08	0,17
Enduit de ciment lisse	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Briques nues	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Parquet sur chevrons	0,20	0,15	0,12	0,10	0,08	0,07
Parquet collé	0,04	0,04	0,07	0,07	0,07	0,07
Carrelages	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04
Dalles PVC	0,02	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02
Linoléum sur feutre	0,08	0,08	0,09	0,10	0,12	0,12
Moquette sur thibaude	0,14	0,32	0,45	0,45	0,40	0,35
Moquette nylon sur béton	0,10	0,15	0,20	0,20	0,20	0,30
Plâtre brut	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,08
Plâtre peint	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Glace épaisse	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Vitrage courant	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Marbre et surface lisse, dure	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Staff	0,02	0,02	0,03	0,05	0,04	0,04
Porte moulurée classique	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08
Porte plane préformée	0,25	0,22	0,17	0,09	0,10	0,10
Frisette, lambris vernis	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03

Figure 46 - Coefficients d'absorption α_s pour les matériaux de construction, selon les fréquences normalisées.

Le temps de réverbération est alors :

$$T_r = 0,07 \cdot V/A = 0,07 \times (6 \times 4,5 \times 2,5) / 10,41 = \mathbf{0,454 \text{ s}}$$

Avec des haut-parleurs de directivité $Q = 6$, la distance critique est de : $D_c = 0,141 \cdot \sqrt{Q \cdot R} = \mathbf{1,793 \text{ m}}$

Une telle valeur est déjà assez intéressante, mais peut être légèrement améliorée, la distance habituelle d'écoute étant plus proche de 2,50 à 3 m. Pour augmenter la distance critique afin d'obtenir $D'_c = 2,50 \text{ m}$ sans changer les enceintes, un traitement des parois est nécessaire afin d'augmenter la valeur de R , pour atteindre R' :

$$R' = (D'_c / 0,141)^2 / Q = \mathbf{52,4}$$

Cette valeur correspond à un coefficient nettement supérieur au précédent : $\alpha'_m = R' / (R' + S) = \mathbf{0,33}$.

L'absorption totale doit passer à :

$$A' = S \cdot \log(1 - \alpha'_m)^{-1} = \mathbf{18,5}$$

pour un nouveau $T'_r = \mathbf{0,255 \text{ s}}$

Si le plafond seul est traité sur sa totalité, soit 27 m^2 , alors sa nouvelle absorption doit être :

$$A'_{2(\text{plafond})} = A' - A_{1(\text{sol})} - A_{3(\text{murs})} \\ = 18,5 - 1,235 - 6,559 = \mathbf{10,706}$$

avec les absorptions sol et murs inchangées.

La surface du plafond reste S_2 mais son coefficient devient α'_2 et $A'_2 = -S_2 \cdot \log(1 - \alpha'_2) = \mathbf{10,706}$

Le matériau utilisé doit par conséquent présenter un coefficient $\alpha'_2 = 1 - 10^{-A'_2/S_2} = \mathbf{0,6}$ à la fréquence considérée.

Une telle absorption est aisée à obtenir au-dessus de 1 kHz avec des dalles acoustiques en fibres compressées, d'épaisseur 15 mm, montées sur profils suspendus, mais presque impossible à atteindre aux basses fréquences en dessous de 250 Hz.

L'exemple très simple exposé ci-dessus permet de présenter la démarche de conception, en résolvant le problème pour une seule fréquence. Toutefois les choses ne vont pas toujours aussi bien, et il arrive que le calcul débouche sur des coefficients d'absorption supérieurs à 1 ! Il est indispensable alors d'envisager le traitement d'une plus grande surface. La seule surface inutilisée par l'ameublement et la décoration est le plafond. C'est aussi la seule qui reste lisse et nue, or sa réalisation est souvent en matériau dur. Son traitement est à mon avis incontournable, mais rarement suffisant, car les matériaux disponibles pour cette surface absorbent surtout les fréquences élevées.

Absorption des matériaux de construction

Dans la pratique il est indispensable de considérer l'ensemble des fréquences, sauf l'extrême grave, pour traiter efficacement le problème. Les fréquences usuelles, pour lesquelles les valeurs d'absorption sont calculées, à partir des données des fabricants sont 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz.

Le tableau de la figure 46 regroupe les coefficients d'absorption couramment admis pour les matériaux de construction habituels. Ces valeurs permettent d'établir le bilan acoustique de la salle avant traitement.

Absorption des matériaux de traitement

Le deuxième tableau figure 47 regroupe les coefficients d'absorption des éléments de mobilier et de décoration usuels, ainsi que des personnes présentes et des matériaux de correction acoustique.

Avant d'aborder un exemple concret de bilan acoustique et de correction d'une salle, je crois indispensable de faire un peu de ménage dans les idées reçues concernant les "traitements" acoustiques.

- L'isolement d'un local, résultat mesurable de la démarche d'isolation acoustique, concerne les nuisances sonores venant de **l'extérieur de ce local**. Il ne s'intéresse pas aux sons produits dans ce local et sa connaissance n'est d'aucun secours dans notre cas. Le fait que ce travail d'isolation soit généralement effectué à l'intérieur du local laisse faussement penser le contraire. Les figures 48 et 49 montrent l'action de l'isolant sur l'énergie sonore transmise depuis l'extérieur à travers la paroi. Cette transmission est variable avec la fréquence et avec l'angle d'incidence, les sons aigus ou rasants étant mieux absorbés ou réfléchis que les sons graves.

Des travaux d'isolation optimale des locaux ne peuvent être envisagés que lors de la construction d'une habitation neuve. L'architecte est amené à prendre en compte les types et les niveaux de nuisance, et à veiller à une mise en œuvre rigoureuse des solutions adoptées, faute de quoi le résultat peut être décevant. Dans le cas de locaux réhabilités, quelques solutions existent qui consistent à construire une "boîte dans la boîte" c'est-à-dire à doubler toutes les parois en laissant un vide d'air et en interposant un absorbant épais dans l'intervalle, en veillant à désolidariser le plus complètement possible, par un montage souple, les doubles parois ajoutées. Doubles vitrages dissymétriques, portes étanches, caissons de volet et d'aération à chicanes complètent l'isolation.

Ces travaux ne sont pas du ressort de l'audiophile, ni même du bricoleur averti, car ils demandent des compétences très élevées en acoustique architecturale, des moyens d'investigation et de contrôle, et doivent respecter des normes sévères quant à la protection en

MATÉRIAU	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000 Hz
Tapis pure laine	0,30	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60
Rideaux légers	0,04	0,05	0,11	0,18	0,30	0,44
Rideaux lourds plissés	0,09	0,33	0,40	0,52	0,50	0,44
CTP 5 mm peint à 5 cm du mur	0,47	0,34	0,30	0,11	0,08	0,08
CTP 5 mm + moquette à 5 cm du mur	0,60	0,50	0,50	0,50	0,60	0,68
Laine minérale 50 mm + tôle perforée	0,26	0,33	0,56	0,79	0,65	0,45
Laine minérale 50 mm + plâtre perforé	0,05	0,18	0,61	0,68	0,39	0,30
Laine minérale 50 mm + toile de jute	0,39	0,45	0,56	0,59	0,61	0,55
Laine minérale 50 mm + skaï	0,74	0,54	0,36	0,32	0,30	0,17
Laine 100 mm + bois perforé ep17/diam.8 dist.16	0,40	0,75	0,90	0,65	0,60	0,45
Laine 100 mm + bois perforé ep17/diam.8 dist.32	0,60	0,95	0,45	0,25	0,20	0,15
Laine 100 mm + bois rainuré ep17/6 × 40 dist.20	0,55	0,90	0,95	0,70	0,70	0,65
Laine minérale 40 mm	0,30	0,70	0,88	0,85	0,65	0,60
Liège aggloméré 8 cm	0,15	0,26	0,22	0,22	0,20	0,20
Liège expansé 2,5 cm	0,10	0,10	0,38	0,60	0,40	0,43
Fibragglo	0,13	0,11	0,22	0,54	0,85	0,71
Fibres minérales floquées	0,12	0,43	0,76	0,88	0,85	0,71
Mousse d'argile	0,38	0,77	0,87	0,99	0,88	1,24
Fibres de bois compressées	0,15	0,44	0,45	0,44	0,53	0,59
Panneau fibres	0,06	0,11	0,33	0,40	0,40	0,43
Sempaphon rouleau mousse ép. 10 mm	0,02	0,10	0,25	0,45	0,70	0,85
Sempaphon absorb ep. 13 mm peint	0,08	0,12	0,50	0,50	0,20	0,11
Panneau Akustic KALM 43 mm	0,20	0,38	0,40	0,60	0,90	0,92
Dalles plafond laine compr. ep.15/vidé 50 mm	0,43	0,50	0,60	0,80	0,90	1
Mousse de mélamine 50 mm	0,20	0,45	0,85	0,95	0,95	0,95
Portes persiennées	0,60	0,45	0,25	0,20	0,15	0,15
Chaise vide	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04
Personne assise sur chaise	0,10	0,15	0,32	0,42	0,55	0,55
Personne debout	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,55
Fauteuil rembourré	0,32	0,32	0,28	0,28	0,30	0,34
Personne assise dans fauteuil	0,20	0,30	0,36	0,44	0,45	0,45
Matériel audio	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06
Piano demi-queue	0,25	0,20	0,15	0,15	0,15	0,15
Placards bois, mobilier bois	0,63	0,42	0,35	0,12	0,08	0,08

Figure 47 - Ces valeurs de coefficients d'absorption proviennent de différentes sources (documentations des fabricants, cours d'acoustique, manuels et guides, revues et livres variés) aussi sont-elles à prendre comme une indication, un ordre de grandeur. Surtout en ce qui concerne les matériaux de correction, il est préférable de

demander au fournisseur une notice détaillée, précisant les conditions de mesure du coefficient α . Un montage différent de celui préconisé par le fabricant peut en effet ruiner l'absorption. Les valeurs pour panneaux perforés sont issues de documentations Obersound.

cas d'incendie. De plus, la moindre erreur ou approximation dans la mise en œuvre des produits peut entraîner une augmentation du niveau des sons transmis, ce qui est l'inverse du but recherché !

Bref, si votre séjour est mal isolé des bruits de rue ou de voisinage, ou qu'au contraire vos voisins sont gênés par vos activités musicales, confiez les travaux à une entreprise spécialisée après avoir fait établir un devis... Fort heureusement, les habitations construites depuis l'apparition de la NRA, nouvelle réglementation acoustique, sont relativement bien isolées.

La NRA a fait l'objet d'une loi cadre sur le bruit du 31 décembre 1992, suivie d'arrêtés du 28 octobre 1994, et elle est entrée en application à compter du 01 janvier 1996.

- La correction acoustique d'un local concerne au contraire les ondes sonores venant de **l'intérieur du local**, et dont l'énergie est réfléchie ou absorbée par les parois. Les moyens mis en œuvre pour l'isolement du local sont sans effet positif sur la correction acoustique, comme le montre la figure 49.
- La correction acoustique nécessite l'emploi de matériaux à surface souple et poreuse, utilisés en épaisseur suffisante, soit au moins 1/10 de la longueur d'onde des fréquences les plus basses à absorber. Des épaisseurs inférieures à 10 mm n'auront un effet que sur les sons aigus, alors que les plus gros problèmes de réverbération se situent dans les registres de bas-médium et de médium. Des épaisseurs de 50 à 200 mm sont parfois indispensables.

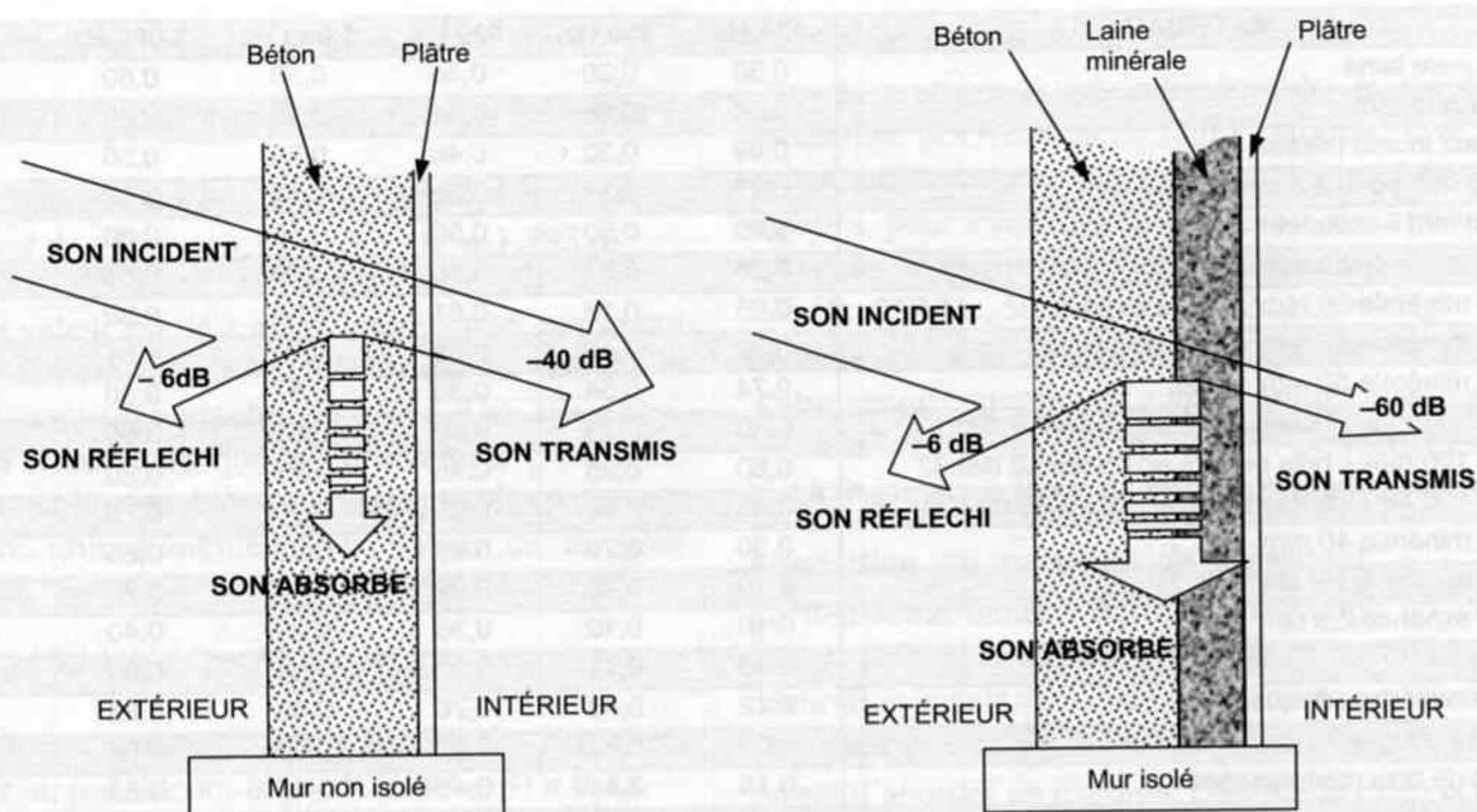


Figure 48 - L'isolation du mur permet de diminuer l'énergie des sons transmis à travers la paroi. Elle fait l'objet de normes précises qui imposent, pour les logements neufs ou réhabilités, des contraintes de construction et de mise en œuvre permettant de garan-

tir un confort sonore vis à vis des bruits de circulation, d'impact, et d'appareillages. L'affaiblissement des bruits transmis est indiqué par le coefficient R en dB, qui est pratiquement indépendant du caractère plus ou moins absorbant des revêtements intérieurs.

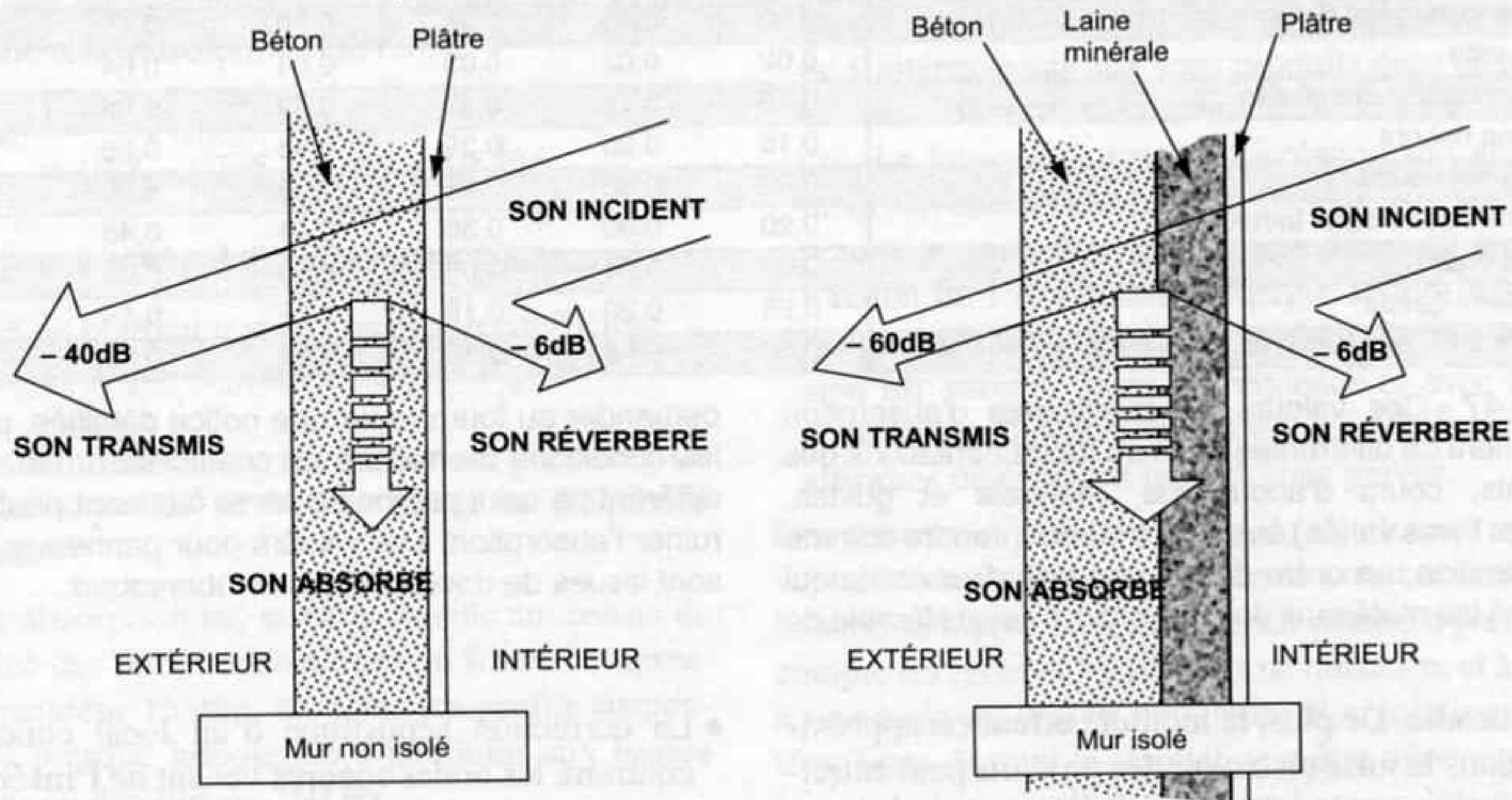


Figure 49 - L'isolation du mur ne permet pas de diminuer l'énergie des sons **réverbérés** à l'intérieur du local. La surface visible des complexes d'isolation couramment utilisés à l'heure actuelle (laine minérale et plâtre) est lisse, plane et dure. Elle réverbère les sons encore mieux qu'un mur de parpaings nus. Le montage souple de ces matériaux peut produire une légère

absorption par effet de membrane autour d'une fréquence particulière, dans la bande bas-médium en général à cause de la légèreté des panneaux. D'importantes réflexions apparaissent sur ces surfaces dures et lisses, et produisent le fameux "flutter echo" extrêmement désagréable.

- Les résonances graves demanderaient pour être traitées des épaisseurs de 1 m à 2 m de laine ou de feutre, ce qui est irréaliste ! Des moyens de prévention et de correction de ces résonances ont été vus précédemment.

- La correction acoustique d'un local n'améliore pas l'isolement des locaux contigus. Les nuisances transmises au voisinage seront donc aussi fortes après application du traitement de correction. Le champ réverbéré dans le local étant plus faible,

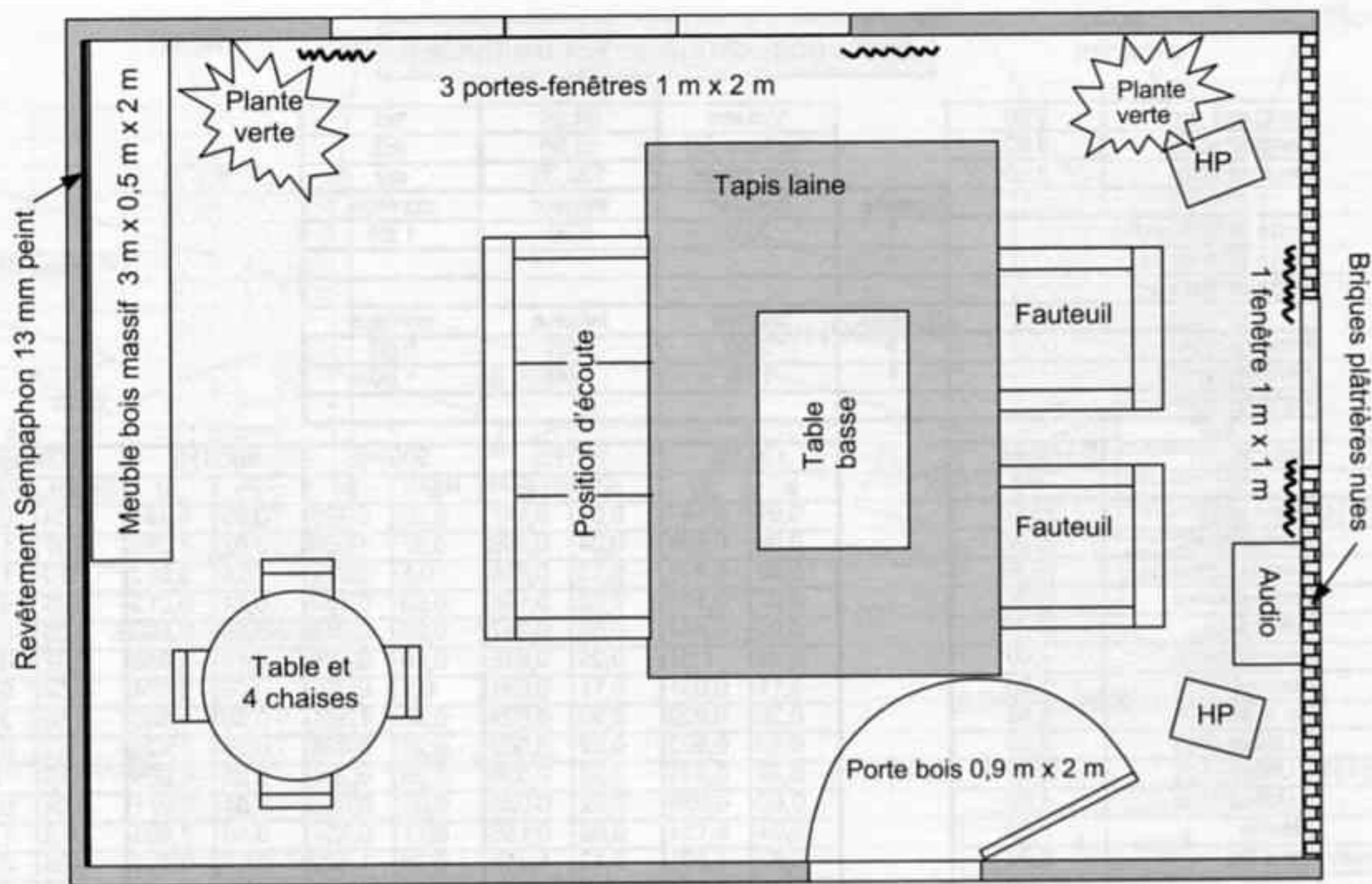


Figure 51 - Plan d'aménagement du salon-séjour pris en exemple pour le bilan acoustique. Ses dimensions

sont de 7 m × 4,80 m × 2,50 m. La position d'écoute est à environ 3,50 m des enceintes acoustiques.

du fond est trop superficiel, il ne fait que diminuer la réverbération des aigus, ainsi que tapis et rideaux, ce qui accentue le défaut perceptible dans le grave.

Il est nécessaire d'envisager une solution pour diminuer la réverbération principalement dans les bandes 125 Hz et surtout 250 Hz, afin d'obtenir une distance critique supérieure à 2 m si possible dans ces bandes.

Le propriétaire des lieux a envisagé d'installer un plafond suspendu en dalles de laine minérale compressée, d'épaisseur 15 mm, installé à 50 mm du plafond existant. Une distance de 200 à 300 mm eut été préférable d'un point de vue acoustique, mais la faible hauteur de la pièce l'interdit. Un bilan prévisionnel avec ce faux plafond a montré l'inefficacité de cette solution, qui procure un temps de réverbération de 0,47 s à 125 Hz, avec une distance critique de seulement 1,20 m, et 0,27 s à 4 000 Hz, avec une distance critique de 3,20 m cette fois.

Le traitement s'avère efficace seulement pour les fréquences élevées, et la variation de distance critique est encore plus grande que précédemment, presque d'un facteur 3 ! De plus la pièce est assourdie.

Après plusieurs simulations exécutées à l'aide d'une feuille Excel construite sur les formules de Eyring et Millington, le choix s'est finalement porté sur les matériaux suivants :

- Plafond : 33,60 m² de panneaux perforés épaisseur 17 mm peints en blanc mat, trous de 8 mm entraxe de 32 mm, avec 100 mm de laine minérale revêtue d'un voile de tissu de verre, acoustiquement trans-

parent. La faible hauteur ne permet pas de réaliser des dents de scie en montant les panneaux en biais, ce qui serait pourtant bénéfique.

- Mur du fond : 12 m² de panneaux perforés de même type, disposés à 100 mm du mur et revêtus de tissu extensible agrafé sur les tranches avant la pose. 6 m² sont masqués par l'ameublement.
- Murs latéraux, au fond : 10 m² de panneaux perforés épaisseur 17 mm, trous de 8 mm entraxe de 16 mm avec 100 mm de laine minérale revêtue d'un voile de tissu de verre, finition crépi grain fin lissé (sans boucher les trous...).
- Murs latéraux, près des enceintes : dalles de liège aggloméré épaisseur 25 mm, sur 10 m² soit largeur 2 m sur hauteur 2,50 m, des deux côtés.
- Mur de droite : ajout d'un meuble persienné de 2 m × 2 m, profondeur 0,50 m.
- Sol : ajout d'un second tapis laine de 3 m × 2 m.

Le nouveau bilan, figure 52, fait apparaître une distance critique supérieure à 2 m sauf à 125 Hz ce qui est normal. Le temps de réverbération correspondant varie entre 0,2 et 0,4 s. La position d'écoute a été légèrement avancée, vers 2,50 m des enceintes, en éloignant ces dernières du mur arrière et en avançant un peu le canapé. Le propriétaire, musicien de jazz amateur, retrouve dans ces conditions la tonalité des petites salles de club, avec une présence proche des instrumentistes, et une sonorité douce mais néanmoins claire, très dynamique et sans aucune lourdeur. L'aménagement est décrit figure 53.

Bilan acoustique après traitement														
Longueur en m		7,00	Volume		84,00	m3								
Largeur en m		4,80	Surface Sol		33,60	m2								
Hauteur en m		2,50	Aire totale		126,20	m2								
			Nombre	hauteur	largeur	surface								
Porte bois massif			1	2,00	0,90	1,80								
Porte bois vitrée														
Porte de service														
			Nombre	hauteur	largeur	surface								
Fenêtre type 1			3	2,00	1,00	6,00								
Fenêtre type 2			1	1,00	1,00	1,00								
Fenêtre type 3														
Désignation	Nature	Surfaces	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
		m2	α	Δt	α	Δt	α	Δt	α	Δt	α	Δt	α	Δt
Plafond	panneaux perforés	33,60	0,60	13,37	0,9	33,6	0,45	8,724	0,25	4,198	0,20	3,256	0,15	2,372
Sol	Parquet collé	33,60	0,04	0,596	0,04	0,596	0,07	1,059	0,07	1,059	0,07	1,059	0,07	1,059
Mur fond	panneaux perforés	6,00	0,60	2,388	0,9	6	0,45	1,558	0,25	0,75	0,2	0,581	0,15	0,423
Mur de face	briques nues	12,00	0,02	0,105	0,02	0,105	0,03	0,159	0,04	0,213	0,05	0,267	0,07	0,378
Murs latéraux	plâtre brut	6,20	0,04	0,11	0,03	0,082	0,03	0,082	0,04	0,11	0,05	0,138	0,08	0,225
Fenêtres	courantes	7,00	0,35	1,31	0,25	0,875	0,18	0,603	0,12	0,389	0,07	0,221	0,04	0,124
Porte	courantes	1,80	0,11	0,091	0,11	0,091	0,1	0,082	0,09	0,074	0,08	0,065	0,08	0,065
Tapis laine	3m x 2m	6,00	0,30	0,929	0,30	0,929	0,40	1,331	0,50	1,806	0,60	2,388	0,60	2,388
Canapé 3 places	3 Unités	3,00	0,32	0,502	0,32	0,502	0,28	0,428	0,28	0,428	0,3	0,465	0,34	0,541
Fauteuil	2 Unités	2,00	0,32	0,335	0,32	0,335	0,28	0,285	0,28	0,285	0,3	0,31	0,34	0,361
Chaises	4 Unités	4,00	0,02	0,035	0,02	0,035	0,03	0,053	0,04	0,071	0,04	0,071	0,04	0,071
Rideaux légers	plissés	7,00	0,04	0,124	0,05	0,156	0,11	0,354	0,18	0,603	0,3	1,084	0,44	1,763
Meuble bois+persiennes	2m x 3m	6,00	0,63	2,591	0,42	1,419	0,35	1,123	0,12	0,333	0,08	0,217	0,08	0,217
Personnes assises		2,00	0,20	0,194	0,30	0,31	0,36	0,388	0,44	0,504	0,45	0,519	0,45	0,519
Murs latéraux	panneaux perforés	10,00	0,40	2,218	0,75	6,021	0,9	10	0,65	4,559	0,60	3,979	0,45	2,596
Meuble bois+persiennes	2m x 2m	4,00	0,63	1,727	0,42	0,946	0,35	0,748	0,12	0,222	0,08	0,145	0,08	0,145
Tapis laine	3m x 2m	6,00	0,30	0,929	0,30	0,929	0,40	1,331	0,50	1,806	0,60	2,388	0,60	2,388
Murs latéraux	liège 25mm	6,00	0,1	0,275	0,1	0,275	0,38	1,246	0,6	2,388	0,4	1,331	0,43	1,465
			A		53,21		29,55		19,8		18,48		17,1	
			Tr		0,111		0,199		0,297		0,318		0,344	
Absorption moyenne			α_m		0,621		0,417		0,303		0,286		0,268	
Constante d'amortissement			R		207		90,19		54,91		50,62		46,21	
Directivité			Q		2		4		4		6		6	
Distance critique			Dc		2,869		2,678		2,09		2,457		2,348	

Figure 52 - Le bilan acoustique de la salle après correction fait apparaître de nettes améliorations : Le temps de réverbération est compris dans la fourchette idéale, sans être trop bref dans les aigus, comme c'est malheureusement souvent le cas. Par contre sa variation n'est pas très régulière avec un minimum vers 250 Hz, à 0,1 s. En pratique, la présence des meubles

masquant une partie des panneaux perforés, diminuant ainsi leur absorption, redonne un équilibre proche de l'idéal. La distance critique est supérieure à 2 m au dessus de 200 Hz. Un très léger manque d'absorption apparaît vers 1 000 Hz, qu'une tapisserie au mur viendra corriger.

L'utilisation de panneaux de bois permet de conserver une certaine clarté à la pièce, le son est vif et clair, brillant quand il le faut. Un champ réverbéré plus diffus améliorerait encore les résultats.

Les enceintes sont positionnées avec leur haut-parleur grave à 0,80 m des murs latéraux, soit 1/6 de la largeur, et à 1,20 m du mur arrière, soit également non loin de 1/6 de la longueur, c'est-à-dire dans une zone sourde vis à vis des résonances de la pièce.

Il reste une petite irrégularité dans la variation du temps de réverbération, autour de 1 000 Hz. L'utilisation de panneaux rainurés sur 6 mm x 40 mm avec entraxe de 20 mm, sur le mur du fond de 12 m², au lieu des panneaux perforés, ferait disparaître ce défaut. Cependant la réalisation pratique des rainures est moins aisée, et les modifications ultérieures du panneau impossible.

Plusieurs moyens complémentaires peuvent être imaginés pour terminer la correction, en particulier autour de 1 000 Hz, où un petit manque d'amortissement se fait remarquer :

- Fermer les rideaux pendant l'écoute, même si ce n'est pas habituel dans la journée.
- Ajouter des doubles rideaux épais.
- Disposer aux murs une tapisserie lourde, et/ou des toiles peintes, sur au moins 4 m², derrière les enceintes.
- Installer un revêtement absorbant ou un rideau, côté intérieur sur la porte en bois.

Des diffuseurs placés sur les murs latéraux, et derrière les enceintes achèveront le traitement en diffusant les réflexions primaires, et en procurant une décroissance plus régulière du champ réverbéré.

De même un plafond réalisé en pente très douce, ou en dents de scie, au moins sur la moitié de la surface, augmenterait la diffusion des sons.

La précision des prévisions est largement suffisante en pratique, et les temps de réverbération obtenus après traitement s'avèrent la plupart du temps assez exacts jusqu'à 2 000 Hz. Au-dessus, pour les sons aigus, l'amortissement naturel de l'air intervient très légère-

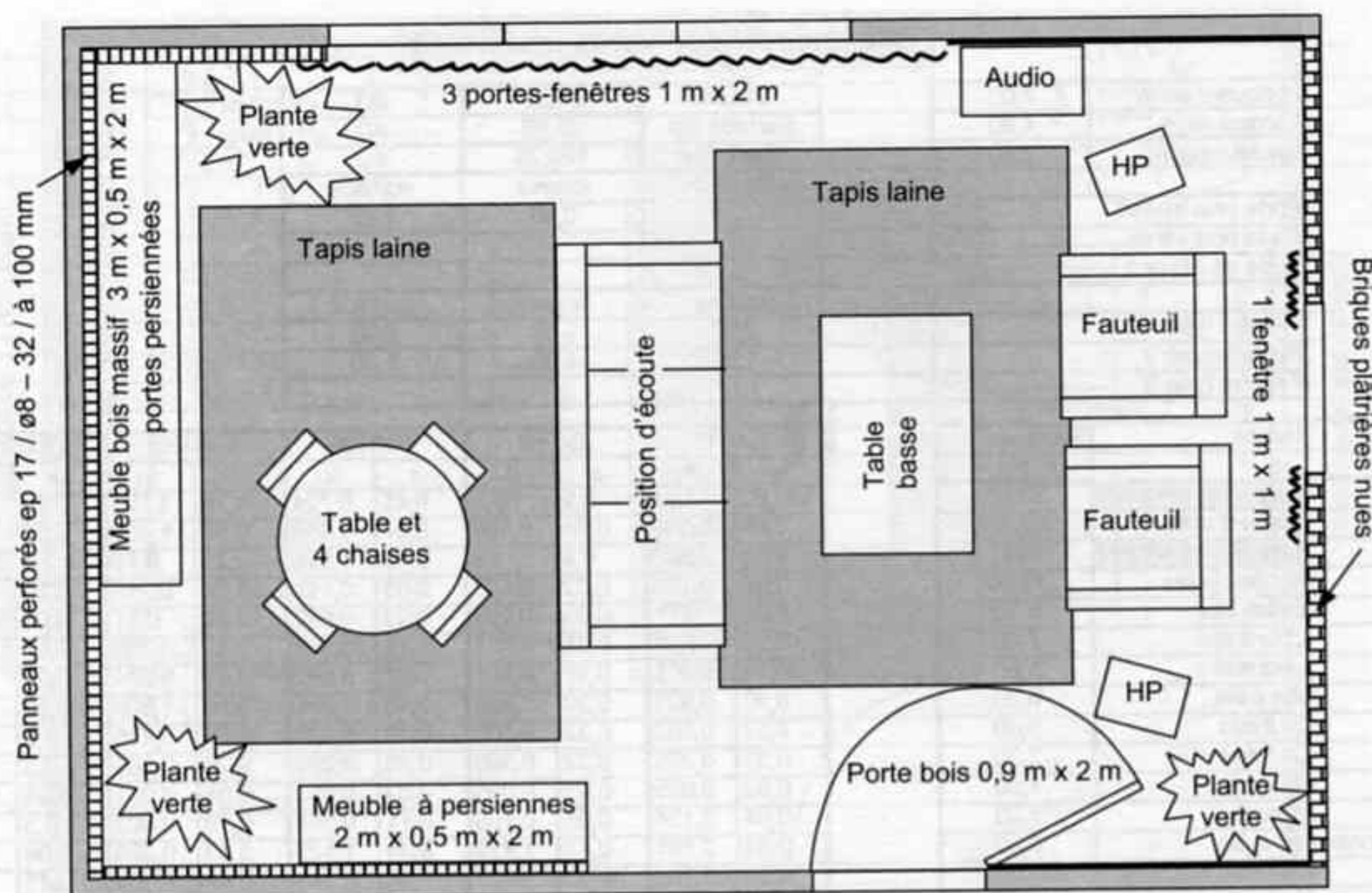


Figure 53 - Nouvel aménagement du salon. La zone située derrière l'auditeur a été rendue absorbante, surtout aux basses fréquences. La zone derrière les enceintes a été laissée réfléchissante, exceptés les murs latéraux, pour lesquels une couche de liège épaisseur 25 mm contribue à diminuer les réflexions latérales. La position d'écoute se situe entre la moitié et

les 5/8 de la longueur, ce qui est idéal du point de vue des résonances, et à 2,50 m des enceintes, c'est-à-dire à peu près à la distance critique, calculée en tenant compte de la directivité des haut-parleurs, sauf dans le grave évidemment, en dessous de 250 Hz. Auditeur et enceintes forment un triangle équilatéral.

ment, et la directivité des haut-parleurs peut être très variable d'un modèle à l'autre. Si le coefficient Q est inconnu, les valeurs utilisées dans l'exemple peuvent être utilisées pour effectuer une première approximation. La réduction du temps de réverbération dans les bandes inférieures à 1 000 Hz, même si elle ne suit pas des calculs rigoureux, est toujours plus bénéfique qu'un simple revêtement superficiel qui étouffe la salle.

TRAITEMENT DES RÉFLEXIONS

Après avoir éliminé les résonances de très basses fréquences, en dessous de 250 Hz, et corrigé les réverbérations excessives, il reste un dernier type de perturbations à même de gêner la restitution de l'espace sonore. En effet, les réflexions primaires, qui se produisent sur les parois avoisinant les enceintes acoustiques, génèrent des images fantômes des sources sonores, véritables reflets acoustiques. Elles ont un effet perturbant sur la restitution de l'espace sonore, en provoquant un déplacement spatial de la source virtuelle. Ces réflexions étant sélectives, certaines notes seulement, contenant des fréquences particulières, mieux réfléchies que d'autres, subissent cet effet. C'est donc la stabilité de l'image stéréophonique, tant en largeur qu'en profondeur, qui se trouve affectée.

Il en résulte un étalement des sources virtuelles, les instruments au spectre très large voyant certains de leurs harmoniques réfléchis et donc déplacés, d'autres n'étant pas affectés. La taille de la source paraît anormalement agrandie, parfois seulement pour certaines notes particulières. D'autre part, la position de cette source est instable, comme si l'instrumentiste se déplaçait tout à coup. L'attaque de la note, bénéficiant de l'effet de précession, est correctement localisée grâce à l'onde directe, mais le maintien, plus long, place la source à un endroit différent, incohérent. L'exemple type est celui de la contrebasse : les attaques de cordes sur les pizzicati, riches en transitoires et fréquences élevées absorbées, donc moins réfléchies, sont situées dans l'espace par exemple en direction de l'enceinte droite, un peu à gauche de celle-ci, alors que la résonance de la caisse, beaucoup plus grave donc peu absorbée, se réfléchit sur le mur et fait paraître l'instrument entier au-delà du mur droit. L'impression est celle d'une contrebasse de 2 m de large, qui dépasse hors de la scène sonore.

Les réflexions latérales, qui perturbent grandement la localisation droite-gauche, sont les plus facilement repérables. Cependant les réflexions au plafond trompent également l'appareil auditif, en donnant des impressions de déplacement des sources vers le haut et vers l'avant.

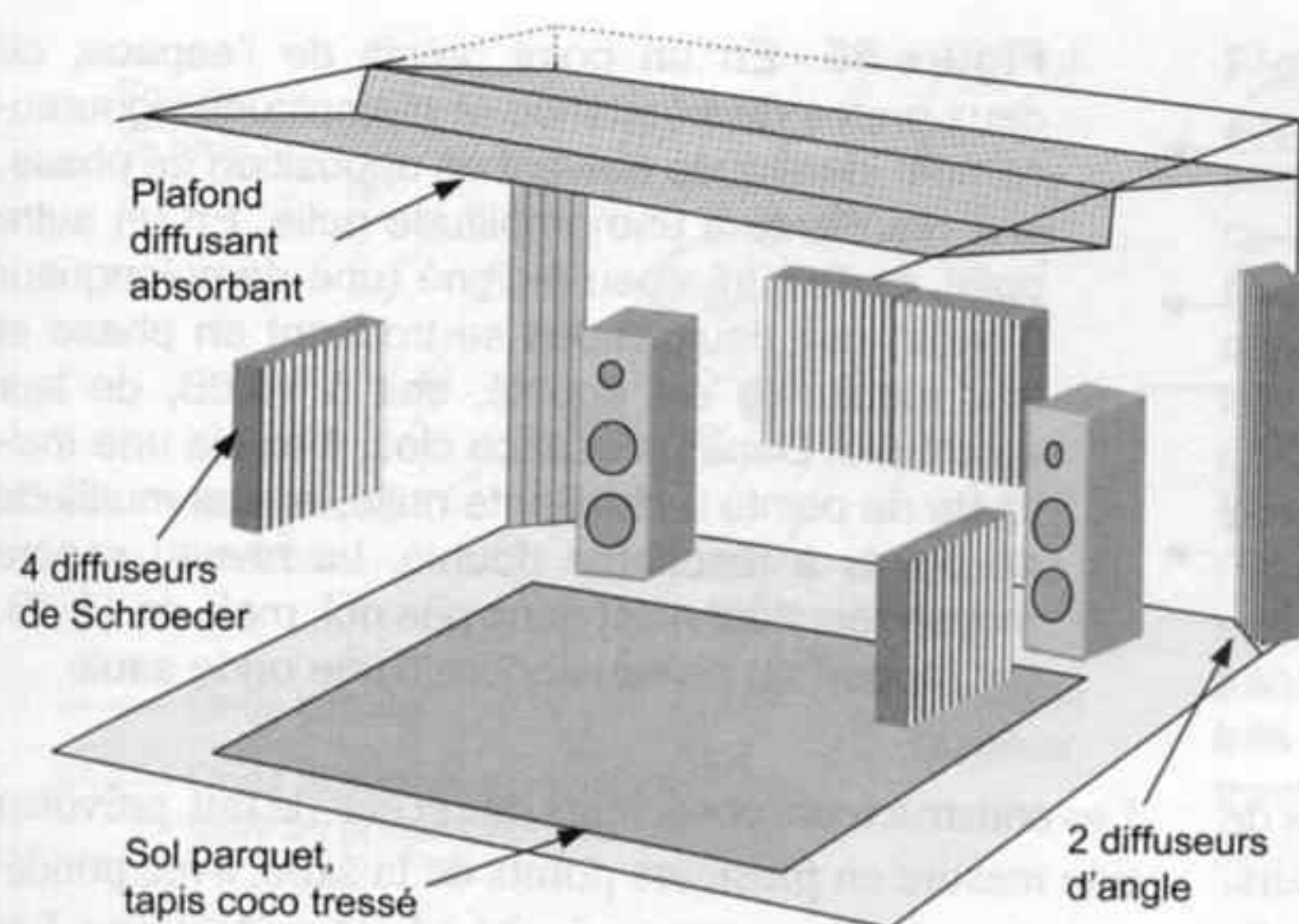


Figure 54 - Le dessin ci-contre montre la disposition des éléments diffusant dans une salle d'écoute.

Quatre diffuseurs de Schroeder sont utilisés pour les réflexions latérales et dorsales. Deux diffuseurs d'angle sont placés dans les coins de la pièce, et participent à l'élimination des résonances.

Le plafond est réalisé en panneaux perforés montés en dents de scie, avec laine minérale.

Ce traitement prend place à la fin de la démarche d'amélioration de la salle, et ne peut se substituer aux éléments traitant les résonances d'une part, et aux traitements de la réverbération d'autre part.

L'absorption des matériaux de correction de la réverbération ne suffit pas à éliminer ces réflexions primaires. En effet, le travail de ces matériaux pour dissiper les ondes en chaleur par frottement visqueux demande un minimum de temps, l'onde s'amortissant un peu plus à chaque réflexion. Malheureusement, ces réflexions primaires, brèves et de niveau élevé ne peuvent être efficacement absorbées. Le seul moyen de lutte consiste à diffracter ces ondes réfléchies dans toutes les directions afin de briser la cohérence de phase, ce qui a pour résultat de les diffuser et revient à étaler sur un laps de temps plus long l'énergie de l'onde réfléchie, tout en réduisant son niveau.

Toute surface irrégulière fait office de diffuseur, pour les fréquences dont le quart de la longueur d'onde est du même ordre de grandeur que les reliefs. Des décrochements de 15 à 20 cm sont donc nécessaires pour diffracter des fréquences aussi basses que 500 Hz.

Le moyen le plus connu, utilisé dans les studios d'enregistrement et certaines salles, est le diffuseur de Schroeder. Il est constitué d'alvéoles rectangulaires de différentes profondeurs construites dans un cadre en bois de dimensions 60 à 120 cm environ. Les bandes de fréquences traitées vont de 500 Hz – 4 kHz pour les plus petits jusqu'à 350 Hz – 10 kHz.

Les panneaux curvilignes fermés travaillent en absorption aux basses fréquences grâce à leur membrane souple, et en diffusion aux fréquences élevées qu'ils dispersent par leur profil convexe. Il existe des modèles d'angle, ainsi que des versions avec éclairage diffus intégré, et diverses finitions bois ou tissu.

Les panneaux curvilignes ouverts, plus simples et plus économiques, ne travaillent que par diffraction.

Des éléments diffracteurs et diffuseurs pour plafond, en matériaux synthétiques légers et peu encombrants, sont disponibles en différentes formes : portion cylin-

drique, pyramide dissymétrique, alvéoles rectangulaires. Ils ont des dimensions permettant leur montage intégré dans les faux plafonds suspendus.

CORRECTION ACTIVE

voir annexe 1, p. 348

Avec l'émergence des moyens informatiques, en particulier pour l'acquisition, le traitement et la présentation des données et des mesures, et l'apparition de nouveaux composants programmables suffisamment rapides et puissants pour effectuer des calculs numériques en temps réel sur un signal, il n'est pas étonnant que quelques constructeurs aient tenté le pari d'effectuer des corrections actives sur le champ acoustique de la salle. Des appareils venus d'outre-atlantique il y a une dizaine d'années, et équipés des fameux processeurs DSP Motorola, et plus récemment des processeurs nécessitant un PC avec logiciel dédié, fonctionnent sur un principe d'annulation des ondes sonores.

En effet, deux ondes sonores de fréquences et d'amplitudes identiques s'annulent exactement en tout point de l'espace où elles se trouvent déphasées d'une demi-période, figure 55. Pour qu'une annulation exacte se produise dans un espace étendu, et non en quelques points isolés, il est impératif que les deux ondes soient issues du même point. Lorsque les deux ondes sont issues de deux points distants, comme par exemple l'onde directe rayonnée par une enceinte acoustique et l'onde réfléchie par le mur latéral, alors il se forme des interférences entre ces ondes, qui produisent des successions de nœuds et de ventres, comme les ronds dans l'eau provenant de deux points distants. Certaines zones voient arriver les ondes en opposition de phase, d'autres les reçoivent en phase. L'idée de base de la correction active est d'envoyer dans la pièce une onde sonore chargée d'annuler l'onde indésirable créée par une surface réfléchissante, autrement dit réverbérée. Pour cela il est nécessaire de procéder à une analyse préalable des réflexions de la salle, ce qui est obtenu au

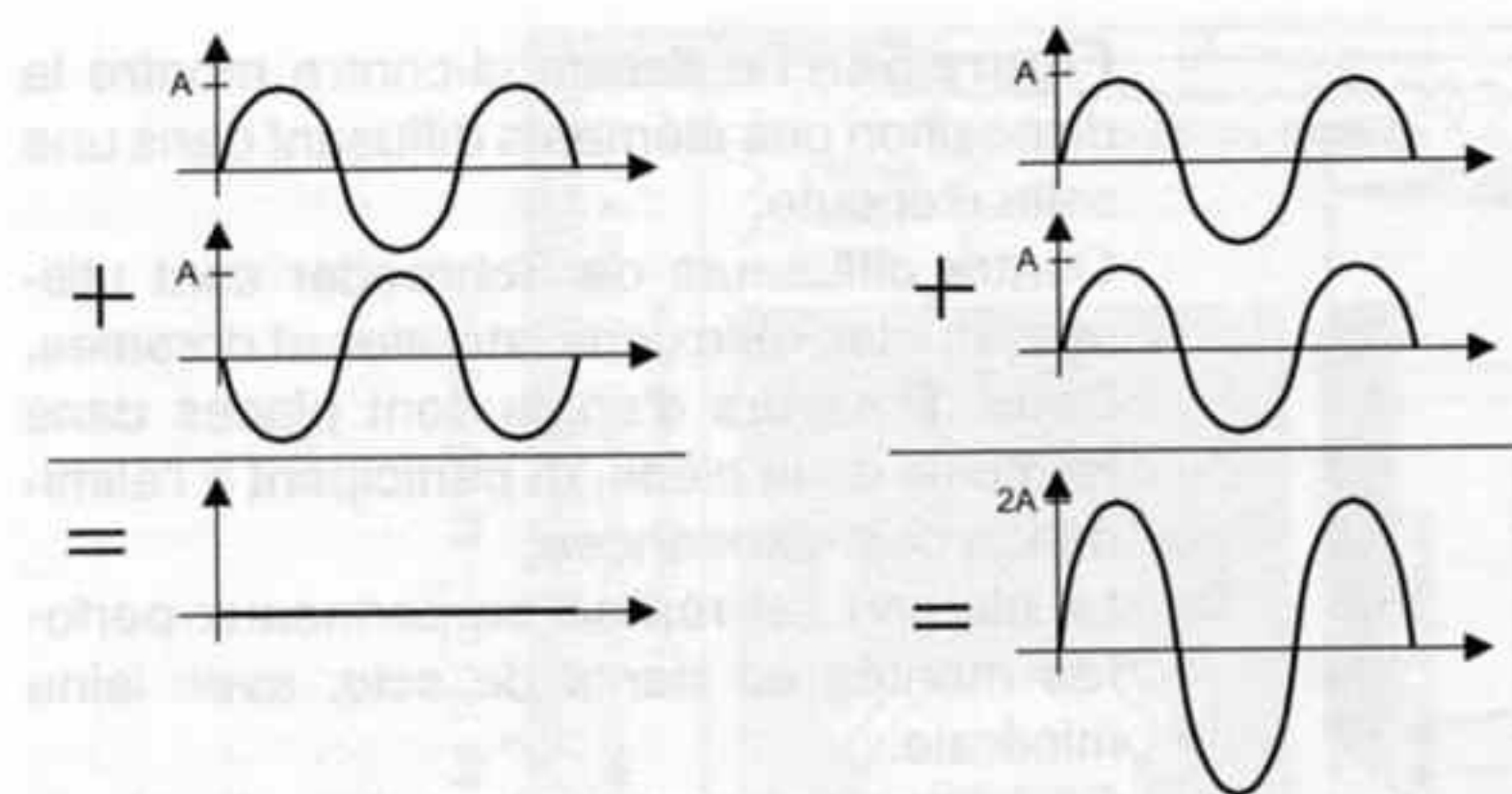


Figure 55 - En un point précis de l'espace, où deux ondes de fréquence et d'amplitude rigoureusement identiques arrivent en opposition de phase, leur résultante a une amplitude nulle. En un autre point, parfois très peu éloigné (une demi-longueur d'onde) ces deux ondes se trouvent en phase et leur résultante est double, soit à +6 dB, de leur amplitude. Dans un espace clos, il existe une multitude de points à résultante nulle, et une multitude de points à résultante double. Le niveau sonore moyen résultant n'est donc pas nul, mais de +3 dB, par rapport au niveau sonore d'une onde seule.

moyen d'impulsions générées par le correcteur, lors de la phase d'étalonnage, et émises par les haut-parleurs. Un micro de mesure, placé dans la zone d'écoute, reçoit ces impulsions en onde directe, mais également les ondes réfléchies qui arrivent avec un certain retard. Les signaux captés par le micro sont numérisés puis mémorisés. Leur analyse permet de calculer avec précision les instants d'arrivée des ondes réfléchies au point d'écoute, ainsi que le contenu fréquentiel de ces ondes, qui ont subi un amortissement sélectif par les parois et le mobilier. Le processeur est alors programmé pour déterminer, quel que soit le signal d'entrée, les signaux à envoyer, et à quels instants précis, pour obtenir l'annulation exacte des ondes réfléchies, au point où se trouvait le microphone... et en ce seul point ! Voir figures 57 et 58.

Cette technique est utilisée avec succès sur les casques anti-bruit (figure 56). Dans ce cas, le haut-parleur est situé juste devant le pavillon de l'oreille, sur le trajet de l'onde à éliminer. Le rayonnement de ce haut-parleur se superpose exactement à l'onde bruyante, et l'annulation est exacte dans une zone assez large autour et à l'intérieur de l'oreille. Dans la salle d'écoute, il n'en est rien !

D'un point de vue énergétique, le correcteur ajoute un troisième champ sonore aux champs direct et réverbéré, que j'appellerais champ "correctif". Ce champ intervient après le signal, et son énergie s'ajoute à celle du champ réverbéré à un instant où cette dernière est déjà trop élevée. Les pressions acoustiques s'additionnent vectoriellement, donc s'ajoutent ou se soustraient d'après leur relation de phase qui varie selon le point de l'espace considéré. Mais les énergies s'ajoutent, quoi qu'il arrive...

On obtient donc une annulation toute théorique en un point insaisissable de la salle, où une seule de mes deux oreilles peut éventuellement se trouver par hasard, avantage illusoire autant qu'inutile, et une augmentation de l'énergie sonore, de la masse sonore, qu'il convient au contraire de réduire. On ajoute encore du traînage derrière les impulsions, on remplit encore plus le silence entre les sons.

Les constructeurs conscients de cet état de fait, prévoient une mesure en plusieurs points de la salle, avec pondération, en attribuant une priorité à la zone d'écoute. Les corrections effectuées interviennent alors sur la réponse niveau/fréquence, ce qui corrige quelques défauts de la salle, si elle est trop brillante ou trop sourde. Cela ne peut corriger toutes les résonances graves, dont la surtension, l'acuité, est très élevée, ni le "flutter echo". La réverbération, qui est un problème temporel et non fréquentiel, ne peut être corrigée par ce principe.

Finalement, c'est le sempiternel égaliseur qui est réintroduit sous une forme moderne, coûteuse et délicate à mettre en œuvre. Ses performances très élevées dans le domaine fréquentiel, en particulier ses pentes d'atténuation très fortes, et sans perturbation de phase, permettent des corrections très localisées, à même de supprimer dans le signal les fréquences excitant les résonances du local, en créant un filtrage en "peigne". Bien que le système auditif ne soit pas sensible aux creux ponctuels dans la réponse en fréquence, ne pas transmettre les signaux de fréquence 113 Hz par exemple, sous prétexte qu'ils font résonner la salle, me semble un pis-aller, une privation, une amputation du signal inacceptable. L'action est établie sur l'effet perturbateur et non sur la cause réelle de la perturbation, aussi sa portée est-elle extrêmement limitée. La précorrection à l'aide d'un égaliseur quel qu'il soit revient à ajouter du sel dans un plat insipide, cuisiné avec des produits quelconques. Cela rattrape un peu la sauce, mais en cachant les vrais problèmes. Au contraire la recherche du réalisme sonore consiste à retrouver le vrai goût des bonnes choses, sans tricherie, sans épices ni aromates. C'est le vrai café noir sans sucre... Notre société et notre éducation, nos habitudes culinaires, nous ont fait perdre la notion d'authenticité.

L'authentique ne se fabrique pas.

Il est approché, jamais atteint, par l'authenticité de la démarche, qui amène à rechercher au fond des choses des éléments de vérité, fragments précieux, limites infranchissables.

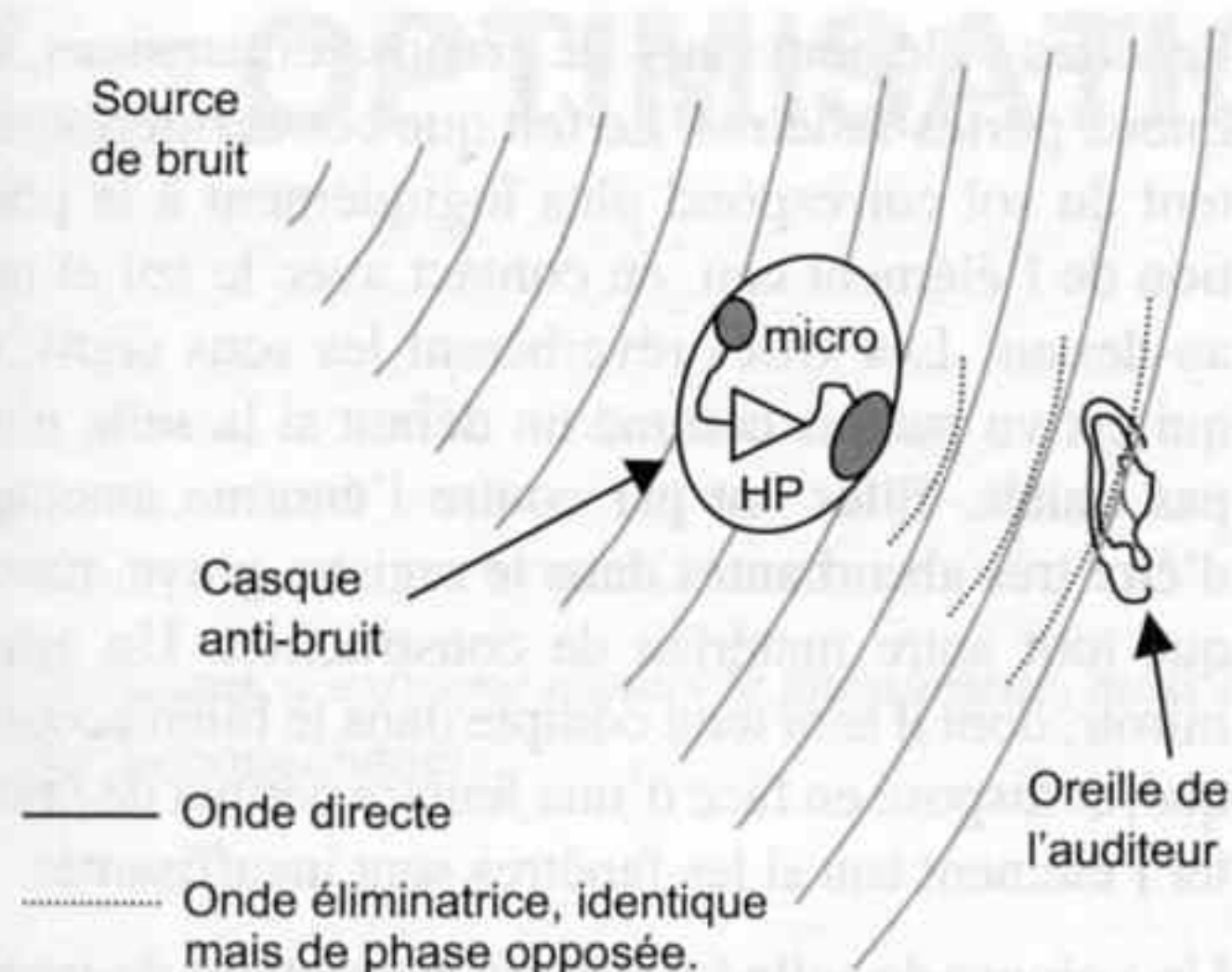


Figure 56 - Dans un casque anti-bruit, un microphone capte le champ sonore incident, afin de piloter via un amplificateur, un haut-parleur chargé d'émettre un signal de fréquence et d'amplitude identiques au bruit perturbateur, mais de phase opposée. Comme les deux ondes se superposent assez bien au voisinage de l'oreille, l'annulation d'amplitude est relativement bonne, et la réduction du bruit ambiant peut atteindre quelques dizaines de dB. Des filtres correcteurs incorporés dans le circuit électronique permettent une annulation des seuls bruits continus, et un passage avec atténuation réglable des sons transitoires, ou fortement modulés. Les bruits industriels très masquants et fatigants sont ainsi éliminés pour le travailleur, mais la communication et les signaux de sécurité restent audibles.

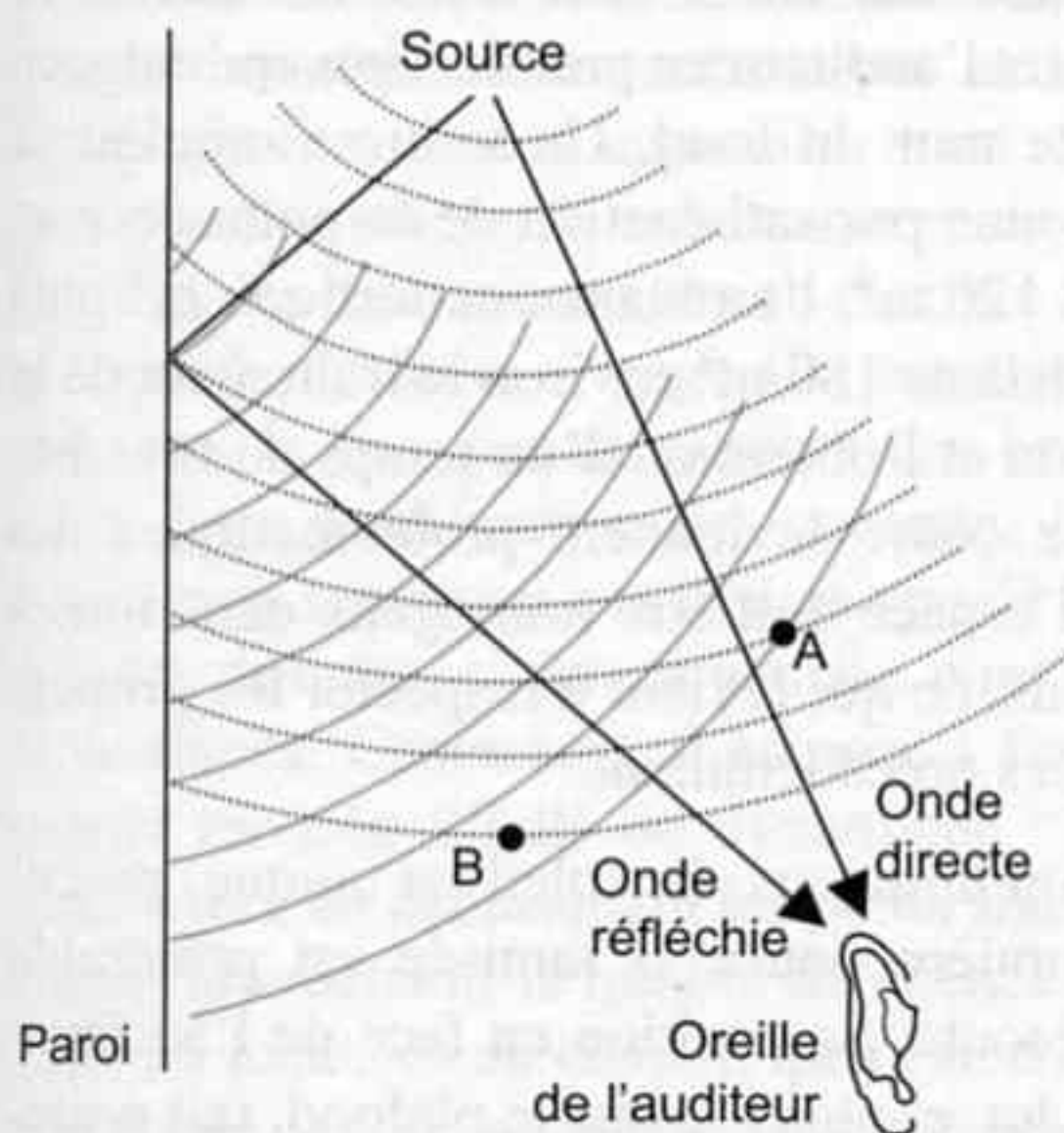


Figure 57 - Dans un local clos, l'onde directe provenant du haut-parleur, et l'onde réfléchie par une paroi, forment un angle d'autant plus grand que l'auditeur est éloigné des parois et proche de la source. Ces deux ondes se combinent en formant des interférences, suites régulières de ventres et de nœuds de pression acoustique. Sur le schéma ci-contre, les lignes courbes représentent les lieux de pression maximale de ces ondes. Au point A par exemple, ces deux ondes verront leur amplitude "s'additionner", de même qu'en tous les points où les lieux de pression maxi se croisent. Par contre au point B, où l'onde réfléchie est en opposition de phase avec l'onde directe, les amplitudes vont se "soustraire", ainsi qu'en tous les points similaires. Théoriquement, si la surface est parfaitement réfléchissante, le champ sonore résultant sera constitué de ventres à +6 dB et de nœuds à 0 dB, le niveau résultant sera de +3 dB au-dessus du niveau que donnerait la source sonore seule.

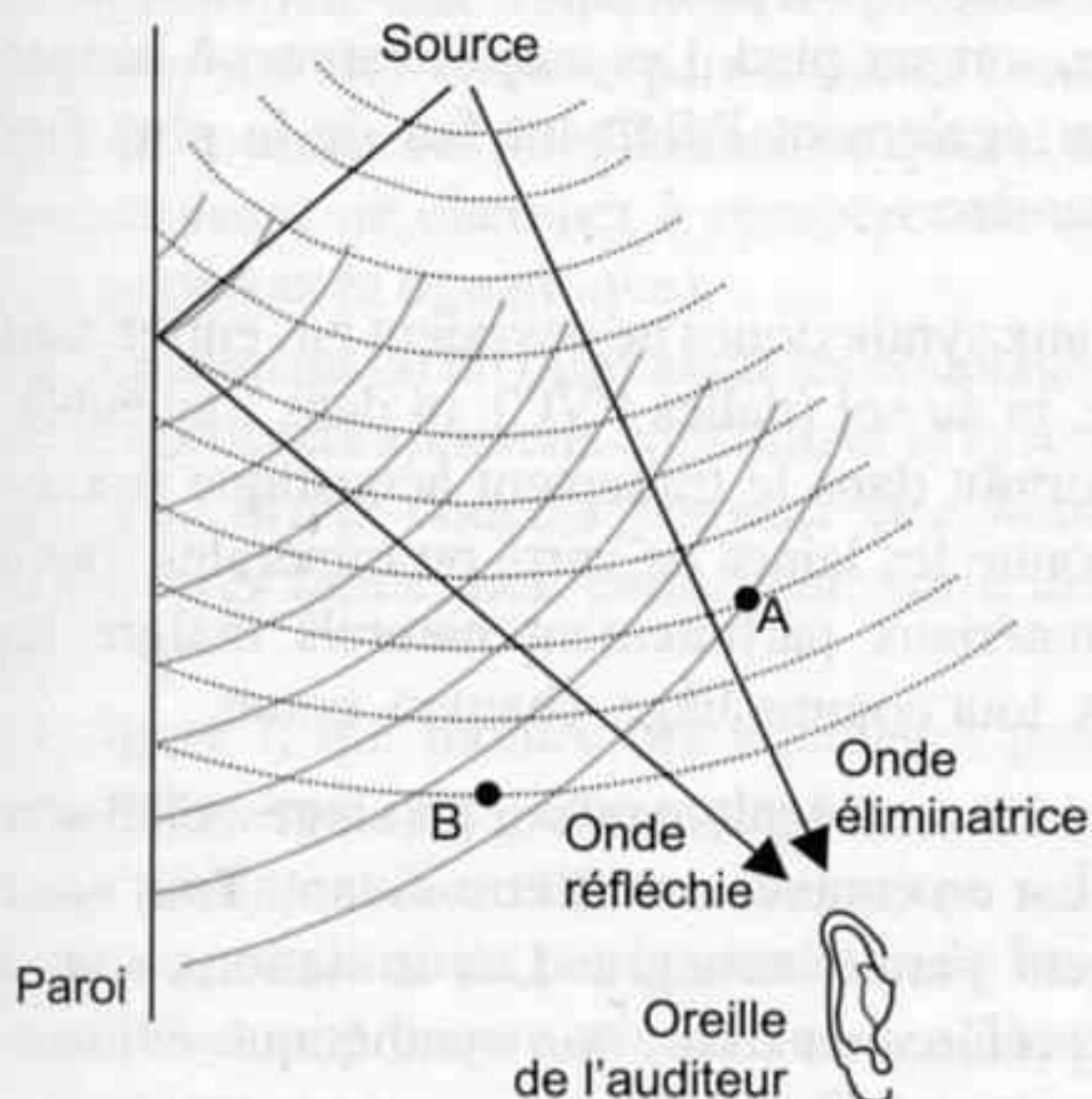


Figure 58 - L'onde réfléchie arrivant à l'oreille de l'auditeur avec un retard temporel, si une onde de caractéristiques identiques est émise par la source à l'instant propice, elle arrivera à l'oreille en même temps que l'onde réfléchie. L'oreille ne se trouvera en un point de soustraction comme B que si elle occupe exactement la position qu'occupait le microphone employé pour l'étalonnage du système. Les longueurs d'onde mise en jeu étant inférieures à 30 cm environ pour les sons médium, et à 8 cm pour les aigus, seule une statue peut bénéficier des effets correcteurs ! Si je m'adosse dans mon fauteuil ou que je tourne la tête, l'effet d'annulation disparaît... Laquelle de mes deux oreilles dois-je mettre au point idéal ? D'autre part d'un point de vue énergétique, l'onde correctrice va générer un champ sonore supplémentaire, retardé par rapport au champ direct. Cela s'appelle une réverbération artificielle ! La naturelle, celle du local, est déjà trop forte...

LE POINT DE VUE DU NATUROPHILE

Notre audition nous renseigne très précisément sur notre environnement, et l'harmonie des matériaux qui entrent dans la salle d'écoute conditionne grandement, de manière inconsciente la plupart du temps, notre réceptivité. C'est pourquoi je pense qu'il est essentiel de respecter dans la pièce d'écoute une distribution des

matériaux correspondant le mieux possible à leur répartition naturelle, afin que l'auditeur se sente dans un espace équilibré, harmonieux, où les sons se propagent et disparaissent de manière naturelle.

Les matériaux utilisés dans les constructions modernes se rattachent aux cinq éléments naturels, ayant chacun des caractéristiques acoustiques propres :

- L'élément terre, auquel appartiennent tous les minéraux entrant dans la construction, tel que le béton, le ciment, le plâtre, la brique, le marbre... Leur amortissement interne est très faible car ils sont rigides. Ils réverbèrent bien les fréquences élevées, et donnent par conséquent un son dur et lisse.
- L'élément bois, présent dans les portes, cadres de fenêtre, lambris et frisée, mais aussi parquet, meubles, étagères, panneaux... et certains revêtements de sol. Beaucoup mieux amorti en général, il donne un son à la fois doux et riche, ample et léger, très naturel.
- L'élément air, qui emplit la pièce, qui a une sonorité propre par amortissement des sons aigus avec la distance au-delà de quelques mètres.
- L'élément eau, dont la transparence est rappelée par les surfaces vitrées, dont la profondeur correspond à la profondeur du champ de vision par les fenêtres. Sa sonorité est cristalline, vive et légère, claire et profonde à la fois.
- L'élément feu, apporté par la lumière ambiante, qui semble avoir un effet colorant sur les perceptions sonores, une lumière chaude faisant paraître les sons plus doux et inversement.

Pour respecter la disposition habituelle de ces éléments, afin que leur contribution à l'ambiance sonore soit la plus naturelle possible, leur répartition devrait être :

- Sol en minéral, élément terre, fondamentalement en bas. Recouvert de végétal, il correspond exactement à la couverture de la planète. Par exemple, chape de béton recouverte de tapis de coco tressé. Les réflexions des sons au sol sont absolument naturelles et indispensables à la création d'une ambiance elle aussi naturelle. Supprimer ces réflexions primaires au sol est inutile, et les non-voyants ressentent cette suppression comme un malaise, avec l'impression d'être "en l'air".
- Murs en bois ou garni de panneaux de bois, essentiellement vertical. Mobilier en bois également. Un tissu à base de coton, lui aussi végétal, peut garnir les parois en finition. Les murs en béton, ou tout autre minéral sont anti-naturels, car il n'existe aucun environnement à part les cavernes ou leur sonorité nous apparaît latéralement.
- Plafond inexistant, en... air ! Ce n'est possible qu'en supprimant son existence d'un point de vue acoustique, c'est-à-dire en le rendant complètement absorbant afin qu'il ne renvoie aucun son. À la rigueur la sonorité du végétal est acceptable, tout comme la présence de la voûte des arbres dans la forêt. Un traitement très absorbant à base de panneaux de bois donne une sonorité très calme.

- Fenêtres – élément eau – de grandes dimensions, ou mieux portes-fenêtres. Le fait que ces dernières partent du sol correspond plus logiquement à la position de l'élément eau, en contact avec le sol et non au-dessus. Les vitres réverbèrent les sons aigus, ce qui est vu parfois comme un défaut si la salle n'est pas traitée. Elles ont par contre l'énorme avantage d'être très absorbantes dans le registre grave, mieux que tout autre matériau de construction. Un grand miroir, dont il sera tenu compte dans le bilan acoustique, et disposé en face d'une fenêtre permet de rajouter l'élément eau si les fenêtres sont insuffisantes.
- Un volume de salle important, permettant de percevoir l'élément air, aussi bien entre les enceintes acoustiques et l'auditeur en premier lieu, qu'entre ce dernier et le mur du fond. Un volume inférieur à 80 m³ ne donne pas satisfaction de ce point de vue. À partir de 120 m³, l'ambiance acoustique est plus aérée. Au-delà de 180 m³ environ le traitement de la réverbération et l'obtention d'un temps de réverbération assez court deviennent problématiques. La sensation d'espace doit être homogène dans toutes les directions, ce qui revient à respecter les proportions données précédemment.
- Un seul point lumineux, (le soleil est unique) procurant une lumière douce et tamisée est préférable pendant l'écoute. Sa position en face de l'auditeur ou derrière lui, et plus bas que le plafond, fait préférer une lampe halogène avec gradateur, soit en applique, soit sur pied. Les amplificateurs à lampes apportent également l'élément feu de la plus élégante manière.

Les matériaux synthétiques ne devraient pas entrer dans cette pièce, ni au sol (dalles PVC), ni dans l'ameublement, ni surtout dans le traitement acoustique (mousses). Par contre les laines de verre ou minérales sont à base de matériaux parfaitement naturels malgré les apparences, tout comme liège, chanvre, coton.

Le cuir est bienvenu également sur les sièges, où il sera à sa place car en contact avec l'être vivant. Tout autre emplacement paraît incongru. Les imitations sont à proscrire, préférer un tissu, non synthétique évidemment.

Cette approche plutôt ésotérique amène à créer un environnement extrêmement serein, quiet. Une salle réalisée à partir de ce modèle procure une impression étonnante d'ouverture de la scène sonore, avec, selon les prises de son, une sensation d'absence des murs, et une légèreté des sons remarquable. Plaisir garanti.

7. OPTIMISATION

« La musique n'exprime jamais le phénomène, mais l'essence intime, le dedans du phénomène, la volonté même ».
Arthur Schopenhauer

Pour l'amateur ne possédant ni les compétences, ni les moyens de conception et de mesure indispensables, et qui par conséquent ne souhaite pas se lancer dans la transformation de ses appareils, il est tout de même possible d'améliorer le rendu sonore de son système. En effet, les limitations vues au chapitre 5 « Approche globale du système », page 40, peuvent être repoussées vers le bas, par diminution des bruits perturbateurs. Sans modification des enceintes il ne sera pas possible de repousser ces limites vers le haut, pour les niveaux de crête, ni vers la gauche, pour ce qui est des sons graves. Cependant, il est tout à fait possible de gagner environ 20 dB de dynamique "vers le bas", c'est-à-dire en démasquant les petits signaux, en améliorant grandement la qualité du silence. L'aménagement du local, vu au chapitre précédent a déjà permis un gain de ce côté, ainsi que dans le domaine temporel, principalement aux fréquences les plus basses, en dessous de 500 Hz. D'autre part il paraît beaucoup plus sain de commencer par éliminer ce qui est en trop (les bruits) avant de chercher à récupérer ce qui manque (les graves et la dynamique).

En supprimant ou en diminuant les couplages parasites entre les divers appareils constituant le système, la plupart des bruits couplés peuvent être ramenés à un niveau très faible, non perturbant, voire même éliminés.

La figure 7, qui montre ces bouclages parasites, fait apparaître trois types de couplage :

- par l'alimentation secteur commune à l'ensemble des appareils reliés par les cordons de liaison audio,
- par le champ sonore dans le local, agissant mécaniquement sur les appareils par effet microphonique,
- par le champ sonore encore, agissant avec un retard, par retour d'ondes de pression sur les haut-parleurs, ces derniers renvoyant un signal à la sortie de l'amplificateur.

Chacun de ces couplages parasites, qui fonctionne par rétro-action comme un système bouclé, ne peut être efficacement combattu qu'en ouvrant purement et simplement la boucle ! Dans certains cas toutefois, une

amélioration est possible en diminuant le gain de cette boucle, parfois dans une bande de fréquences précise, limitée. C'est par un filtrage, mécanique ou électrique, inséré dans la boucle, de préférence dans la voie de retour de signal, qu'il est possible de contrôler son gain aux fréquences voulues. Les spécialistes des systèmes bouclés, régulations et asservissements divers, sont plus habitués à calculer des boucles choisies volontairement, avec l'objectif d'un gain précis et d'une stabilité optimale. Ici, il convient de rechercher des boucles établies involontairement, et d'en contrôler ou d'en annuler le gain sans intervenir sur la transmission du signal.

Par exemple, si je parle dans un microphone et que ma voix est reproduite, amplifiée, par un haut-parleur situé à proximité, figure 59, je risque d'être victime du fameux effet Larsen, du nom de son découvreur. Le bruit de fond de l'installation, émis par le haut-parleur, est capté par le micro, réamplifié puis réémis, capté à nouveau puis réamplifié et ainsi de suite avec un niveau de plus en plus élevé. C'est un excellent exemple de bouclage involontaire, qui se traduit par un sifflement strident insupportable.

Je peux évidemment diminuer le gain de la boucle en baissant le volume sur l'amplificateur. Je peux aussi diminuer le niveau des sons aigus grâce aux contrôles de tonalité, ou encore diminuer la sensibilité en baissant le niveau d'entrée de l'amplificateur si ce dernier est muni d'un atténuateur d'entrée. Toutes ces interventions ont le même effet : diminution du gain direct de la boucle. Cette boucle n'a pourtant pas été supprimée.

L'intervention sur le trajet direct aura bien supprimé l'accrochage, amplification incontrôlable, qui transforme l'amplificateur en oscillateur grâce à la réaction positive créée par le champ sonore. En diminuant le gain, soit pour toutes les fréquences en agissant sur le réglage de volume, soit pour une bande de fréquence limitée en agissant sur le réglage de tonalité, j'ai stabilisé le fonctionnement de mon système bouclé. Mais je

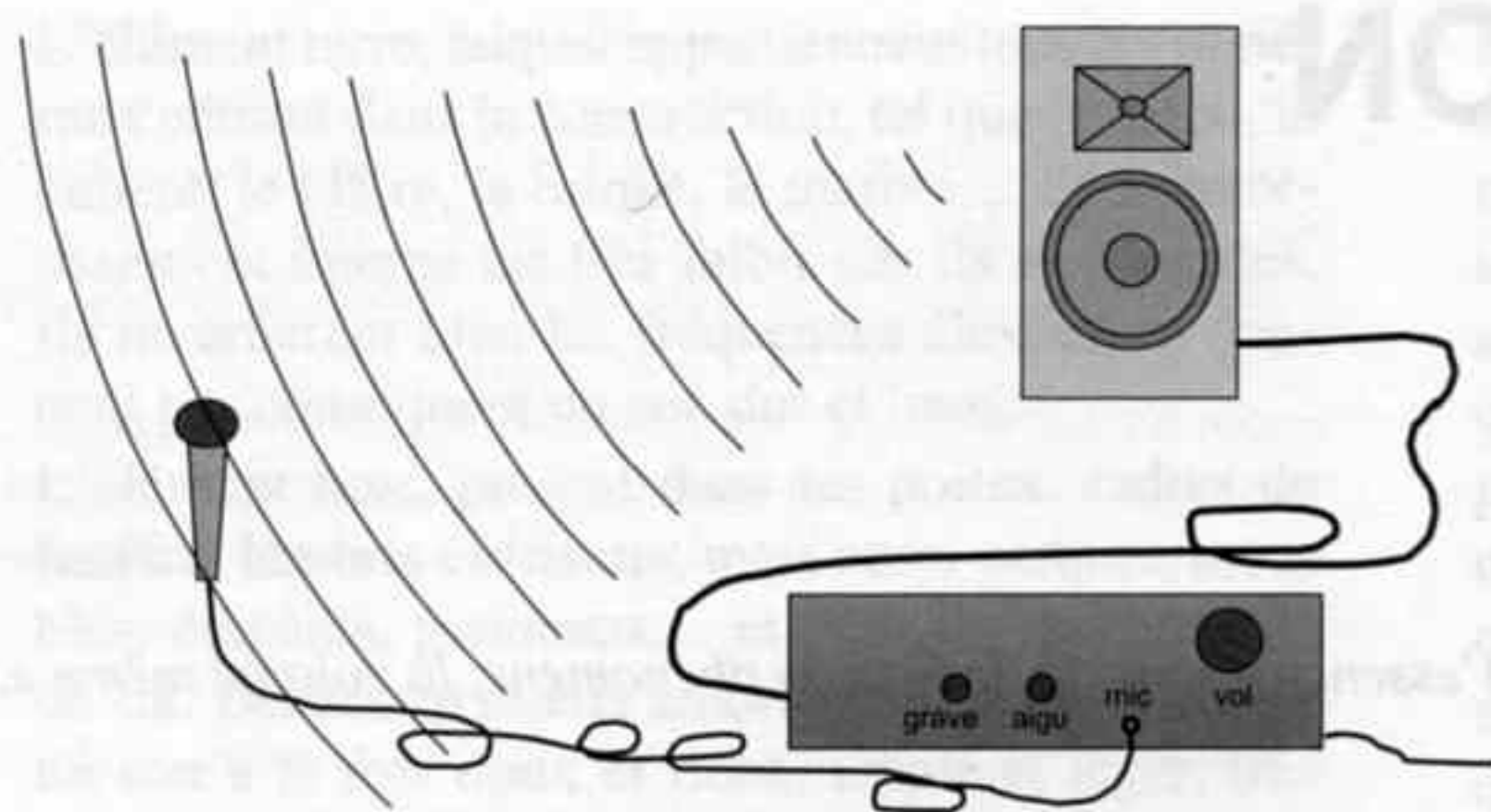


Figure 59 - Le champ sonore réalise un bouclage involontaire entre le capteur de signal, le microphone, et le diffuseur du signal amplifié, le haut-parleur. Le gain de cette boucle est tributaire du réglage de volume et du réglage de tonalité, pour ce qui est du trajet direct, mais aussi de la position relative du micro et de l'enceinte, et de leur caractéristique de directivité, pour ce qui est du trajet de retour.

n'ai pas supprimé la boucle, et de plus j'ai modifié la transmission du signal utile, ce qui peut se révéler gênant.

En revanche, si j'agis sur le trajet de retour, je peux diminuer ou supprimer le couplage sans altérer le trajet direct, donc sans modifier la transmission du signal. Pour cela, je peux disposer le haut-parleur en hauteur et l'orienter vers le public à qui je m'adresse, puis me placer en arrière de ce haut-parleur, hors de son champ de diffusion. Je peux également utiliser un micro directionnel, qui captera exclusivement ma voix et restera insensible aux sons ambiants.

D'une manière générale, pour tous les couplages parasites dont le système est victime, il convient de rechercher le trajet de retour, qui peut parfois emprunter des itinéraires surprenants, et de trouver un moyen de l'interrompre, ou à défaut de limiter sa transmission en installant une certaine "résistance", électrique ou mécanique, au passage du signal.

COUPLAGE PAR LE RÉSEAU EDF DU SECTEUR

Ce couplage est inévitable, à moins d'utiliser des alimentations par batteries rechargeables, non reliées au secteur lors de l'écoute. Des appareils tels que préamplificateurs, filtres actifs, convertisseurs numérique-analogique peuvent être alimentés de cette manière, les batteries étanches à électrolyte gélifié étant rechargées la nuit au tarif heures creuses. Les circuits de charge de ces batteries doivent garantir une isolation totale par rapport au secteur lors de l'écoute, ce qui impose d'utiliser des interrupteurs bipolaires, et de ne pas relier à la terre les appareils ainsi alimentés. La consommation de ces appareils étant limitée à 0,1 A environ, des batteries de 6 à 10 Ah de capacité assurent une autonomie de plusieurs dizaines d'heures.

Malheureusement, dès que deux appareils de l'installation ne bénéficient pas de ce principe et sont alimentés classiquement par le secteur, il y a couplage. Par exemple, dans un système avec filtre actif et préampli alimentés par batteries, si l'amplificateur et le lecteur de CD sont tout deux reliés au secteur, ces deux appareils seront couplés par leurs cordons secteurs respec-

tifs. Le trajet direct de cette boucle emprunte les conducteurs de masse des cordons de liaisons audio, le trajet retour emprunte les câbles secteurs, tous obligatoirement reliés.

Si le réseau secteur était parfait, sans résistance (ou impédance) et si les circuits d'alimentation des appareils fournissaient un isolement parfait par rapport à ce réseau, ce couplage serait sans effet. Mais hélas, rien n'est parfait... Tout d'abord, aux fréquences élevées, à partir de quelques kHz, le réseau EDF présente à la prise secteur une impédance de l'ordre de 10 Ω à 1 k Ω , typiquement autour de 100 Ω en mode différentiel, c'est-à-dire pour tout courant circulant entre phase et neutre, et d'environ 200 Ω en mode commun, par rapport aux masses environnantes reliées à la terre. Ensuite, l'isolement apporté par l'incontournable transformateur d'alimentation secteur est souvent assez mauvais, de l'ordre de 0,1 M Ω à quelques M Ω . Ce n'est pas un défaut d'isolation des conducteurs utilisés pour le bobinage, mais simplement l'effet des capacités parasites entre les spires et la carcasse, elle-même reliée à la terre pour raisons évidentes de sécurité. Enfin en troisième lieu, la consommation de certains appareils, les amplificateurs en particulier, est modulée par le signal. Ce sont surtout les amplificateurs à transistors, de classe AB ou B (ces points seront détaillés dans le chapitre 9 « L'électronique ») qui voient leur consommation secteur fluctuer au rythme de la modulation audio.

La conséquence apparaît immédiatement : lorsqu'on tire un courant variable (modulé) à travers une impédance non nulle (augmentant avec la fréquence) on obtient aux bornes de cette impédance (à la prise secteur) une tension modulée, faible bien sûr mais gênante. Il est très risqué de tenter une mesure de cette modulation, et les appareils de mesure usuels ne permettent pas de la détecter. Il est impossible sur un oscilloscope de distinguer des détails de 0,05 V sur une sinusoïde de 630 V crête-à-crête, et un analyseur de spectre avec au moins 80 dB de dynamique est indispensable. Par contre, il est possible, bien que très dangereux, d'entendre cette modulation : en débran-

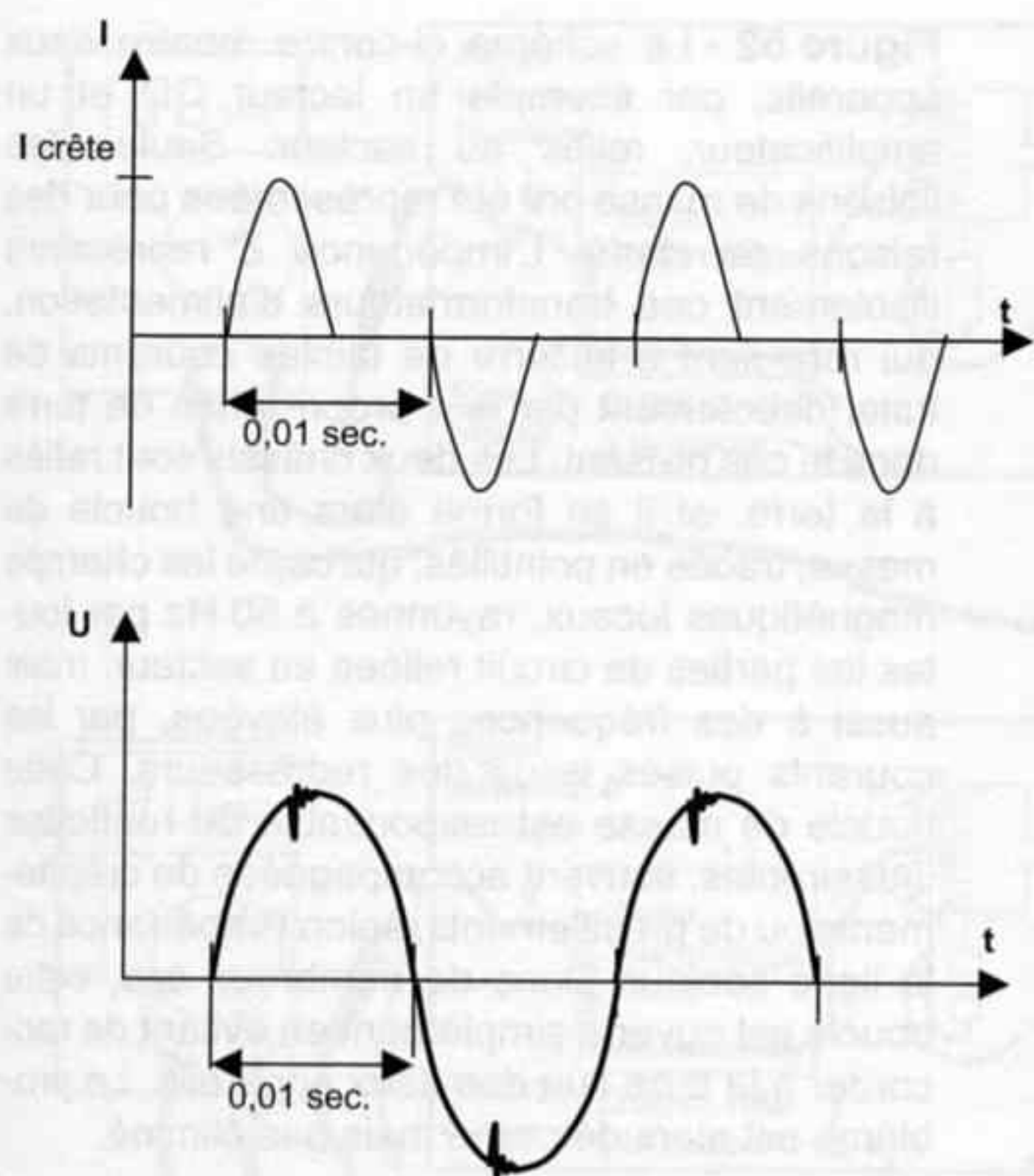


Figure 60 - Le courant pulsé tiré par le transformateur sur le réseau secteur présente une forme très pointue lorsque les redresseurs chargent des capacités de fortes valeurs. En plus d'une composante basse fréquence, double de la fréquence secteur, soit 100 Hz en Europe, ce courant est riche en harmoniques de fréquences élevées, et de niveaux importants jusqu'au rang 20 et très souvent au-delà. L'impédance de la ligne secteur n'est plus négligeable à ces fréquences de plusieurs kHz.

Figure 61 - L'impédance de la ligne secteur augmente avec la fréquence, de quelques centaines de $m\Omega$ à la fréquence du réseau de 50 Hz, jusqu'à plus de 100 Ω à partir de quelques kHz. Les courants pulsés, tirés par les grosses alimentations redressées, munies de capacités de forte valeur, provoquent dans cette impédance des tensions impulsionnelles de plusieurs dizaines de mV, contenant principalement des hautes fréquences, et qui sont propagées par conduction sur le réseau et vont polluer les autres appareils du système de reproduction.

chant les enceintes et en les remplaçant par des résistances de puissance de 8 Ω /25 W minimum, puis en passant un disque de piano, un petit haut-parleur relié en série à un condensateur secteur de 1 μF (classe X2), entre phase et neutre laisse entendre un ronflement-crépitement dont l'amplitude est modulée, au rythme de la phrase musicale. Je déconseille impérativement cette manipulation aux personnes non expérimentées !

Cette modulation de quelques dizaines de mV, due aux courants dissymétriques tirés par l'étage de sortie de l'amplificateur (sauf s'il fonctionne en pure classe A), se retrouve aux bornes des enroulements primaires des transformateurs de tous les éléments du système. On la retrouve aux secondaires, généralement atténuée, sauf dans les amplificateurs à lampes, pour lesquels la tension secondaire est généralement plus élevée que celle du secteur. La modulation parasite du secteur est amplifiée dans cette situation. Si l'alimentation est parfaitement filtrée, le problème est réglé, mais ce n'est bien sûr pas toujours le cas.

Le crépitement quant à lui est dû au fait que le transformateur d'alimentation tire sur le réseau un courant qui n'a rien de sinusoïdal, mais qui est constitué "d'impulsions", de durée brève et de hauteur importante, figure 60. Ces impulsions correspondent aux intervalles de temps pendant lesquels les diodes de redressement sont passantes, et conduisent le courant à travers le condensateur de tête de filtre, dit condensateur de lissage (des précisions sur ce sujet seront données au chapitre électronique). Il est tout à fait habituel que ce type d'alimentation tire au secondaire du transformateur un courant efficace valant de 3 à 5 fois le

courant continu consommé en sortie. Le courant crête pouvant atteindre de 10 à 30 fois le courant continu ! La composante à 50 Hz de ce courant ne pose aucun problème car l'impédance du réseau est très faible à cette fréquence, typiquement inférieure à 1 Ω . Par contre les harmoniques de rang croissant, et donc de fréquence croissante, de ce courant, voient une impédance de plus en plus élevée, atteignant facilement 100 Ω à 10 kHz. On retrouve par conséquent sur la tension secteur des pics parasites, figure 61, d'amplitude faible, mais qui sont eux aussi transmis à tous les appareils, jusqu'aux enroulements secondaires de leurs transformateurs. Ces pics sont très difficiles à filtrer.

Courants de masse

Un autre problème enfin est lié à l'utilisation du réseau EDF, et concerne le raccordement obligatoire à la terre, par le conducteur de protection vert/jaune. Cette liaison permet d'évacuer d'éventuels courants de défaut ainsi que les inévitables courants de fuite, dus à l'imperfection de l'isolement bobinage/carcasse, l'impédance d'isolement étant court-circuitée aux fréquences élevées par les capacités parasites entre enroulements et noyau du transformateur. Malheureusement, pour des raisons de sécurité évidentes, le châssis des appareils est relié lui aussi à la terre, et la masse qui devrait s'appeler référence de potentiel, commune aux circuits du signal et aux alimentations est, elle aussi, reliée à la terre par le châssis. Deux appareils reliés au secteur, donc à la terre, ont leurs masses reliées entre elles par les conducteurs vert/jaune. En

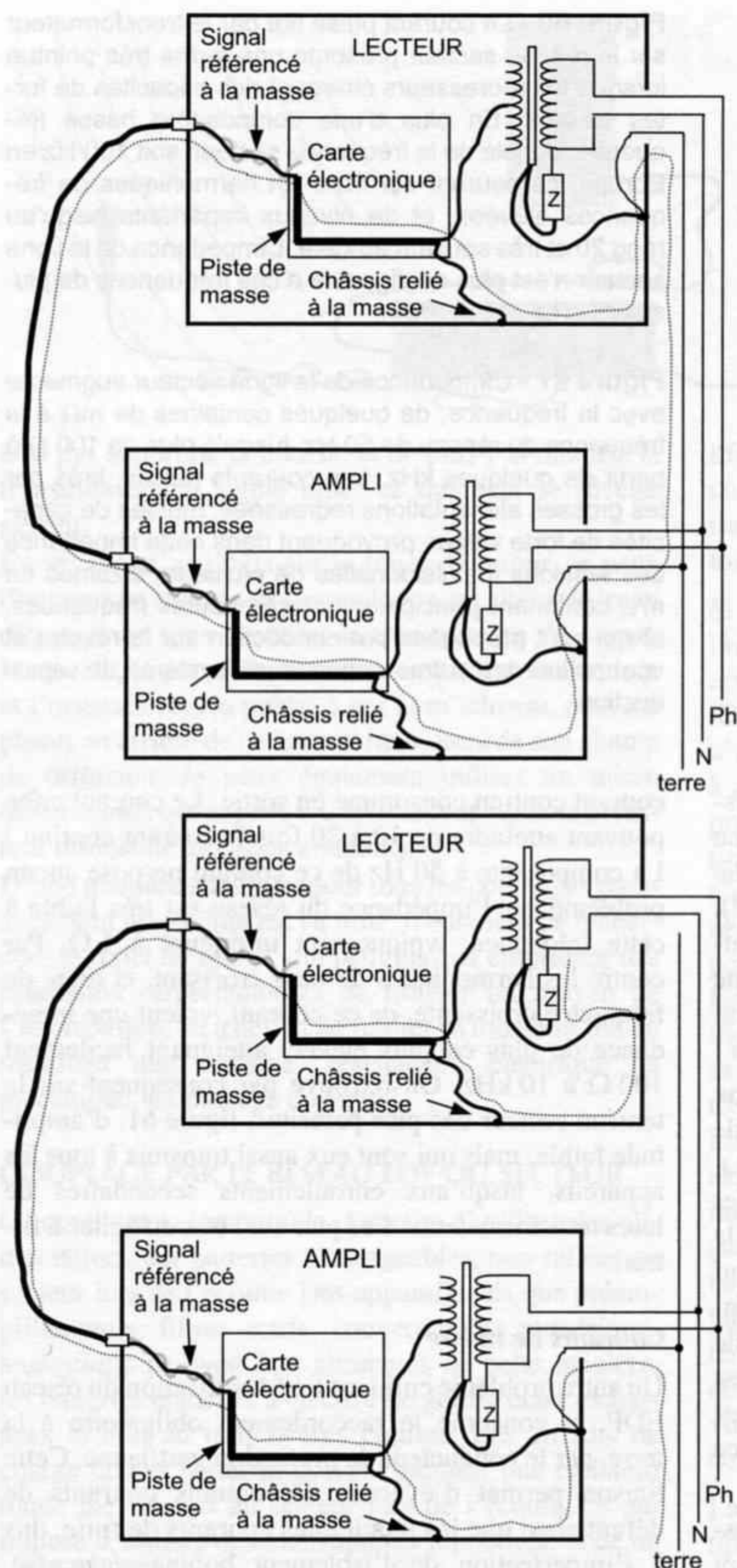


Figure 62 - Le schéma ci-contre montre deux appareils, par exemple un lecteur CD et un amplificateur, reliés au secteur. Seules les liaisons de masse ont été représentées pour des raisons de clarté. L'impédance Z représente l'isolement des transformateurs d'alimentation, qui renvoient à la terre de faibles courants de fuite, directement par leur propre prise de terre dans le cas présent. Les deux châssis sont reliés à la terre, et il se forme alors une boucle de masse, tracée en pointillés, qui capte les champs magnétiques locaux, rayonnés à 50 Hz par toutes les parties de circuit reliées au secteur, mais aussi à des fréquences plus élevées, par les courants pulsés issus des redresseurs. Cette boucle de masse est responsable de ronflettes indésirables, souvent accompagnées de crépitements ou de grésillements, selon l'impédance de la ligne secteur. Dans de nombreux cas, cette boucle est ouverte simplement en évitant de raccorder à la terre l'un des deux appareils. Le problème est alors détourné mais pas éliminé.

Figure 63 - Le lecteur CD est maintenant isolé de la terre. Le courant de fuite de son alimentation (en particulier les composantes de fréquences élevées, véhiculées par le réseau et provenant de l'alimentation d'autres appareils) ne trouve un chemin vers la terre – en pointillés – qu'en traversant le châssis et la masse de l'appareil, puis le câble de liaison audio qui raccorde le lecteur à l'amplificateur. Après avoir enfin traversé le circuit de masse de ce dernier, ces parasites trouvent une voie d'évacuation. Même si les circuits d'alimentation de l'amplificateur sont parfaitement filtrés, les perturbations parviennent quand même à polluer ses circuits de signal ! L'amplitude de ces perturbations dépend de l'impédance d'isolement Z , et de l'impédance du câble de liaison audio. Il n'est pas rare de mesurer quelques mA de courant de fuite, ce qui introduit quelques dizaines de μV de bruit aux bornes du cordon de signal, limitant ainsi le rapport signal/bruit à moins de 80 dB, ce qui n'est pas fameux.

reliant ces deux appareils par un cordon de signal audio, il s'établit une seconde liaison entre ces deux masses ! Cela s'appelle une boucle de masse, figure 62. Il circule dans cette boucle fermée des courants induits par les champs magnétiques environnants, mais aussi des courants dits de circulation, que chaque appareil renvoie à la terre par le plus court chemin, figure 63. Ce chemin passe parfois par un autre appareil... dont l'impédance de liaison à la terre est

plus faible ! Comme le signal audio est référencé à cette masse, la tension sur le conducteur signal suit exactement celle sur le conducteur de masse. Les tensions parasites induites par ces courants sont donc en mode commun, c'est-à-dire sur les deux conducteurs audio en même temps. Malheureusement les étages d'entrée transforment ces tensions de mode commun en tension différentielle, laquelle s'ajoute au signal audio. Cette conversion indésirable est mesurée par le

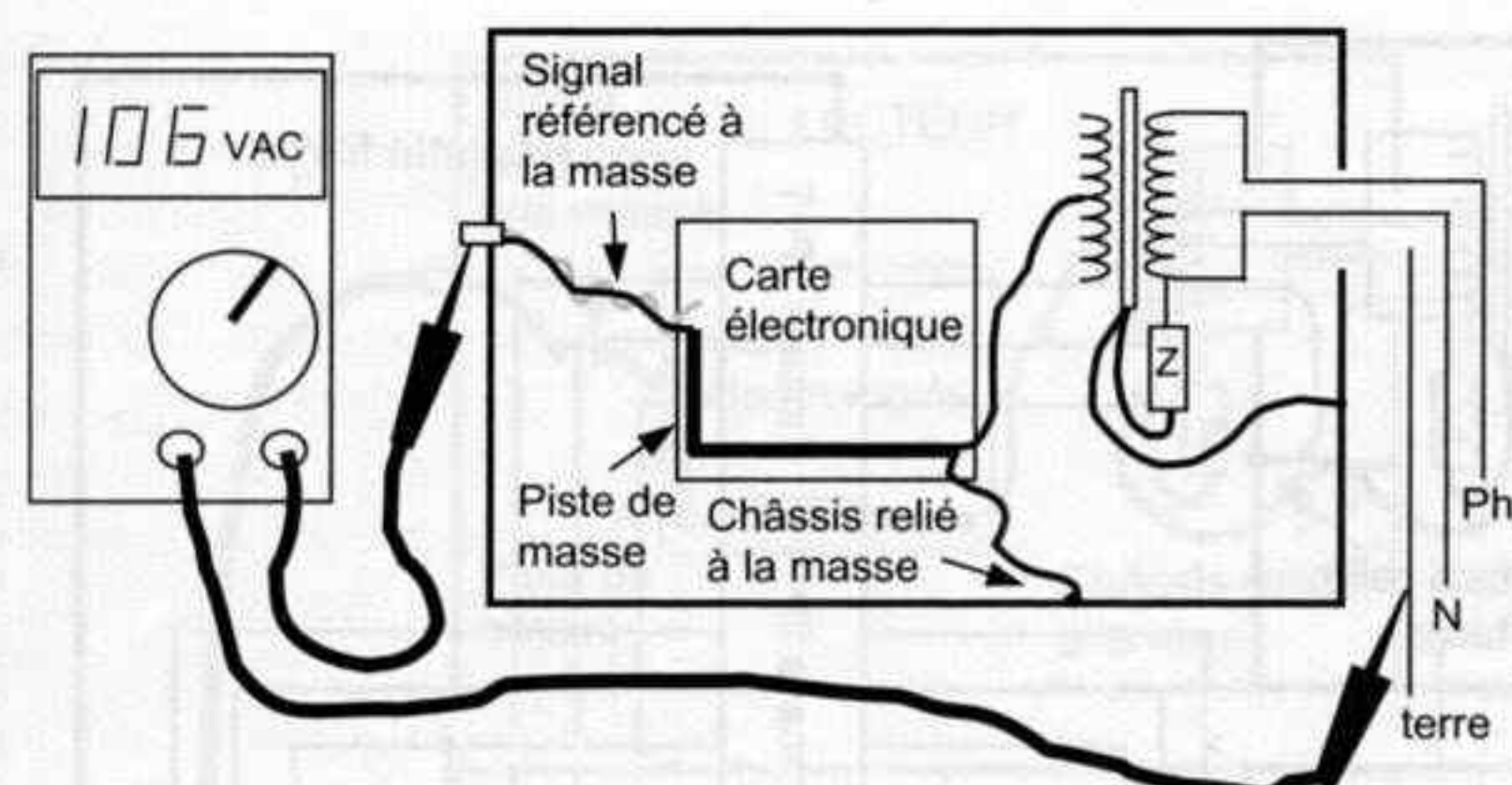


Figure 64 - La mesure de la tension alternative entre masse et terre, lorsque l'appareil n'est pas relié à la terre, permet de constater la présence de courants de fuite, de quelques dizaines de μA si le transformateur est de petite taille, jusqu'à quelques mA si l'appareil est muni d'un filtre secteur. La tension existante pouvant être dangereuse, il est recommandé de ne pas toucher le châssis de l'appareil pendant cette mesure, de plus de 100 V dans l'exemple choisi : $V_1 = 106 \text{ V}$.

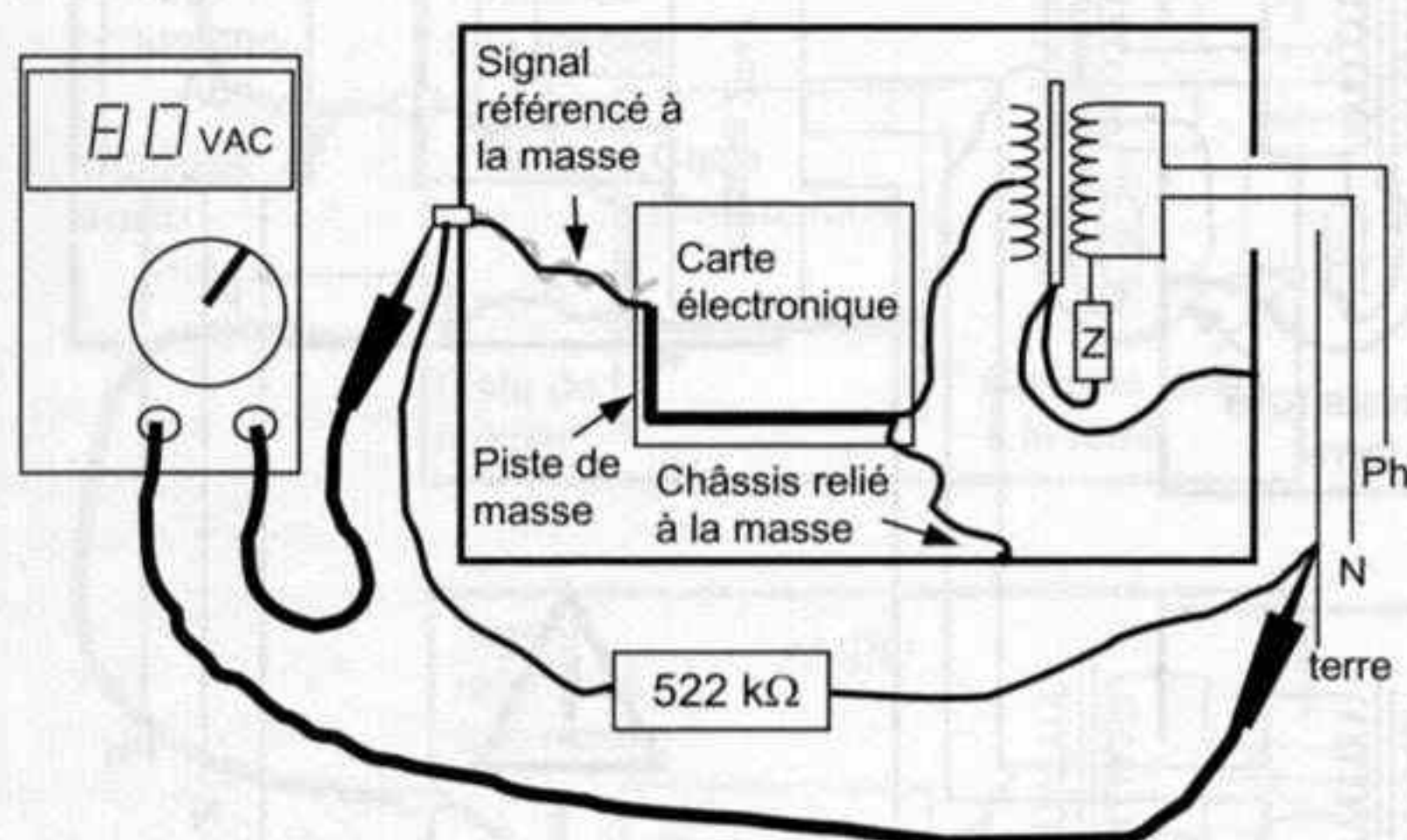


Figure 65 - La masse est maintenant reliée à la terre par une résistance de forte valeur, ici de $R = 0,5 \text{ M}\Omega$ environ, la tension parasite est plus faible : $V_2 = 80 \text{ V}$ dans cet exemple.

L'impédance d'isolement Z se calcule avec : $R / (R + Z) = V_2 / V_1$ d'où $Z = R \cdot [(V_1 / V_2) - 1]$. Dans l'exemple choisi, $Z = 170 \text{ k}\Omega$.

Si le cordon de liaison audio présente une impédance de seulement $0,1 \Omega$ à 50 Hz, un courant $I = 106 \text{ V} / 170 \text{ k}\Omega = 0,62 \text{ mA}$ circule dans le conducteur de masse de ce cordon, soit une tension parasite de $62 \mu\text{V}$. Avec un signal audio utile de $0,3 \text{ V}$, le rapport signal/bruit atteint 74 dB seulement...

taux de réjection du mode commun, CMRR en anglais, qui est souvent très faible en haute fréquence, face aux pics parasites.

Contre tous ces bouclages par le secteur, y compris le fil de terre, il n'existe qu'un seul remède : le filtrage secteur. Contrairement aux idées reçues, ce filtrage n'agit pas sur les courants arrivant par le secteur, mais plutôt sur les signaux perturbateurs véhiculés d'un appareil à l'autre par les câbles secteur. Il s'agit donc d'un filtrage sur la boucle de retour du système bouclé. Un simple filtre passe-bas suffit à couper l'action de ce bouclage.

Il existe un moyen très simple de déceler et de contourner ce problème :

- Les appareils étant reliés au secteur, provisoirement sans raccordement à la terre, par exemple en intercalant un adaptateur 3 pôles/2 pôles dans la prise secteur.
- Tous les cordons de liaison audio du système étant débranchés,
- Raccorder un multimètre numérique (efficace vrai, encore appelé "true RMS") en position V-AC entre la masse de l'appareil, par exemple sur une borne externe d'une prise d'entrée, et la terre d'une prise murale.
- La mesure de la tension alternative efficace entre la masse de l'appareil sous tension et la terre renseigne exactement sur les courants de fuite de son transfor-

mateur. Les appareils munis d'un filtre secteur, souvent intégré dans l'embase du cordon secteur, présentent des courants de fuite d'autant plus intenses que leur filtre est efficace. Il est fréquent de mesurer une tension alternative de plusieurs dizaines de volts (figure 64).

- Relier maintenant la masse à la terre par l'intermédiaire d'une forte résistance, de l'ordre de $0,5$ à $1 \text{ M}\Omega$.
- Mesurer à nouveau la tension alternative entre masse et terre. Cette valeur devrait être inférieure à la précédente, et elle permettra de calculer l'impédance d'isolement de l'appareil (exemple figure 65).
- Inverser si possible le sens de branchement de la prise secteur et effectuer à nouveau la mesure.
- Choisir le sens de branchement qui donne la tension la plus basse, donc les courants les plus faibles.
- Mesurer également la tension entre les masses de deux appareils consécutifs. Il existe un arrangement des prises secteur qui donne la tension la plus basse, donc les courants d'équilibrage des masses les plus faibles.

L'exemple figures 64-65, qui montre comment déterminer avec une bonne précision l'impédance d'isolement d'un appareil, donne des valeurs relevées sur un amplificateur à tubes, de fabrication artisanale, équipé d'un filtre secteur intégré. Ce filtre évacue dans le châssis de l'appareil un courant de fuite de $0,62 \text{ mA}$ à

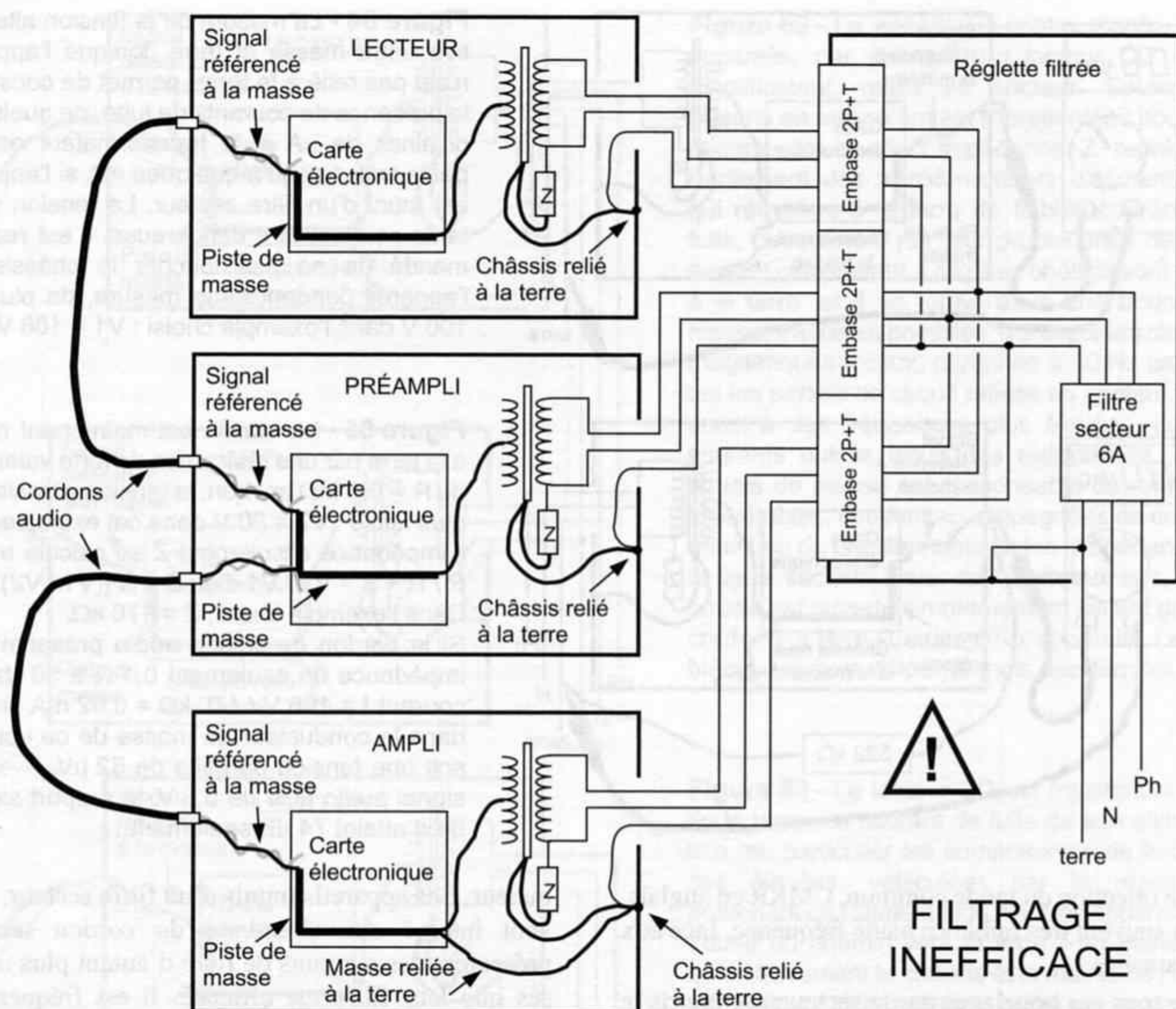


Figure 66 - La réglette d'alimentation secteur multiprises, équipée d'un filtre secteur non blindé de petite taille, souvent limité à 6 A, ne permet pas de "découpler" les appareils. Les boucles par le secteur restent présentes car les embases femelles sont toutes reliées en parallèle à la sortie du filtre. Ce type de filtre est très utile lorsque le fonctionnement du matériel risque d'être perturbé par des parasites haute fréquence, ou au contraire d'en générer et de les renvoyer sur l'ensemble du réseau, et le filtre intégré est d'ailleurs un modèle à hautes performances en mode commun, parfois à double étage. Les matériels informatiques sont les premiers concernés par ce problème. Pour le filtrage

secteur d'un système audio, ce type de filtre est d'une très faible efficacité et n'élimine qu'une minorité de parasites. Son utilité réside alors plutôt dans la protection apportée contre les surtensions, protection parfois installée en amont des prises, sous forme d'éclateurs ou de varistances. L'interrupteur luminaireux intégré permet une mise sous tension de l'ensemble du système sans avoir à enclencher chaque appareil. Le gain en terme de diminution des bruits parasites est pratiquement inaudible, des essais sur différentes installations n'ont montré au mieux aucun changement, et au pire une dégradation sensible, une impression de son crispé et confus.

50 Hz, en plus de tous les parasites hautes fréquences. L'utilisation de ce type de filtre à l'intérieur de l'appareil impose un raccordement direct du châssis à la terre, en assurant un bon contact du boîtier du filtre avec les tôles du châssis.

Un seul et unique appareil dans l'ensemble du système peut être équipé de ce type de filtre, car dès que deux appareils sont reliés à la terre, il y a boucle de masse ! Le plus sage est de n'utiliser ce genre de filtre que dans les amplificateurs de puissance ou intégrés, qui seront

donc les seuls appareils reliés à la terre. Les normes CEM en vigueur depuis quelques années, ont imposé la présence de ces filtres dans de nombreux équipements.

Filtre secteur

La mise en place d'un filtrage sur le secteur étant cependant indispensable pour supprimer le bouclage parasite, il s'avère incontournable de disposer ce filtre à l'**extérieur** des appareils, afin de ne pas faire circuler

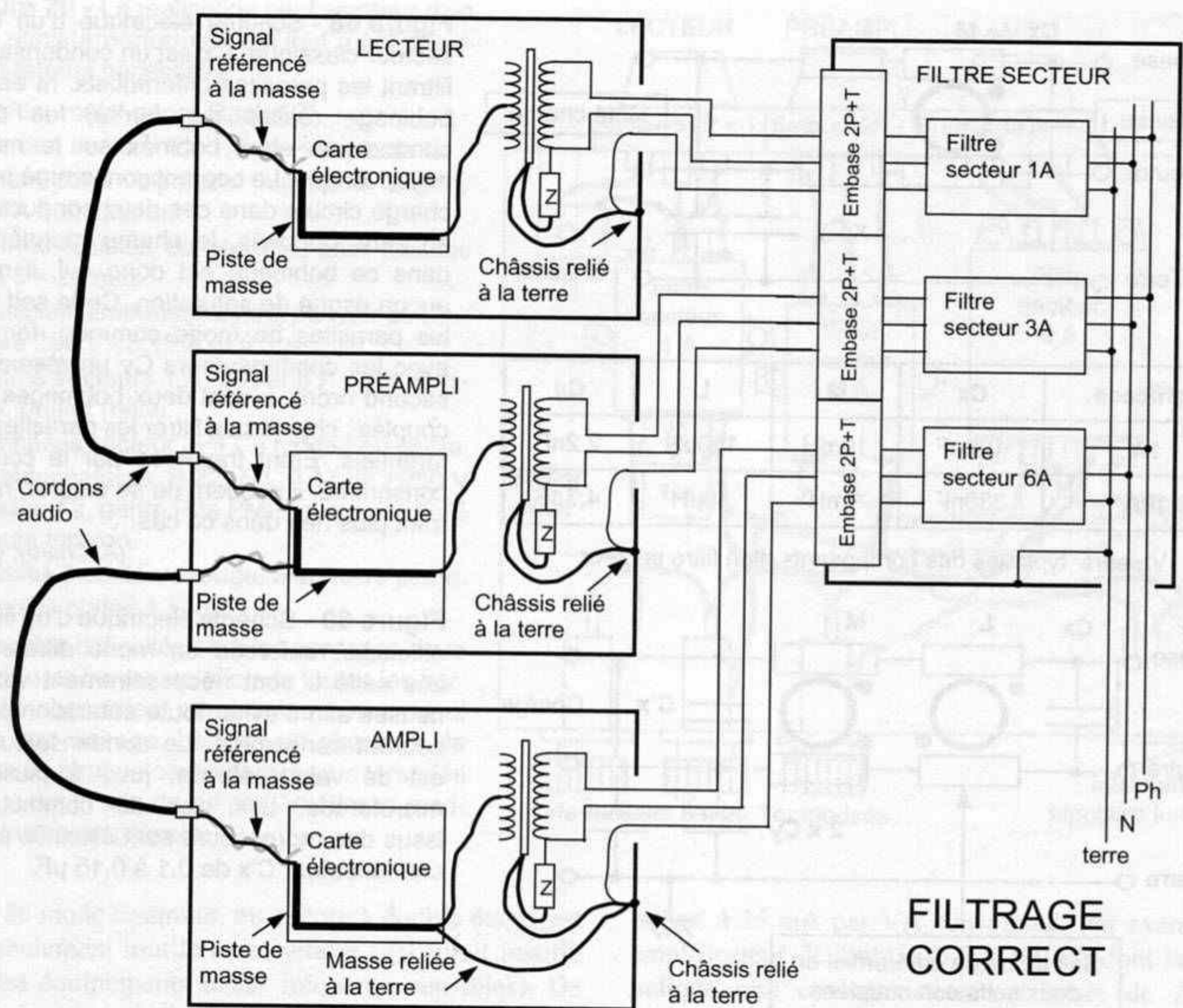
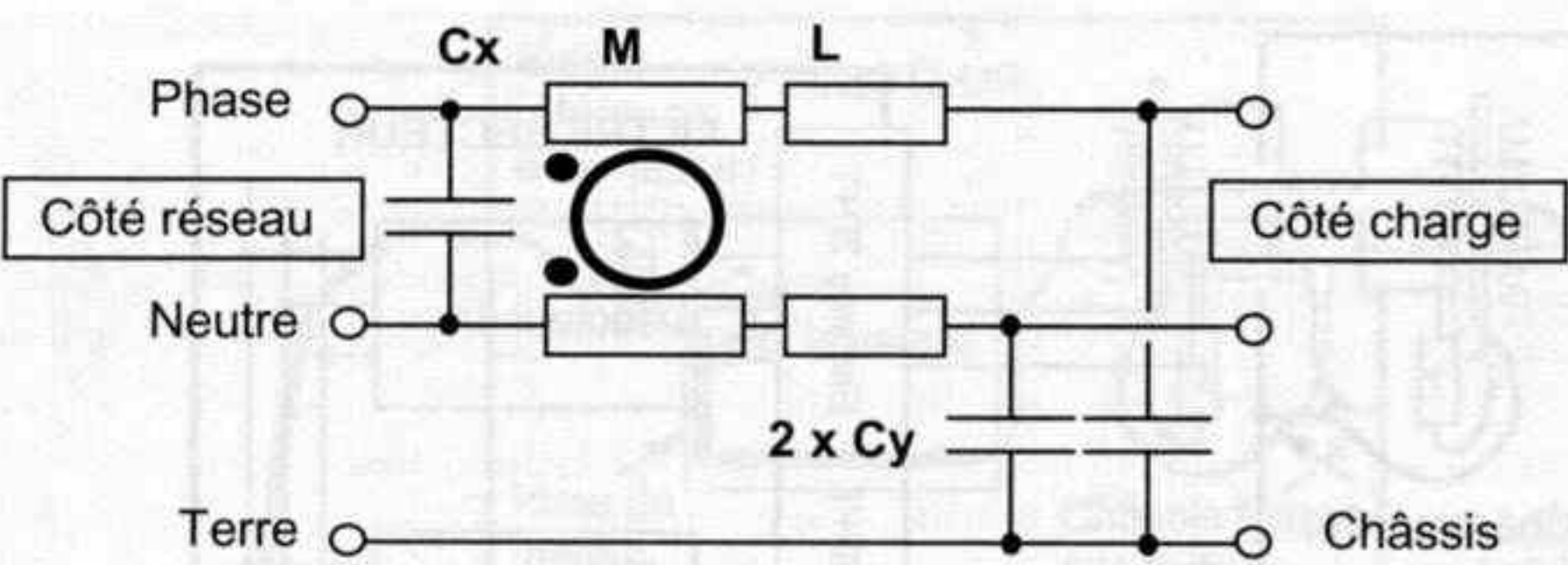


Figure 67 - Le dessin ci-dessus montre la seule manière correcte d'installer des filtres secteurs dans un système audio habituel. Cette disposition assure que chaque appareil est alimenté par une tension secteur exempte de parasites et de modulation, et qu'il ne peut pas non plus renvoyer sur le réseau des parasites provenant de son alimentation. Ces derniers sont en effet évacués directement à la terre par une liaison indépendante, non partagée, entre l'appareil et son filtre, et ne peuvent atteindre les autres appareils du système. Ce filtre, un par appareil, a son boîtier en contact avec le châssis renfermant l'ensemble des filtres, ce châssis étant lui-même relié à la terre. En ce qui concerne les châssis des éléments du système, **il sont reliés à la terre pour des raisons de sécurité**, mais pas à la masse du signal, afin d'éliminer les boucles de masse passant par la terre. Pour éviter que cette masse, référence de potentiel du signal, ne soit flottante, il convient de la raccorder **en un seul point** à la terre, dans un seul des appareils, de préférence dans l'amplificateur de puissance, en particulier si ce dernier comporte des

tubes alimentés par haute tension. Dans le cas contraire, la masse risquerait de se trouver portée à un potentiel élevé par rapport à la terre à cause des courants de fuite des enroulements secondaires des transformateurs, ce qui serait dangereux pour l'utilisateur. Les prises de liaison audio doivent être isolées des châssis, à l'aide de canons isolants en nylon disponibles dans le commerce, si nécessaire. Les appareils sérieusement construits comportent des prises isolées, ainsi qu'un interrupteur permettant de relier ou non le châssis à la masse. Les appareils qui contiennent d'origine un filtre secteur intégré posent problème, et à moins de démonter ce filtre, ce qui n'est pas conseillé pendant la période de garantie, l'unique solution est d'isoler complètement la masse signal du châssis, si nécessaire en coupant purement et simplement le fil qui les relie ! **Un interrupteur de mise à la terre est souvent utile.** Seules les platines disque nécessitent un raccordement de leur masse à celle du préampli, par un câble de masse séparé, afin de limiter les ronflements induits sur les fils du bras de lecture.

dans leurs châssis, ni dans leur masse, ni dans les cordons de liaison audio, les courants parasites. Ceux-ci devront trouver un chemin d'évacuation vers la terre à l'extérieur du système. Le châssis sera raccordé à la

terre pour des raisons de sécurité de contact, mais ne sera pas relié à la masse de l'appareil. Ainsi les diverses masses pourront être reliées entre elles par les cordons de liaison audio sans créer de boucles.



I efficace	Cx	M	L	Cy
1A	100nF	10mH	100µH	2,2nF
10A	330nF	1mH	10µH	4,7nF

Valeurs typiques des composants d'un filtre secteur

Figure 68 - Schéma électrique d'un filtre secteur classique. Cx est un condensateur filtrant les parasites différentiels. M est un bobinage réalisé sur ferrite, les deux conducteurs étant bobinés sur le même noyau torique. Le courant consommé par la charge circule dans ces deux conducteurs en sens opposés, le champ magnétique dans ce bobinage est donc nul, il n'y a aucun risque de saturation. Cette self filtre les parasites de mode commun, formant avec les condensateurs Cy un réseau du second ordre. L sont deux bobinages non couplés, chargés de filtrer les parasites différentiels. Étant traversés par le courant consommé, il risquent de se saturer, ne filtrant plus rien dans ce cas...
(A. Charoy, CEM)

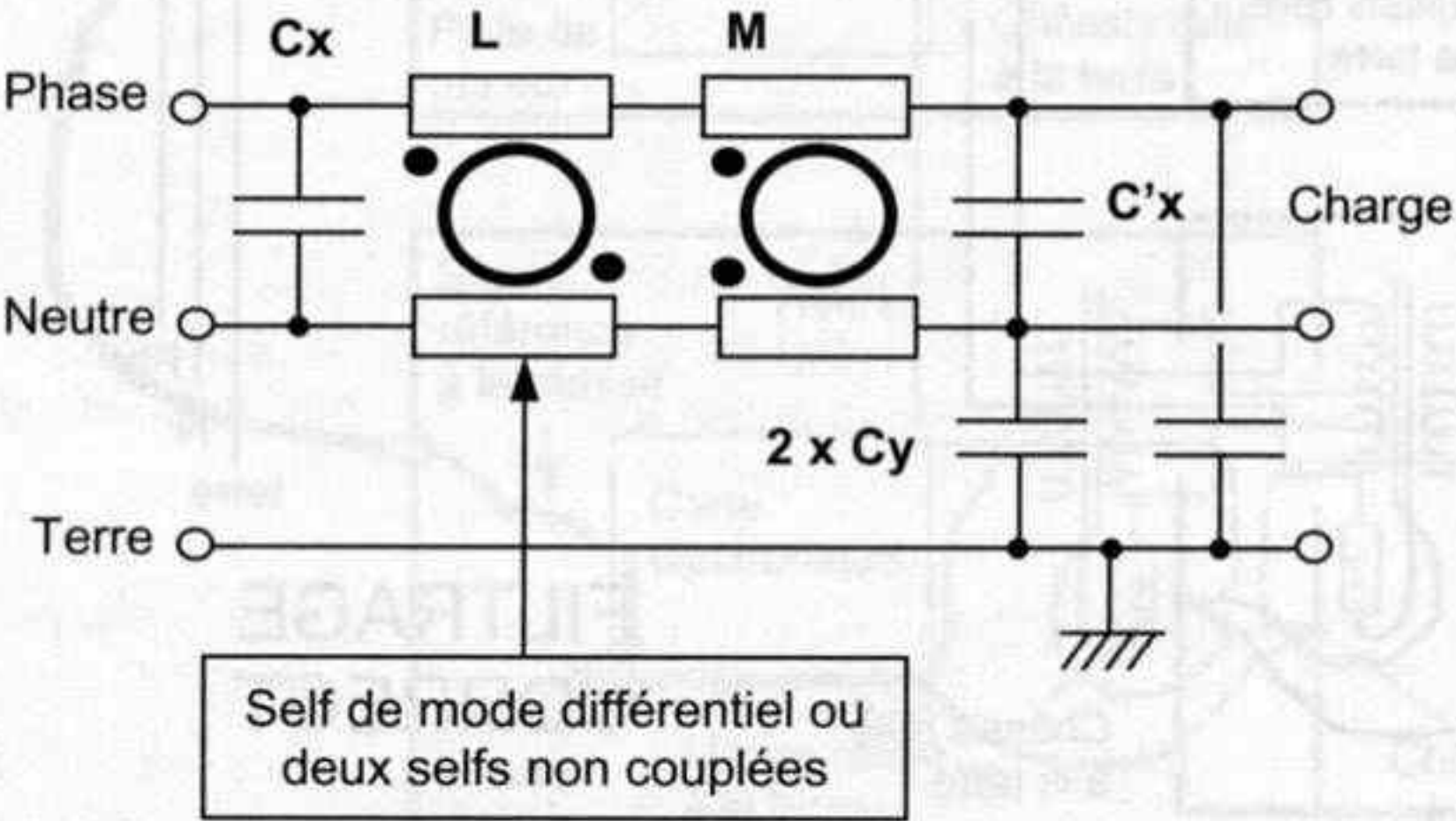


Figure 69 - Schéma électrique d'un filtre à efficacité renforcée en mode différentiel. Les selfs L sont nécessairement volumineuses afin d'éviter toute saturation par le courant consommé. Le condensateur Cx est de valeur élevée, jusqu'à plusieurs microfarads. Les pics de commutation issus des redresseurs sont éliminés par le condensateur C'x de 0,1 à 0,15 µF.

Il est indispensable d'installer un étage de filtre pour chaque appareil. En effet, si deux appareils sont branchés en sortie d'un même étage de filtre, le chemin de retour de la boucle n'est pas ouvert, les deux appareils sont reliés en parallèle et le filtre ne sert pratiquement à rien, figure 66. Une réglette multiprise secteur avec filtre intégré 6 A est donc non seulement inefficace pour éliminer ce type de couplage, mais de surcroît sous dimensionnée pour alimenter un système complet, les courants crêtes à chaque alternance risquant de saturer les noyaux en ferrite des inductances. Elles ne filtrent alors... plus rien, et le champ de fuite des inductances saturées rayonne sur les conducteurs secteur et induit des courants harmoniques impairs, à 150 Hz entre autres. Ces réglettes sont à proscrire pour les systèmes audio, à moins d'en installer une par appareil !

En revanche, l'utilisation de filtres secteur industriels, utilisés par exemple sur les baies informatiques des mini-ordinateurs ou sur les racks de laboratoire, est tout à fait correcte (figure 67). Ces filtres possèdent plusieurs prises de sortie, chacune reliée à un filtre en boîtier blindé, prévu pour un courant de 10 à 50 A bien souvent. Une ou plusieurs de ces sorties sont équipées

de filtres à efficacité renforcée, ou de filtres radiofréquences, qui peuvent s'avérer fort utiles. Le coût de ces filtres étant extrêmement élevé, l'amateur réalise une économie substantielle en assemblant lui-même un filtre exactement adapté, à partir d'éléments aisément disponibles (figure 70).

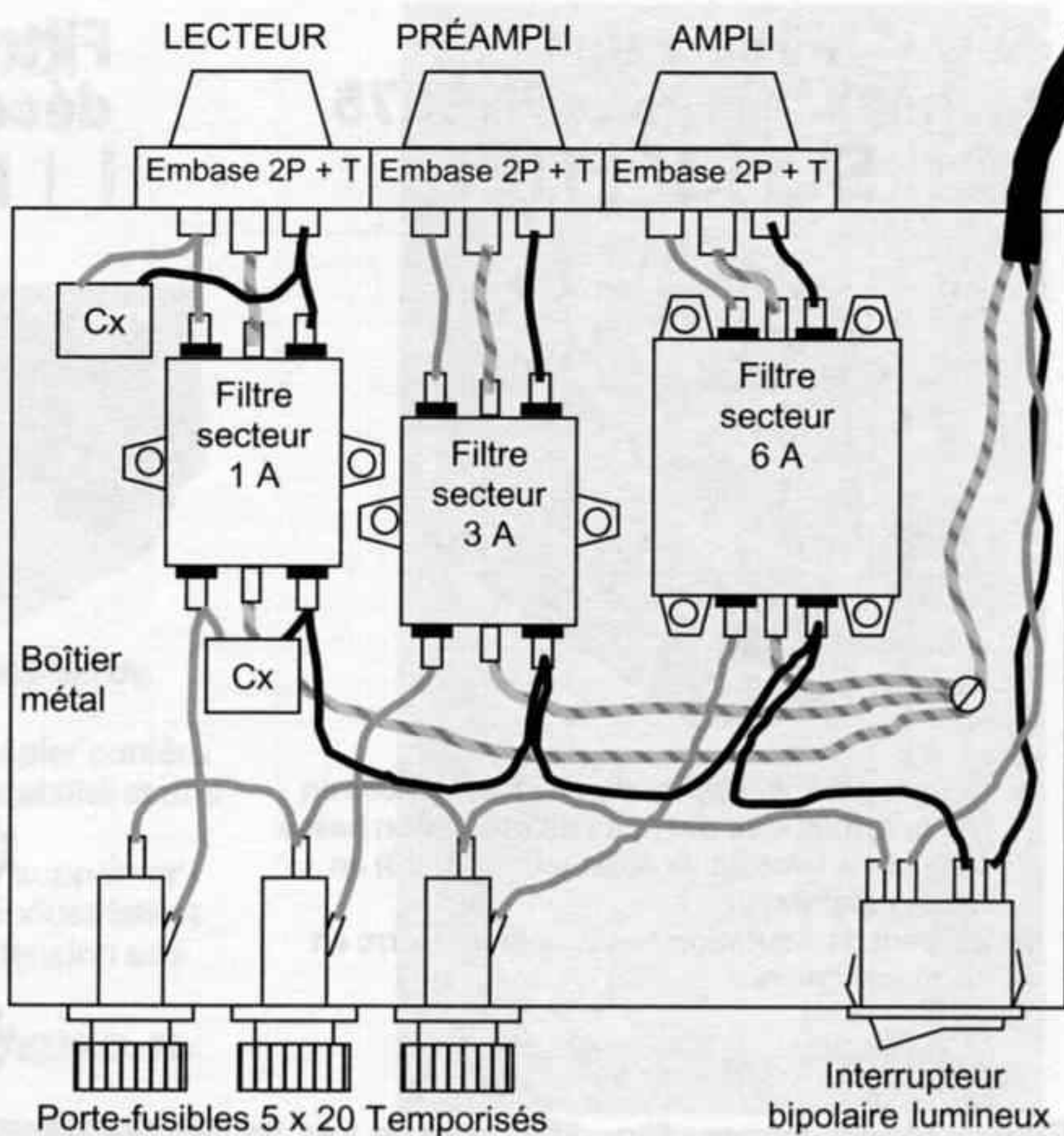
Les filtres secteurs (figure 68) qui conviennent pour l'utilisation souhaitée doivent présenter de bonnes performances en mode différentiel, c'est-à-dire pour filtrer des parasites symétriques, tensions indésirables entre phase et neutre. Les performances en mode commun ne sont pas très importantes dans le cas des systèmes audio, car le transformateur d'alimentation réalise une réjection des tensions de mode commun, lesquelles portent les deux conducteurs de phase et neutre simultanément à un potentiel parasite par rapport à la terre. Ces parasites ne sont gênants que s'ils dépassent la tension de claquage des enroulements, ce qui arrive très rarement, en cas d'impact de foudre par exemple.

Ce filtre est chargé par le transformateur d'alimentation de l'appareil concerné. Cette charge présente un isolement galvanique, donc une forte impédance en mode commun. Un filtre à forte réjection du mode commun, équipé d'une self de terre, ou de doubles

Figure 70 - La réalisation par l'amateur d'un filtre secteur performant est tout à fait possible. Matériel nécessaire :

- Boîtier métal genre Rack 19".
- Cordon secteur 3 × 1,5 mm² et passe-fil.
- Interrupteur bipolaire luminaireux 250 V / 15 A à encastrer.
- Portes fusibles de sécurité, pour fusibles de 5 × 20 mm.
- Fusibles temporisés à haut pouvoir de coupure 250 V / 3,15 A et 6,3 A.
- Filtres secteurs 1 A, 3 A et 6 A pour châssis, boîtier métal.
- Embases secteur 2P+T à monter en saillie.
- Condensateurs 0,22 ou 0,47 µF / 250 V classe X2, genre Rifa PME, ou papier huilé haute tension.
- Câbles 3 couleurs rouge, bleu, vert/ jaune.
- Cosses plates à sertir.

Les seules difficultés sont les perçages de la façade et la bonne isolation de toutes les bornes. Le châssis est mis à la terre en un seul point, par vissage. Les fils de phase et de neutre de chaque circuit seront tous torsadés deux à deux, afin de ne pas émettre ni recevoir de champ parasite.



selfs de mode commun, ou encore à double étage, est non seulement inutile mais néfaste ! (Il serait justifié sur des équipements haute fréquence sensibles). De même les tores de ferrite, en demi-coquilles plastique à disposer autour des câbles, ne filtrent que le mode commun HF.

Le seul type de filtre qui convienne ici est le filtre à efficacité renforcée en mode différentiel, figure 69.

Ces filtres sont fournis assemblés en boîtier (cuivre étamé) de différentes formes, par divers fournisseurs, le plus connu étant sans aucun doute Schaffner. Le modèle FN9675 de ce constructeur constitue sans doute le meilleur filtre pour appareil audio, avec typiquement 90 dB d'atténuation des parasites différentiels (figure 71).

Un paramètre important est l'ampérage que devra supporter ce filtre : c'est en effet le courant de crête consommé par l'appareil, qui risque de saturer les selfs différentielles du filtre, ruinant son efficacité. Le chapitre "amplificateurs" donnera des éléments de calcul des circuits d'alimentation permettant de déterminer ce courant crête. Il sera de toute façon très supérieur au courant continu consommé en sortie de l'alimentation redressée et filtrée. Une marge de sécurité indispensable est prise en considérant ce courant crête égal à 6 fois le courant efficace. Si seule la consommation de l'appareil est connue, en VA, le courant crête peut être

estimé à 25 mA par VA consommé. Par exemple un amplificateur de puissance 2 × 100 W, dont la notice indique une consommation maximale de 230 VA absorbera, lorsque alimenté sous 230 V, un courant efficace de 1 A.

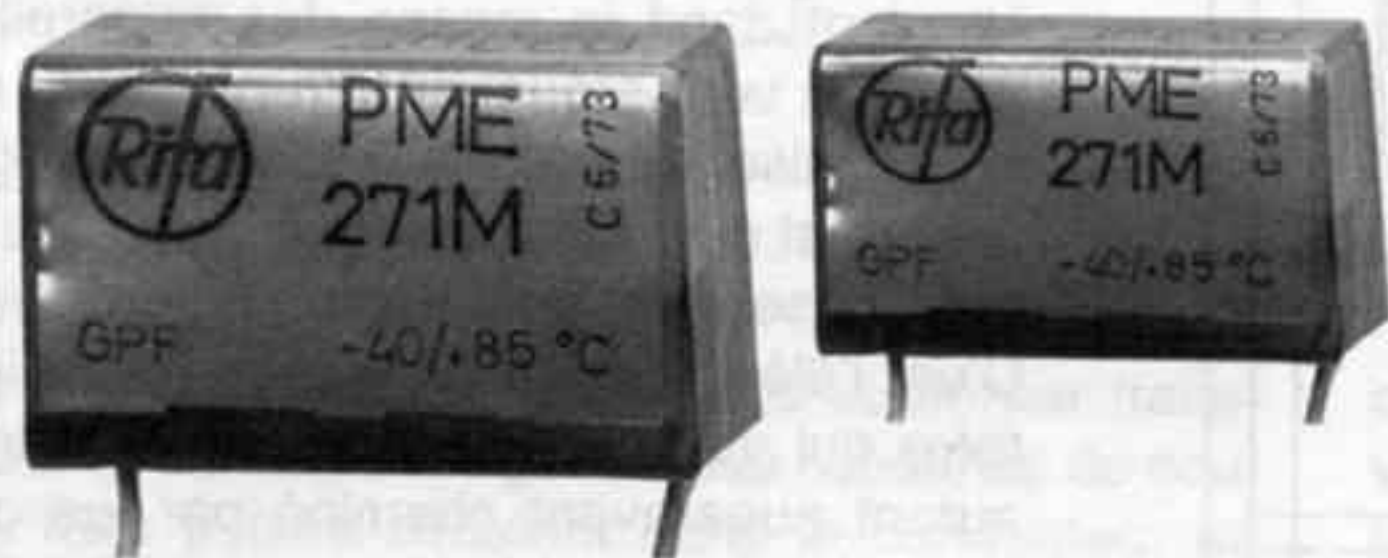
Le courant crête sera de $0,025 \times 230 = 5,75$ A. Un filtre secteur prévu pour supporter le courant efficace sera sévèrement saturé à chaque fois que les diodes de redressement conduiront, c'est-à-dire deux fois par période du secteur, autrement dit 100 fois par seconde ! Les parasites seront plus sévères avec le filtre que sans lui... C'est un filtre prévu pour 6 A qu'il convient d'installer ici.

Il est possible d'ajouter des condensateurs extérieurs en parallèle sur Cx et C'x à condition d'utiliser des composants classe X1, à isolant papier imprégné ou polypropylène (A. Charoy, CEM).

D'une manière générale, le filtre pour un amplificateur sera choisi de 3 A pour les puissances jusqu'à 50 W, de 6 A jusqu'à 100 W, 10 A jusqu'à 200 W etc. Les filtres pour les appareils à tubes seront choisis une taille au-dessus, car ces appareils consomment un peu plus que leurs homologues à transistors, à puissance de sortie égale. En ce qui concerne les autres appareils, tels que lecteur, convertisseur, préamplificateur ou filtre actif, leur faible consommation permet d'utiliser un filtre de 1 A.

Condensateurs classe X2 papier métallisé série PME271M

Evov-Rifa



- ▶ Gamme de condensateurs papier métallisé de classe X2.
- ▶ La résine époxy imprégnée dans le papier confère à ces condensateurs une excellente stabilité et une grande efficacité.
- ▶ Ces condensateurs sont conçus pour supprimer les interférences radio des appareils industriels et électroménagers fonctionnant sur la tension secteur.

Homologations: SEMKO, NEMKO, DEMKO, FI, VDE, SEV, OVE, IMQ, UL

Spécifications techniques

Tension de service: 250 V c.a. (630 V c.c.)

Tolérance: $\pm 20\%$

Resistance d'isolement: $\geq 12 \text{ G}\Omega$ ($C \leq 0,33 \mu\text{F}$)

$\geq 4000 \text{ s}$ ($C > 0,33 \mu\text{F}$)

Facteur de dissipation à 1 kHz: $\leq 1,3\%$

Température d'utilisation: -40°C à $+85^\circ\text{C}$

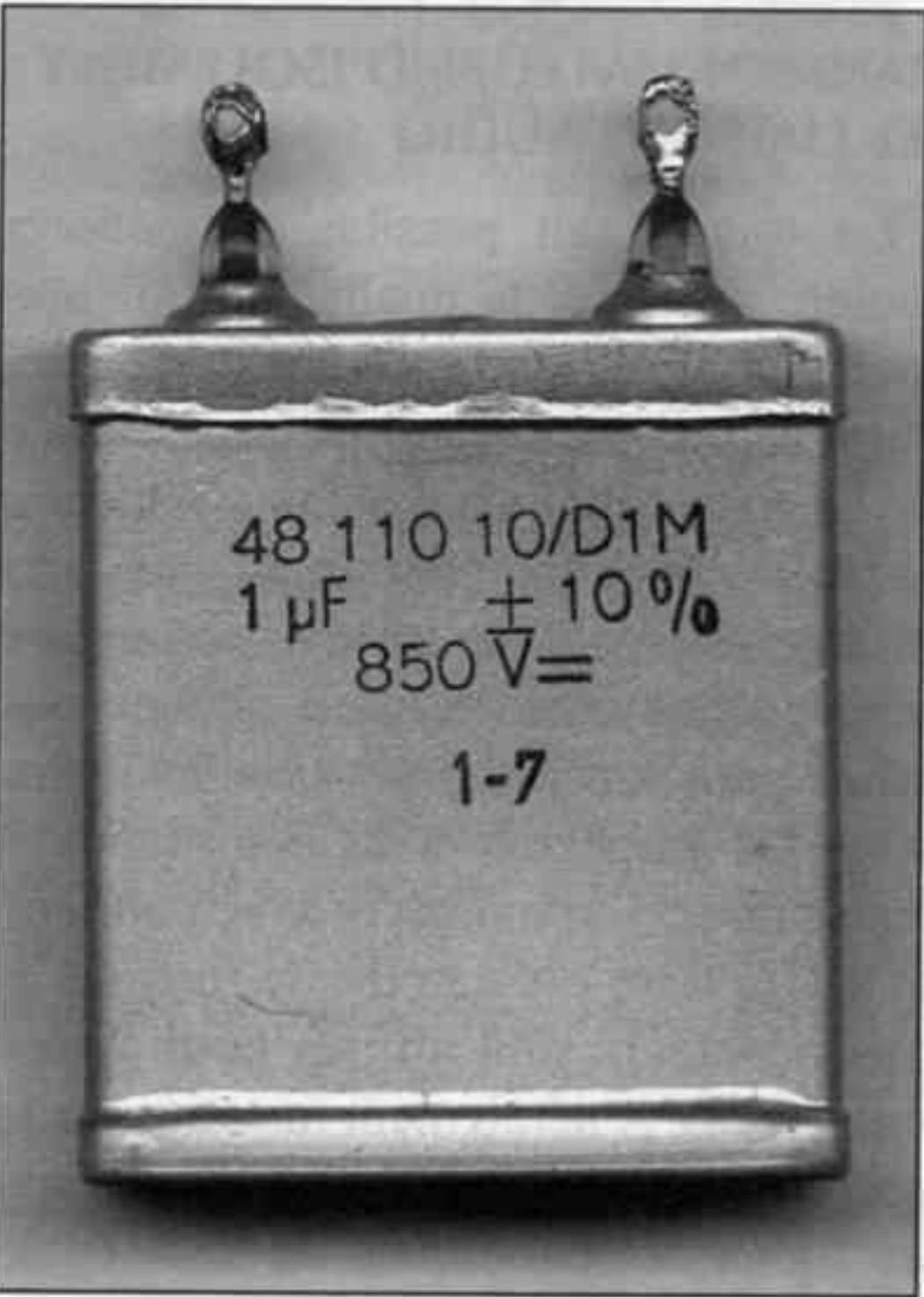
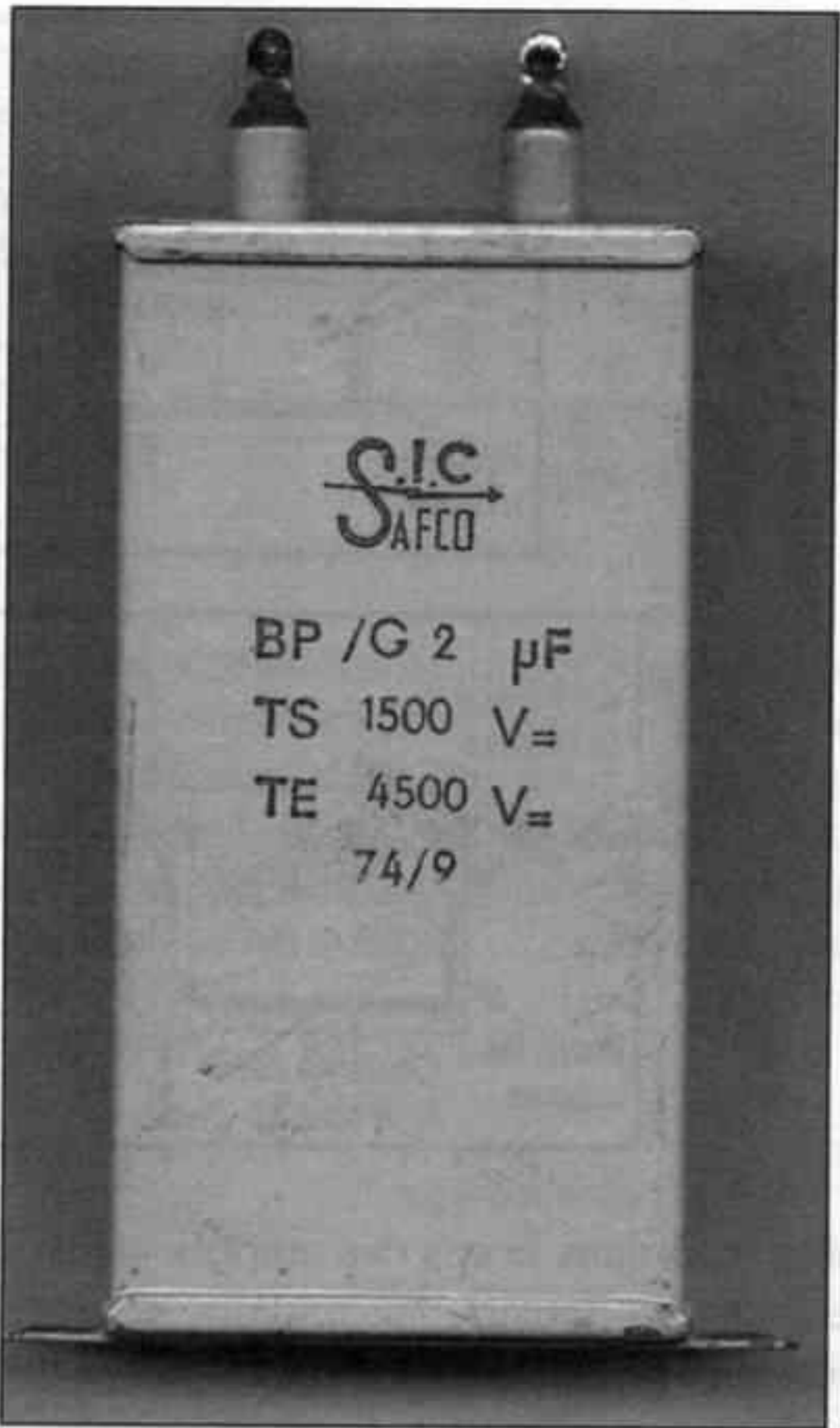


Figure 72 - Les condensateurs de classe X, au papier métallisé imprégné d'époxy sont aisément disponibles jusqu'à 2,2 μF (doc. Radiospares). Un filtrage basse fréquence plus efficace nécessite l'utilisation de condensateurs à bain d'huile, avec armatures aluminium isolées au papier imprégné. Les connexions internes multiples assurent une faible résistance, et un courant transitoire très élevé. En haut à droite un modèle Sic-Safco haute tension, bornes porcelaine, de dimensions 135 x 85 x 40 mm, utilisable sur secteur ou amplificateurs à lampes, disponible jusqu'à 25 μF , et à droite un modèle Philips à sortie sur perles de verre. Ce dernier est excellent aux hautes fréquences et peut même être utilisé en liaison audio.

ments, même s'ils étaient inaudibles, ont disparu. Il en résulte une impression générale de calme, de quiétude de la restitution, les sonorités semblant avoir perdu une certaine agressivité. Le gain paraît plus sensible avec les amplificateurs à transistor, peut-être parce qu'ils génèrent plus de parasites, de par leur alimentation redressée par diodes et fortement filtrée, alors que les appareils à lampes avec redressement par valve et self de filtrage sont moins polluant de ce point de vue.

L'usage des filtres secteurs décrits à la figure 71, s'il procure déjà une amélioration notable, n'élimine pourtant pas complètement les courants perturbateurs circulant entre les éléments du système par les cordons de liaison audio (figure 73). En effet, les enroulements secondaires des transformateurs présentent eux aussi une capacité parasite par rapport à la masse. Comme les tensions secondaires sont généralement assez basses, et qu'un écran relié à la masse est souvent disposé entre les enroulements, ces courants de fuite sont fai-

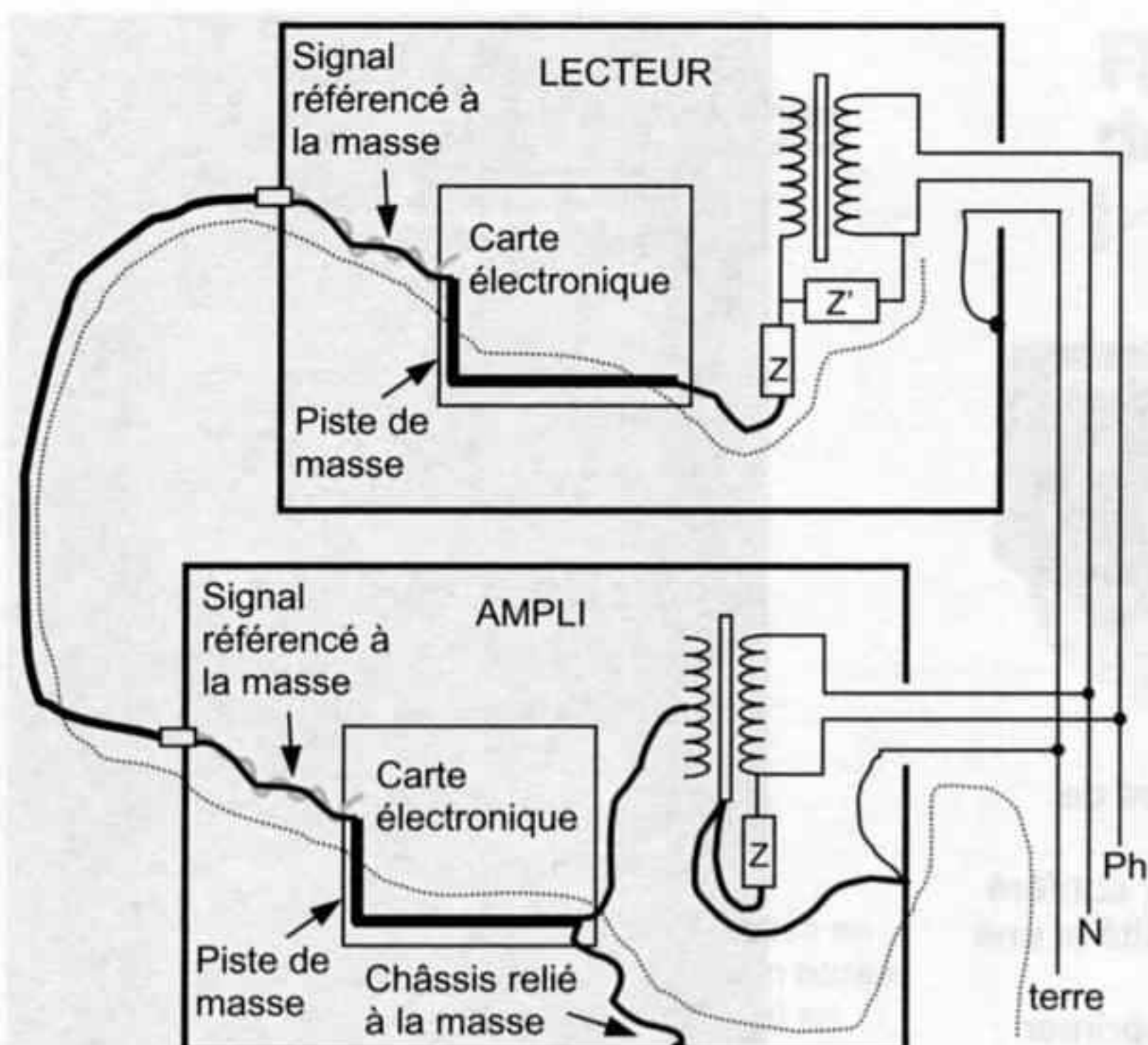


Figure 73 - Les couplages par capacités parasites entre primaires et secondaires des transformateurs d'alimentation, ainsi qu'entre secondaires et masse, même si les impédance d'isolement en jeu sont très grandes, sont responsables de courants de fuites, circulant dans la masse des appareils. Ces courants vont regagner la terre par le chemin le plus aisé, en traits pointillés sur la figure ci-contre, et qui peut dans le pire des cas traverser l'ensemble des appareils du système ! C'est l'élément dont la masse est reliée à la terre qui va collecter tous ces courants, qui auront auparavant cheminé par les conducteurs de masse des cordons audio. Seul un isolement galvanique, en entrée ou en sortie, des liaisons audio permet de s'affranchir des effets néfastes de ces courants.

bles, sauf dans le cas des amplificateurs à tubes, pour lesquels la tension secondaire atteint couramment 400 V et parfois 800 V !

TRANSFORMATEURS D'ISOLEMENT DES LIAISONS AUDIO

Il est tout à fait possible d'améliorer encore, de manière décisive, la qualité des silences, en supprimant complètement les parasites cheminant par les câbles audio. Pour cela il est nécessaire d'installer sur ces liaisons audio un isolement galvanique, qui permettra la transmission du signal, mais assurera une isolation totale des circuits des deux appareils reliés. En audio professionnelle, c'est ce qui est couramment réalisé pour raccorder les nombreux micros et leurs préamplis respectifs à la console de mixage, sans aucune boucle de masse, et avec pourtant un raccordement à la terre obligatoire de tous les appareils. Des transformateurs sont utilisés pour assurer cette fonction. Ils sont généralement installés sur les entrées des appareils, mais rien n'interdit de les disposer en sortie. Les lignes téléphoniques en font également usage, d'un seul bout de la ligne évidemment...

Ces transformateurs traitent des signaux faibles, de quelques V au plus, et sont chargés par des impédances assez élevées, de plusieurs k Ω en général. Par conséquent, ils peuvent être de faibles dimensions et réalisés dans des matériaux à très haute perméabilité magnétique, Mumétal, Supermalloy etc. Les bobinages primaires et secondaires, réalisés en bifilaires, sont rigoureusement symétriques et parfaitement couplés. Depuis l'invention des liaisons par condensateurs, moins lourds, moins encombrants, moins coûteux, les transformateurs pour signaux ont disparu du matériel

grand public. Ils se sont vus chargés de tous les maux, simplement pour justifier leur abandon, les vrais critères économiques étant inavouables !

Pourtant un bon transformateur présente l'avantage d'une réjection quasi parfaite des signaux de mode commun. Autrement dit, il ne transmet à son secondaire que la différence de tension présente entre ses bornes primaires, et rien d'autre. Aucun courant de masse ne peut circuler. Même les parasites haute fréquence sont supprimés pour peu qu'un blindage (écran électrostatique) soit disposé entre les enroulements et raccordé à la masse du côté de la source du signal. La transmission par transformateur est incontestablement meilleure que par un simple câble (figures 74-75).

Les inconvénients sont une bande passante limitée dans les très basses fréquences d'une part, à moins de surdimensionner généreusement, et présentant éventuellement des résonances en haute fréquence d'autre part, si la réalisation des bobinages n'est pas optimale. De plus, un transformateur rayonne et capte des champs magnétiques. Il doit en conséquence être correctement blindé, avec un boîtier en matériau très perméable, Mumétal par exemple. Les fabricants sérieux ont contourné ces défauts et proposent actuellement des transformateurs de liaison très performants, miniaturisés. Les modèles Jensen, Lundahl, Sowter entre autres, avec noyaux mumétal ou amorphe sont réputés pour leur musicalité dans le milieu professionnel. Le seul inconvénient reste le prix.

Dans de nombreux cas la place disponible à l'intérieur des appareils permet de loger un transformateur d'isolement raccordé en entrée de signal. Un modèle blindé est nettement préférable, son encombrement restant limité à moins de 50 mm. Si l'appareil ne peut être

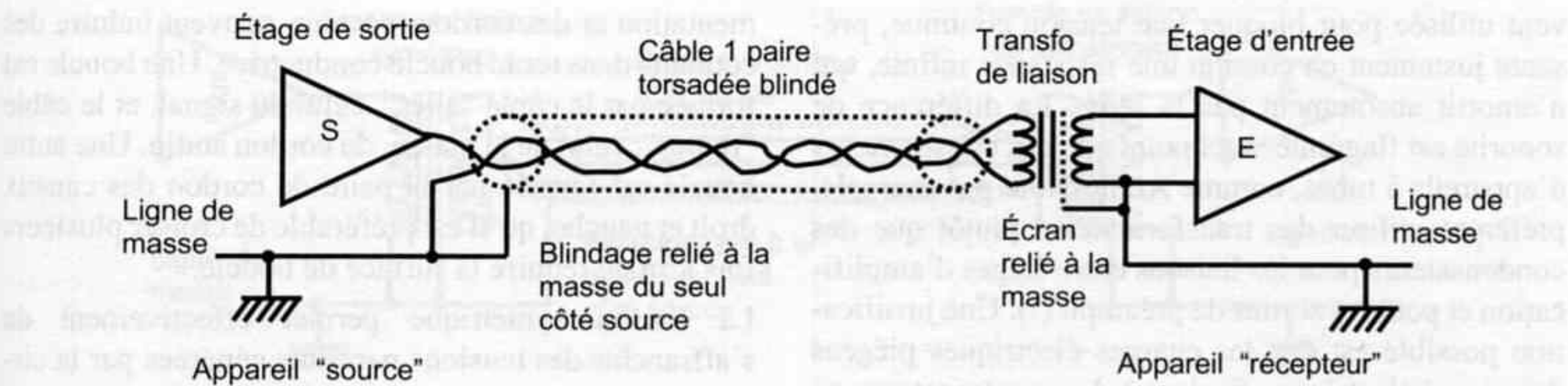


Figure 74 - La liaison des appareils audio par transformateur est la seule qui garantisse l'absence de courant de fuite pulsés circulant dans le conducteur de masse. L'isolement galvanique assure que seul le signal différentiel est transmis, et non les signaux de mode commun, qui sont rejetés en dessous de -80 à -100 dB. Il est impératif de ne pas raccorder l'écran du

câble à la masse du côté du transformateur, qui ne servirait alors... à rien ! Attention donc aux câbles dont le blindage est raccordé aux prises aux deux extrémités, inutilisables dans ce cas, et aux câbles coaxiaux dont la tresse de blindage sert de conducteur de masse. Le coaxial n'a pas sa place en audio. (doc. Lundahl)

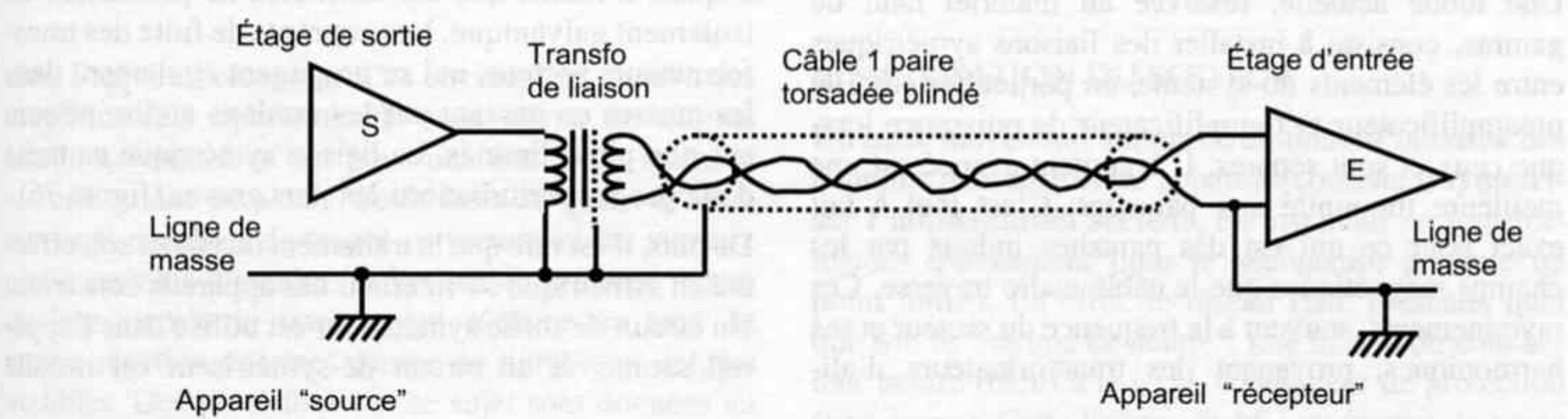


Figure 75 - Le transformateur est ici installé en sortie de l'appareil source, ce qui permet une meilleure adaptation des impédances, en choisissant un rapport de transformation n de 4 : 1 à 10 : 1, l'impédance de sortie de l'appareil source sera alors divisée par n^2 , soit 16 à 100 fois plus faible qu'auparavant. L'atténuation du signal sera de n , soit de -6 dB à -20 dB, mais dans de nombreux cas le gain total du système est très largement suffisant : il suffira de tourner un peu plus le réglage de volume. Le gain de musicalité apporté par ce dispositif est flagrant, à condition de ne pas installer de condensateur en série avec le primaire du transformateur, comme cela se pratique sur certains circuits

d'outre-atlantique. Un inconvénient est l'encombrement de ce type de transformateur de sortie, en particulier si l'étage de sortie de la source est à tubes, car alors le courant continu traversant le bobinage primaire imposera un circuit magnétique avec entrefer, donc très largement surdimensionné, d'où une taille et un prix en conséquence. Audio-Note utilise ce principe sur ses préamplificateurs à tubes haut de gamme, avec des transformateurs en tôles spéciales à très haute perméabilité, bobinés en fil d'argent, et dont l'entrefer est réalisé par une feuille de métal amagnétique et non en plastique. (d'après documentation Lundahl)

modifié, il est possible de disposer le transformateur à l'extérieur, sur le cordon audio, le plus près possible de l'entrée. Des cordons de liaison équipés de transformateurs miniatures sont proposés par divers fabricants, Maxitrans de "Hi-Fi câbles et compagnie" ou Lundahl LL6810.

Le schéma (figure 74) montre comment installer un transformateur de liaison entre deux appareils. Il s'agit ici d'un transformateur de rapport 1 : 1, ce qui signifie qu'il possède le même nombre de spires au bobinage primaire et au bobinage secondaire. Il transmet donc le signal sans élévation ni abaissement de tension, et

l'impédance de charge vue par l'appareil source est exactement égale à l'impédance d'entrée de l'appareil récepteur, de l'ordre de quelques dizaines de k Ω , tout comme s'il n'y avait pas de transformateur.

Cependant, aux très basses fréquences et en continu, cette impédance de charge chute à une très faible valeur, égale à la résistance du fil du bobinage primaire, souvent inférieure à 200 Ω , voire moins. Le câble de liaison est donc terminé par une faible résistance, constituant un amortissement important des oscillations pouvant apparaître sur la ligne de liaison. Au contraire, une liaison par condensateur série, sou-

vent utilisée pour bloquer une tension continue, présente justement en continu une résistance infinie, qui n'amortit absolument pas la ligne. La différence de sonorité est flagrante, à tel point que des constructeurs d'appareils à tubes, comme Audio-Note par exemple, préfèrent utiliser des transformateurs plutôt que des condensateurs pour les liaisons entre étages d'amplification et pour les sorties de préampli (!). Une justification possible est que les charges électriques piégées dans les diélectriques (isolants) des condensateurs de liaison, et responsables de l'effet de mémoire, ne trouvent pas de chemin à basse impédance pour s'évacuer, alors que la faible résistance des enroulements du transformateur assure un écoulement rapide des charges accumulées dans le diélectrique du câble.

Liaisons symétriques

Une mode actuelle, réservée au matériel haut de gamme, consiste à installer des liaisons symétriques entre les éléments du système, en particulier entre le préamplificateur et l'amplificateur de puissance lorsque ceux-ci sont séparés. L'argument avancé est une meilleure immunité aux parasites. C'est tout à fait exact pour ce qui est des parasites induits par les champs magnétiques que le câble audio traverse. Ces rayonnements, souvent à la fréquence du secteur et ses harmoniques, provenant des transformateurs d'alimentation et des cordons secteur, peuvent induire des courants dans toute boucle conductrice. Une boucle est formée par le câble "aller", celui du signal, et le câble "retour", celui de la masse, du cordon audio. Une autre boucle est formée par la paire de cordon des canaux droit et gauche, qu'il est préférable de croiser plusieurs fois afin de réduire la surface de boucle.

La liaison symétrique permet effectivement de s'affranchir des tensions parasites générées par la circulation de ces courants induits. Ces tensions parasites sont identiques sur les deux conducteurs + et - de la liaison, et constituent donc des parasites de mode commun. Le circuit récepteur est obligatoirement de type différentiel, et rejette donc assez bien ces signaux de mode commun. Par contre, les ronflements induits par les boucles de masse se refermant par la terre, ne sont absolument pas éliminés par les liaisons symétriques, à moins que ces dernières ne présentent un isolement galvanique. Les courants de fuite des transformateurs secteur, qui se propagent également dans les masses en passant par les cordons audio, ne sont pas non plus éliminés. La liaison symétrique ne traite donc pas les perturbations les plus graves (figure 76).

De plus, il est rare que le traitement du signal soit effectué en symétrique à l'intérieur des appareils concernés. Un circuit de sortie symétriseur est utilisé dans l'appareil source, et un circuit dé-symétriseur est installé

ment et des cordons secteur, peuvent induire des courants dans toute boucle conductrice. Une boucle est formée par le câble "aller", celui du signal, et le câble "retour", celui de la masse, du cordon audio. Une autre boucle est formée par la paire de cordon des canaux droit et gauche, qu'il est préférable de croiser plusieurs fois afin de réduire la surface de boucle.

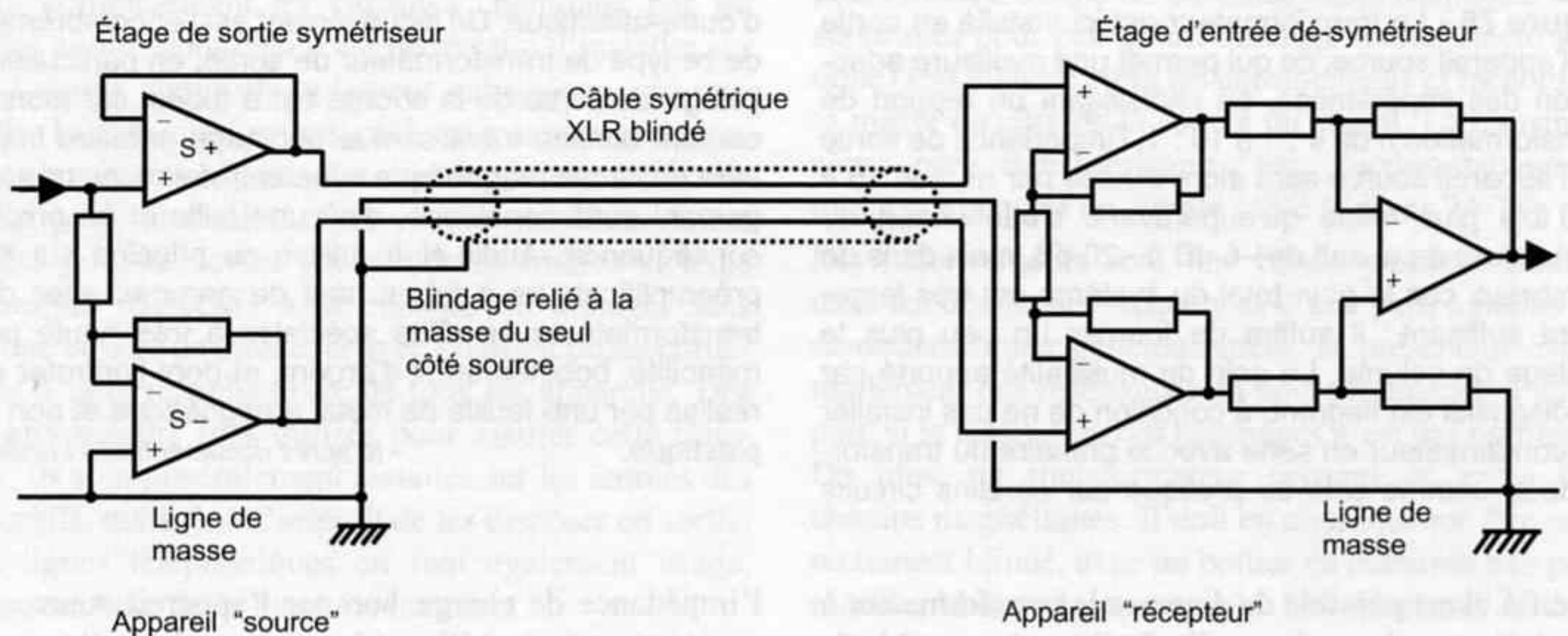


Figure 76 - La liaison symétrique entre les appareils audio permet seulement de s'affranchir des parasites induits sur le câble, car elle ne fournit pas d'isolement galvanique. Les cordons à 3 conducteurs sont équipés de prises XLR verrouillables à 3 broches. L'exemple ci-dessus met en évidence la connexion des masses des deux appareils, formant avec la terre une inévitable boucle de masse. Comme les circuits ne sont pas entièrement symétriques à l'intérieur des appareils, il y aura inévitablement une ronflette. Les amplificateurs intégrés généralement utilisés, ici au nombre de cinq pour

une seule liaison, dégradent sensiblement la transparence sonore. De plus, la symétrie des deux branches du circuit de sortie n'est que rarement exacte, en particulier aux fréquences élevées où le déphasage de 1/2 période, nécessaire pour obtenir la symétrie, n'est pas respecté à cause des performances inégales et des capacités parasites différentes sur les deux branches. Quelques constructeurs garantissent une parfaite symétrie... au laboratoire. Une paire d'amplificateur opérationnel en boîtier intégré coûte environ 100 fois moins cher qu'un bon transformateur !

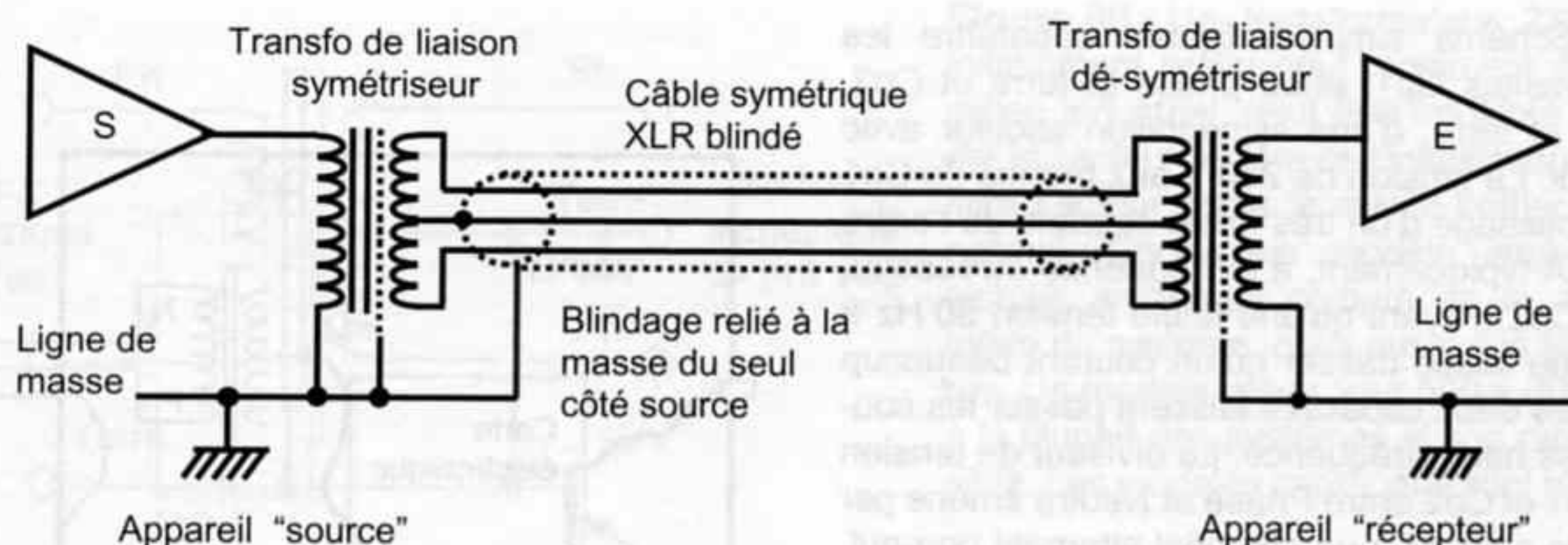


Figure 77 - De nombreux appareils audio professionnels utilisent des transformateurs en entrée et en sortie, ceux-ci permettant une parfaite symétrisation du signal avant son envoi sur de longues lignes, puis sa parfaite dé-symétrisation dès son entrée dans l'appareil récepteur. Les prises XLR, en entrée comme en sortie, possèdent des interrupteurs pour le fil de masse, qui peut

donc être relié ou non à chacun des deux appareils, sa liaison d'un seul côté évitant les boucles de masse. Les circuits électroniques ne sont généralement pas symétriques. La symétrie exacte étant très difficile à obtenir, les constructeurs obtiennent une excellente immunité aux bruits pour ces circuits en soignant les routages des pistes de masse ainsi que le câblage.

dans l'appareil récepteur. Ces circuits font appel à des amplificateurs opérationnels sous forme de circuits intégrés, lesquels n'ont pour une très large majorité aucune qualité musicale. Seuls trois ou quatre d'entre eux sont capables de traiter correctement les signaux audio sans les dégrader. Cela tient au principe même de leur circuiterie interne, qui réclame un taux de contre-réaction énorme, source de nombreux défauts audibles. Des précisions sur ce sujet sont données au chapitre "amplificateur".

Les appareils à entrées-sorties symétriques correctement construits utilisent tout simplement des transformateurs de liaison, qui possèdent sur chacun de leurs enroulements un point milieu, raccordé à la masse. Une symétrie rigoureuse des enroulements est obtenue par la technique du bobinage bifilaire, les fils du primaire et du secondaire étant bobinés ensemble. Si une liaison de ce type, avec transformateur symétriseur en sortie, et transformateur dé-symétriseur en entrée, résout tous les problèmes de connexion, c'est parce qu'elle présente un isolement galvanique, et non parce qu'elle est symétrique... Cette liaison réellement symétrique ne se justifie que pour des longueurs de cordon de plusieurs mètres, par exemple pour raccorder les microphones de prise de son à la console de mixage (figure 77).

Pour un système installé dans un salon, où les longueurs de câbles sont inférieures au mètre, un raccordement par paire torsadée, appelé branchement quasi-symétrique, apporte exactement le même résultat, à condition que le blindage (tresse) ne soit raccordé que d'un seul côté. Le sens du branchement a alors une importance, le blindage raccordé du côté de l'appareil source étant généralement préférable.

SYMÉTRISATION DU SECTEUR

Un autre moyen fort simple de diminuer l'intensité des courants de masse entre appareils consiste à **symétriser l'alimentation secteur**, en installant un transformateur d'isolement dont le secondaire possède un point milieu. En effet, le réseau EDF présente, quel que soit le "régime de neutre", une liaison du conducteur neutre (bleu) à la terre, conducteur de protection (vert-jaune). Cette liaison, établie au niveau du poste de transformation HT/BT du quartier est indispensable pour éviter de laisser flotter la tension secteur – ce qui serait extrêmement dangereux ! – en référençant l'un des deux pôles à la terre. Les capacités parasites entre phase et terre d'une part, et entre neutre et terre d'autre part, produisent au niveau de l'alimentation secteur de l'appareil, transformateur en particulier, des courants de fuite riches en fréquences élevées. La liaison terre-neutre introduit une dissymétrie des courants de fuite, lesquels dépendent étroitement de l'impédance de liaison de l'appareil à la terre.

Deux appareils reliés au secteur et dont les châssis sont tous deux reliés à la terre vont par conséquent échanger des courants entre leurs châssis, comme le montrent les figures 78 et 79.

Avec un réseau secteur symétrique, procurant deux tensions déphasées, de 115 Vac chacune par rapport à la terre, les potentiels alternatifs des points Ma et Mb de la figure précédente, seront beaucoup plus faibles. Dans le cas idéal d'une symétrie parfaite des deux tensions ainsi que des capacités parasites, ces potentiels de masse seraient nuls, et aucun courant parasite ne circulerait entre les masses des appareils. Malheureusement, les transformateurs d'isolement ne sont pas réalisés en enroulements bifilaires et la symétrie des

Figure 78 - Schéma simplifié faisant apparaître les capacités parasites Cp1, entre phase et terre et Cp2, entre neutre et terre, d'une alimentation secteur avec transformateur. La tension de 230 V aux bornes de Cp1 provoque le passage d'un très faible courant, de l'ordre de 1 à 100 μ A typiquement, à la fréquence du réseau. La capacité Cp2 n'ayant qu'une faible tension 50 Hz à ses bornes, ne laisse passer qu'un courant beaucoup plus faible. Les deux capacités laissent passer les courants parasites haute-fréquence. Le diviseur de tension formé par Cp1 et Cp2 entre Phase et Neutre amène par conséquent le point M à un potentiel alternatif non-nul, dépendant de l'impédance Zm de liaison entre M et la terre du réseau, c'est-à-dire de longueur et section du conducteur de terre, donc de sa résistance Rs ($<1 \Omega$) pour la fréquence du réseau, et de son inductance Ls nettement plus élevée, pour les parasites haute-fréquences.
(d'après Jensen A-N 004)

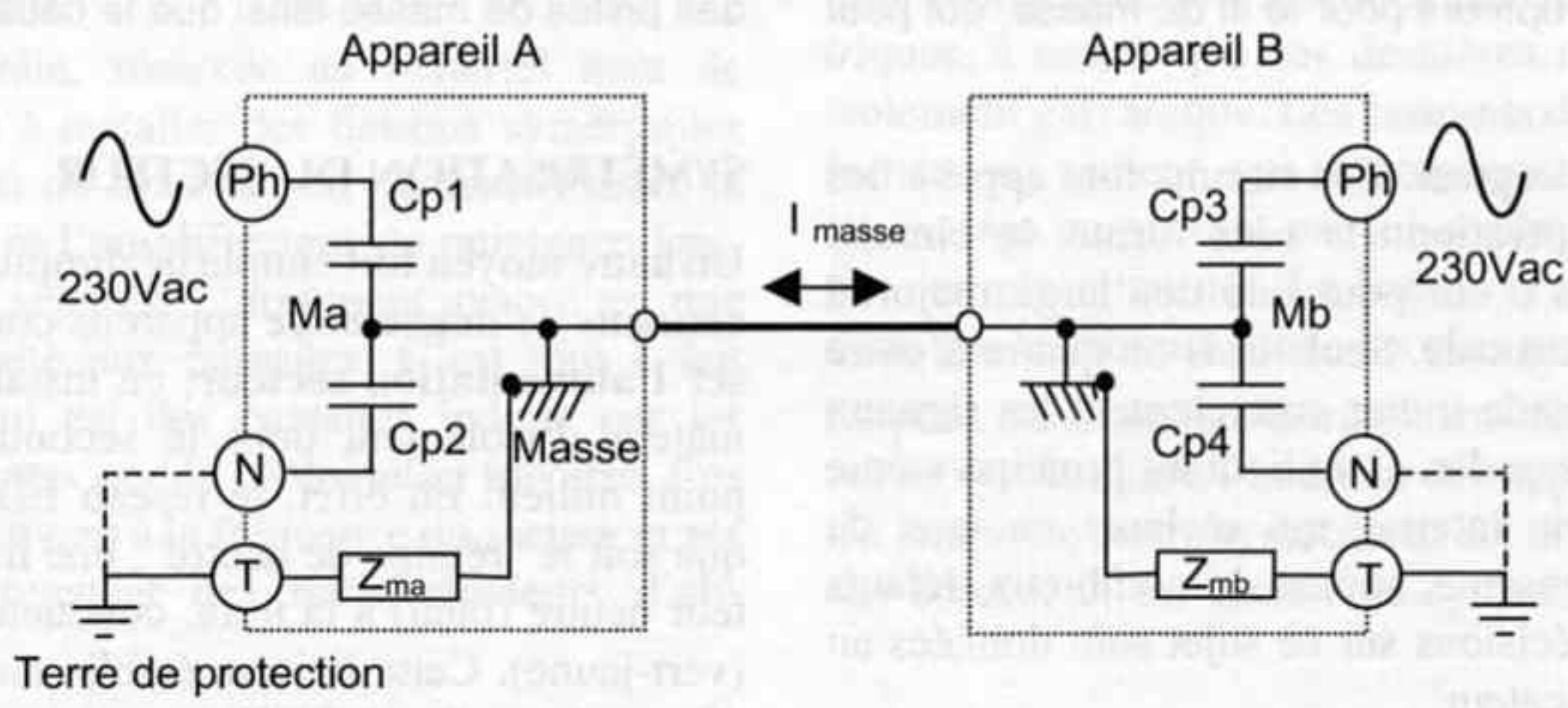
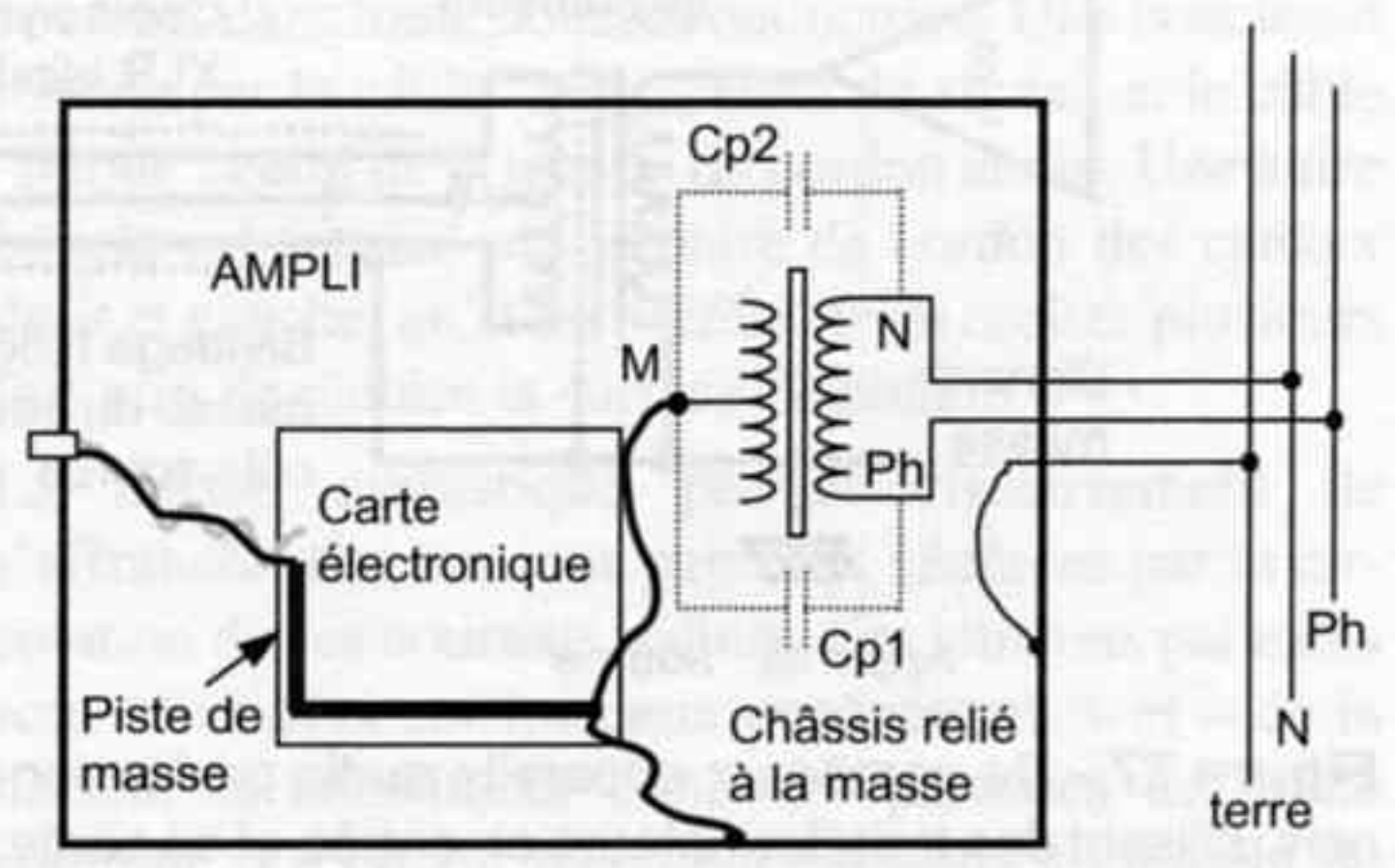



Figure 79 - La dissymétrie par rapport à la terre, du réseau d'alimentation secteur entraîne l'apparition de potentiels de masse Ma et Mb pour les deux appareils A et B. Ces potentiels ne sont jamais identiques, ni en amplitude ni en phase, du fait de capacités parasites

différentes, d'où l'apparition d'un courant I_{masse} à 50 Hz, plus parasites HF, circulant dans le conducteur de masse du cordon audio, entre les deux châssis. Ce courant s'ajoute au signal audio, sous forme d'un "hum" 50 Hz et d'un "buzz", grésillement.
(doc. Jensen)

deux moitiés de secondaire est illusoire. D'autre part les capacités parasites, en particulier celles liées au câblage, ne sont jamais rigoureusement égales. À défaut d'une annulation totale, une réduction notable des courants de masse peut être tout de même obtenue grâce à cette symétrisation du secteur. Elle se traduit par une diminution de 10 à 15 dB minimum, et jusqu'à 40 dB du bruit de fond à basse fréquence, le transformateur produisant de plus un filtrage efficace des hautes-fréquences en provenance du secteur. Le schéma figure 80 montre l'installation d'un tel transformateur symétriseur (d'après M. Glasband, Equi=Tech).

Pour terminer cette section importante du filtrage secteur, un récapitulatif s'impose :

- Les appareils équipés d'un cordon avec prise 2P (sans la terre) ne posent aucun problème de boucle de masse. Rechercher le **sens de la prise** qui produit les plus faibles courants de fuite (procédure expli-

- quée plus haut) Ces appareils à double isolation portent le symbole  et ne sont pas raccordés à la terre.
- Les châssis métalliques des appareils doivent **pour raison de sécurité être reliés à la terre**, mais pas à la masse électrique des circuits, sauf pour un seul d'entre eux afin que cette masse ne soit pas flottante.
- Dans le cas où plusieurs appareils sont reliés à la terre il se forme une **boucle de masse** qui collecte les champs magnétiques environnants, en particulier à la fréquence du réseau, d'où une ronflette parasite.
- Si un appareil comporte un **filtre secteur intégré**, il doit impérativement être **relié à la terre**.
- Si sa masse électrique est reliée à son châssis, il doit être le seul dans ce cas dans l'ensemble du système, sinon il convient de couper le fil reliant la masse des circuits au châssis, en installant éventuellement un **interrupteur de mise à la terre**.

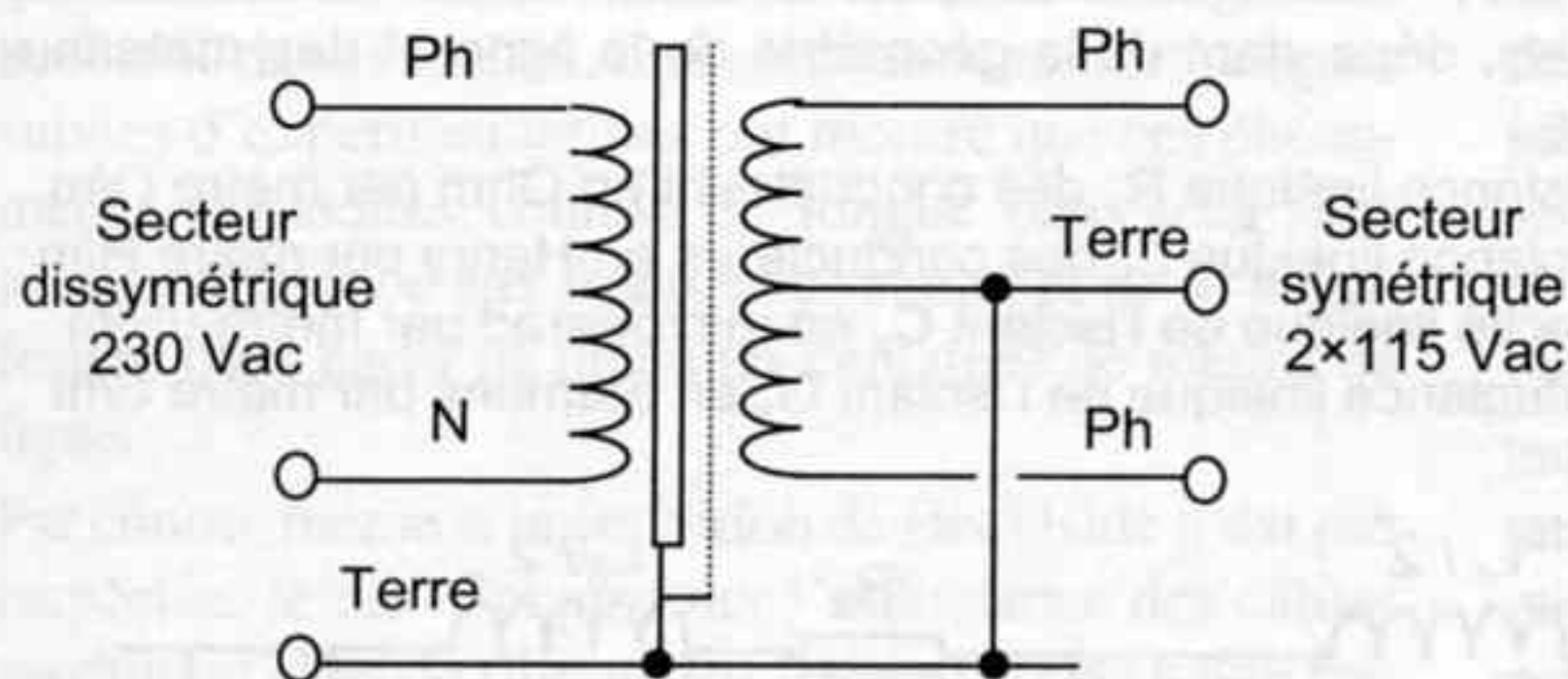


Figure 80 - Un transformateur 230 V/2 × 115 V, initialement prévu pour isolement de sécurité en milieu industriel, peut être implanté pour symétriser le secteur en tête de l'installation, en amont du filtre secteur, dans le même boîtier si sa taille le permet. Choisir un modèle largement dimensionné, en tenant compte de la consommation totale du système, mais aussi des évolutions futures. Un modèle prévu pour 500 à 800 VA convient à la plupart des systèmes et son prix reste accessible. Les modèles imprégnés sont plus silencieux.

(doc EquiTech)

- Les filtres secteurs doivent être installés à l'extérieur des appareils, dans un châssis séparé relié à la terre.
- Ces filtres doivent être efficaces en mode **différentiel à basse fréquence**, et surdimensionnés.
- Ils peuvent être complétés par des condensateurs **classe X**, de préférence au papier huilé, ou imprégné ou encore au polypropylène.
- Les câbles secteurs filtrants, les tores et coquilles de ferrite, sont efficaces contre les parasites HF (radio, TV, CB etc.) Seul le lecteur de CD, ou son convertisseur s'il est séparé, génèrent des parasites HF et peuvent bénéficier de ces accessoires.
- Les courants d'équilibrage des potentiels de masse, qui circulent entre les masses des appareils par les cordons audio, sont minimisés en recherchant la **tension minimale entre masses**, mesurée avec les cordons audio débranchés. Le **sens des prises** secteur influe sur les fuites du transformateur et par conséquent sur son potentiel de masse. **Un transformateur d'isolement secteur symétriseur** diminue ces courants parasites.
- Ces courants ne peuvent être éliminés totalement que par une **isolation galvanique** entre les appareils. Les transformateurs de liaison constituent la solution idéale de transmission du signal.
- Des modèles de transformateurs miniatures de très haute qualité peuvent trouver place en entrée des appareils, que cette entrée soit symétrique ou non.
- Des câbles de liaison audio avec transformateur intégré seront préférés si la place manque.
- Les **tresses de blindage ou écrans** des cordons audio ne doivent être impérativement raccordés que d'un **seul côté**, de préférence du côté de la source du signal.
- Les cordons de liaison audio doivent être constitués d'une **paire torsadée**, afin de soustraire les effets des champs magnétiques, ou mieux de deux paires torsadées en sens contraire, puis torsadées ensemble. Le **blindage** est indispensable pour diminuer la diaphonie droite-gauche.

- Les câbles **coaxiaux** sont **extrêmement mal adaptés** à la transmission de signaux bas niveaux et basses fréquences, ils sont à **proscrire en audio**, car la tension parasite de mode commun s'ajoute directement au signal.

D'ailleurs ces cordons de liaison méritent largement un paragraphe spécifique.

LES CORDONS DE LIAISON AUDIO

Les affirmations des premiers audiophiles concernant le son des câbles, mais aussi d'autres composants, ont longtemps été ignorées par les scientifiques et les industriels. Face à une exigence croissante du marché, ces derniers ont réagi et l'offre actuelle est pléthorique. En effet, un certain nombre de câbles proposés ne présentent que peu d'intérêt par rapport à un vulgaire bifilaire utilisé pour l'éclairage ! D'autres font payer trop cher une innovation fumeuse. Il est vrai que le problème de la transmission d'un signal audio est loin d'être aussi simple qu'il y paraît.

Considérer le câble comme un bout de fil est une erreur grossière. Si les électrons circulent effectivement dans le conducteur, le champ électrique qui les propulse se propage dans l'isolant, à une vitesse proche de celle de la lumière. Les qualités du diélectrique utilisé pour isoler les câbles sont par conséquent aussi importantes que celles du conducteur. Les caractéristiques électriques du câbles dépendent de trois facteurs :

- La conductivité du métal ou de l'alliage du conducteur.
- Les constantes diélectriques de l'isolant.
- La géométrie des conducteurs.

La sonorité d'un câble est liée à la combinaison de ces trois facteurs, mais aussi à d'autres paramètres non modélisables à l'heure actuelle, et il est extrêmement difficile de tirer des généralités sur l'influence de chacun des facteurs pris séparément. Toutefois quelques idées émergent, sans qu'il y ait de quoi établir une synthèse.

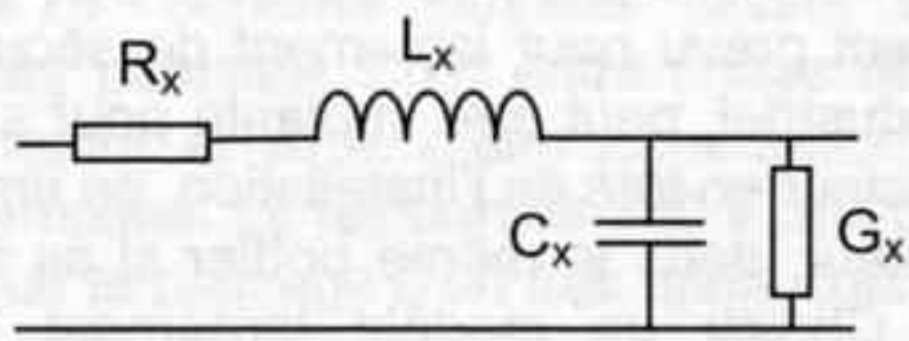


Figure 81 - Une ligne bifilaire est caractérisée par des constantes réparties, dépendant de la géométrie de la ligne et des matériaux utilisés :

- Résistance linéique R_x des conducteurs en Ohm par mètre Ω/m
- Inductance linéique L_x des conducteurs en Henry par mètre H/m
- Capacité linéique de l'isolant C_x en microFarad par mètre $\mu F/m$
- Conductance linéique de l'isolant G_x en Siemens par mètre S/m

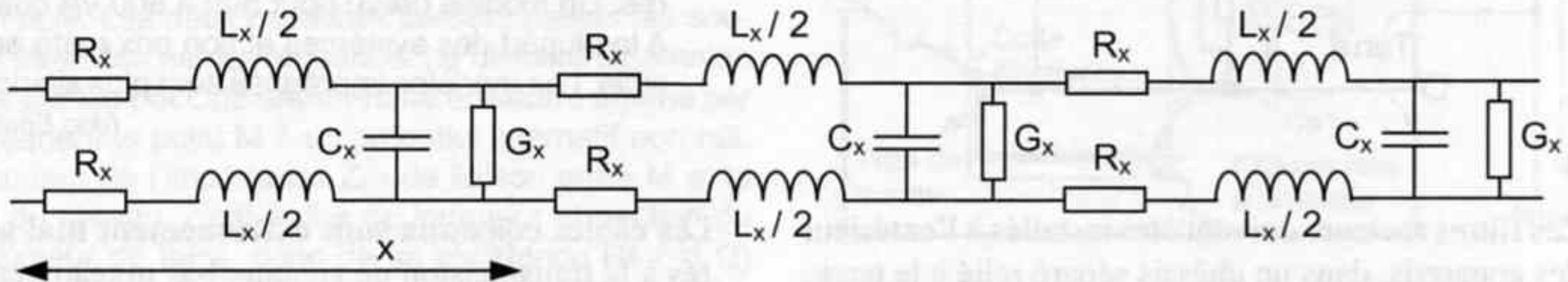


Figure 82 - Ces paramètres primaires de la ligne interviennent soit en série, R et L, soit en parallèle, C et G, tout au long de cette dernière, de manière diffuse. La ligne complète se caractérise par :

Résistance $R = \rho L/s$ avec ρ résistivité du métal, L et s longueur et section du conducteur. R est de l'ordre de $0,1 \Omega$ et généralement négligeable par rapport aux résistances de contact en bout de ligne.

- Inductance $L = (\mu_0 / 2\pi) \log (2D/\varnothing)$
avec $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} H/m$ perméabilité magnétique du vide, \varnothing diamètre du conducteur, D écart entre les deux conducteurs. Si l'isolant est magnétique de perméabilité relative μ_r , alors L est multipliée par μ_r . L est de l'ordre de quelques μH .
- Capacité $C = 2\pi \cdot \epsilon_r \epsilon_0 / \log (2D/\varnothing)$
avec $\epsilon_0 = 1/36 \cdot \pi \cdot 10^9 F/m$ permittivité du vide, ϵ_r permittivité relative de l'isolant. C est très dépendante de l'isolant, de 50 pF à plusieurs nF !

Des recherches systématiques menées depuis les années 90, mais s'appuyant sur des résultats pratiques établis de longue date, ont permis de préciser les caractéristiques électriques importantes pour la transmission des signaux audio. En particulier, l'influence sur le signal audio des phénomènes de propagation le long d'une ligne, a été éclaircie. Ces mécanismes, mis en évidence à la fin du XIX^e siècle avec le télégraphe, ont été étudiés depuis le début du XX^e siècle à l'avènement du téléphone. Des modélisations mathématiques (Maxwell) ont abouti à la définition des grandeurs caractéristiques, des équations reliant ces grandeurs, puis à des méthodes pratiques d'évaluation et d'amélioration de la transmission sur ces lignes. La réflexion du signal en bout de ligne longue lorsque le câble n'est pas chargé par une impédance convenable a ainsi été comprise et remédiée.

Les études récentes aboutissent à la conclusion que ces effets de propagation n'ont pas d'influence directe pour les lignes très courtes utilisées dans les systèmes audio. Aucune différence audible n'a pu être mise en

Conductance transversale G très faible, inverse de la résistance d'isolement R_p généralement très élevée, de l'ordre de plusieurs dizaines de $M\Omega$. G est négligée sauf aux très hautes fréquences.

- Ces paramètres permettent de définir :

- L'impédance caractéristique du câble

$$Z = \sqrt{(R + L)/(G + C)}$$

devient en HF : $Z = \sqrt{L/C}$

très utile pour adapter les impédances de la liaison, lorsqu'elle est à haute fréquence, vidéo par exemple.

- La vitesse de propagation V utile pour les liaisons numériques à haut débit : $V = 1/\sqrt{L \cdot C}$
- La fréquence de résonance $f = 1/(2\pi \sqrt{L \cdot C})$ avec une surtension :

$$Q = (1/R) \cdot \sqrt{L/C}$$

évidence entre un câble correctement adapté en impédance et un autre non adapté. Par contre deux câbles de géométrie ou de technologie différentes produisent des différences audibles parfois très nettes, qu'ils soient accordés ou non.

La ligne de transmission (figure 82) est donc à la fois inductive et capacitive, et son impédance varie avec la fréquence. L'effet de peau intervient également en rejetant les lignes de courants à la surface du conducteur lorsque la fréquence augmente, et l'effet de proximité tend à rapprocher les lignes de courant entre les deux conducteurs. Heaviside a démontré que la propagation du signal le long d'une ligne s'effectue sans déformation si les caractéristiques de la ligne sont telles que $R/L = G/C$.

Avec G par nature très faible (grand isolement) et C relativement grande par la proximité des conducteurs, un moyen d'équilibrer les lignes est d'augmenter l'inductance L, ce qui est réalisé en disposant des bobines régulièrement espacées le long de la ligne (Pupinisation) ou en installant un matériau magnétique tel

qu'un fil de fer enroulé (Krarupisation) ou une poudre de ferrite dans l'isolant. Des simulations informatiques suivies d'expérimentations ont montré que ces phénomènes classiques connus de longue date sont sans aucune influence aux fréquences audio, et ne se manifestent qu'à partir de quelques centaines de mètres de ligne.

Par contre, même si la condition de Heaviside n'est pas respectée, le fait d'augmenter l'inductance des câbles produit un effet de filtrage sur les signaux de haute fréquence, qu'ils s'agisse des pics parasites du secteur, propagés sur les câbles par les courants de masse, ou qu'il s'agisse de produits de distorsions harmoniques de rangs élevés, ou encore de bruits numériques à la fréquence d'échantillonnage du signal. Ce filtrage a plusieurs effets bénéfiques car les circuits d'entrée des appareils ne sont pas capables de traiter ces signaux de haute fréquence. Le fonctionnement de ces circuits n'est pas linéaire à ces fréquences, et une intermodulation sévère se produira entre le signal audio et les parasites HF dans l'étage d'entrée, donnant naissance à des raies spectrales nombreuses, qui vont polluer le silence dans le haut de la bande audio, à partir de quelques kHz. Un effet de démodulation par détection d'enveloppe peut également produire des bruits basses fréquences audibles si l'amplitude des bruits HF est modulée.

Ce n'est donc pas dans les caractéristiques du modèle mathématique habituel qu'il convient de chercher les explications aux différences de sonorité des câbles. Les défauts structurels des conducteurs, avec un seuil de conduction entre grains du métal, et des isolants, avec une absorption des charges électriques, semblent bien être responsables du caractère sonore des câbles.

Pour ce qui est du conducteur, un consensus se dégage depuis quelques années autour de l'argent, meilleur conducteur qui soit, présentant de plus l'avantage d'avoir un oxyde lui aussi très bon conducteur. Les phénomènes de résistance de contact entre grains sont absents. Les reproches parfois formulés, de son trop brillant, dur, métallique, ne sont pas imputables à ce métal. Les câbles en argent ne font que révéler de manière transparente les possibilités réelles du système... et ses défauts. Les appareils Audio-Note entièrement câblés en argent, jusqu'aux bobinages des transformateurs, ne donnent jamais un son trop brillant ! Le fabricant Siltech utilise de l'alliage or/argent en surface de conducteurs en argent pur.

Le cuivre à cristaux long, appelé OCC (Ohno Continuous Casting) ou LC (Linear Crystal) vient en seconde place. Il a l'énorme avantage d'être beaucoup moins cher. La qualité sans oxygène OFC (Oxygène Free Copper) permet d'éviter l'oxydation aux joints des grains. Dans le cuivre pur standard, ces joints

deviennent semi-conducteurs à la longue, avec un effet de seuil qui empêche le passage des petits signaux, et parfois un effet redresseur sur ces mêmes signaux. Il semblerait que le cuivre donne généralement un son plus rond, moins articulé, mais avec un meilleur feeling.

Un équilibre intéressant est obtenu avec les conducteurs en cuivre argenté, qui peuvent donner des résultats très variables, selon la géométrie du câble. Kimber utilise l'argent pur pour un conducteur et le cuivre pur pour l'autre afin de bénéficier des avantages de chacun.

En ce qui concerne l'isolant, là aussi un consensus apparaît autour du téflon PTFE (Poly-Tetra-Fluor-Ethylène). C'est en effet le seul diélectrique (à part l'air) ne présentant pas d'effet de mémoire par absorption de charges électriques. Tous les autres matériaux, à des degrés divers, stockent des charges par absorption lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique, et les restituent ensuite avec un certain retard qui dépend étroitement de leur résistance de fuite. Les très bons isolants, qui ont une résistance de fuite gigantesque, n'évacuent que très lentement ces charges, et présentent par conséquent un courant de décharge parasite après l'extinction du signal. Cela se traduit par une pollution sonore sur les signaux de faible niveau, un peu comme une sorte de réverbération artificielle. C'est le cas de la plupart des plastiques : polyester, PVC, et dans une moindre mesure polypropylène. Les isolants dont la résistance de fuite est plutôt faible évacuent plus facilement et plus rapidement ces charges, et rendent un son plus propre, plus détaillé, plus aéré surtout. C'est le cas du papier, huilé ou imprégné de polycarbonate ou d'époxy. Le PTFE est le seul matériau couramment disponible présentant une absorption quasi-nulle, donc un effet de mémoire presque inexistant. Sa mise en œuvre en revêtement de câbles par extrusion est délicate, ce qui explique en partie le prix élevé des cordons qui en font usage. Le polypropylène arrive en deuxième place, avec une sonorité moins légère dans le registre aigu. Les textiles, coton, soie, lin sont très peu utilisés, ils ont pourtant des caractéristiques très intéressantes. Les techniques de pupinisation, consistant à équilibrer les constantes réparties de la ligne, en incorporant un matériau magnétique dans le diélectrique, sont théoriquement sans effet pour les longueurs inférieures à quelques centaines de mètres. Cependant il est possible que la résistance de fuite du diélectrique soit ainsi abaissée, ce qui serait bénéfique. Les constructeurs combinent habilement les différents diélectriques, téflon en couche mince en contact avec le conducteur, polypropylène autour, gaine en PVC ou coton.

La géométrie, l'agencement des conducteurs, donnent une grande liberté de conception. Le conducteur peut être monobrin, multibrins, ou multibrins isolés de type

fil de Litz. La disposition peut être en paire, en quarte, coaxiale (!), conducteurs parallèles à plat ou en spirale etc. Le câble multibrins de très faible jauge, utilisant un très grand nombre de brins de 0,05 mm ou moins ne se rencontre plus guère actuellement, peut-être à cause des multiples contacts entre brins, à l'origine de problèmes sur petits signaux. La tendance s'oriente vers l'utilisation d'un faible nombre de brins, de 1 seul à une vingtaine, de section assez importante proche de 0,3 mm². Les fils de Litz isolés individuellement permettent d'obtenir une section suffisante sans être gêné par l'effet de peau sensible sur les gros conducteurs, de diamètre supérieur à 0,6 mm. Le torsadage des deux conducteurs est indispensable. Certains fabricants réalisent la tresse autour d'une âme en PTFE ou polypropylène, afin de maintenir une distance suffisante entre les conducteurs, ce qui diminue la capacité parasite. La combinaison de l'inductance des conducteurs avec la capacité parasite fait que le câble est assimilable à un réseau du second ordre. Il présente par conséquent une fréquence de résonance, à moins que son amortissement ne soit suffisant. Un réseau correcteur incorporé dans un boîtier en bout de câble permet de garantir un comportement irréprochable du câble aux plus hautes fréquences. Même si ces fréquences sont inaudibles et n'existent pas dans le signal original, les bruits et parasites HF divers peuvent en transitant par le câble intermoduler gravement avec le signal, surtout si l'impédance du câble n'est pas constante en fréquence. Ces correcteurs assurent que la réponse du câble est amortie. Un point important souvent oublié est la rigidité mécanique du câble. Tout mouvement relatif, vibration en particulier, d'un conducteur ou de la tresse par rapport aux autres génère par effet triboélectrique (frottement) une tension de bruit. La capacité parasite du câble est également modulée par les vibrations parasites, ce qui rend le filtrage non linéaire avec l'amplitude du signal ! Une gaine épaisse et rigide est indispensable, ainsi qu'un montage très serré des conducteurs dans cette gaine. C'est pourquoi les fabricants font parfois usage de gaine thermorétractable, afin de maintenir une contrainte de serrage constante. Le blindage est constitué d'une tresse en cuivre, parfois étamé ou argenté. Les feuillards d'aluminium ou de polyester aluminisé sont plutôt inefficaces. Un excellent blindage est réalisé par une maille de Nickel ou de Cupronickel, rarement rencontrée sur des réalisations commerciales. Ce blindage ne doit être raccordé que d'un seul côté si les conditions suivantes sont réunies (d'après A. Charoy, CEM) :

- Les signaux sont à basse fréquence, moins de 50 kHz ;
- Les signaux sont à bas niveau : bruit tolérable inférieur au millivolt ;

- Il existe une tension parasite de mode commun à basse fréquence : courants de masse 50 Hz ;
- Le signal est transmis sous forme d'une tension.

Ce qui correspond tout à fait au cas des signaux analogiques transmis entre les éléments du système audio.

Les prises demandent une qualité de contact qui ne peut être obtenue qu'en utilisant du métal massif, revêtu d'un bon conducteur ne s'oxydant pas, or ou argent. La pression nécessaire à la tenue du contact dans le temps est assurée par effet ressort, les contacts étant fendus, ou serrage par filetage. L'isolant devrait être du même type que celui du câble. Le conducteur est idéalement raccordé par sertissage, la soudure ne présentant pas une qualité de contact ni une tenue suffisante, car ni l'étain ni le plomb ne sont de bons conducteurs, et leurs oxydes sont semi-conducteurs. À la rigueur une soudure à l'argent peut convenir.

Il n'y a pas de câble idéal, cependant les câbles les moins typés du point de vue du réalisme sonore semblent suivre une direction de conception commune :

- plusieurs brins de cuivre OFC argenté, de 0,1 à 0,3 mm isolés individuellement ou par petits groupes,
- isolation PTFE extrudé,
- conducteurs torsadés, ou spiralés sur une âme,
- surmoulage d'une gaine épaisse, ou enveloppe thermorétractable,
- blindage par tresse cuivre argenté,
- gaine extérieure textile.

De nombreux essais sont parfois nécessaires pour trouver le type de câble adapté à un système, chacun possédant une personnalité sonore propre, une esthétique musicale particulière. Il est indispensable d'aller au-delà des considérations esthétiques, de ne pas s'arrêter sur le plus beau ou le plus agréable a priori. C'est justement dans ce genre de comparatif qu'il est important de conserver à l'esprit l'objectif de départ, en terme d'authenticité. Les bons câbles sont tout d'abord ceux qui solutionnent le problème de liaison sans apporter de parasites, et en diminuant le bruit de fond global de l'installation. Parmi ceux-ci, celui qui laisse l'impression que tout est plus vrai, plus présent, plus vivant, dans l'ensemble et pas seulement sur un registre particulier, mérite d'être retenu.

Lors de ces essais, le fait de remplacer un seul des câbles du système n'apporte pas d'amélioration nette. Les éléments du système étant en série, c'est le plus médiocre qui fixe les performances de l'ensemble, aussi en laissant un câble quelconque entre lecteur CD et préampli et en installant un excellent câble entre préampli et ampli de puissance, il est fort probable que le gain en qualité soit limité. La personnalité d'un câble ressort beaucoup plus nettement s'il est utilisé en

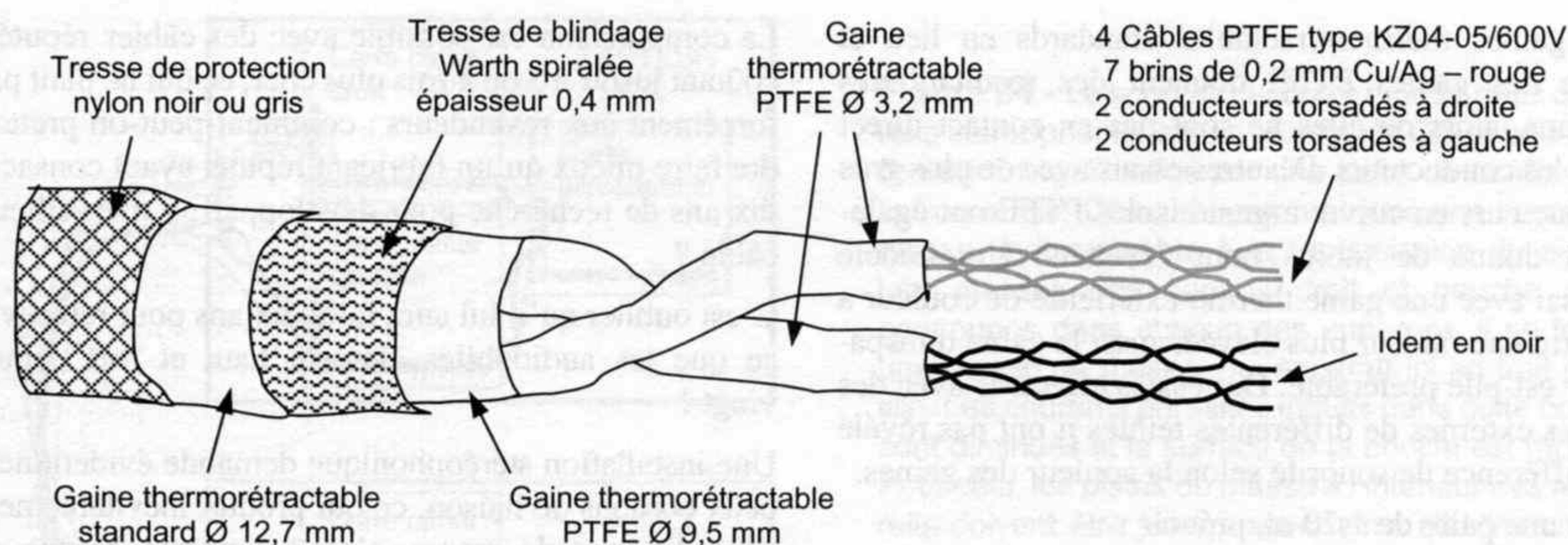


Figure 83 - Cordons de liaison Argent/Téflon.

trois ou quatre exemplaires dans le système, ce qui permet d'évaluer aisément son degré de réalisme, ou au contraire son esthétique sonore particulière.

EXEMPLE DE RÉALISATION

La qualité et la pureté des matériaux entrant dans la fabrication sont essentielles et interviennent largement sur le prix de vente. Le savoir-faire et les difficultés de mise en œuvre pèsent également sur le coût de production. L'amateur qui ne souhaite pas se ruiner peut cependant réaliser une économie substantielle, en fabricant lui-même ses câbles, qu'il pourra comparer à des modèles réputés du commerce, souvent aimablement prêtés par les revendeurs. Un exemple de réalisation est donné figure 83.

Pour réaliser ces cordons, 2×4 câbles, chacun à 7 brins de 0,2 mm en cuivre recuit argenté, isolés PTFE sont torsadés deux à deux, avec un pas régulier de l'ordre de 5 mm, avant d'être glissés dans une gaine thermorétractable en PTFE Ø 3,2 mm, disponible en longueur de 1,20 m. Un pistolet à air chaud est nécessaire pour obtenir un rétreint homogène. Les gaines PTFE demandent une température relativement élevée, autour de 320° C, pour garantir un rétreint, donc un serrage efficace. Porter des gants et respecter les consignes d'utilisation du pistolet à air chaud. Un rétreint au fer à souder n'est pas possible avec ces gaines. La même opération est répétée pour le second conducteur. Les deux faisceaux obtenus sont ensuite torsadés ensemble, bien jointifs, puis glissés dans une gaine thermorétractable PTFE de Ø 9,5 mm.

Une tresse Warth, en maille de Cupronickel, fendue au ciseaux sur toute sa longueur, puis enroulée en spirale avec recouvrement à 50 % assure le blindage, raccordé d'un seul côté. La tresse tubulaire peut également convenir bien que la résistance mécanique et la tenue des brins soit inférieures. Chaque câble est dénudé sur 5 mm environ puis étamé avec soudure à l'argent. Les 4 câbles constituant le conducteur sont ensuite soudés

ensemble, puis sur la borne de la prise RCA, dorée et isolée PTFE évidemment. Les modèles assurant un serrage du contact de masse de la prise femelle garantissent une résistance de contact minimale. Les soudures à l'argent peuvent être protégées par un remplissage de cire, pour les perfectionnistes. Le blindage n'est raccordé à la masse que d'un seul côté, par contact direct avec le diamètre intérieur du corps de la prise, et soudure sur le point de masse.

La finition est réalisée avec une dernière gaine thermo standard puis une tresse nylon d'habillage, terminée aux extrémités par un morceau de gaine thermo de couleur débordant sur la prise. Un anneau de couleur permettra de repérer de quel côté est relié le blindage.

Différentes versions ont été réalisées et essayées, en particulier une version sans tresse de blindage, de longueur 0,5 m, qui présente une très faible capacité. Cette variante convient bien à la liaison entre source à impédance de sortie plutôt élevée, tuner ou magnétophone par exemple, et préampli. Elle est parfaitement adaptée en sortie de préampli passif, lesquels présentent une impédance de sortie élevée par la présence du potentiomètre de réglage de volume juste avant la sortie. Malheureusement avec cette version l'immunité aux parasites HF induits par rayonnement sur le câble est moins bonne.

Une autre possibilité consiste à monter une paire torsadée rouge (signal) et une paire torsadée noire (masse) dans chaque gaine de Ø 3,2 mm. Le bruit induit est encore plus faible, mais la capacité parasite augmente nettement, ce montage est donc mal adapté aux sources à haute impédance, supérieure à 2 kΩ environ. Il peut convenir à la liaison entre lecteur de CD et préampli, ou préampli et ampli.

La version de base en longueur 1,20 m présente une capacité assez faible, d'environ 75 à 85 pF selon le torsadage, sans blindage, et 120 à 160 pF avec tresse, selon le recouvrement et le type de la tresse.

Les gaines thermorétractables standards en lieu et place des gaines PTFE donnent des résultats très moyens, alors qu'elles ne sont pas en contact direct avec les conducteurs. D'autres essais avec de plus gros conducteurs en cuivre argenté isolés PTFE ont également donné de moins bons résultats. Un modèle d'essai avec une gaine thermo extérieure de couleur a montré une raideur plus élevée, aussi la gaine transparente est-elle préférable. Des essais effectués avec des gaines externes de différentes teintes n'ont pas révélé de différence de sonorité selon la couleur des gaines.

Pour une paire de 1,20 m, prévoir :

- 5 m de câble 7 × 0,2 noir, soit TFE UL 1213 600 V 200° C jauge 30 AWG, en bobine de 30 m,
- soit PTFE KZ04-05, en bobine de 100 m,
- couper 4 longueurs égales de 1,25 m,
- 5 m de câble 7 × 0,2 rouge, 4 longueurs de 1,25 m,
- 4 gaines thermorétractables TFE-R 1/8, l = 1,20 m,
- 2 gaines thermorétractables TFE-R 3/8, l = 1,20 m,
- 2 × 2,50 m de tresse de blindage, soit Warth en cupronickel, soit tubulaire en cuivre étamé,
- 2 gaines thermorétractables standard Ø 12,7 mm RNF 100,
- 2 × 1,50 m de tresse nylon extensible Ø 10 mm,
- 2 paires de prises RCA rouge/noire, dorées ou argentées, isolées PTFE, marque WBT, Neutrik ou Deltron,
- 4 × 25 mm de gaine thermorétractable couleur rouge/ noire Ø 20 mm, pour terminaisons.

Les constituants sont tous disponibles chez Radiospares. La longueur des gaines PTFE permet de réaliser un câble de 1,20 m ou deux de 0,60 m. Chaque paire de câbles revient à environ 150 € en 1,20 m avec prises Neutrik ou Deltron, et demande une journée de travail. Le torsadage en particulier est assez fastidieux et demande du soin et de la patience, car il doit être régulier, et surtout identique autant que possible sur les 4 paires.

Ce câble est aussi décevant en première impression qu'il se révèle exceptionnel après un rodage de quelques heures, qui s'avère indispensable, et pendant lequel la tonalité évolue énormément, jusqu'à un excellent équilibre. La première impression est celle d'un son dur et projeté, comme si seul le médium était transmis. Le grave et le bas médium se libèrent en premier, rendant le son lourd, épais. Le haut du spectre arrive ensuite après plus de 2 heures ! Après 1 ou 2 jours, la restitution acquiert un naturel surprenant. Le câble devra subir à nouveau un rodage rapide chaque fois qu'il sera débranché et manipulé ou transporté. Aucune explication sérieuse ne peut être actuellement avancée sur ce phénomène curieux.

La comparaison est possible avec des câbles réputés, coûtant jusqu'à 3 ou 4 fois plus cher, ce qui ne plait pas forcément aux revendeurs : comment peut-on prétendre faire mieux qu'un fabricant réputé, ayant consacré dix ans de recherche pour développer un merveilleux câble ?

C'est oublier qu'il lui aura fallu dix ans pour retrouver ce que les audiophiles clament haut et fort depuis vingt !

Une installation stéréophonique demande évidemment deux cordons de liaison, ce qui produit inévitablement deux liaisons de masse, c'est-à-dire une boucle de masse, voir figure 84. (C'est encore pire avec un système home-cinéma comportant au minimum 5 canaux). Une construction double-mono, avec séparation complète des deux circuits droit et gauche, y-compris les alimentations et les circuits de masse, permet de résoudre en grande partie ce problème. Lorsque les deux châssis droit et gauche sont séparés, l'appareil est alors constitué de deux blocs monophoniques, ce qui représente une solution idéale sauf si malheureusement le constructeur a prévu de relier les masses aux châssis et les deux châssis à la terre, ce qui est très souvent le cas pour les amplificateurs à lampes en deux blocs mono (figures 85 et 86).

Pour terminer ce paragraphe consacré aux cordons de liaison audio, je tiens à préciser que le choix des câbles comme éléments compensateurs, dans le but de corriger, d'équilibrer un défaut audible du système, est une pratique désastreuse, quoique conseillée par certains revendeurs. Si vous trouvez que vos enceintes sont un peu courtes dans le grave et un peu sèches, le choix d'un câble assez capacitif (plus de 500 pF/m) donnant une sonorité assez sourde permettra effectivement de diminuer le niveau apparent des aigus, et de remonter subjectivement le niveau de grave, ce qui rééquilibrera un peu la réponse fréquentielle. La dynamique sera nettement diminuée, la réponse temporelle sera aplatie, étalée. Toutes les améliorations faites ensuite seront inutiles car sans effet audible.

Cette pratique ferme les éventuelles voies de progrès en insérant un "limiteur" dans le système. Chaque maillon peut être comparé à une vitre à travers laquelle l'événement sonore virtuel est observé. Chacun d'eux doit être le plus transparent et le moins coloré possible, car ils sont en série dans le système, ce qui revient à considérer les "vitrines" comme empilées les unes derrière les autres. Si l'une d'elle est teintée bleue, le fait d'en ajouter une teintée bronze n'augmentera jamais la transparence d'ensemble ! L'image sera moins lumineuse, moins contrastée, moins nette, les couleurs moins saturées. Faut-il accepter tout ces défauts simplement pour corriger une coloration un peu crue ?

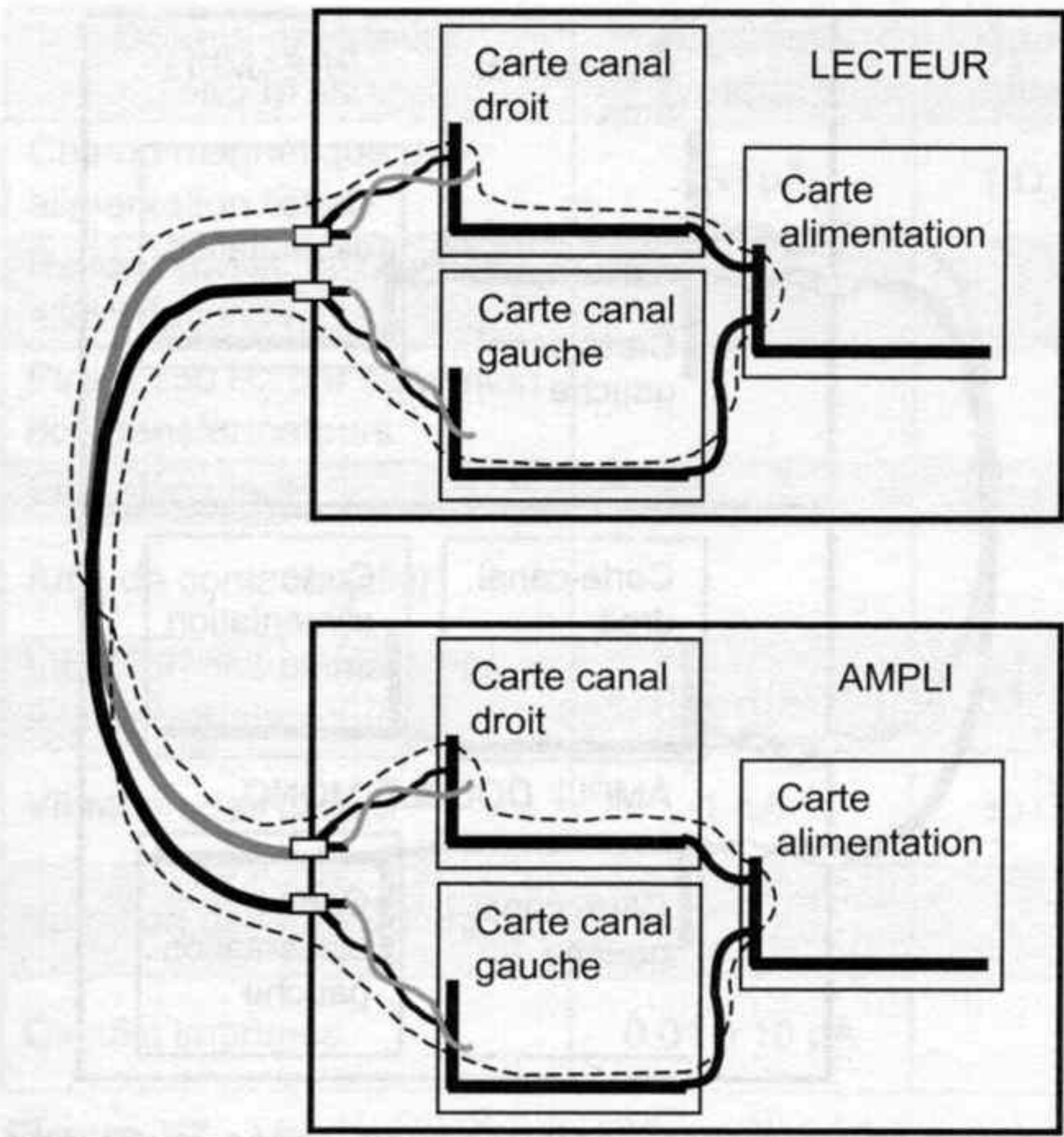


Figure 84 - Le schéma ci-contre montre deux appareils stéréophoniques, un lecteur de CD et un amplificateur intégré, reliés par une paire de cordons de liaison audio. Chaque cordon assure une liaison de masse, indispensable à la transmission du signal. Les masses des canaux droit et gauche étant communes dans chacun des appareils, il se forme une boucle de masse, qui apparaît ici en trait pointillé. Les courants parasites induits dans cette boucle sont diminués si la surface de la boucle est réduite. Pour cela, les pistes de masse à l'intérieur des appareils doivent être juxtaposées, ainsi que les câbles des signaux droit et gauche. Le cheminement des cordons doit être étudié afin de minimiser le ronflement capté, un torsadage simple ou triple (toujours impair) s'avérant parfois nécessaire. Il est possible de supprimer cette boucle en installant deux transformateurs en entrée de l'amplificateur, ou bien en sortie du lecteur, comme expliqué auparavant, ou encore sur les câbles eux-même.

Je suis au contraire convaincu que le gain en transparence apporté par une amélioration, telle qu'un bon choix de câbles, s'accompagne de la mise en évidence de qualités nouvelles autant que de défauts nouveaux. En laissant passer plus d'informations, le nouveau câble révèle les particularités de tous les autres éléments du système, en bien comme en mal. Cela est non seulement normal, mais encore absolument nécessaire, le nouveau défaut révélé constituant un guide indispensable, indiquant la prochaine direction de recherche.

Le bon câble n'est pas celui qui compense, qui harmonise, mais celui qui révèle, qui dévoile, qui fait mieux percevoir à la fois espace, matière et mouvement, dans cet ordre hiérarchique. Ces perceptions n'ont pas à être jugées, agréables ou non, mais simplement évaluées, en terme de "plus qu'avant".

COUPLAGE MICROPHONIQUE

L'accrochage basse fréquence est bien connu des utilisateurs de disques microsillons. Les platines 33 tours même les mieux suspendues ne sont pas à l'abri de ce phénomène, sensible surtout vers 50 à 100 Hz à cause du gain très important du préamplificateur à ces fréquences, gain imposé par la correction de gravure. Le simple fait de marcher ou de toucher l'étagère portant le matériel suffit à produire de grands bourdonnements intempestifs. Dans les pires cas, les ondes sonores peuvent exciter directement le bras de lecture et provoquer l'accrochage.

Cet effet de rétro-action positive par voie mécanique se produit à des degrés divers sur tout appareil ou composant soumis aux vibrations créées par les ondes

de pression acoustique. Les composants les plus sensibles à cet effet, après la platine tourne-disque, sont les tubes électroniques, en particulier les modèles miniatures, surtout ceux de fabrication récente et de piètre qualité, mais aussi certains condensateurs, les bobinages, selfs ou transformateurs s'ils ne sont pas protégés des vibrations par une imprégnation à cœur. Des résistances bobinées peuvent également en être victime, et d'une manière générale tout composant, s'il baigne dans un champ magnétique, subit une induction variable avec sa position relative par rapport aux lignes de champ. Toute vibration qui fait osciller faiblement la position du composant – quelques millièmes de mm suffisent parfois – a pour effet de moduler cette induction.

Si les bruits induits par ces phénomènes peuvent sembler à priori négligeables, quelques réflexions simples amènent à les considérer plus sérieusement :

- Le niveau maximal du signal à l'enregistrement ne dépasse jamais la barre des -6 dB par rapport à la pleine échelle du format numérique, ceci afin d'éviter à coup sûr un écrêtage. Les lecteurs CD délivrent pour la plupart un signal de 2 V efficace à pleine échelle, donc 1 V efficace pour le signal maximal à -6 dB.
- Le réglage de volume général est très souvent positionné entre -20 dB et -40 dB, selon la sensibilité des enceintes et le gain de l'amplificateur. Par exemple avec une enceinte de sensibilité 90 dB/1W à 1 m, grandeur qui sera détaillée au chapitre suivant (8), un niveau acoustique de crête de 96 dB est atteint avec une puissance électrique de 4 W. Si

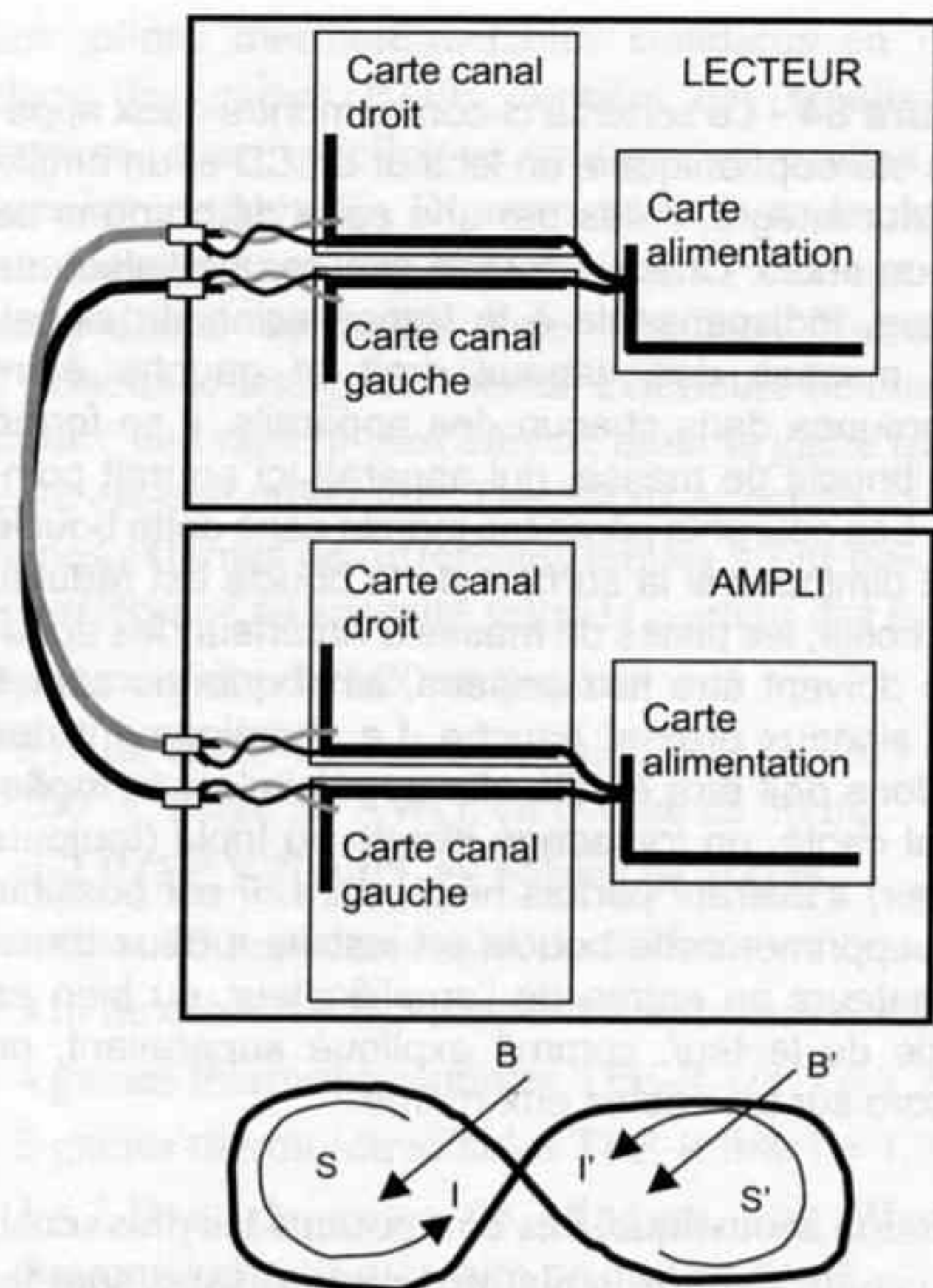


Figure 85 - La diminution de la surface de la boucle de masse, tant à l'intérieur des appareils qu'au niveau de leur liaison externe, permet de diminuer les ronflements parasites induits sur les cordons de liaison. Le simple fait de croiser les deux cordons fait que les courants induits dans chacune des deux moitiés de la boucle se soustraient, comme le montre le schéma ci-dessus. L'induction B sur une moitié de la boucle étant légèrement différente de l'induction B' sur l'autre moitié, c'est en ajustant l'étendue des surfaces S et S' en déplaçant les cordons, que l'on obtient l'annulation des courants induits, et le bruit de fond minimal.

L'impédance de l'enceinte est de $4\ \Omega$, la tension efficace maximale, lors d'un signal fort, à ses bornes est de $U = \sqrt{P \cdot Z} = 4\ \text{V}$. Le préampli ayant un gain de 16 dB sur l'entrée ligne, et l'amplificateur ayant un gain en tension de $G = 34\ \text{dB}$, soit un total de 50 dB donc une amplification de tension $A = 316$, le signal d'entrée du préamplificateur est de $4/316 = 12,6\ \text{mV}$ environ pour le niveau sonore maximal ! Autrement dit -38 dB en dessous du signal de sortie du lecteur de CD, pour cet exemple.

- Avec une dynamique reproduite de 60 dB – soit un rapport de 1 000 – ce qui n'est pas très ambitieux, les plus petits signaux enregistrés pouvant être reproduits de manière audible sont représentés par une tension de seulement $12,6\ \mu\text{V}$ environ en entrée du préampli, toujours dans cet exemple typique. Le signal audio est donc extrêmement fragile vu les très faibles niveaux mis en jeu.

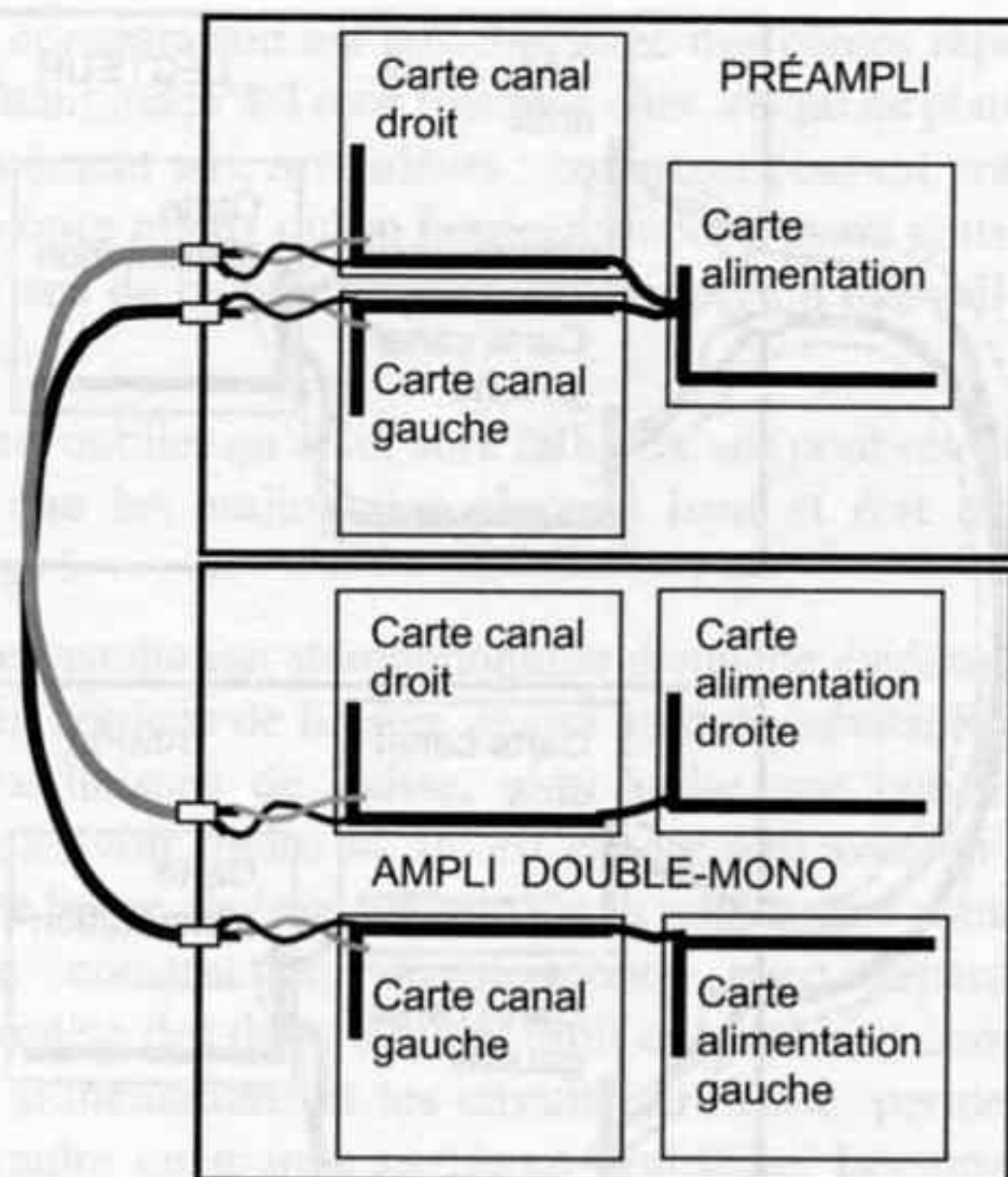


Figure 86 - Un amplificateur double-mono, avec masses droite et gauche séparées, de même que deux blocs mono en deux châssis distincts, permet de supprimer la boucle de masse droite-gauche à condition que le ou les châssis ne soit pas reliés à ces deux masses, car la boucle serait ainsi refermée ! Les alimentations doivent être entièrement distinctes depuis les enroulements indépendants au secondaire du transformateur secteur. La masse ne devant pas rester flottante, une liaison de la masse avec la terre doit être effectuée, de préférence dans le préampli plutôt que dans l'un des blocs mono. Une liaison des châssis à la masse par deux diodes tête-bêche, un condensateur de faible valeur, une diode Zener ou une varistance sont des solutions dangereuses et néfastes du point de vue des bruits induits.

- Le tableau figure 87 donne un ordre de grandeur de différents bruits induits.

Si l'on excepte les arcs de contact, peu perturbants car brefs et isolés, faciles à filtrer par réseau R-C installés sur les interrupteurs et contacteurs responsables, ainsi que les réceptions involontaires de station radio, qui sont généralement éliminées par un filtre sélectif en entrée des appareils, on constate que les alimentations secteur sont responsables en majeure partie des bruits induits. Lorsque les boucles par le secteur sont filtrées et que les boucles de masse ont été supprimées, comme expliqué précédemment, la contribution restante au bruit de l'installation est due principalement aux vibrations des câbles et des composants sensibles.

Dans le pire des cas, lorsque le système comporte plusieurs paires de câbles de liaison, leur contribution totale au bruit peut noyer les petits signaux.

Source extérieure du bruit :	Amplitude typique :	Impédance réceptrice :	Tension de bruit :	Remèdes habituels :
Champ magnétique des alimentations 50 Hz	100 µA	1 Ω (câbles)	100 µV	Suppression des boucles de masse, alimentation éloignée.
Rayonnement 100 Hz des alimentations redressées			30 µV	Alimentation en boîtier séparé blindé. Fils torsadés.
Pics à 150 Hz par saturation des transformateurs			5 µV	Implantation des composants, transformateur différent.
Émissions radio			1 mV	Blindage des câbles.
Arcs de contacts (clic)			1 mV	Suppression des boucles de masse, filtrage secteur, blindage.
Vibration des composants (condensateurs)	10 pA(<100 Hz)	47 kΩ (?)	0,47 µV	Choix des composants et implantation.
Vibration des câbles	1 nA	10 Ω à 1 kΩ	10 nV à 1 µV	Utilisation de diélectrique à faible bruit.
Vibration des tubes d'entrée			10 µV	Choix des tubes, montage souple, amortisseurs.
Circuits imprimés	0,01 à 10 pA			Nettoyage des vernis de soudure, circuit Téflon

Figure 87 - Valeurs de tension de bruit données à titre indicatif, très variables au cas par cas. (Analog Devices)

Les tubes constituent à eux seuls un problème à part entière, qui sera traité plus en détails au chapitre électronique.

Les couplages indésirables par effet microphonique peuvent être répartis en 2 grandes classes :

- Couplage direct, par **voie aérienne**, de l'onde acoustique, transformée en vibration mécanique (figure 88).
- Couplage indirect, l'onde acoustique excitant la vibration d'un élément, qui transmet le mouvement par **voie solide** aux objets, appareils et composants en contact (figure 89).

• Le couplage par voie aérienne directe est peu sensible sur les composants, de par leur petite taille relativement aux longueurs d'ondes considérées. Ce n'est qu'aux fréquences de plusieurs kHz, pour lesquelles les longueurs d'onde deviennent inférieures à quelques cm, que les dimensions des tubes par exemple sont significatives. Aux fréquences inférieures, l'obstacle constitué par le composant est contourné par l'onde comme s'il était absent, et pratiquement aucune énergie ne lui est transmise. C'est donc du côté des fréquences élevées, dans le registre aigu, que ce mode de couplage est le plus actif.

Il se fait sentir principalement sur les parois des enceintes acoustiques, les tubes de grandes tailles, sur les grosses capacités électrochimiques, sur les transformateurs. Les vibrations transmises à ces composants induisent directement des signaux parasites, dont le spectre de fréquence ne contient souvent que quelques raies dispersées correspondant aux résonances internes des parties constitutives. Les armatures en

feuille d'aluminium d'un condensateur chimique, séparées par un buvard relativement déformable donc élastique, vont pouvoir vibrer à certaines fréquences, et moduler ainsi la capacité du composant. Cette variation de capacité se traduit par une variation de tension aux bornes du composant. En effet, la quantité d'énergie stockée ne peut varier rapidement. Cette énergie vaut : $E = C \cdot U^2 / 2$

C étant la capacité et U la tension continue à ses bornes. Si C est modulée et E constante, alors U^2 subit une modulation identique à celle de C, en opposition de phase. Cette tension modulée est un bruit parasite.

• Le couplage par voie solide indirecte est bien plus sévère, car les dimensions des étagères ou meubles supports sont souvent d'un ordre de grandeur comparable aux longueurs d'onde des plus basses fréquences sonores, c'est-à-dire supérieures à 1 m. L'énergie acoustique étant élevée à ces fréquences, les vibrations transmises seront de forte amplitude, et elles trouveront un chemin malgré les obstacles jusqu'aux composants les plus sensibles. Les fréquences de résonance des étagères sont habituellement dans le registre grave/bas-médium, vers quelques centaines de Hz, et sont très facilement excitées sur programme musical. C'est généralement ce mode de couplage qui est responsable des accrochages à basse fréquence des platines 33 tours, et du son réputé chaud de certains tubes, qui amplifient artificiellement les fréquences bas-médium par cette voie détournée. Les vibrations du châssis du haut-parleur grave se propagent également par voie

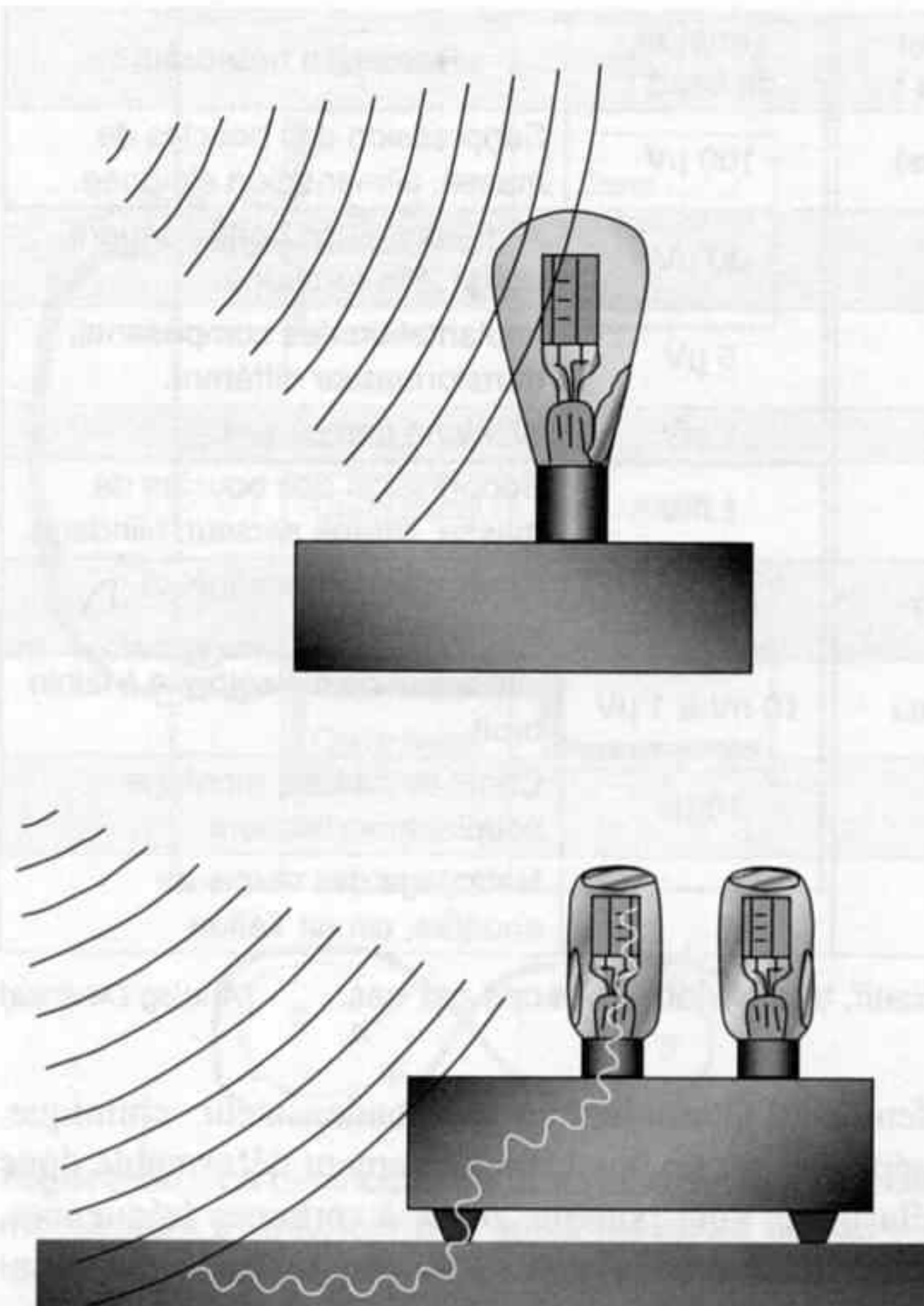


Figure 88 - Le couplage par voie aérienne se produit lorsque l'onde acoustique, rencontrant un obstacle, lui communique une énergie suffisante pour le faire vibrer, dans son ensemble ou partiellement. Une grande surface plane se comportera comme une membrane et oscillera autour de sa position moyenne par déformation de flexion. Des surfaces plus complexes subiront des déformations locales, aux endroits les moins rigides. Les fréquences de résonance (et leurs multiples) définies par la masse des éléments et la raideur de leurs fixations, sont excitées de manière plus sensible. L'amplitude des vibrations ainsi transmises est très faible, de l'ordre du millièème de mm au grand maximum, mais suffisante par exemple pour moduler la distance entre les électrodes d'un tube électronique, grille et cathode en particulier, et créer ainsi une modulation de tension, c'est-à-dire un signal parasite.

Figure 89 - Le couplage par voie solide se produit lorsque l'onde acoustique fait vibrer, dans son ensemble ou partiellement, une grande surface plane telle qu'une étagère, la plaque de fond d'un châssis, le couvercle d'un appareil. La vibration se propage à travers les différents solides en contact, avec une réflexion et une diffraction à chaque interface ou changement de matière, ainsi qu'une absorption dans les matériaux les moins rigides et les plus hétérogènes, jusqu'aux composants sensibles.

solide aux panneaux, en particulier le "baffle" support, et aux autres haut-parleurs, dont le fonctionnement peut alors être perturbé.

Lutte contre les vibrations parasites

Les moyens de lutte contre ces couplages acoustiques sont nombreux, relativement simples à mettre en pratique et la plupart du temps peu coûteux. Par contre le diagnostic est difficile, et c'est avant tout la connaissance des chemins de couplage par voie solide, et ensuite la mise en œuvre de quelques règles simples, qui permettent de choisir et d'expérimenter un moyen.

La mise en évidence des chemins de couplage est possible pour tous les éléments du système traitant de signaux analogiques. Par contre pour les maillons numériques, la constatation de phénomènes microphoniques est beaucoup moins aisée, mais pas impossible pour autant.

Lorsque le système est en fonction, sans aucun signal, et avec le réglage de volume presque à fond, le simple fait de marcher, de toucher les commandes ou de taper certains appareils ou composants, fait entendre un gong indésirable dans les haut-parleurs. Un petit choc de l'ongle contre la paroi de verre d'un tube laisse entendre un "ding" caractéristique du couplage par voie directe. Ce n'est cependant pas le mode de cou-

plage le plus sévère. Il convient de rechercher au contraire les voies solides empruntées par les vibrations, en procédant par élimination.

Ces voies sont dues aux couplages suivants :

- champ sonore/sol, par l'ensemble de sa surface,
- sol/meuble support, par ses pieds,
- champ sonore/meuble support, par les grandes surfaces planes, verticales surtout,
- meuble support/appareils, par leurs pieds,
- champ sonore/appareils, par leurs grandes surfaces, fond et capot, parois des enceintes,
- appareils/composants châssis (condensateurs, transformateurs, tubes, câbles, HP aigus...) par leurs fixations et par leurs câbles,
- appareils/circuits imprimés, par les supports,
- circuits imprimés/composants, par leurs pattes ou leurs appuis,
- composants/conducteurs internes, par le boîtier du composant.

Ces couplages sont révélés en excitant par de petits chocs d'un doigt les différents supports, capots, châssis, lorsque le système est en fonction, sans signal et avec le réglage de volume à mi-course. Le son n'est souvent audible qu'à proximité immédiate d'un haut-parleur, ce qui implique l'assistance d'une autre personne. Un second test peut être effectué sur modula-

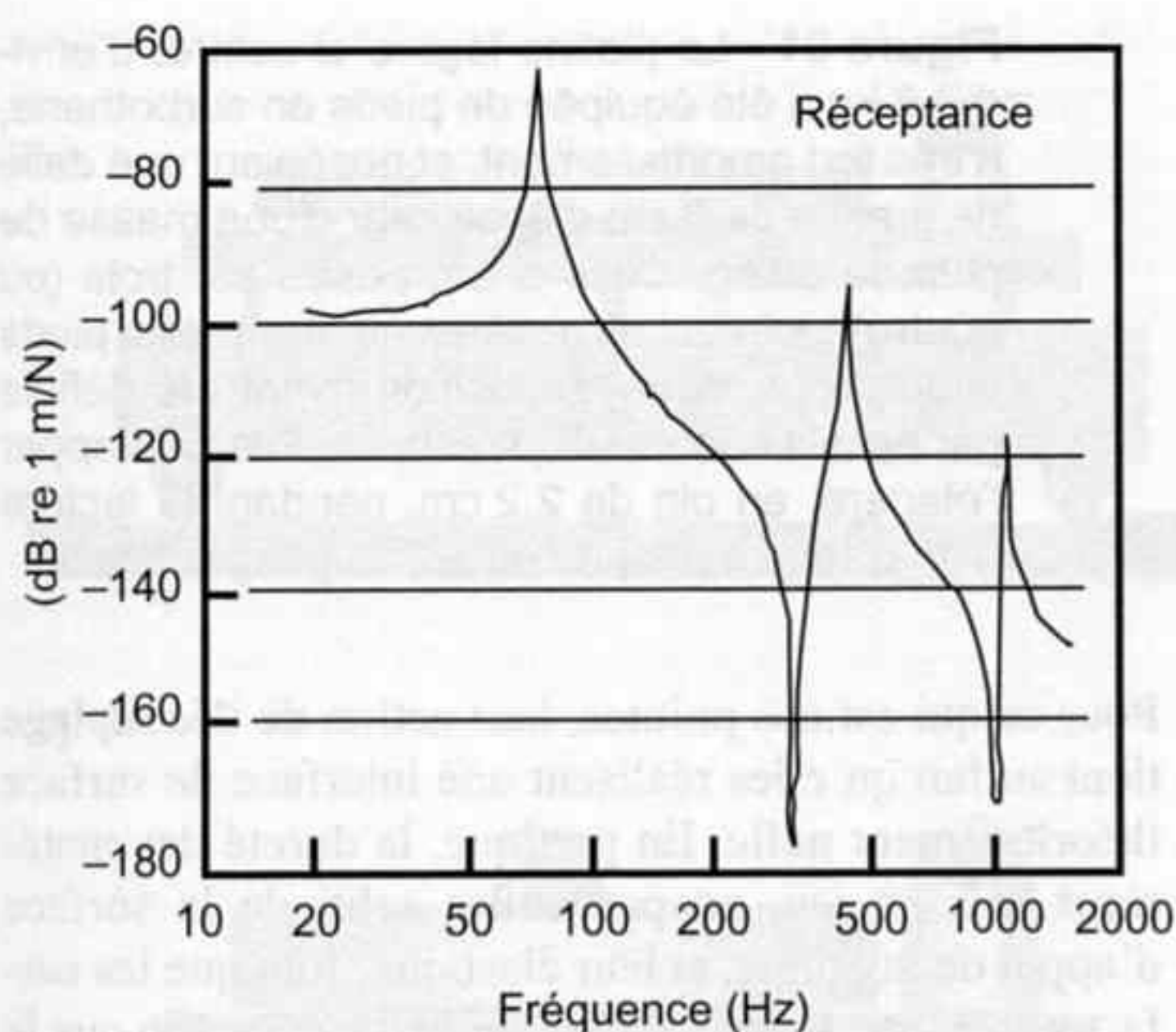


Figure 90 - Exemple de tracé d'une courbe de transfert. Elle montre l'amplitude de mouvement de la structure en fonction de la fréquence, pour une force d'excitation constante. L'amplitude est mesurée en mètre par Newton, 0 dB correspondant à 1 m/N. Ce relevé a été effectué sur un ressort à lame non amorti encastré dans un bâti rigide. Il montre qu'en plus d'une résonance située un peu en dessous de 100 Hz, le ressort transmet également un mouvement vers 500 Hz, et un peu plus de 1 000 Hz. Les ressorts métalliques présentent tous cette particularité, qui fait qu'aux fréquences élevées, ils n'isolent pas des vibrations mais transmettent au contraire certaines raies spectrales. La suspension simple non amortie n'interrompt que très imparfaitement le chemin de couplage.

tion musicale, en posant la main ou juste un doigt sur les surfaces soupçonnées. La sensibilité tactile est telle qu'une vibration d'amplitude inférieure à 1/100^e de mm est facilement détectable. Des vibrations bien plus importantes sont décelées la plupart du temps sur les étagères supports, en bois mince, et sur les parois des enceintes même les plus réputées. Les parois verticales en particulier sont directement soumises au champ de pression sonore qui leur arrive perpendiculairement. Leur fixation avec la structure du meuble fait propager dans l'ensemble de celui-ci les vibrations captées.

Lorsque la vibration parvient jusqu'au conducteur interne du composant, elle module les caractéristiques électriques de ce composant, ce qui peut introduire un signal parasite. Certains composants fournissent un signal microphonique à peu près en phase avec l'onde acoustique, d'autres au contraire peuvent donner un signal en opposition. Ces signaux sont sélectifs et n'apparaissent qu'à certaines fréquences, c'est pourquoi le concepteur d'un appareil est amené à essayer de multiples combinaisons de composants afin de trouver ceux qui procurent une certaine compensation des effets microphoniques. Utiliser le même type de condensateur, avec la même valeur, en de nombreux endroits d'un circuit est en général défavorable sur ce point, car les effets vont s'accumuler, avec accentuation de quelques fréquences précises. Cela constitue en grande partie la coloration attribuée à certains composants.

Le couplage par voie solide peut être supprimé en ouvrant, en interrompant les chemins, en n'importe lequel des points de passage de la liste ci-dessus. Il est souvent nécessaire de couper plusieurs chemins, opérant en parallèle, en particulier les couplages sol/étagères d'une part, et étagères/appareils d'autre part, et de supprimer tous les "ponts" tels que ceux constitués par

la fixation ou l'appui d'un cordon contre une paroi de meuble, ces ponts réalisant de véritables court-circuits, chemins de passage particulièrement aisés pour les vibrations parasites. Pour réaliser cette interruption du couplage, il ne suffit pas d'installer un... découplage. Empêcher la vibration d'un solide n'est pas une chose si aisée quand la bande de fréquence concernée couvre plusieurs octaves.

Les études de mécanique vibratoire permettent de dégager deux idées principales :

- L'énergie vibratoire obéit aux règles de propagation des ondes et est donc :
 - **Transmise** à travers l'interface, la surface de contact entre les deux solides.
 - **Réfléchi**e par l'interface, selon la différence de nature des matériaux.
 - **Absorbée** et dissipée dans les matériaux réalisant l'interface.
- L'énergie vibratoire transmise est convertie en mouvement en fonction de trois facteurs :
 - **Amortissement** : L'énergie vibratoire est dissipée en chaleur par frottement visqueux dans un solide "mou" ou un fluide. Cet amortissement est d'autant plus efficace que la vitesse de déplacement est grande, c'est pourquoi il est associé à une suspension, laquelle autorise un débattement, un mouvement relatif des deux corps en liaison. Cependant, sans suspension il existe un amortissement interne dans tous les solides, surtout les moins rigides.
 - **Rigidité** : L'énergie vibratoire traverse un corps rigide en le déformant moins qu'un corps souple, "élastique". Un solide rigide, indéformable, présentera par conséquent une amplitude vibratoire

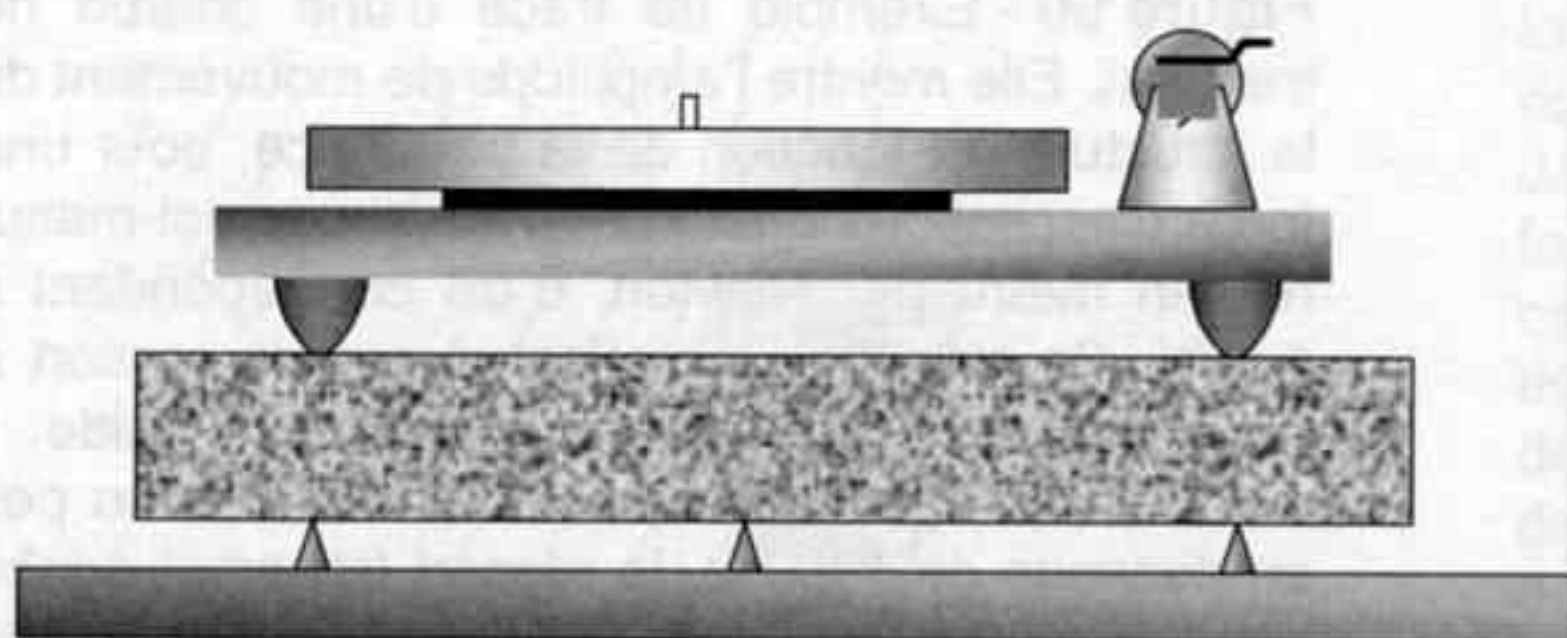


Figure 91 - La platine légère ci-contre, d'environ 6 kg a été équipée de pieds en sorbothane, à très fort amortissement, et posée sur une dalle de granite de 6 cm d'épaisseur d'une masse de plus de 30 kg. Celle-ci est posée sur trois (ou quatre) pointes disposées au droit des pieds caoutchouc, cette disposition ayant été définie par essais successifs. Il est possible de frapper l'étagère, en pin de 2,2 cm, pendant la lecture d'un disque sans provoquer de gong parasite.

moindre que celle d'un solide souple, et sa résonance apparaîtra à une fréquence plus élevée, elle sera plus marquée, mais plus facile à amortir.

- **Masse** : L'énergie vibratoire apportée à un solide lui impose une amplitude de déplacement inversement proportionnelle à sa masse. Un corps lourd vibre donc de manière plus faible, moins ample qu'un corps léger.

La lutte contre les vibrations parasites commence donc par la recherche de moyens permettant de ne pas transmettre les vibrations, en réalisant un découplage efficace. Elle se poursuit en recherchant des moyens de dissiper l'énergie transmise et d'éviter qu'elle ne soit convertie en mouvement avant d'être amortie.

Les moyens de découplage les plus connus sont le ressort, sous toutes ses variantes, et la pointe de... couplage. Tout matériau élastique fait office de ressort, les plus courants étant l'acier et le caoutchouc naturel ou synthétique. Une structure de masse M en kg suspendue par un ressort de raideur K en N/mm présente une résonance, c'est-à-dire une transmission maximale de la vibration, à la fréquence $f = (1/(2\pi)) \cdot \sqrt{K/M}$. En dessous de cette fréquence le couplage est complet, la suspension ne sert donc à rien, et l'appareil est soumis aux mêmes vibrations que son support. Au-dessus de cette fréquence le découplage est effectif, mais la structure suspendue répond à la force transmise par un mouvement dont l'amplitude dépend de la fréquence. C'est la réceptance de la structure, correspondant à sa fonction de transfert, figure 90, qui permet de connaître l'amplitude du mouvement résultant.

Lorsqu'un amortissement est ajouté, l'acuité des pics et des creux de la fonction de transfert est diminuée. La résonance est donc moins marquée, moins franche, et sa fréquence est légèrement plus élevée.

Les ressorts en caoutchouc présentent un amortissement naturel, par la viscosité du matériau. Les ressorts métalliques imposés par les fortes charges demandent un amortissement séparé, par mouvement d'un piston plongeant dans un fluide visqueux. Pour les masses faibles que représentent les appareils audio, une suspension par pieds caoutchouc souples est tout à fait adaptée.

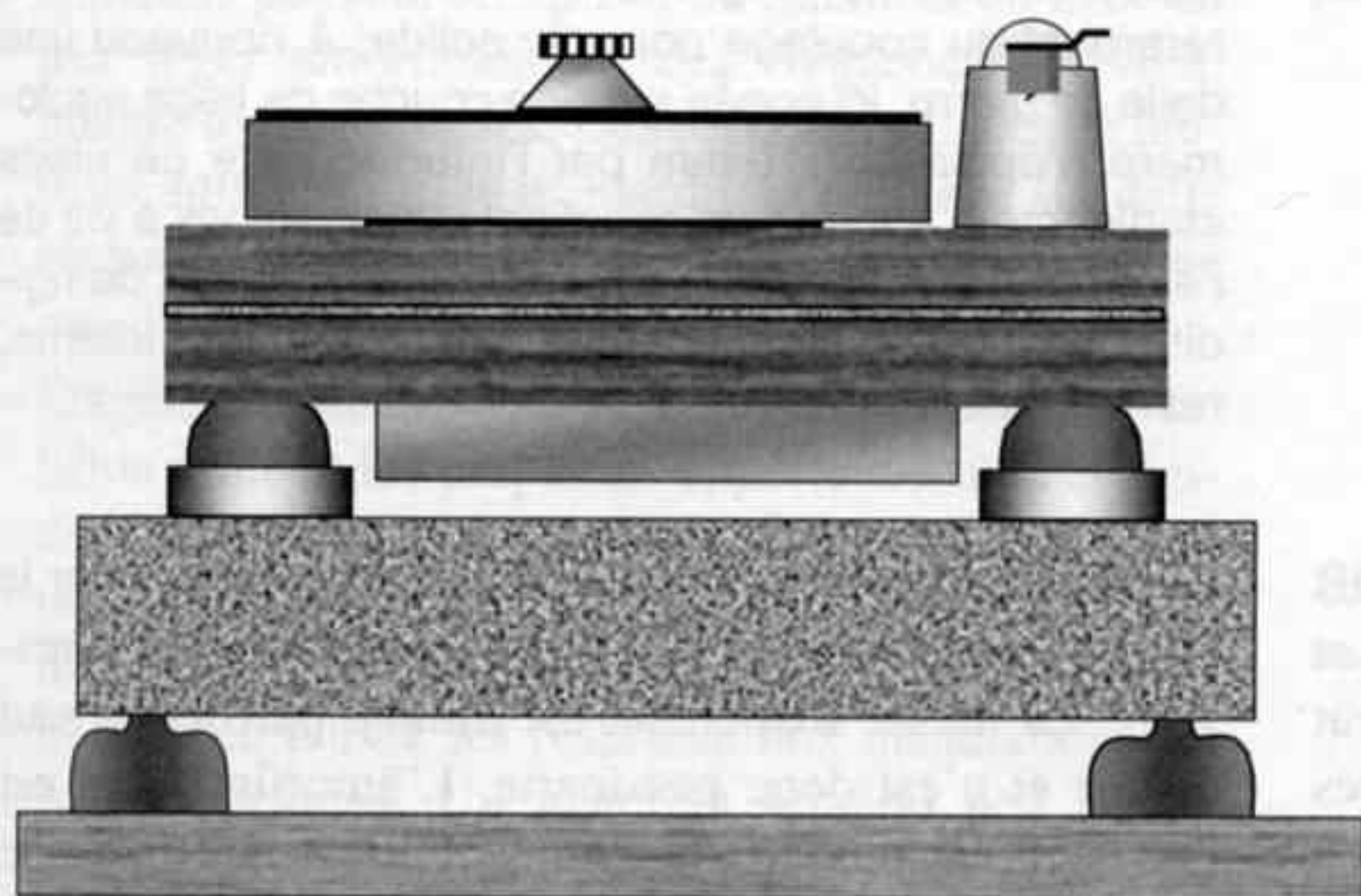
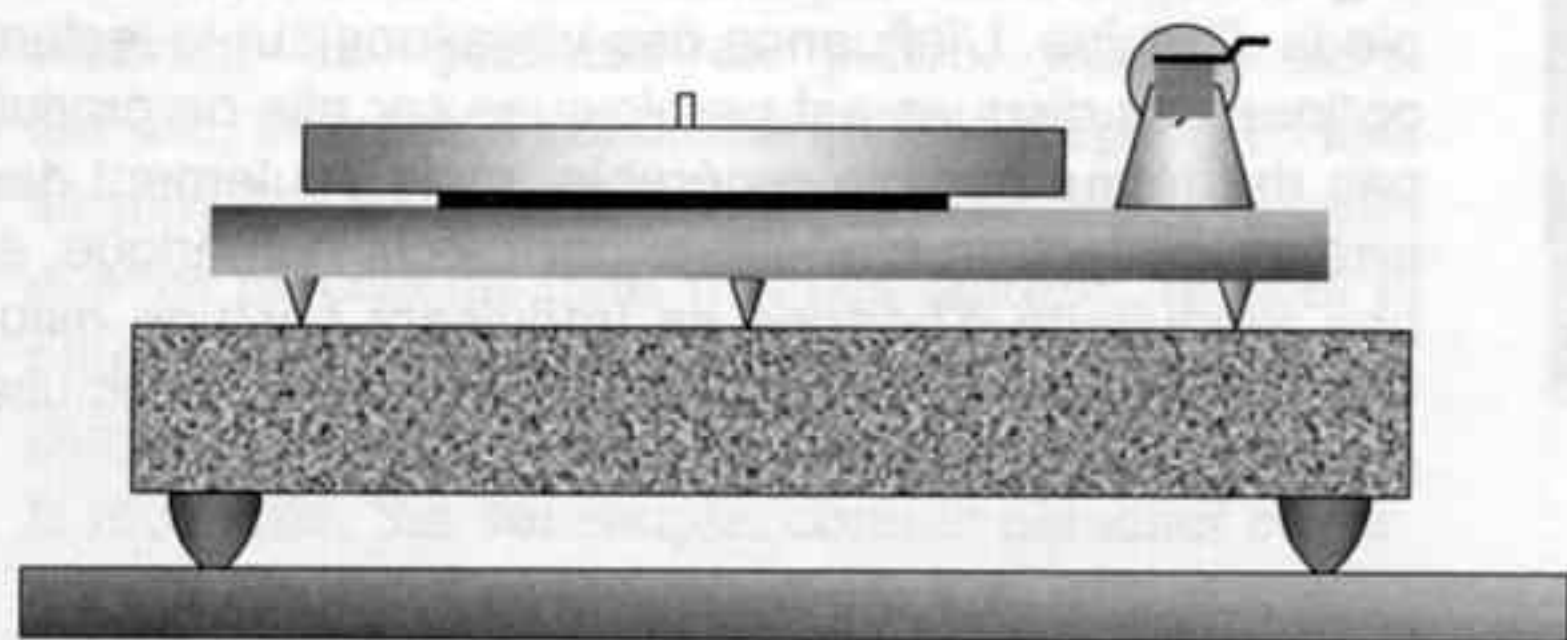
Pour ce qui est des pointes, leur action de découplage tient au fait qu'elles réalisent une interface de surface théoriquement nulle. En pratique, la dureté des matériaux mis en jeu, en particulier celui de la surface d'appui de la pointe, et leur élasticité, font que les surfaces en contact sont localement déformées afin que le contact s'établisse sur une étendue suffisante pour supporter la charge. La pression de contact est néanmoins extrêmement élevée sous la pointe, souvent supérieure à 100 kg/mm^2 . Une telle contrainte très localisée empêche tout mouvement de la surface d'appui en ce point, imposant un nœud de vibration. Le solide support ne peut vibrer que dans les modes où un nœud existe au contact des pointes. Les autres modes vibratoires du support sont bridés, ceci d'autant mieux que les contraintes sont élevées, c'est-à-dire que la masse de l'objet "suspendu" est importante.

Le montage sur pointe réalise donc un couplage, presque parfait aux fréquences basses, et nettement moins bon aux fréquences élevées. Considérer qu'un mauvais couplage réalise un découplage ne me paraît pas pertinent.

La masse des appareils audio est en général insuffisante pour permettre un isolement vibratoire correct, même avec des ressorts très souples, qui sont difficiles à amortir et provoquent des désagréments d'utilisation, tels que des oscillations et des instabilités de l'appareil. Les monter directement sur pointes sur une étagère légère ne résout pas non plus le problème, car c'est alors la masse de l'appareil qui bride les vibrations de l'étagère aux fréquences basses. Les fréquences plus élevées passent tout droit !

Les solutions les plus saines sont de deux types :

- Appareil suspendu, grâce à des pieds souples en caoutchouc faisant office de ressort, figure 91. La raideur des pieds est choisie afin que la fréquence de résonance se situe en deçà de la bande audio, c'est-à-dire en dessous de 16 Hz. Ces pieds reposent sur un support très rigide et massif, afin que l'amplitude vibratoire de ce support reste modérée. Si le meuble ne répond pas à ce critère, une plaque lourde et rigide, en marbre, pierre, fonte, granite, au moins deux à trois fois plus massive que l'appareil, est



interposée entre ce dernier et l'étagère. Quatre pointes disposées entre cette plaque et l'étagère limitent encore la transmission. La position idéale de ces pointes est théoriquement à l'aplomb de chacun des pieds. La quatrième pointe, superflue d'un point de vue mécanique, est indispensable à la stabilité. Les facultés de conformation de l'étagère sont suffisantes pour que la charge se répartisse équitablement sur les quatre pointes, dont l'une peut être réglable par vis.

- Appareil couplé grâce à des pointes ou des pieds durs et rigides à une masse élevée et inerte, elle-même suspendue par rapport au support, figure 92. L'appareil est virtuellement alourdi par son couplage à la masse, et il est alors plus aisé d'obtenir une fréquence de résonance basse. La liaison appareil/pointe doit être absolument rigide, un vissage énergique est de loin la meilleure solution. Si l'appareil possède un fond léger peu épais, il est préférable d'installer des cales en bois dur au quatre coins à l'intérieur du châssis. Les pointes s'y visseront correctement. L'une d'elle doit être réglable en hauteur, puis bloquée. L'amortissement doit se faire en partie dans la masse additionnelle, qui ne devrait pas pré-

Figure 92 - La même platine légère a été équipée de pointes en acier dur, et posée sur une dalle de pierre reconstituée, choisie pour sa rigidité, sa masse et son amortissement interne très élevé, dû à sa structure très hétérogène. Sa masse dépasse 25 kg. Celle-ci est posée sur quatre pieds caoutchouc. Par rapport au cas précédent, la dynamique est nettement plus élevée, et fait ressortir des défauts d'équilibre tonal, surtout sur les fortes. La platine elle-même semble manquer de rigidité.

Figure 93 - Cette platine artisanale possède un bâti en multiplis de hêtre, en 2 couches de 30 mm séparées par du liège de 4 mm. Une masse additionnelle en acier, fixée en dessous, porte le total à environ 30 kg. La suspension fait appel à 4 pieds spéciaux utilisés en laboratoire, contenant un ressort conique et un piston plongeant dans un gel de silicone, le tout contenu dans une enveloppe élastomère. La fréquence de résonance est de 8 Hz. Le support est une dalle de pierre reconstituée, comme ci-dessus, mais d'une masse de 40 kg environ, suspendue sur des pieds caoutchouc avec une fréquence de résonance de 5 Hz. La terre peut trembler ! Le plateau de 8 kg en aluminium rempli de mortier est équipé d'un couvre-plateau concave en plexiglass collé, et d'un palet presseur, ce qui assure un couplage parfait du disque avec la masse inerte.

senter de résonance propre, car celle-ci serait transmise à l'appareil qui lui est couplé ! Les pierres dures, le marbre, le verre sont donc à éviter.

La solution la plus intéressante est évidemment celle de l'appareil très massif, rigide, avec un amortissement interne élevé, et aucune partie mince susceptible d'entrer en vibration. Les pièces constitutives doivent être massives, pleines, sans aucune cavité interne, et en matériau à la fois dense, rigide et inerte, comme par exemple le multiplis de hêtre, ou encore des sandwichs métal/bois. Le châssis est plein, sans espace vide. Un tel appareil monté sur suspension souple est déjà très bien abrité des perturbations vibratoires, de par sa masse et sa rigidité. Un amortissement des suspensions est cependant indispensable pour éviter la remontée de hautes fréquences par les ressorts. À cause de cet amortissement, le découplage basse fréquence n'est plus parfait, et seul le montage sur une base lourde elle-même suspendue, mais avec une fréquence de résonance différente, amène à un isolement vibratoire exceptionnel. Le couplage intime du disque avec le plateau est étudié au chapitre "sources".

Une platine réalisée sur ces principes, figure 93, a subi avec succès le test suivant : diamant en contact avec un disque à l'arrêt donc sans signal, le réglage de volume

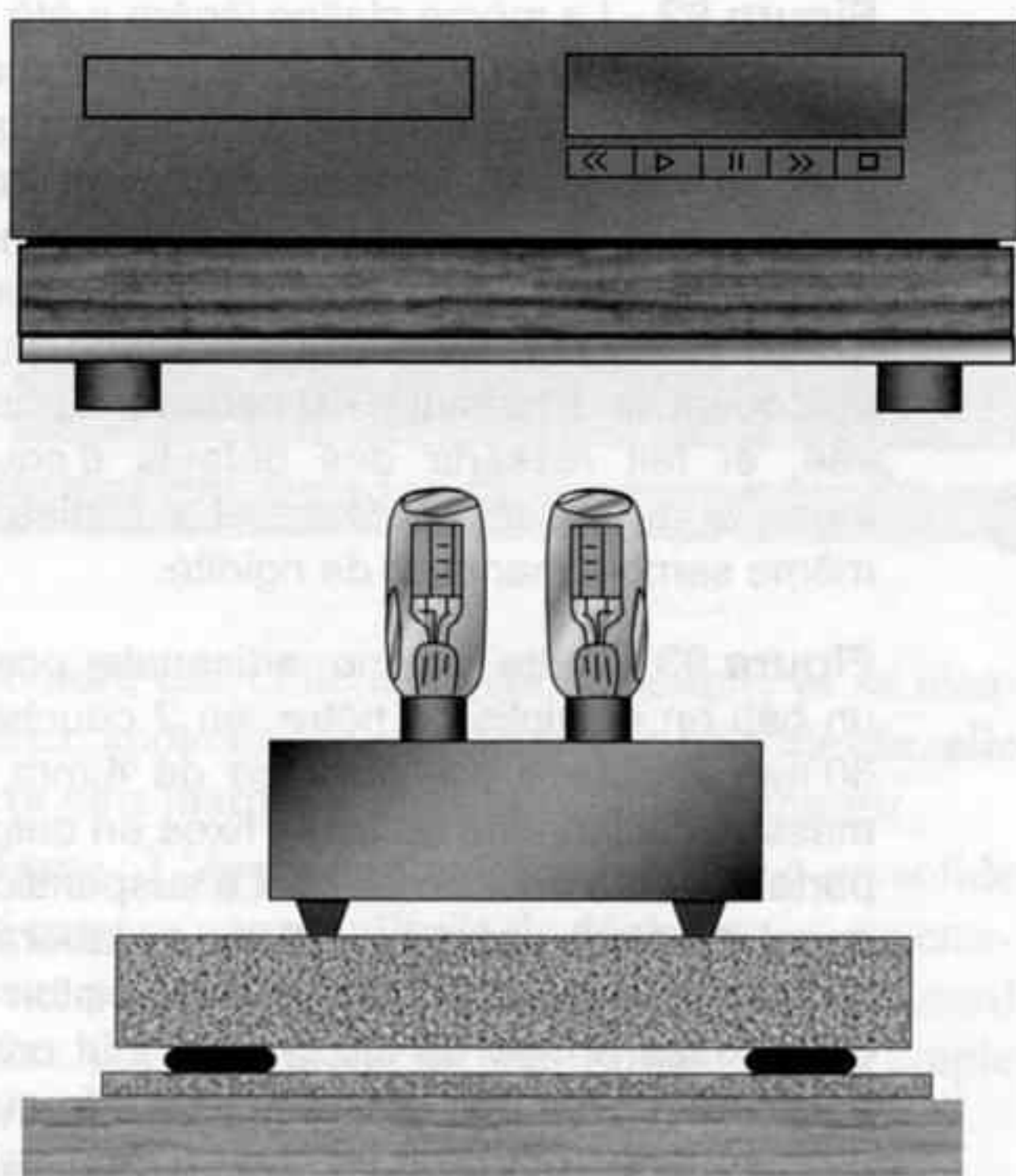


Figure 94 - Le lecteur de CD ci-contre, a perdu ses pieds d'origine. L'influence des vibrations sur la lecture optique des disques est pernicieuse car elle ne produit pas de défaut audible repérable, mais seulement des erreurs de lecture corrigibles par calcul numérique, et une irrégularité d'horloge se traduisant par une mauvaise restitution de la dimension temporelle, avec une sonorité scintillante.

Figure 95 - Les appareils à tubes gagnent à être installés eux aussi sur des supports massifs découplés du mobilier. Les moyens mis en œuvre à l'intérieur de l'appareil ne le protègent que du couplage aérien, et rarement du couplage par voie solide. À nouveau une dalle de pierre, ici posée sur une couche de liège aggloméré d'épaisseur 10 mm par l'intermédiaire de pieds stabidômes, apporte un excellent isolement vis à vis de l'étagère. La masse de l'appareil et les qualités de rigidité des tubes, autant le bulbe que la structure interne, restent des paramètres essentiels.

étant à fond ce qui représente un gain total de 113 dB à 50 Hz entre la cellule de lecture (Denon DL 103) et la sortie de l'amplificateur, haut-parleurs à très haut rendement de 104 dB/1W à 1 m. Des chocs modérés sur l'étagère n'entraînent aucun son audible même à proximité des haut-parleurs, des chocs soutenus sont nécessaires pour produire un "boum" retenu et feutré.

Cet exemple montre un cas extrême, où la sensibilité microphonique est telle que des moyens décisifs sont requis. Ces moyens sont la plupart du temps peu onéreux, les dalles de pierre reconstituée étant disponibles dans les grandes surfaces de bricolage, les pieds caoutchouc pouvant se trouver en VPC chez divers fournisseurs comme Radiospares.

Pour les plus bricoleurs, fabriquer un bâti constitué d'une plaque d'aluminium d'épaisseur 10 mm ou plus, vissée et collée sur une base en multiplis de hêtre de 25 à 40 mm est un jeu d'enfant. Ce bâti, figure 94, fixé sous un appareil en intercalant une couche permettant un bon couplage, comme une feutrine adhésive ou une épaisse couche de cire dure, permet d'augmenter à la fois la masse, la rigidité et l'amortissement. Quatre pieds caoutchouc complète une excellente isolation.

La suspension de la mécanique de lecture interne a pour rôle de protéger l'appareil contre les chocs, qui pourraient générer un décrochage de la lecture, passager ou définitif, désagréable à coup sûr. Ce saut entraîne un affolement des circuits d'asservissement, de suivi de piste d'une part, ce qui provoque des aller-retour rapide de la tête de lecture, et de focus d'autre part, ce qui provoque un déplacement vertical de la lentille pouvant aller jusqu'au contact avec le disque

en rotation. Les dégâts, pour le lecteur comme pour le disque, sont évités par le montage antichoc sur ressorts. La masse suspendue est limitée parfois au seul disque et n'est donc pas inerte. L'amortissement est inexistant la plupart du temps. Cette suspension de protection n'a rien d'antivibratoire. Des détails de conception et d'amélioration anti-vibratoire sortant du cadre de la simple mise en œuvre sont donnés au chapitre "sources", tome 2.

Pour améliorer ce découplage, la liaison sol/mobilier support doit également être étudiée. Trois solutions de support sont envisageables, dans lesquels les différents appareils ne doivent pas être empilés, chacun d'eux reposant alors sur une étagère distincte (seules les sources auxiliaires comme tuner ou magnétophone tolèrent l'empilement):

- Meuble en **bois**, constitué de plateaux assez épais, 18 à 27 mm selon la masse des appareils. Une essence de bois pas trop raide et assez inerte est préférable. Les planchettes en lamelles de pin collées présentent une très bonne rigidité, supérieure à celle du bois massif, et un amortissement interne élevé, par les discontinuités des multiples collages. Le multiplis de hêtre est excellent également. Bannir toute paroi verticale, seuls des poteaux rigides relient les plateaux entre eux. Ce type de meuble est malgré tout peu rigide, peu massif mais bien amorti. Les appareils doivent par conséquent être posés sur des supports massifs et rigides en pierre par exemple, découplés par feutre, liège, pieds caoutchouc etc. (figure 95). Le meuble lui-même doit être découplé du sol par des patins de feutre ou des silent-blocs.

- Meuble à structure **métallique** soudée ou vissée, recevant des plateaux en pierre, marbre, lave, ardoise, ou verre à condition qu'il soit épais, 10 mm au moins. Ces meubles sont plus rigides et massifs que les précédents mais très peu amortis. Ils sont la plupart du temps équipés de pointes permettant un couplage avec un sol rigide, chape ou dalle, à travers la moquette. Sur sol souple, comme plancher et parquet, les pointes ne devraient pas être utilisées mais remplacées par des caoutchoucs. Un essai comparatif est conseillé, les résultats étant liés à la raideur et aux modes vibratoires du sol. Sur ces supports les appareils peuvent être posés directement ou avec un très léger amortissement des fréquences élevées, malgré tout transmises. Des rondelles minces de feutrine suffisent. Rien n'interdit un montage sur dalle suspendue, mais son utilité n'est pas décisive dans ce cas.

- Étagères réalisées en **pierre** ou maçonnerie. Le béton armé et les parpaings apportent masse et rigidité mais aucun amortissement. Les parpaings creux remplis de sable sont sans doute la solution la plus inerte que l'on puisse imaginer, la masse, le volume, la mise en œuvre les réservent aux installations les plus exigeantes. Un matériau minéral peu dense, poreux et granuleux, genre pierre volcanique ou pierre du Gard, utilisée pour les entourages de cheminée, présente des pertes internes importantes le rendant assez inerte aux vibrations et adapté à la réalisation de meubles supports. Le béton cellulaire, les carreaux de plâtre et la brique ne présentent que peu d'intérêt pour cette application.

Enfin les appareils eux-mêmes reçoivent sur leur châssis, principalement le fond et le capot qui sont de grandes surfaces planes, mais aussi les parois frontales et latérales des enceintes, une énergie vibratoire non négligeable, qui se transmet aux éléments internes. Des découplages, des amortissements, et des masses additionnelles peuvent être ajoutés aux endroits stratégiques :

- Double fond massif pour le châssis, voir le lecteur de CD plus haut. Le couplage d'une pièce mince, peu massive et peu rigide telle qu'une tôle de châssis, avec une autre pièce massive, est souvent assez mauvais. Le contact de la pièce mince ne s'effectue qu'en quelques points épars, variants avec les modes de vibrations. Ces contacts erratiques génèrent des "mirlitons" audibles. Le vissage, indispensable, en augmentant la rigidité de la liaison ne fait que remonter ces bruits à des fréquences plus élevées. Un excellent couplage est établi par un médium capable de se conformer aux rugosités et adhérent aux surfaces, mais sans élasticité car il y aurait alors découplage. L'adhésif double-face ne convient donc

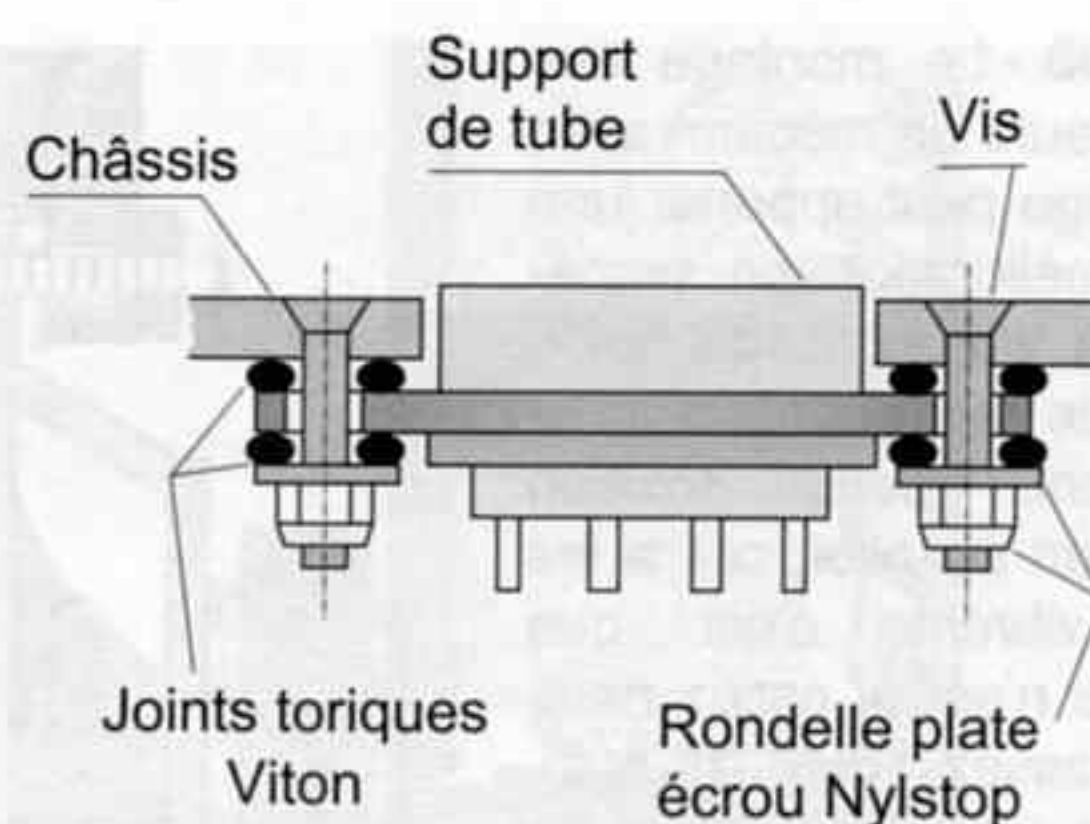


Figure 96 - Montage souple d'un support de tube, avec joints toriques haute température.

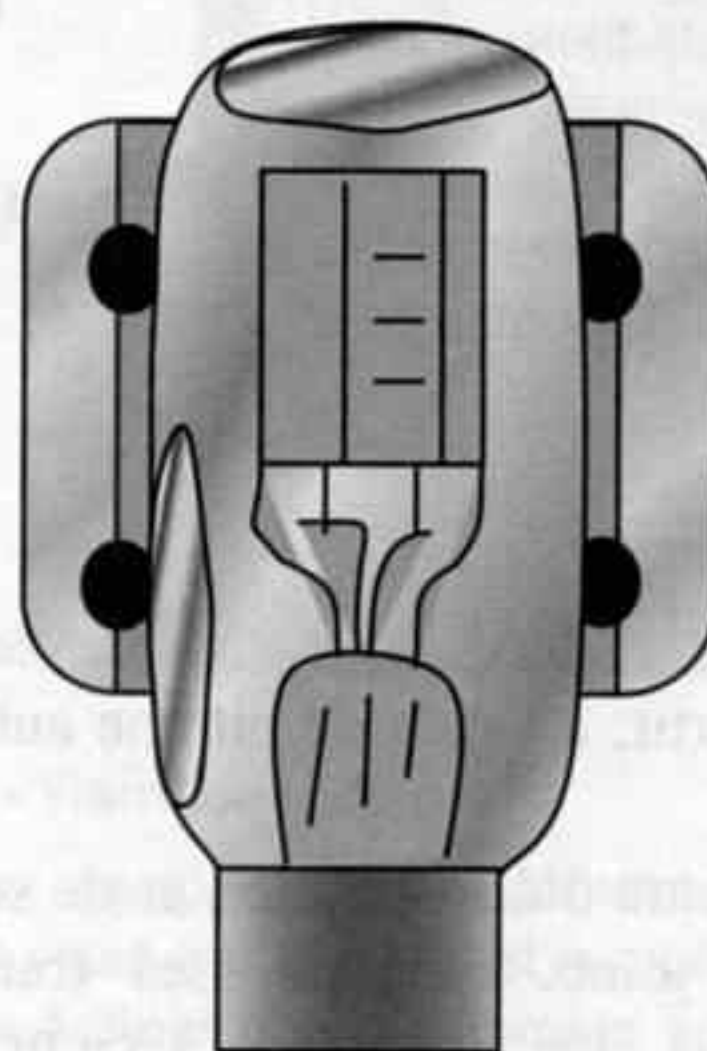


Figure 97 - La douille amortisseur anti-microphonie est ici vue en coupe afin de mieux faire apparaître sa construction interne : 2 joints toriques insérés dans des gorges exercent une pression tout autour du bulbe, réalisant le couplage du tube avec la bagde de cuivre, dont la masse est plus de dix fois celle du tube.

pas. Une colle cyanoacrylate en couche très mince peut convenir, mais empêche tout démontage. Une feutrine fine autocollante, ou mieux une cire naturelle sont nettement préférables. Une enceinte acoustique dont l'ébénisterie est trop légère, moins de 30 kg environ, gagne à recevoir un double fond creux rempli de sable fin et sec bien tassé. Ce point sera détaillé plus loin.

- Capot amorti intérieurement par une couche de bitume autocollant. Le rigidifier entraîne le décalage de sa fréquence de résonance vers le haut, avec le risque qu'elle soit alors mieux transmise par les fixations du capot au châssis. Il est préférable de seulement l'amortir, éventuellement de le découpler en interposant des rondelles caoutchouc entre les tôles, si cela est possible. Les panneaux d'ébénisterie des enceintes actuelles sont en général bien amortis, mais pas assez rigides. En les rigidifiant par un tasseau collé et vissé, ou mieux une cornière, les fré-

Figure 98 - Le montage des haut-parleurs de médium avec découplage peut apporter une petite amélioration en empêchant les vibrations du baffle support de perturber leur fonctionnement. Cette solution n'est qu'un pis-aller, car si les parois vibrent, c'est que l'enceinte n'est ni assez massive, ni assez rigide, ni suffisamment amortie ! Le joint de découplage, ici en feutre de 5 mm, ne sert absolument à rien si les vis ne sont pas elles aussi montées souples sur rondelles élastomères, sans aucun contact avec l'ébénisterie, ce qui oblige à repercer les trous de fixation à un diamètre supérieur.

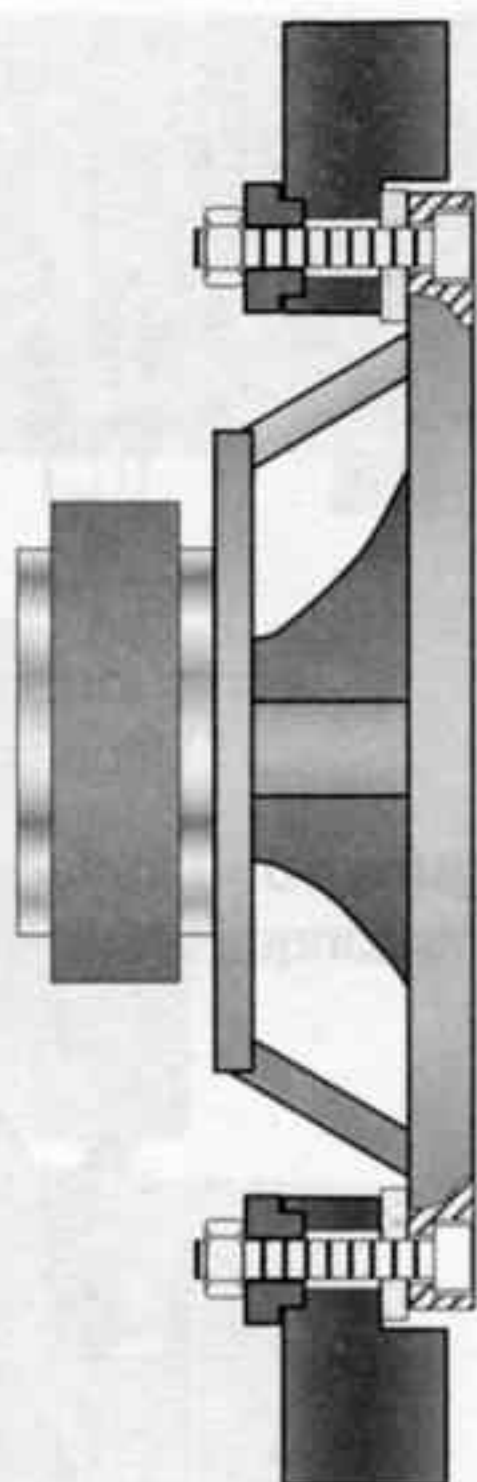
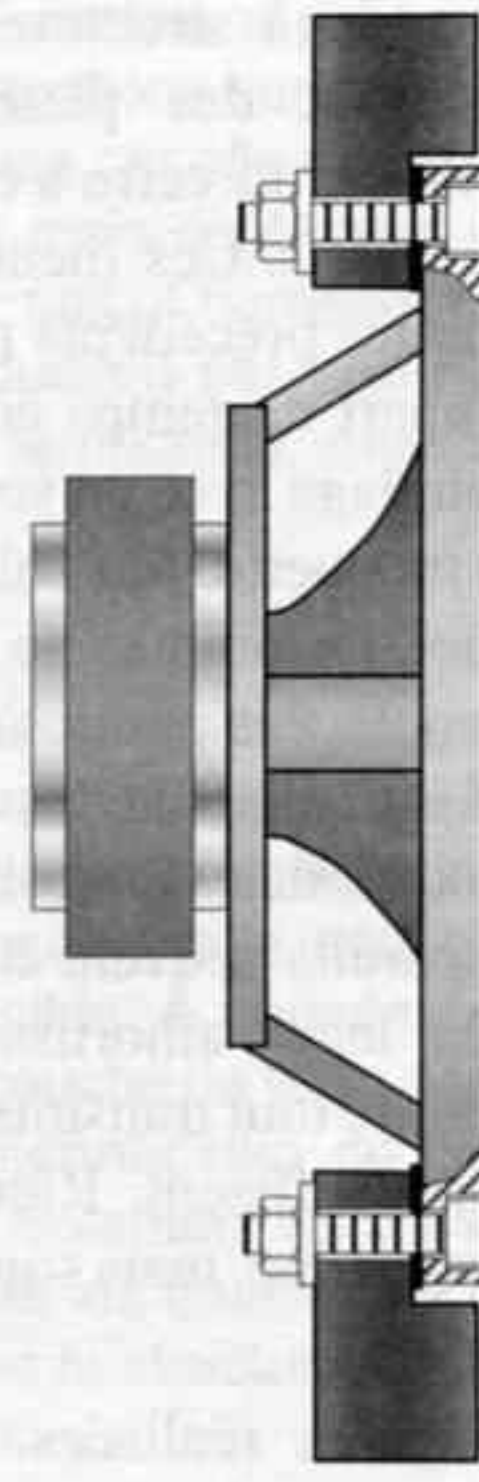


Figure 99 - Le montage rigide des haut-parleurs avec joint mince réalise un couplage d'autant plus complet que le châssis est rigide et le serrage efficace. Les petits haut-parleur jusqu'à 20 cm peuvent se contenter de 4 vis, au-delà 6 ou 8 vis sont requises. Leur filetage ne doit pas prendre dans le bois, mais dans des écrous métalliques insérés, ou à défaut des écrous freinés genre Nylstop appuyés sur rondelles. Si l'enceinte est correctement conçue, sans économie de poids ni de matériau amortissant les parois, cette solution est nettement préférable. Seul le haut-parleur d'aigu gagne parfois à être découplé.



quences de résonances sont plus élevées mais plus aisées à amortir, à l'aide de bitume autocollant par exemple.

- Transformateurs d'alimentation et de sortie montés souples sur joints toriques. Les transformateurs devraient tous être imprégnés à cœur pour éviter toute vibration des spires. Les transformateurs de sortie des amplificateurs à tubes sont généralement moulés dans une résine époxy, parfois dans une cire Microwax. Si ce n'est pas le cas, prévoir un boîtier aluminium dans lequel le transformateur sera posé sur caoutchoucs avant la coulée d'une cire, de préférence à chaud. Une fermeture par une couche de résine époxy ou polyester évite les fuites de cire.
- Les condensateurs chimiques gagnent à recevoir plusieurs couches de gaine thermorétractable, quand leur taille le permet. Les plus gros peuvent être inclus dans des tubes de métal assez épais et non magnétiques, aluminium par exemple, ou de bois, avec également une résine ou une cire qui assure une liaison totale entre le composant et son nouveau boîtier. Malgré ces précautions, un mauvais condensateur chimique reste assez médiocre si les armatures internes manquent de rigidité, ou si le diélectrique présente un effet de mémoire. Les meilleurs chimiques ont une construction interne anti-vibratoire, par exemple ELNA Cérafine, dont le diélectrique est dopé à la poudre de céramique, Black-Gate, dopé à la poudre de carbone, et d'autres spécialement étudiés pour l'audio, avec des séparateurs en papier spécial, ou en soie pour les ELNA Silmic, des armatures épaisses plus rigides, et des nervures embossées sur le boîtier.

- Les circuits imprimés montés sur entretoises reçoivent les vibrations par leur liaisons vissées. Le plus efficace est de les dévisser et d'intercaler des silent-blocs souples collés aux entretoises et sur lesquels le circuit est simplement posé, à la rigueur maintenu par quelques points de colle thermofusible. Des clapets de plomberie en élastomère diamètre 5 ou 6 mm sont très efficaces. La solution du circuit suspendu par élastiques est dangereuse et vieillit mal. Les câbles reliés à ces circuits ne doivent pas être tendus mais au contraire former une boucle ou une spire.
- Les tubes doivent être doublement protégés, au niveau de leur embase qui doit être suspendue simplement par rondelles élastomère haute température, et au niveau de leur bulbe, qui peut recevoir un amortissement par anneau adhésif, gaine thermorétractable, ressort métal circulaire muni de plots téflon, ou encore mieux, pièce tubulaire en laiton massif (amagnétique) munie intérieurement de deux joints toriques haute température venant prendre appui sur le bulbe. De tels accessoires sont disponibles dans le commerce (figures 96-97).

Les haut-parleurs de médium et d'aigu subissent directement les vibrations induites dans la face avant de l'enceinte par les déplacements du haut-parleur grave. Pour les protéger, un montage découplé est possible bien que moyennement efficace. Un joint en liège expansé épais de 5 ou 6 mm, ou en mousse adhésive, en feutre, non comprimé par le serrage, peut améliorer la netteté dans le haut du spectre, figure 98, mais peut aussi diminuer la dynamique apparente en rendant les attaques de notes plus molles, le châssis du haut-parleur découplé n'étant plus une référence mécanique

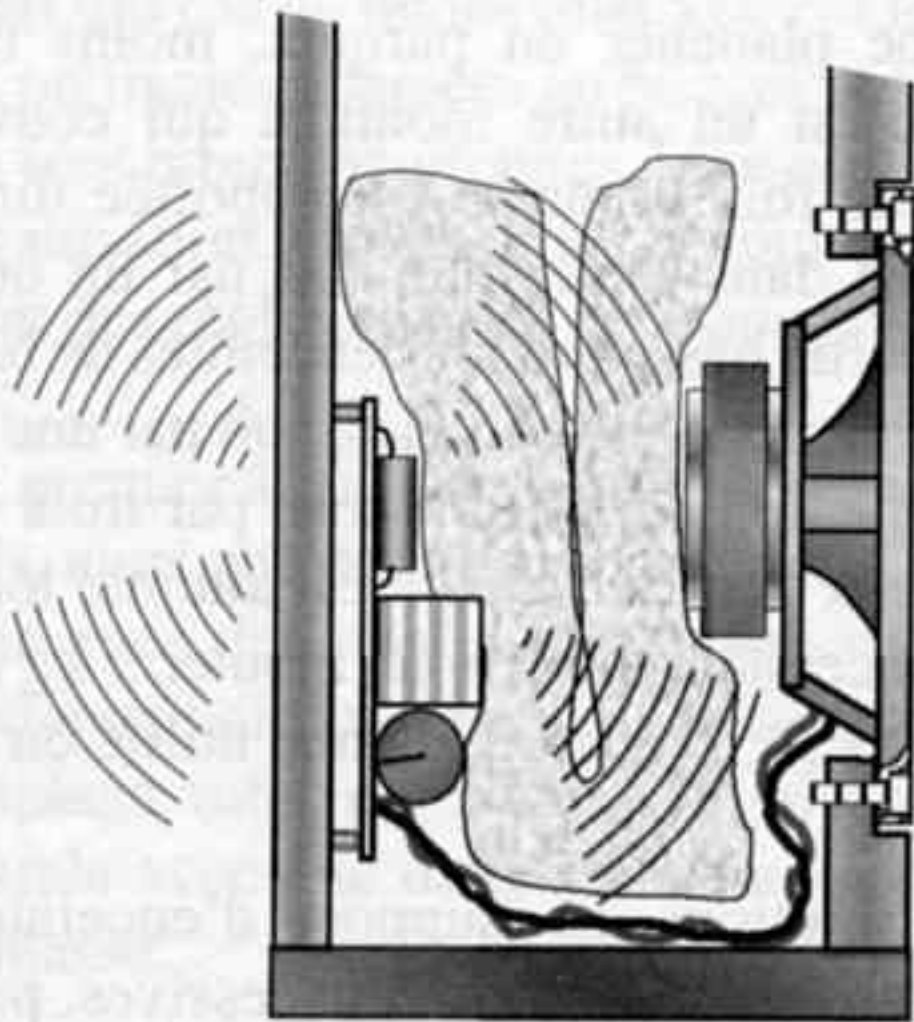


Figure 100 - Solution courante :

Le filtre séparateur monté directement et rigidement dans l'enceinte, contre la paroi dorsale, celle qui vibre le plus fortement, est alors soumis à d'intenses vibrations. (L'absorbant interne n'amortit que le volume d'air mais pas les parois) Il subit de plus les champs magnétiques de fuite des haut-parleurs.

stable, fixée rigidement à une masse élevée. Un essai est donc conseillé. Un joint mince a l'effet inverse, qu'il soit en feutrine, en carton, en élastomère, sa faible épaisseur et son absence d'élasticité une fois comprimé par le vissage, apportent un couplage avec l'ébénisterie, figure 99. La seule solution vraiment efficace est de monter rigidement les haut-parleurs de médium et d'aigu dans des caisses séparées, massives, rigides et bien amorties, découplées avec silent-blocs par rapport au caisson de grave. Ces points seront vus en détail au prochain chapitre.

- Les composants du filtre séparateur intégré à l'enceinte, figure 100, sont soumis aux mêmes règles que leurs homologues logés dans un appareil électronique. Le support doit être suspendu, les composants amortis. Des composants de même valeur mais non

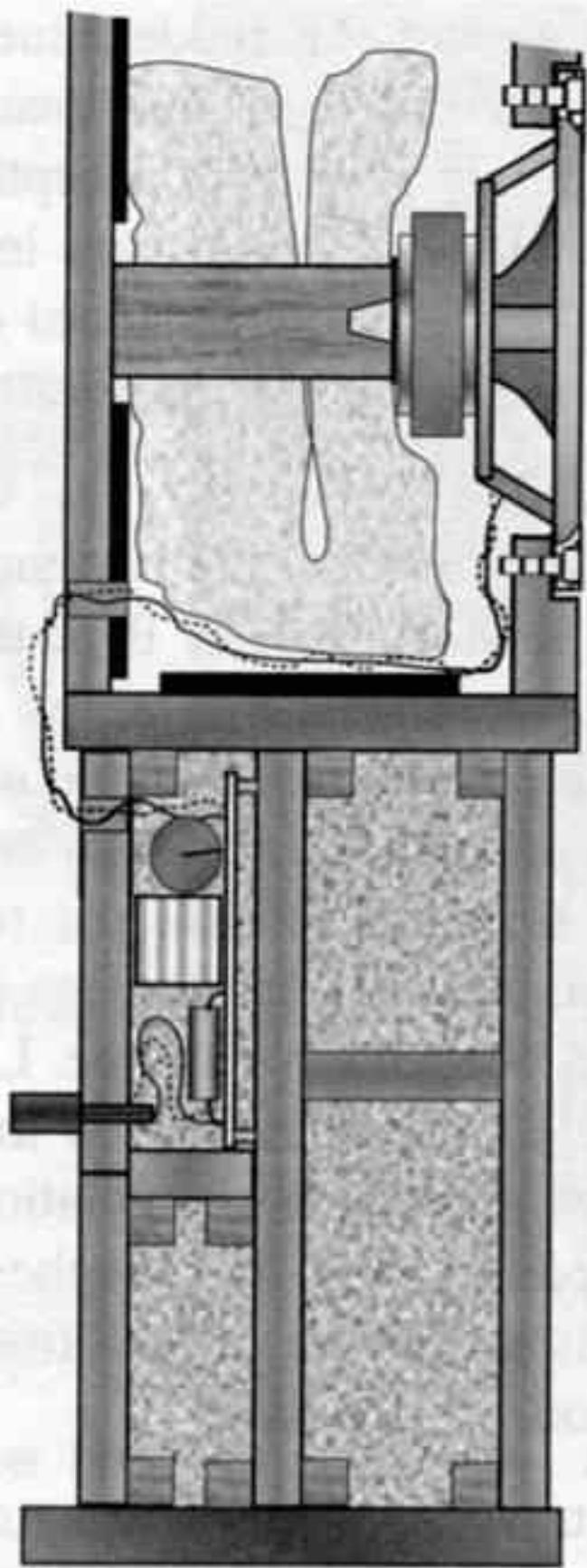


Figure 101 - Remède radical :

L'enceinte est équipée d'un piétement rigide, directement collé et vissé sur le fond, et rempli de sable. Des tasseaux empêchent son gonflement sous la pression du sable, dont la masse atteint 45 kg. Un compartiment est aménagé pour recevoir le filtre, lui aussi noyé dans le sable. Un panneau amovible, équipé du bornier de raccordement et d'un joint étanche permet une intervention. La face dorsale de l'enceinte étant libérée, un chevron de bois dur assure la rigidité en couplant le châssis du haut-parleur grave à l'ébénisterie. Le contact intime avec le métal du haut-parleur est assuré par une couronne de feutrine mince autocollante, l'orifice de décompression arrière du haut-parleur étant laissé libre.

microphoniques apportent souvent une amélioration nette dans les aigus. La solution du filtre entièrement noyé dans une résine coulée est intéressante d'un point de vue vibratoire, ainsi que pour la protection d'un brevet ou d'un schéma particulier que le constructeur ne souhaite pas dévoiler. Elle rend impossible toute amélioration par échange des composants ou re-câblage. Je lui préfère un montage en "bac à sable", démontable et apportant une masse inerte, figure 101.

Supports d'enceintes

Les supports d'enceintes acoustiques posent un problème particulier : une enceinte digne de ce nom est par essence massive, rigide et amortie et n'a besoin de... rien. Malheureusement, la place disponible dans

les habitats modernes et la mode actuelle de miniaturisation qui en découle, font que beaucoup hésiteront encore longtemps avant d'accepter cette vérité simple : s'il était possible de faire le son d'un piano avec quelque chose de moins lourd qu'un piano, les facteurs de piano le feraient, ne serait-ce que pour des raisons de transport.

Aussi, avant que la mode ne revienne aux enceintes normales, de taille humaine, il reste à améliorer le comportement de nos petites boîtes. Trop légères, le couplage intime à une masse inerte est indispensable. Trois pointes couplant l'enceinte à un piétement massif et rigide, lui-même couplé par trois pointes à la dalle de béton, c'est le seul montage capable de simuler une masse virtuelle mécanique. Le piétement doit être rigide, d'où sa réalisation en métal, souvent en tubes d'acier soudés, avec triangulation, figure 102. Le remplissage par du sable de ces tubes les rend inertes et évite qu'ils ne résonnent aux fréquences élevées, donnant un son... métallique.

Les pointes traversent une moquette sans laisser de trace, et s'appuient directement sur la chape en ciment. Si le revêtement de sol est un parquet ou des carrelages, sa liaison à la chape joue un rôle important. Pour éviter la transmission des bruits d'impact, une sous-couche absorbante est souvent disposée entre dalle et revêtement, créant un découplage partiel. Selon la raideur de cette sous-couche, les résultats sont très variables. Un essai comparatif est conseillé, avec pointes et plaquettes d'appui, ou sans pointes, avec pieds élastiques.

Ces pointes disponibles par quatre en kit, vivement conseillées à leur apparition sur le marché, sont devenues sujet à controverse, car elles ont été souvent mal utilisées. Elles ne fonctionnent qu'en liaison avec une masse inerte, avec laquelle elles assurent un couplage. L'appellation pointes de découplage est erronée, et source de malentendus. D'autre part, une liaison correcte demande trois pointes ni plus ni moins, disposées sur un triangle le plus large possible. Une quatrième pointe permettant d'élargir la surface d'appui, rectangulaire cette fois, donne une meilleure assise, plus stable, mais dans cette configuration l'une des pointes supporte une pression de contact plus faible que les trois autres, parfois même nulle ! Ce contact erratique peut dépendre de la température, de l'humidité de l'air, de la souplesse du sol, et de la position exacte du pot de fleur posé sur l'enceinte... Les bruits générés par ce mauvais contact mécanique sont à l'origine des opinions négatives parfois entendues. Le pire est atteint lorsque quatre pointes sont disposées sous une enceinte colonne de 10 kg et portent directement sur un plancher suspendu peu rigide.

Si la stabilité apportée par trois pointes s'avère insuffisante, deux pieds caoutchouc assez durs disposés aux coins empêchent le basculement sans dégrader le couplage.

Sur sol de type plancher ou parquet, moins rigide qu'une dalle, c'est un autre montage qui convient, figure 103. Cette fois la masse est apportée directement ou presque dans l'enceinte, soit par un double fond sablé, en partie basse pour les enceintes de bibliothèque, ou dorsale pour les colonnes, soit par une dalle massive sur laquelle l'enceinte repose par trois pointes. Dans les deux cas, l'efficacité est atteinte lorsque la masse de l'enceinte a quadruplé, ajouter 5 kg à une enceinte qui en pèse 15 n'est d'aucune utilité ou presque.

Ces diverses solutions de support d'enceintes et d'appareils paraissent très souvent excessives, parfois exagérées et démesurées... jusqu'à ce que l'expérimentation démontre sans aucune équivoque le bien fondé de cette approche. Les commentaires sur le gigantisme ou l'esthétique sont parfois acerbes, les jugements relatifs aux facultés mentales de l'audiophile souvent désobligeants. Comment ose-t-on prétendre, avec deux sacs de sables, faire mieux qu'une équipe complète d'ingénieurs ?

Il suffit pourtant d'admettre que l'industriel adapte son produit au marché et non aux phénomènes physiques, et que ses contraintes de transport sont énormes, en particulier si la production est délocalisée. L'équipe des concepteurs a recherché le meilleur résultat possible pour un coût, un poids, un encombrement imposés. L'utilisateur peut aisément dépasser ces limitations par une mise en œuvre optimisée.

L'importance des vibrations parasites, tout comme celle du local, n'est pas sujette au débat d'opinions personnelles, ou de modes passagères, il s'agit d'une évidence physique, qui n'a d'ailleurs aucunement besoin d'un modèle mathématique pour être justifiée. Je crois utile de rappeler à ce sujet que c'est le modèle mathématique qui a besoin de faire ses preuves, pas la réalité physique du monde qui nous entoure.

Des essais très simples peuvent être effectués, même par les moins bricoleurs. Avec quelques briques pleines empilées, quelques feuilles de liège et un kit de pointes, un piétement provisoire sera expérimenté, pour une dépense modique. Il n'y aura malheureusement aucun espoir de progresser vers un réalisme sonore si les enceintes doivent se cacher, disparaître à la vue par une taille ridicule, se blottir derrière les fauteuils ou au fond d'une bibliothèque.

Le choix de la recherche d'un plus grand plaisir musical doit être assumé complètement, et les implications qui en découlent doivent être acceptées. Prétendre

améliorer son système sans traiter l'acoustique du local, sans s'attarder à la mise en œuvre du matériel avec des supports dignes de ce nom, relève de l'utopie. Cette chasse aux vibrations parasite demande dans la plupart des cas un temps relativement long, et les solutions optimales adaptées au budget et à la place disponible sont rarement atteintes, bien souvent par manque d'organisation. Les priorités découlent pourtant directement des règles simples de propagation décrites plus haut :

- En premier lieu, **augmenter les masses** des appareils, ainsi que des meubles supports, autant que possible avec des matériaux denses, rigides et inertes, facilement disponibles et de mise en œuvre aisée. Le couplage total par pointes d'un appareil ou d'un meuble avec une dalle réalise une augmentation de sa masse.
- Ensuite il devient possible de **suspendre** efficacement ces masses, c'est-à-dire de les découpler, sur des ressorts souples, efficaces dans toutes les directions, afin d'obtenir une fréquence de résonance basse. Des pieds caoutchouc existent avec une grande variété de formes (Radiospares).
- Il est alors possible d'**amortir** facilement les vibrations résiduelles de fréquence élevée, à la fois par les pertes internes dans les matériaux du support et des pieds, ainsi que des revêtements amortissant.

Ce n'est qu'après élimination des vibrations transmises par voie solide que le traitement des perturbations par voie aérienne peut commencer, si cela s'avère nécessaire.

- Là aussi il convient d'**augmenter la masse** du composant ou de l'organe récepteur des vibrations, en le couplant le plus totalement possible à une pièce lourde, rigide et inerte.
- Il est nécessaire ensuite de **suspendre** soigneusement les composants les plus sensibles comme les tubes, les circuits imprimés, mais aussi les plus perturbants comme les transformateurs d'alimentation.
- Il reste à **amortir** par des produits à pertes internes élevées les composants qui le réclament. Le changement de certains composants pour des versions moins microphoniques peut être alors envisagé.

Ces trois dernières interventions nécessitent l'ouverture de l'appareil concerné, et sont parfois irréversibles. Des essais, après expiration de la garantie légale, et en gardant la possibilité de revenir en arrière sont vivement conseillés, certains remèdes à priori intéressants s'avérant défavorables à l'usage.

Il est tout à fait inutile de changer par exemple un tube d'entrée type ECC 83 de fabrication récente, pour une version ancienne – aussi réputée que ruineuse – choisie pour sa faible microphonie, si l'amplificateur concerné

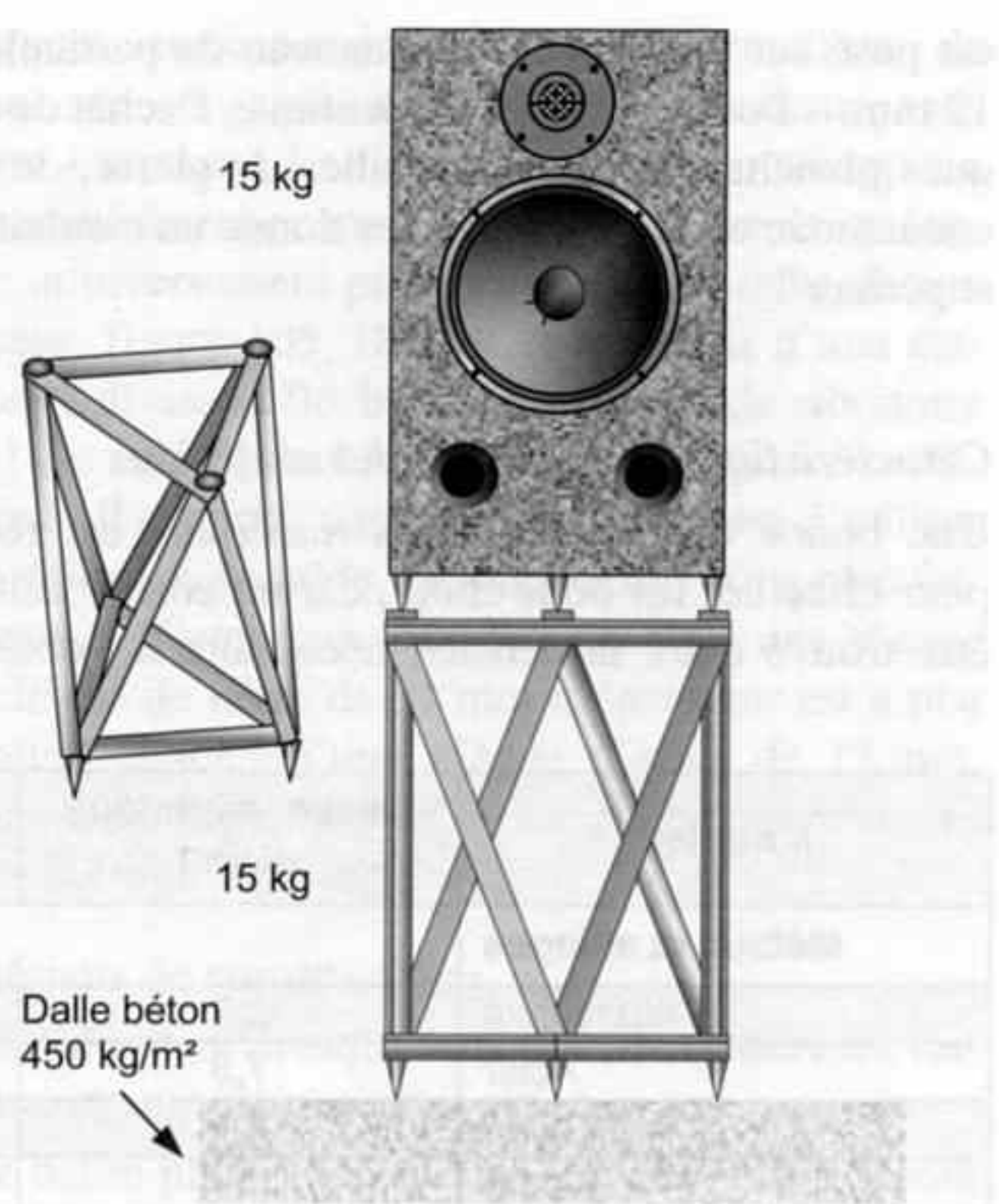


Figure 102 - Une enceinte légère est couplée à la dalle béton par un piétement rigide en tubes d'acier soudés, triangulés et remplis de sable fin. Trois pointes reposant dans des crapaudines assurent la liaison ébénisterie/pied. Trois autres pointes lient l'ensemble à la masse de la dalle.

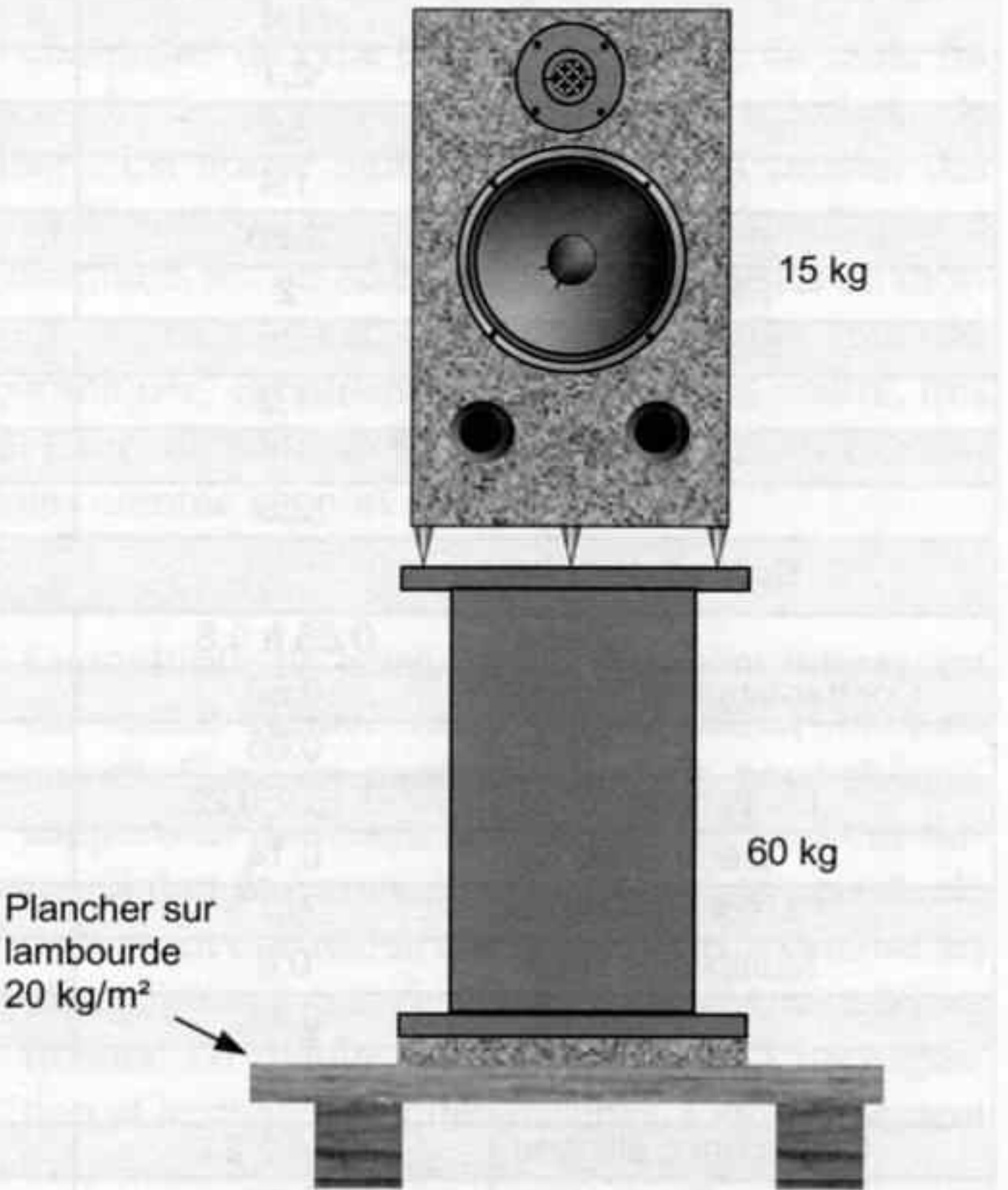


Figure 103 - Ici l'enceinte est couplée par trois pointes à la masse mécanique inerte de son piétement, réalisé avec deux plaques métalliques rigides, reliées par soudage ou cimentées à un tube rempli de sable fin. Ce tube peut être rond ou carré, fait de bois ou de métal, ou même de briques cimentées ! La base repose sur le plancher avec liège ou élastomère.

est posé sur une étagère en panneau de particules de 12 mm... Pour une dépense identique, l'achat de quelques planches épaisses, de dalles de pierre, de plots caoutchouc et de joints toriques donne un résultat bien supérieur !

Caractéristiques vibratoires des matériaux

Une bonne connaissance des matériaux est requise pour effectuer les bons choix, car un compromis doit être trouvé entre la densité, nécessaire à l'obtention

d'une masse élevée, la raideur indiquée par le module d'Young, indispensable à une rigidité suffisante, et les pertes internes indispensables à l'amortissement. Aucun matériau ne possède ces trois caractéristiques maximales à la fois, deux au plus étant élevées et la troisième faible dans ce cas. C'est donc en les associant, en les combinant en couches de natures opposées, étroitement couplées entre elles, qu'il est possible d'associer les bénéfices de chacun d'eux. Le tableau de la figure 104 donne des valeurs indicatives pour les matériaux courants.

Matériau	Masse volumique g/cm3	Module de Young E MPa	Vitesse du son C km/s	Pertes internes
Métaux et alliages				
Aluminium	2,7	69 000 à 75 000	5,2 à 6,4	0,006
Acier	7,8	200 000 à 220 000	5,3 à 5,8	0,0002
Laiton	8,4	92 000 à 100 000	4,39	0,003
Plomb	11,4	17 000	2,6	0,1
Titane	4,5	116 000	6,1	0,0005
Construction				
Ardoise	2,5	25 000	3	0.01
Béton plein	2,3	23 000	1,9	0,04
Béton léger	1,35	5 000	3,5	0,03
Brique pleine	1,8 à 2,1	16 000	1,2 à 3,1	0,01
Fibrociment	1,4	14 000	3,2	0,005
Granite	2,7	60 000	3,95	0,005
Grès	2,2	15 000	1,2	0,01
Marbre	1,4	26 000	3,81	0,005
Mortier	2,25	28 000	3,5	0,02
Parpaing plein	2	27 000	2,5	0,01
parpaing creux	1,3	27 000	3,5	0,03
Plâtre	1,3	7 000	2,4	0,005
Sable	1,6	----	----	++++
Verre	2,5	69 000	5,5 à 5,8	0,005
Bois et dérivés				
Chêne	0,65 à 0,8	12 000	1.6 à 4.3	0,02
Contreplaqué standard	0,62	4 500	3,2	0,03
Hêtre	0,65	4 000	2,5	0,02
Liège compressé	0,15 à 0,25	300	0,35	0,2
Liège expansé	0,14	100	0,15	0,3
Médium densité	0,7	8 000	1,8	0,05
Multiplis de hêtre	0,8	15 000	2,2	0,1
Pin	0,45	9 000	3 à 5	0,02
Synthétiques				
Caoutchouc silicone	1,4 à 2	100	0,04	0,4
Elastomère	0,95	500 à 1 000	0,15	0,5
Feutre	0,1	<100	----	+++++
Néoprène	1,1	1 000	1,6	0,05
Nylon et polyamide	1,15	2 000 à 4 000	2,69	0,04
Polyéthylène	1,3	200 à 700	1,78	0,03
Téflon	2,2	3 000	1,52	0,01

Figure 104 - Caractéristiques vibratoires des matériaux.

Les valeurs présentées dans le tableau sont issues des “Techniques de l’Ingénieur”, de formulaires “Artenum.org”, de documents “Elcometer” mesures et contrôles par ultrasons, et de “l’aide-mémoire d’acoustique appliquée” de M. Val. Toutefois ces données varient d’une source à l’autre et n’ont qu’une valeur indicative, à titre de comparaison et non de référence absolue.

Pour les matériaux homogènes, tant en composition chimique qu’en taille de grain ou de molécule, comme les métaux et les matériaux synthétiques, la vitesse de propagation des ondes sonores est un assez bon indicateur des pertes d’énergie internes, donc de l’amortissement procuré face aux vibrations. Plus les pertes sont faibles plus le son se déplace vite. Par contre, lorsque le matériau est hétérogène, présentant des discontinuités, des variations locales de composition ou de granulométrie, les pertes internes sont plus importantes que ne le laisse supposer la vitesse du son, à cause des multiples diffractions, diffusions et réflexions des ondes à chaque changement rencontré sur leur trajet. Le sable et le liège en sont de bons exemples, constitués tous deux d’air et de particules solides. Les matériaux feuilletés ont également un amortissement interne élevé, surtout dans le sens transversal, perpendiculairement au plan des feuilles, car les ondes doivent alors traverser un grand nombre d’interfaces.

Ce tableau amène quelques constatations qui s’imposent :

- Métaux :

- Lorsqu’il s’agit de rigidifier, l’acier semble tout indiqué car économique et facilement disponible. Ses propriétés magnétiques en font un blindage de choix mais peuvent constituer un inconvénient, car en attirant, détournant et concentrant les lignes de champ, il peut faire augmenter les bruits induits.
- L’aluminium est amagnétique mais demande des épaisseurs environ 1,46 fois plus fortes pour donner la même rigidité, si l’on suppose un travail en flexion, d’où des pièces deux fois plus légères qu’avec l’acier.
- Les autres métaux sont rarement disponibles en plaque et parfois très coûteux.
- Le plomb existe sous forme de rouleaux utilisés par les couvreurs. C’est le seul métal présentant un amortissement interne réel.

Les métaux ne sont donc pas utilisés seuls mais comme support rigide ou comme lest. Un autre matériau est chargé de l’amortissement. Son couplage doit être intime, par collage très mince, cire ou ciment. Si l’on considère que les parties les plus perturbées par vibrations sont des panneaux plans, comme les étagères ou les capots d’appareils, les principaux modes de

résonances correspondent à des déformations de flexion sur un seul axe, parfois sur deux axes (flexion + torsion). La flèche d’une plaque en appui à ses extrémités est proportionnelle au cube de sa longueur, et inversement proportionnelle au cube de son épaisseur, figure 105. Diviser la longueur d’une étagère par 2 divise sa flèche, donc l’amplitude vibratoire par 8 ! De même, doubler son épaisseur divise la flèche par 8. Il est donc parfois plus intéressant d’utiliser un matériau moins raide, de module d’Young plus faible, mais en forte épaisseur. Par exemple une plaque de multiplis de hêtre de 32 mm d’épaisseur est à peu près aussi rigide qu’une plaque d’acier de 13 mm, mais quatre fois plus légère, et ses pertes internes sont en gros 400 fois plus fortes...

- Matériaux de construction :

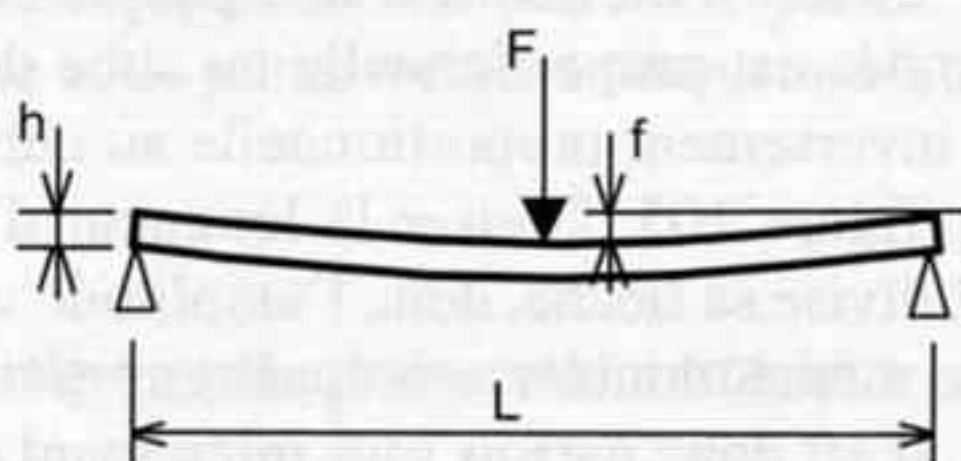
- Ils présentent presque tous des pertes internes faibles, et amortissent assez peu.
- Le béton plein, la brique pleine et le mortier sont les plus intéressants parmi les matériaux rigides.
- Le sable est idéal pour ces pertes internes mais exige un contenant !
- Les pierres dures et le verre se comportent comme les métaux, et peuvent les remplacer en apportant une esthétique plus agréable.

Un composite du type béton réalisé avec un sable fin et enrichi de poudre de pierres dures (déchets de taillage) est utilisé industriellement pour mouler des dalles décoratives pour jardin ou muret. Appelé pierre reconstituée, ses caractéristiques sont proches du mortier, avec une plus grande rigidité. Ses dalles sont très économiques, et rendent un son tout à fait neutre, très mat. Leurs dimensions de 50 cm par 30 cm les rendent idéales comme support d’appareil.

- Bois et dérivés :

- Le multiplis de hêtre est extrêmement intéressant car assez rigide, relativement dense, et bien amorti. C’est un matériau de choix pour châssis, supports et doublage de fond, et parois d’enceintes. Il doit être considéré comme un composite, la colle étant une résine qui imprègne et solidarise les plis, qui sont autant de couches croisées de matériau fibreux. La rigidité est augmentée par l’imprégnation et le croisement des couches, l’amortissement est dû aux très nombreuses discontinuités.
- Les lièges sont d’excellents amortisseurs, mais ne peuvent servir de ressort.
- Les bois massifs présentent peu d’intérêt sauf pour les étagères : pin, méditerranéen ou chêne par ordre de coût.

FLEXION D'UNE PLAQUE :



Une plaque mince, d'épaisseur \$h\$, de largeur \$b\$, disposée sur deux appuis distants de \$L\$, subit sous l'effet de l'effort \$F\$ exercé en son milieu, une flèche \$f\$:

$$f = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

Avec \$E\$ module d'Young du matériau considéré, et \$I\$ moment d'inertie de la section droite :

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad \text{d'où} \quad f = \frac{F \cdot L^3}{4 \cdot E \cdot b \cdot h^3}$$

• Synthétiques :

- Le caoutchouc est sans surprise l'amortisseur idéal, et présente en plus une élasticité élevée qui en fait un excellent ressort.
- Le feutre ne supporte pas les fortes charges et ne sert plus à rien une fois écrasé. La feutrine sert à réaliser des rondelles qui disposées sous les pieds assurent un bon couplage aux basses fréquences avec le support, et un découplage aux fréquences élevées, à partir de 4 à 5 kHz typiquement.
- Les plastiques habituels sont intéressants pour des pieds, des colonnes supports de circuits imprimés, des anneaux anti-microphoniques.

C'est par combinaison harmonieuse de différents matériaux, afin d'éviter de favoriser une bande de fréquence particulière, qu'un équilibre tonal est habituellement trouvé. La manipulation, le contact avec les matériaux permet d'apprécier assez finement leur caractère sonore. Une plaque de dimensions suffisantes pour servir de support à un appareil audio, 50 × 30 cm par exemple, rend des sons forts différents selon sa composition, quand elle est frappée d'un petit coup. En passant une heure, armé d'un maillet, au rayon "matériaux de construction" d'une grande surface de bricolage, les découvertes sont surprenantes tant les sonorités des dalles, des pierres sont variées. Celles qui rendent les sons les plus mats, les plus brefs, sont à retenir. Quant au vendeur, il risque de s'en souvenir longtemps...

Le naturophile trouve ici encore matière à exercer son art, car une protection harmonieuse contre les perturbations vibratoires se doit de faire intervenir les cinq

Figure 105 - Une plaque d'épaisseur \$h_1\$ en matériau de module d'Young \$E_1\$ aura la même flèche, toutes choses égales par ailleurs, qu'une plaque d'épaisseur \$h_2\$ en matériau de module \$E_2\$ si :

$$h_2 = \sqrt[3]{(h_1)^3 \cdot (E_1/E_2)}$$

En prenant pour base de comparaison une plaque d'acier de module d'Young \$E_1 = 220\,000\$ MPa, d'épaisseur \$h_1 = 10\$ mm, on calcule qu'une plaque d'aluminium avec \$E_2 = 73\,000\$ MPa aura la même rigidité si son épaisseur est \$h_2 = 14,5\$ mm. Elle sera deux fois plus légère et 30 fois mieux amortie !

Une plaque de multiplis de hêtre avec \$E_3 = 15\,000\$ MPa aura elle aussi la même rigidité si \$h_3 = 24,5\$ mm.

Elle sera quatre fois plus légère que l'acier et ses pertes internes environ 500 fois plus fortes.

L'acier ou l'aluminium seront donc choisis pour lester, et le multiplis pour rigidifier et amortir. Le couplage au contact des deux matériaux doit être le meilleur possible, par collage à la cire et vissage.

éléments. Le bois de l'étagère est complété par le minéral de la dalle. Le métal est présent dans l'appareil lui-même, mais aussi dans les pointes qui en sont constituées, et les plaques de lest. Les pierres dures, lisses et brillantes, comme le marbre ou le granite poli sont associées au métal. L'eau est évoquée par le caoutchouc naturel, sève liquide de l'hévéa, vulcanisée par le feu. Sa couleur noire, sa souplesse sont également associées à l'élément liquide, tout comme le verre. Le feu est simplement symbolisé par toute forme triangulaire, acérée. Les pointes disposées sous le support sont là pour y pourvoir.

L'expérience montre que les positions relatives les plus efficaces pour ces matériaux sont précisément les plus naturelles.

- Le feu couve sous la terre : Les pointes ou cônes métalliques associés par leur forme à l'élément feu, sont donc disposés sous la dalle support en pierre, reliée à l'élément terre.
- Sur le sol se trouve le métal : Les ressorts de suspension sont en contact avec la pierre.
- Au-dessus se trouve l'eau : La suspension caoutchouc rattachée à l'élément liquide par sa forme courbe, sa couleur noire, son origine, prend appui sur le ressort, l'englobe parfois.
- Le végétal s'élève au dessus de l'eau : Le socle en bois repose sur ses suspensions caoutchouc.

Un support réalisé en suivant ces principes donne visuellement une impression de solidité, de stabilité, de force tranquille et sûre. L'impression auditive est identique, sans doute influencée par l'apparence. Je n'ai pas fait de comparaisons en aveugle de différents

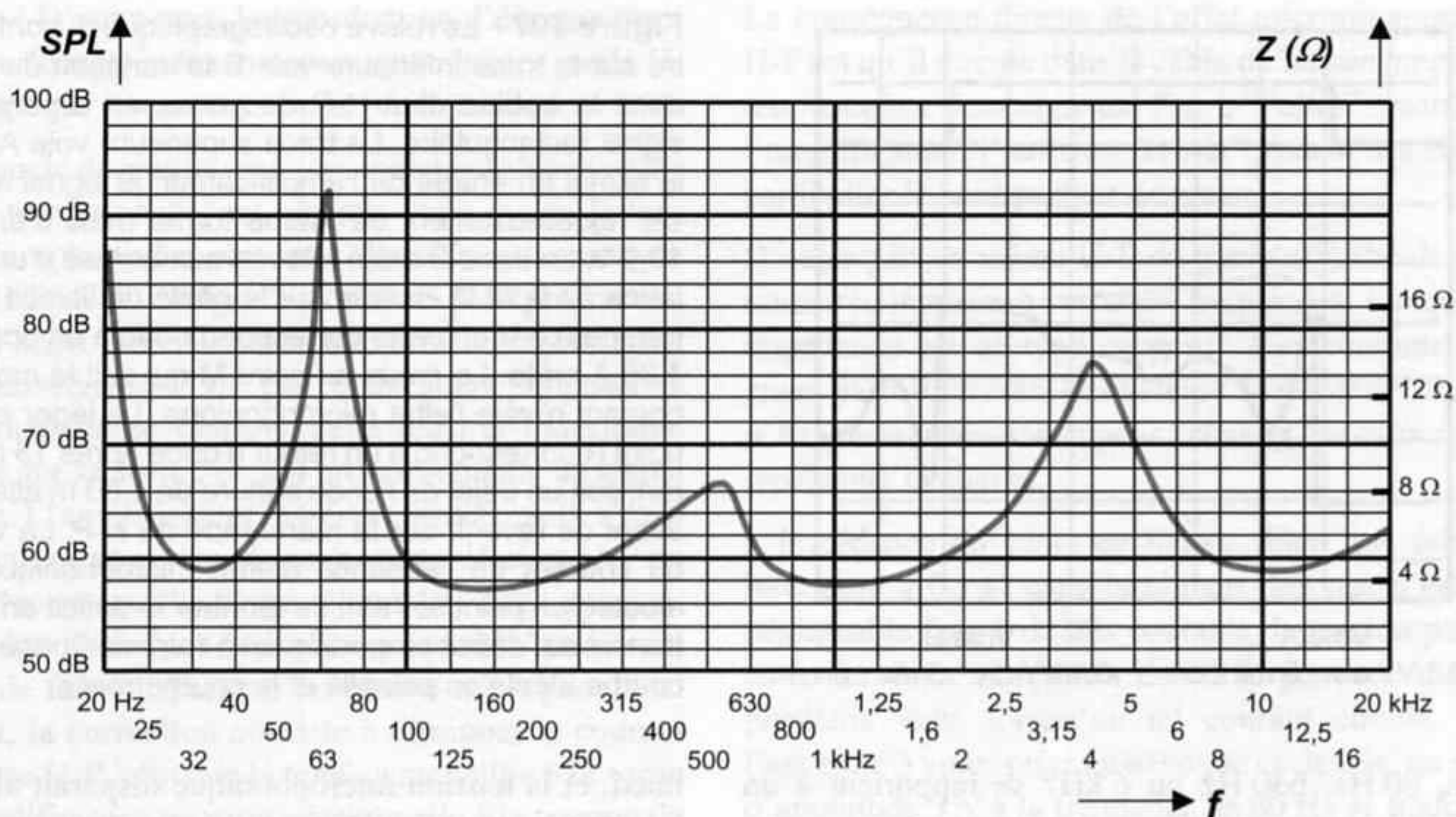


Figure 106 - Impédance d'une enceinte trois voies.

supports, mais de très nombreux essais, effectués sur des équipements variés, étalés sur de longues périodes afin de décanter les premières impressions parfois trompeuses.

La nature fait bien les choses, s'en inspirer n'est pas ésotérique.

COUPLAGE AMPLI/HAUT-PARLEURS

Le haut-parleur électro-dynamique classique est un microphone. De mauvaise qualité bien évidemment, sa sensibilité étant très faible. Il est à peu près aussi peu sensible en tant que microphone qu'il est peu efficace en tant que... haut-parleur. Son rendement énergétique, dans les deux cas, est pour une écrasante majorité, inférieur à 0,5 %, ce qui signifie que 99,5 % de l'énergie qui lui est fournie disparaît en chaleur !

Des détails plus scientifiques, inutiles pour l'instant, seront donnés au chapitre 8 « Enceintes acoustiques », page 143.

Néanmoins, lorsque la membrane reçoit une pression acoustique due aux ondes sonores se propageant dans la salle, la bobine mobile génère un courant électrique, très faible mais pas négligeable par rapport aux signaux musicaux les plus faibles. Cela signifie que le haut-parleur, lorsqu'il reçoit un signal électrique en provenance de l'amplificateur, s'y oppose en produisant, par le déplacement de sa membrane générant une pression acoustique, une tension aux bornes de sa bobine, tension de signe contraire à celui du signal et légèrement retardée.

Le retard, décalage temporel, entre la tension appliquée au haut-parleur et sa réaction microphonique est très variable avec la fréquence. En effet, la tension microphonique est une conséquence du déplacement de la membrane, lui-même lié au passage du courant dans la bobine du H-P, ce courant n'étant pas en phase avec le signal audio, mais en retard ou en avance, selon que l'impédance de l'enceinte est inductive, montante avec la fréquence, ou au contraire capacitive, descendante avec la fréquence. Comme la courbe d'impédance, voir figure 106, d'une enceinte acoustique présente des bosses et des creux fonctions de la fréquence, le décalage temporel du courant et de la tension microphonique n'est pas aisément prévisible.

Plus l'élongation du H-P est élevée et son amortissement faible, plus cet effet est important. Les petits H-P à rayonnement direct et à suspensions très souples sont donc concernés en premier lieu, par contre les H-P à chambre de compression sont bien isolés de ce phénomène par la présence du pavillon qui adapte au mieux le transfert d'énergie acoustique du H-P vers l'air ambiant, les élongations étant alors extrêmement faibles.

Sur la courbe d'impédance prise en exemple figure 106, relative à une enceinte trois voies, quatre haut-parleurs, à très haut rendement – 99 dB/1W à 1 m – les parties montantes, vers 50 à 63 Hz, puis aux environs de 400 Hz et de 3,15 kHz correspondent à des comportements inductifs de l'enceinte, qui absorbe un courant en retard sur la tension générée à la sortie de l'amplificateur. Au contraire, les parties descendantes vers

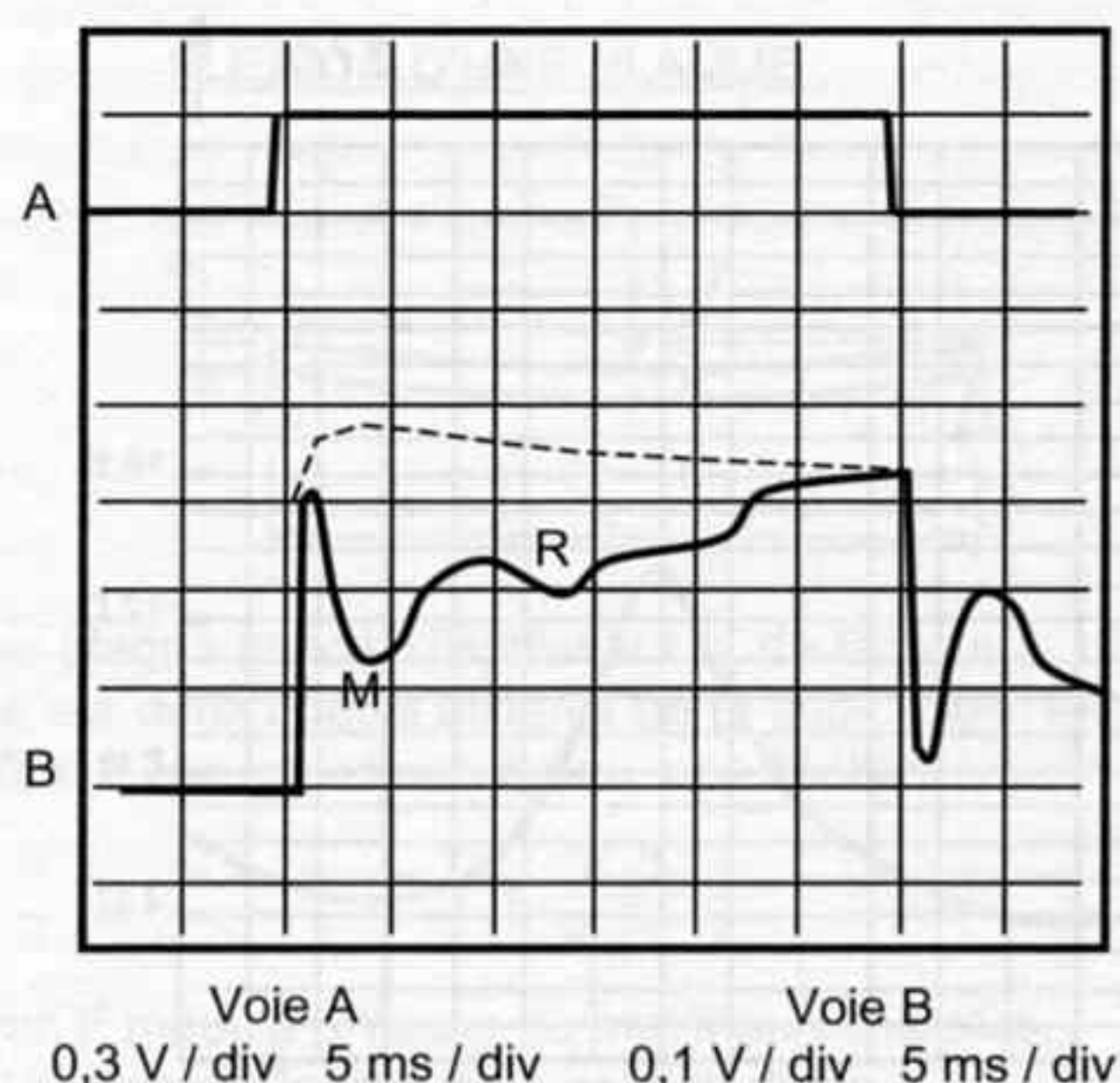


Figure 107 - Le relevé oscillographique ci-contre montre sur la trace inférieure voie B la variation du courant dans la bobine d'un H-P de grave, en réponse à un signal rectangulaire. La trace supérieure voie A montre le signal en entrée de l'amplificateur, le signal en sortie est rigoureusement de même forme mais d'amplitude 10,9 V. La trace B a été relevée aux bornes d'une résistance de $0,22 \Omega$ insérée sur le câble de liaison. La lecture de 0,3 V en crête correspond donc à un courant de 1,36 A crête. Le creux au point M qui suit la montée du courant révèle l'effet microphonique. Le léger creux au point R correspond à un retour d'onde après 13 ms environ, soit un trajet de l'onde sonore de 4,50 m aller-retour avant de revenir sur la membrane du H-P. La variation du courant en l'absence d'effet microphonique a été ajoutée en pointillés afin de montrer le déficit en énergie transmise, déficit proportionnel à l'aire comprise entre la courbe idéale en pointillé et la courbe réelle.

25 Hz, 80 Hz, 630 Hz ou 6 kHz se rapportent à un fonctionnement capacitif, ou le courant est en avance sur la tension.

L'impédance globale de l'enceinte est la somme de l'impédance électrique des bobines des H-P associés à leurs filtres, et de l'impédance "motionnelle" due au mouvement, et liée aux caractéristiques électromagnétiques du moteur du H-P ainsi qu'à la charge mécano-acoustique. Cette impédance motionnelle est responsable de la tension microphonique, véritable force contre-électromotrice, qui présente donc un retard variable sur la tension du signal audio, et qui s'oppose au mouvement en freinant le passage du courant (voir chapitre 9 figures 212 à 214).

Les haut-parleurs de très grands diamètres ou chargés par pavillons ont des déplacements de membrane infiniment plus faibles que leurs concurrents de diamètres limités, à rayonnement direct. Ces faibles excursions de l'équipage mobile impliquent des vitesses de déplacement très faibles elles aussi, donc des effets microphoniques très réduits.

Cette tension microphonique est proportionnelle à la vitesse de déplacement de la membrane, donc au produit de l'amplitude par la fréquence du signal. Les attaques de notes, au spectre riche en fréquences élevées, et de niveau crête très important, sont par conséquent suivies de signaux microphoniques d'amplitude notable.

Comme le fait apparaître le relevé de la figure 107, réalisé avec un H-P de grave de diamètre 13 cm, un transitoire d'attaque, tel que le front montant du signal rectangulaire, produit une tension microphonique suffisante pour s'opposer au courant débité par l'amplificateur. Elle se manifeste entre 1 et 5 ms après le début du passage du courant dû au signal, précisément lorsque la membrane atteint sa vitesse maximale. Ensuite la membrane s'arrête en position de déplacement

maxi, et la tension microphonique disparaît alors, car la vitesse est nulle. Environ 13 ms plus tard, l'onde réfléchie sur un mur situé à 2,20 m du H-P revient exercer sur la membrane une pression responsable de la diminution du courant en R, par une tension parasite d'origine microphonique également. La réverbération du local fait vraiment de gros dégâts !

On peut cependant considérer que la membrane du haut-parleur, amortie par la liaison électrique avec l'amplificateur, représente une surface presque parfaitement absorbante, qui participe bien involontairement à la diminution de la réverbération du local. L'étendue de cette surface est beaucoup trop faible en général pour que son action soit sensible, sauf dans le cas de haut-parleur de (très) grand diamètre, supérieur à 40 cm.

L'amplificateur, quant à lui, possède dans une immense majorité des cas, une boucle de contre-réaction chargée d'asservir le signal de sortie au signal d'entrée. Grâce à cette boucle très efficace, la tension de sortie V_s est rigoureusement égale au produit de la tension d'entrée V_e par la valeur de l'amplification A : $V_s = A \times V_e$.

Ceci quelles que soient les conditions présentes à la sortie de l'amplificateur, donc indépendamment du comportement de la charge que représente l'enceinte. Cela permet entre autre de stabiliser le gain à une valeur connue, prévisible dès la conception, indépendante des tolérances des composants, constante pour un large éventail d'impédance de charge comprise entre 2 et 20Ω environ, et d'assurer une réponse en fréquence linéaire même avec une charge dont l'impédance augmente avec la fréquence. Autrement dit cela rend le fonctionnement de l'amplificateur indépendant de celui de l'enceinte, ce qui en soit est tout à fait illogique puisque les deux sont en série dans le même

système ! D'autre part, la transduction d'énergie électrique en énergie mécano-acoustique réalisée par le H-P est régie par le courant et non par la tension...

Cette boucle de contre-réaction, indispensable avec les circuits transistorisés, est gênante vis-à-vis de la tension microphonique, car cette dernière est renvoyée par le H-P dans l'étage de sortie de l'amplificateur, juste à l'endroit où démarre cette boucle (figure 108). La contre-réaction va par conséquent imposer à l'amplificateur de corriger cette tension indésirable présente sur sa sortie, et non proportionnelle au signal d'entrée. L'amplificateur, asservi correctement, s'exécute docilement et renvoie sans aucun délai au H-P un signal "correcteur" chargé d'annuler cette tension, c'est-à-dire de freiner le déplacement car c'est le seul moyen de faire disparaître la tension microphonique. En effet, la correction consiste à diminuer le courant envoyé au H-P, afin que la tension recueillie à la sortie de l'amplificateur reste proportionnelle à la tension du signal d'entrée.

Les amplificateurs fortement contre-réactionnés donnent par conséquent un son extrêmement retenu, très mat, peu vivant. Une contre-réaction modérée est nettement préférable et la tendance actuelle est orientée vers une diminution du taux de contre-réaction. Les amplificateurs à lampes peuvent dans certains cas s'en passer complètement. Les détails de conception et de philosophie des circuits seront abordés au chapitre électronique.

La conséquence directe de l'effet microphonique des H-P est qu'il circule dans le câble de liaison amplificateur/enceinte deux signaux, l'un à "l'aller" émanant de l'amplificateur, l'autre en "retour" venant des H-P, en particulier le haut-parleur de grave.

D'autre part ce même H-P de grave absorbe des courants très intenses à certaines fréquences, lorsque son impédance est de type capacitif. Ces courants atteignent parfois en crête des valeurs de plusieurs dizaines d'Ampères, nécessaires pour "charger" la capacité que représente la charge.

L'impédance du câble de liaison, bien que faible et inférieure à $0,1 \Omega$ dans la plupart des cas, n'est plus négligeable face à de tels courants, la tension parasite entre les deux extrémités du câble pouvant atteindre plusieurs volts lorsqu'un tel courant circule. Dans l'enceinte 3 voies prise en exemple ci-dessus, un signal d'amplitude 3 V à la fréquence de 80 Hz se traduit par un courant absorbé de 1,5 A environ, en avance de phase de 45° sur la tension du signal ! Ce courant produit une tension parasite de 0,15 V aux bornes du câble. L'amplitude du signal arrivant à l'enceinte est par conséquent réduite, ce qui n'est pas très grave.

Beaucoup plus grave est le fait que les différents H-P, bien qu'alimentés à travers des cellules de filtrage indépendantes, partagent malgré tout une impédance commune, celle du conducteur de retour, relié à la masse électrique de l'amplificateur.

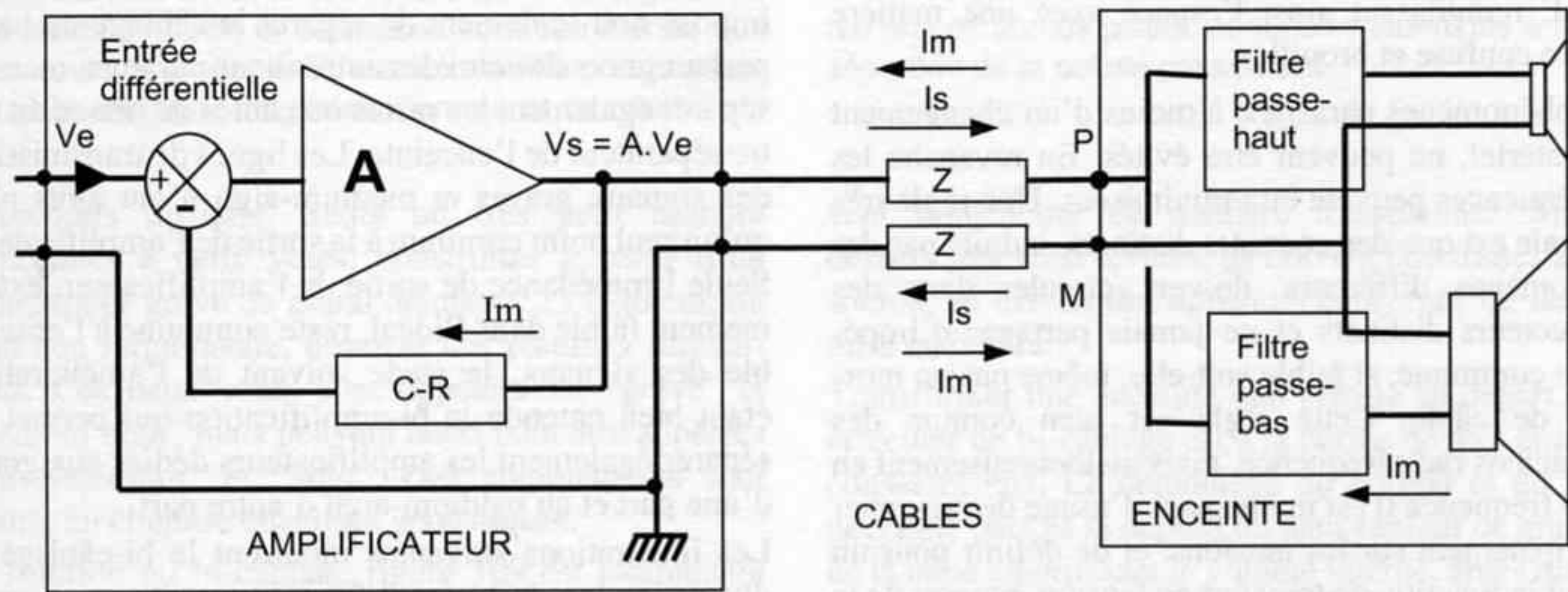


Figure 108 - La liaison amplificateur/enceinte n'est pas si simple qu'il y paraît : En plus du courant modulé par le signal audio I_s , il y circule un courant parasite I_m dû aux effets microphoniques des haut-parleurs, et qui est en partie réinjecté dans le circuit de contre-réaction, malgré la faible impédance de l'étage de sortie de l'amplificateur. Ce courant majoritairement issu du haut-parleur grave, de par ses grandes elongations, et circulant dans l'impédance non négligeable du câble de

liaison, module la tension au point P, auquel est malheureusement relié également le haut-parleur d'aigu. Ce dernier prend pour référence de potentiel le point M, dont la tension est modulée par le passage des forts courants absorbés par le haut-parleur de grave. Les modulations des tensions au points P et M se combinent d'après leur relation de phase, très variable, s'ajoutant ou se retranchant selon la fréquence et l'amplitude du signal.

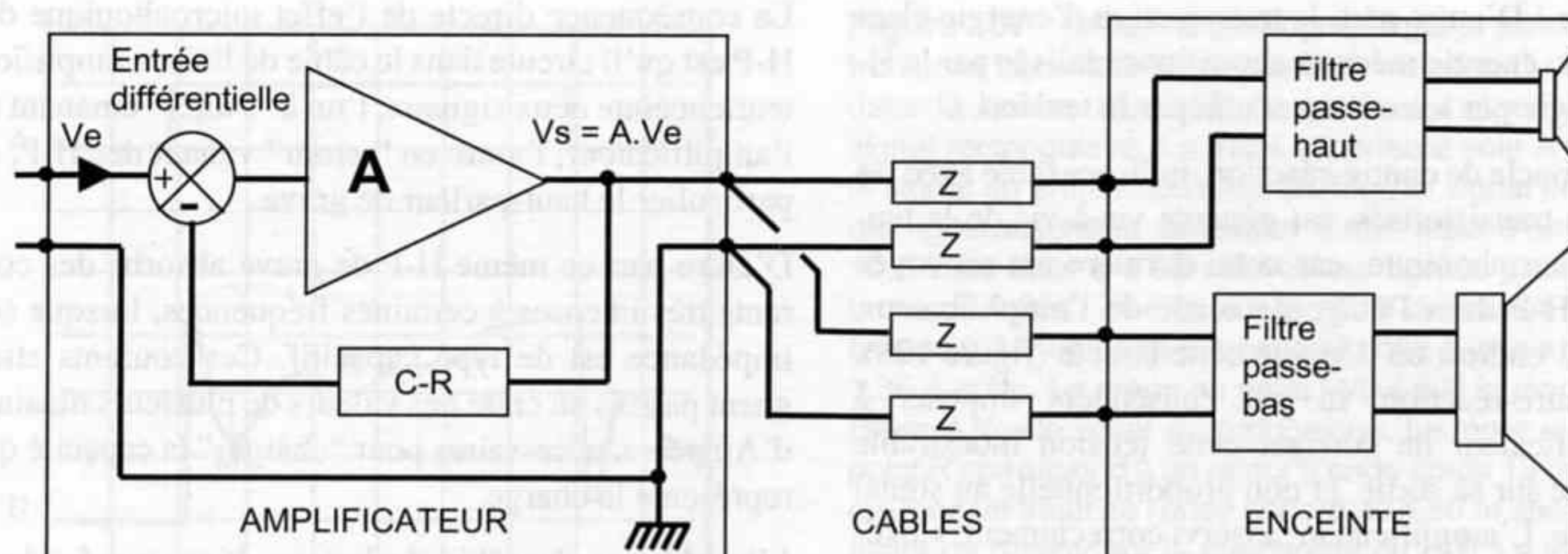


Figure 109 - Le bi-câblage permet de faire cheminer les faibles signaux destinés aux haut-parleurs médium et aigu séparément des forts courants du haut-parleur grave, ainsi que de ses courants de réaction microphonique. Dans cette configuration il ne reste qu'une très faible impédance commune, celle de sortie de l'amplifi-

cateur. Cette dernière est la somme de l'impédance du câblage interne jusqu'aux bornes de sortie, de l'impédance de sortie de l'étage de gain, et de l'impédance de sortie de l'alimentation, toutes trois en série. La contre-réaction diminue l'impédance résultante à une valeur très faible, de l'ordre de 50 mΩ.

Le comportement d'un câble face aux signaux audio n'est pas linéaire, cela a été précisé dans le paragraphe consacré aux cordons de liaison. Le câble de raccordement des haut-parleurs n'échappe pas aux effets néfastes liés aux matériaux conducteurs et aux isolants, et ces phénomènes parasites sont responsables de l'intermodulation des signaux audio avec les courants microphoniques d'une part, et des signaux de la bande grave avec ceux de la plage médium-aigu d'autre part. L'intermodulation produit un grand nombre de raies spectrales, de part et d'autre des harmoniques du signal, remplissant ainsi l'espace avec une matière sonore confuse et brouillée.

Cette règle fort simple - pas d'impédance commune - lorsqu'elle est appliquée avec rigueur, permet de définir une implantation idéale des composants ainsi qu'un tracé optimal des pistes ou des cheminements de câble, en particulier ceux de masse qui constituent la référence de potentiel pour chacun des composants.

Bi-câblage

Appliquée à la liaison ampli/enceintes, pour éliminer le couplage par impédance commune et minimiser les conséquences de l'effet microphonique, cette règle impose non seulement de séparer le câblage du haut-parleur grave de celui des autres haut-parleurs, mais de séparer également les pistes ou câbles de masse du filtre séparateur de l'enceinte. Les lignes de transmission des signaux graves et médium-aigu n'ont alors plus qu'un seul point commun à la sortie de l'amplificateur. Seule l'impédance de sortie de l'amplificateur, extrêmement faible dans l'idéal, reste commune à l'ensemble des signaux, le stade suivant de l'amélioration étant bien entendu la bi-amplification qui permet de séparer également les amplificateurs dédiés aux grave d'une part et au médium-aigu d'autre part.

Les illustrations suivantes montrent le bi-câblage et divers modes de bi-amplification pour une enceinte deux voies. C'est uniquement pour des raisons de clarté que deux voies seulement sont représentées, ce choix ne permet pas d'accéder à un réalisme sonore suffisant, le haut-parleur de grave étant à la fois trop petit pour restituer la dynamique des sons graves, et trop grand pour monter à une fréquence assez élevée assurant un raccordement correct avec le haut-parleur d'aigu. Ce dernier, devant descendre à des fréquences relativement basses, fait également l'objet d'un

Ces phénomènes parasites, à moins d'un changement de matériel, ne peuvent être évités. En revanche les conséquences peuvent être minimisées. Une règle très générale est que des courants distincts, induits par des phénomènes différents, doivent circuler dans des conducteurs distincts et ne jamais partager d'impédance commune, si faible soit-elle, même pas un morceau de câble. Cette règle est bien connue des techniciens radiofréquence, mais malheureusement en basse fréquence il est maintenant d'usage de raisonner principalement sur les tensions, et de définir pour un circuit la fonction de transfert en tension, rapport de la tension en sortie sur la tension en entrée. Les courants sont ignorés et avec eux les boucles fermées dans lesquels ils circulent, boucles se refermant souvent par la masse. L'intensité du courant est considérée seulement s'il induit un échauffement, son itinéraire reste superbement méconnu. Cela peut entraîner bien évidemment de graves erreurs de conception, comme relier deux ou trois haut-parleurs très différents par un même câble à l'amplificateur.

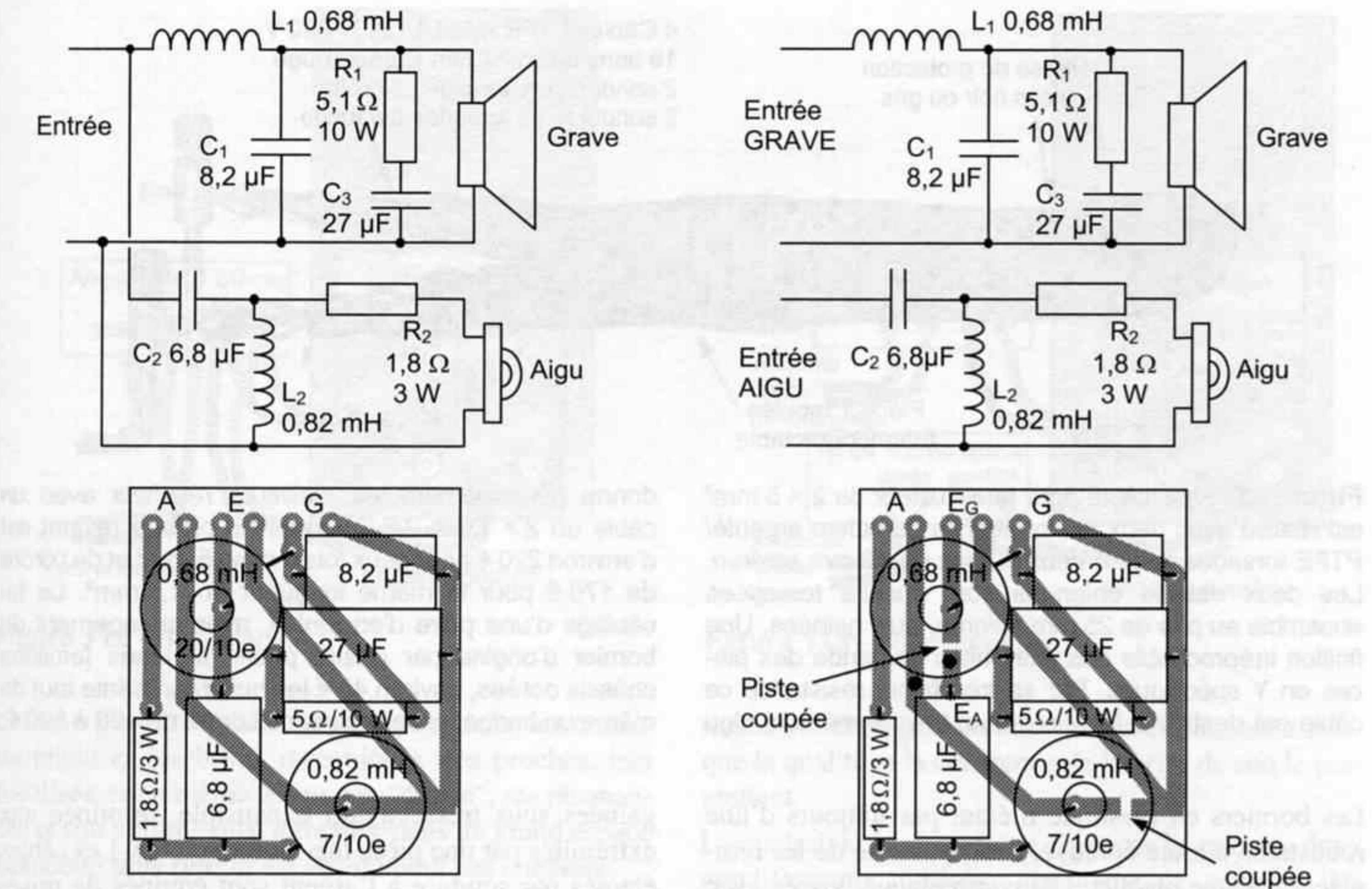


Figure 110 - Le schéma ci-dessus montre à gauche un exemple de filtre d'origine d'une enceinte deux voies, non prévue pour le bi-câblage. Ce filtre est réalisé sur une plaquette de circuit imprimé de 10 cm sur 12 cm environ, représenté ici côté composants, les pistes étant vues par transparence. Le bornier à deux points est relié en E, le H-P grave en G et l'aigu en A. Les pistes d'entrée et de masse sont communes aux deux voies. À droite, le filtre a été modifié pour s'adapter au bi-câblage : les pistes d'entrée et de masse ont

été coupées au cutter sur environ 2 mm de large aux endroits repérés par les deux flèches, afin d'isoler la cellule de filtrage passe-haut alimentant le H-P d'aigu. Les bornes d'entrée E_G ne servent donc plus que pour la voie grave, et sont reliées à une première paire de prises bananes femelles de 4 mm. Une seconde paire est reliée par deux nouveaux fils aux deux points, repérés en noir sur les pistes, et qui constituent les entrées séparées de la cellule passe-haut.

compromis difficile. Seuls un très petit nombre d'enceintes à deux voies, construites à partir d'un haut-parleur grave de grand diamètre, 25 à 30 cm, ou d'un bon large-bande, donnent des résultats satisfaisants. Ces deux voies sont appelées ici "grave" et "médium-aigu" mais peuvent aussi bien être appelées "grave-médium" et "aigu". Des compléments sont donnés au chapitre enceintes acoustiques.

La solution du bi-câblage figure 109 est maintenant adoptée par une majorité de constructeurs d'enceintes acoustiques, et ne semble pas être seulement un phénomène de mode. Là aussi le gain en transparence de l'espace sonore est tel que certains défauts ou limitations peuvent être révélés, ce qui a parfois entraîné des jugements négatifs sur cette pratique. Les câbles d'enceintes, tout comme les cordons de liaison, n'ont pas pour objet de compenser ou d'harmoniser, ils doi-

vent transmettre de manière transparente. Si des défauts sont ainsi révélés, ils doivent être traités à leur source, au niveau des appareils concernés ou de leur mise en œuvre.

Transformer une enceinte non prévue au départ pour effectuer un bi-câblage est à la portée de tout amateur consciencieux. Le démontage du bornier et du filtre nécessite parfois la dépose du haut-parleur de grave et de la laine amortissant le volume interne, après quoi le circuit du filtre est modifié en coupant simplement la piste de masse entre la cellule de filtrage passe-bas et le reste du circuit, ainsi que la piste d'entrée, entre les deux cellules de filtrage. Le bornier est remplacé par un modèle spécial à quatre prises, disponible dans le commerce, et recâblé avec les fils d'origine, plus deux fils d'entrée-sortie supplémentaires, conformément au schéma de l'exemple (figure 110).

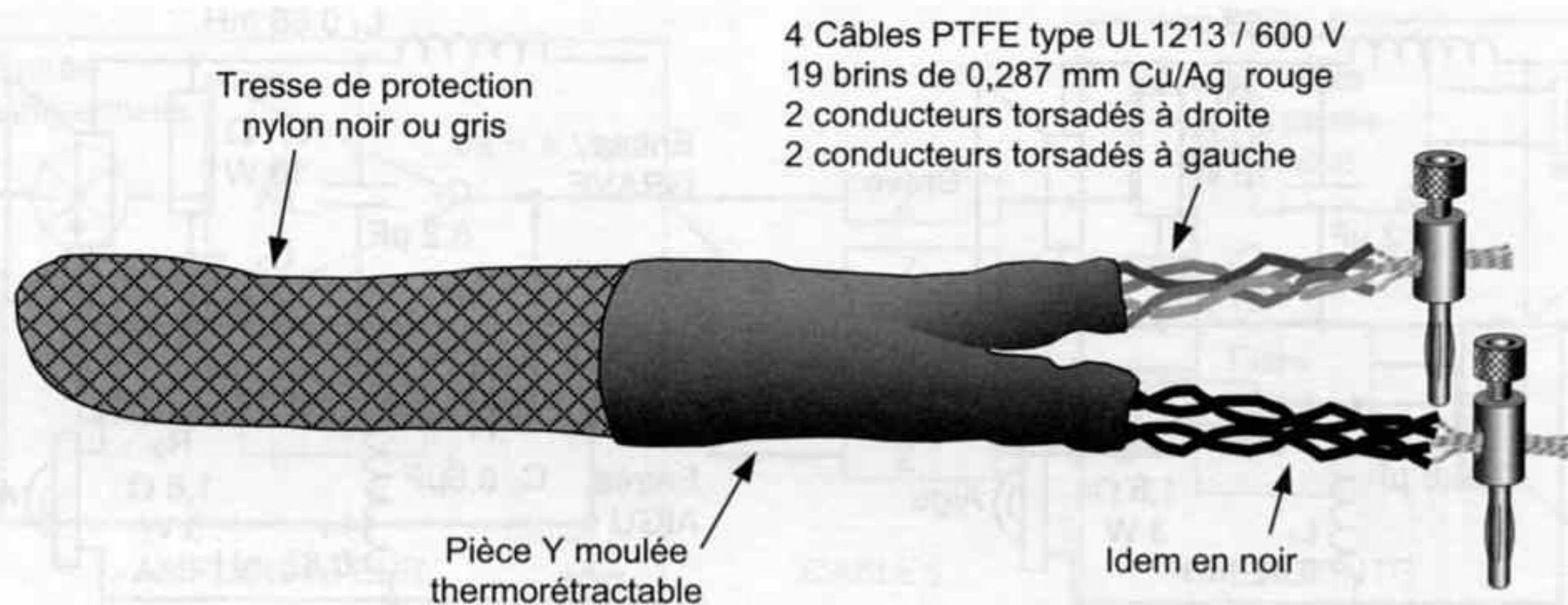


Figure 111 - Ce câble pour haut-parleur de $2 \times 5 \text{ mm}^2$ est réalisé avec deux fois quatre fils de cuivre argenté/PTFE torsadés deux à deux au pas de 10 mm environ. Les deux tresses obtenues sont ensuite torsadées ensemble au pas de 25 mm environ, puis gainées. Une finition irréprochable des extrémités demande des pièces en Y spécifiques. Par sa très faible résistance ce câble est destiné à la voie grave, la voie médium-aigu

Les borniers en plastique n'étant pas toujours d'une robustesse à toute épreuve, il est possible de les remplacer par une plaquette de contreplaqué, vissée avec joint de feutrine sur l'ébénisterie, et équipée de deux paires de fiches bananes de 4 mm, dorées ou argentées, filetées sur 25 à 40 mm de longueur.

EXEMPLE DE RÉALISATION

Le tri-câblage d'une enceinte trois voies ne semble pas apporter d'amélioration supplémentaire dans la majorité des cas, un essai est néanmoins possible bien que coûteux en câbles et prises. Là encore, l'amateur a tout intérêt à confectionner lui-même ses câbles haut-parleur, en appliquant les recettes audiophiles connues et enfin reconnues par les fabricants : petit nombre de brins de section 0,3 à 0,6 mm^2 de conducteurs argentés, isolant PTFE extrudé, plusieurs fils étant torsadés afin d'obtenir une section importante, de 1,5 à 6 mm^2 . Le fil de câblage UL 1213 en jauge AWG 16 pour la voie grave ou AWG 22 pour la voie médium-aigu permet la réalisation de câbles d'une qualité très élevée. Le fil AWG 16 est constitué de 19 brins de diamètre 0,287 mm, le fil AWG 22 de sept brins de diamètre 0,254 mm. Ces brins sont en cuivre pur OFC recuit, revêtu par électrolyse d'une couche d'argent pur. Leur seul et unique défaut est d'être relativement raide, encore plus une fois torsadés.

Quatre conducteurs par polarité sont utilisés, torsadés deux à deux, une paire torsadée à droite et l'autre à gauche. La section totale s'élève à 5 mm^2 pour le grave et 1,5 mm^2 pour le médium-aigu. Les deux tresses obtenues sont ensuite torsadées ensemble avant d'être

donne généralement les meilleurs résultats avec un câble de $2 \times 1,5$ à $2 \times 2,5 \text{ mm}^2$. Le prix de revient est d'environ 220 € pour deux fois 5 m en 5 mm^2 et de l'ordre de 170 € pour la même longueur en 1,5 mm^2 . Le bi-câblage d'une paire d'enceintes, avec changement du bornier d'origine par quatre prises bananes femelles châssis dorées, environ 40 € les huit, représente tout de même un budget conséquent, de l'ordre de 400 à 500 €.

gainées sous tresse nylon expansible, terminée aux extrémités par une pièce thermorétractable. Les câbles étamés par soudure à l'argent sont équipés de prises bananes mâles vissantes de 4 mm, dorées ou argentées, figure 111.

Une liaison ampli/enceinte de 5 m nécessite par conséquent 20 m de fil noir et 20 m de fil rouge en AWG 16, et à nouveau 20 m noir et 20 m rouge en AWG 22. Le tout deux fois en stéréo... Ces fils sont disponibles en bobines de 30 m, ce qui permet avec le reste de recâbler l'enceinte, entre filtre et haut-parleurs.

Ces câbles ne demandent aucun blindage, qui aurait pour effet d'augmenter la capacité parasite de la liaison, ce qui n'est pas apprécié par certains amplificateurs à transistors de sortie MosFET. La capacité du câble est de l'ordre de 80 pF/m ce qui est très faible. Le schéma (figure 111) illustre la réalisation.

Le schéma de la figure 112 rappelle si besoin est comment raccorder une enceinte prévue pour le bi-câblage. La comparaison entre mono et bi-câblage est possible tout simplement en disposant des straps amovibles entre les deux bornes de masse d'une part, et les deux bornes d'entrée d'autre part. Il est préférable d'utiliser des câbles de même technologie sur les deux voies afin de conserver une harmonie, une cohérence des timbres et de l'espace sonore. Associer un câble au caractère chaud et ample pour la voie grave, à laquelle il ajoutera une réverbération artificielle augmentant la sensation d'espace, de profondeur, à un câble très défini et dynamique pour la voie médium-aigu, qui produira un effet de présence, de proximité exagérée, ne donne pas un résultat réaliste. L'esthétique sonore

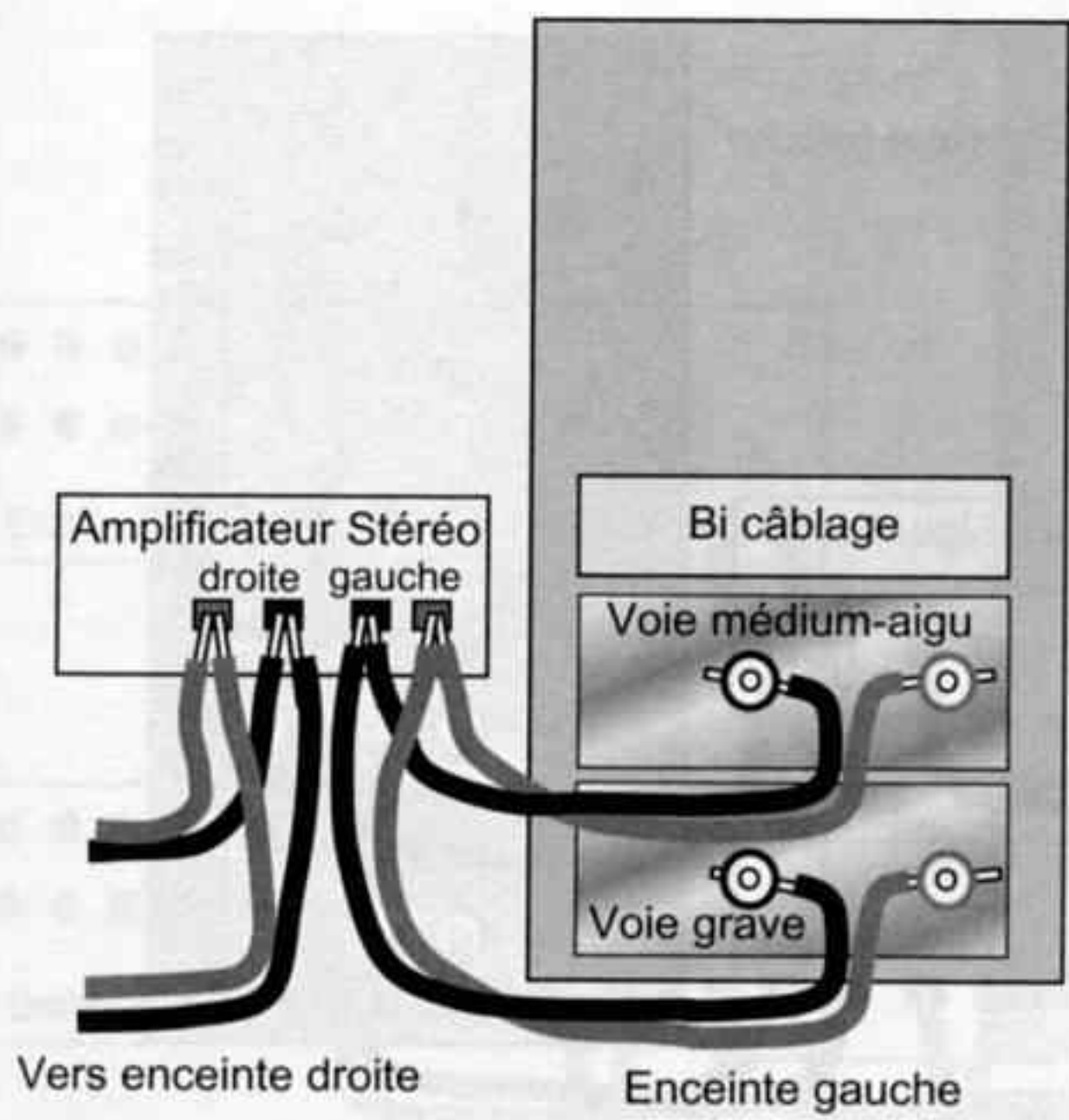


Figure 112 - Bi-câblage.

obtenue peut être plaisante, mais entendre les cordes du piano et ses bruits mécaniques très proches, très focalisés, et en même temps son “coffre”, ses résonances et son volume plus lointains, dans un grand espace beaucoup plus flou, n’est absolument pas cohérent.

BI-AMPLIFICATION

voir annexe 2, p. 349

Passer du bi-câblage, figure 112, à la bi-amplification passive, figure 113, comme le montrent les schémas, ne demande qu’un amplificateur supplémentaire. Les filtres séparateurs intégrés à l’enceinte sont conservés, ce qui est préférable avec pratiquement toutes les enceintes du commerce, quasiment aucune n’ayant été prévue pour la multi-amplification active, qui demande la réalisation de filtres actifs spécialement adaptés aux haut-parleurs utilisés, aussi bien pour la fréquence de raccordement que la pente d’atténuation et le délai indispensable au respect de la phase, donc de la dimension temporelle.

Il est parfois possible d’utiliser deux amplificateurs différents, les meilleurs résultats étant souvent obtenus avec un amplificateur à transistors, assez puissant et nerveux, pour la voie grave, la contre-réaction procurant un excellent amortissement électrique de la membrane, et un amplificateur à lampes en classe A beaucoup moins puissant, si possible sans contre-réaction, afin de laisser une liberté totale aux sonorités dans le secteur médium-aigu. Dans cette configuration, la tenue des sons graves, leur absence de résonances, de traînage, leur rapidité d’établissement et d’extinction, aèrent et libèrent complètement l’espace sonore, dans lequel le grain de la matière sonore, la finesse du trait musical, la vivacité des sonorités médium et aiguës,

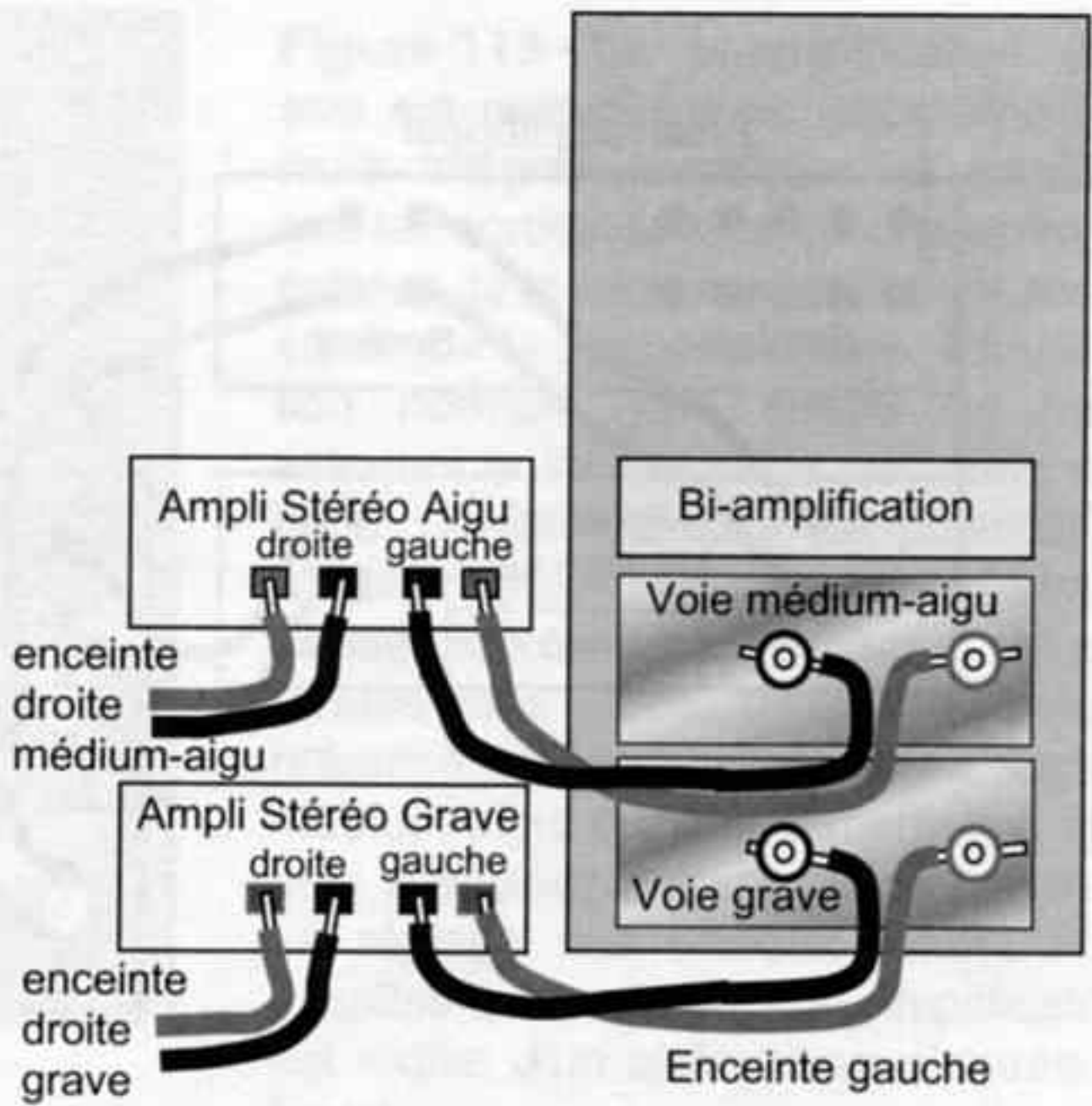


Figure 113 - Bi-amplification.

riches et libres, procurent un réalisme saisissant lorsque la qualité et la cohérence de la prise de son le permettent.

La contrainte la plus sévère concerne le gain des deux amplificateurs utilisés, ainsi que le réglage des niveaux relatifs des voies. Les haut-parleurs de grave et de médium-aigu n’ont que très rarement des sensibilités égales. De plus ces sensibilités peuvent varier avec le niveau du signal, surtout pour les haut-parleurs graves de faible diamètre, dont le rendement diminue aux niveaux élevés, à cause des limites mécaniques d’excursion de la membrane. En plus de limiter la dynamique des sons graves, cela tend à déséquilibrer la restitution lorsque le volume sonore augmente, avec l’impression que le grave est atténué. Sur d’autres systèmes utilisant des haut-parleurs grave à la membrane épaisse, rigide et lourde, dotés d’une forte tenue en puissance, le registre grave peut donner au contraire l’impression de gonfler à fort niveau, en devenant envahissant.

Un réglage des niveaux relatifs est indispensable, et doit être prévu dans le préamplificateur, si possible de manière séparée pour les voies droite et gauche, afin d’ajuster très précisément la position exacte des sources sonores centrales. En effet, sur un système bi-amplifié, une variation de 0,5 dB du niveau de médium-aigu de la voie droite par rapport à la gauche suffit pour décentrer de plusieurs degrés l’image stéréophonique.

Cet ajustage des niveaux ne doit pas être effectué par un atténuateur résistif installé dans l’enceinte, toute résistance en série avec le haut-parleur provoquant une diminution de l’amortissement, d’où réduction de la dynamique et augmentation du trainage. Dans l’exam-

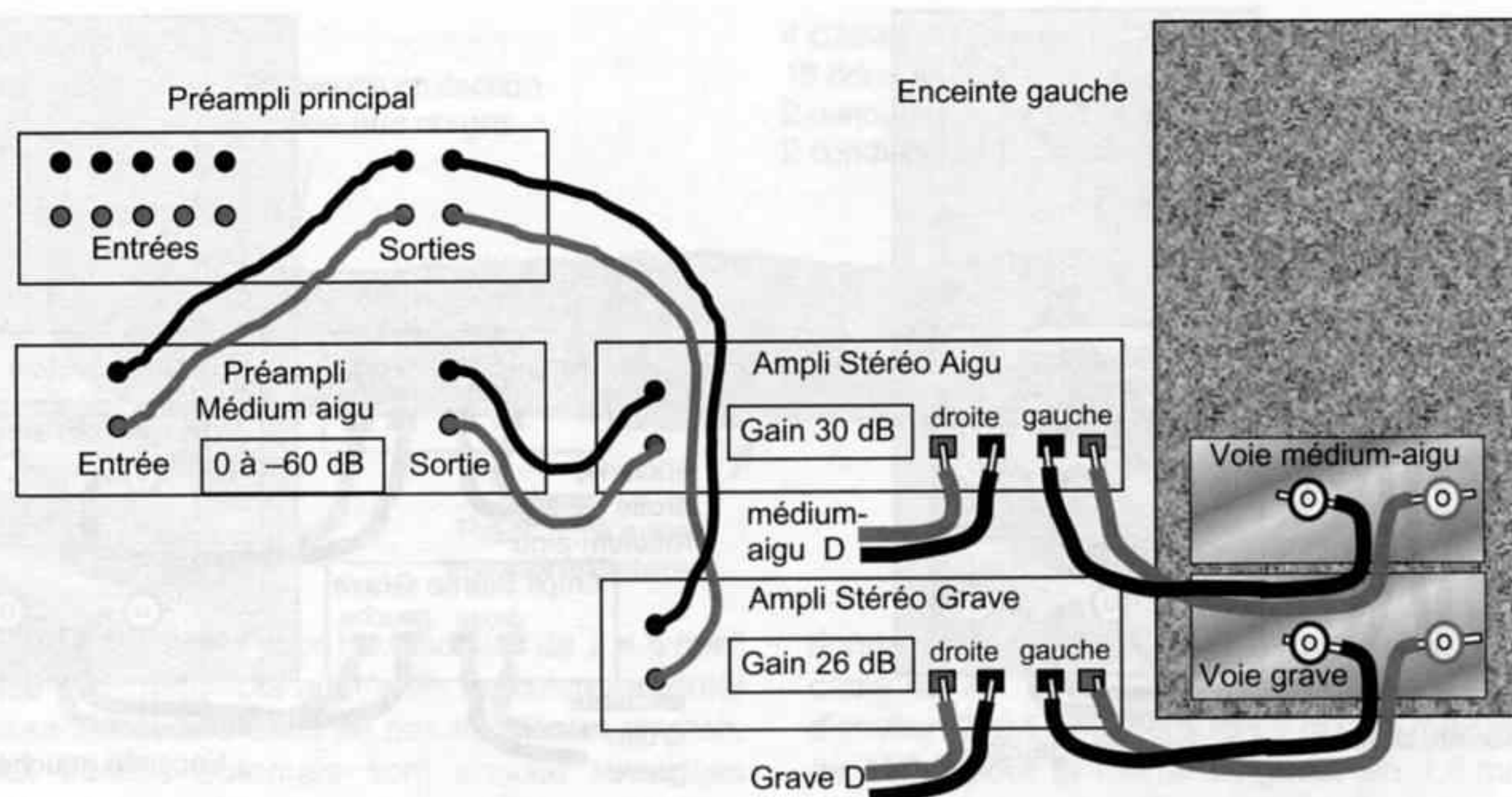


Figure 114 - Une configuration correcte de bi-amplification autorise un réglage du volume global à l'aide du préamplificateur principal. Le réglage du niveau relatif des voies médium-aigu est accessible grâce au préampli dédié, en fait un simple atténuateur passif, réalisé avec un boîtier, quatre prises Cinch dorées et un potentiomètre double $2 \times 50 \text{ k}\Omega$. Le gain supérieur de l'amplificateur, ainsi que le rendement plus élevé des

haut-parleurs, fait que les voies médium-aigu demandent la plupart du temps une atténuation, de -6 dB dans cet exemple. L'écoute à niveau élevé ou au contraire modéré demande une atténuation supérieure, jusqu'à -8 dB. Lorsque les haut-parleurs grave et médium-aigu sont mal assortis, tout changement du réglage de volume demande un réajustage des niveaux relatifs, ce qui est contraignant.

ple évoqué plus haut, la résistance de $1,8 \Omega$ servant à atténuer le haut-parleur d'aigu doit être supprimée en bi-amplification.

Il s'avère que même en utilisant deux amplificateurs identiques, le résultat global n'est satisfaisant que pour un réglage de niveau précis, ce qui laisse une liberté très insuffisante à l'utilisateur.

La bi-amplification, figures 114, 115 et 116 ne doit par conséquent se concevoir qu'avec la bi-préamplification, elle seule permettant de disposer de réglages séparés des niveaux de grave et de médium-aigu. Dans cette configuration, l'un des deux préamplificateurs est utilisé pour sélectionner les sources et régler le volume sonore global, sa sortie attaquant directement l'amplificateur de grave sans autre atténuation. Une deuxième sortie attaque le second préamplificateur, utilisé seulement comme atténuateur, et éventuellement correcteur si cela s'avère indispensable, et qui devrait présenter un gain nul ou très faible, inférieur à 6 dB. Un préamplificateur passif est suffisant, constitué de deux potentiomètres de volume autorisant un réglage très précis de la balance. Il est relié à l'amplificateur de médium-aigu, qui doit idéalement présenter un gain légèrement supérieur à celui de grave, afin de permettre un ajustement de part et d'autre du zéro des niveaux relatifs.

La puissance d'amplification nécessaire pour la voie grave peut atteindre des valeurs inavouables avec les enceintes actuelles à très bas rendement. Il est normal de recourir à des amplificateurs de quelques centaines de Watts, à condition que la tenue mécanique des haut-parleurs de grave le permette, ce qui malheureusement est rarement le cas. Comme cela sera détaillé au chapitre enceintes acoustiques, un H-P grave de 26 cm est un strict minimum, un diamètre de 31 cm ou mieux 38 cm étant une valeur normale, nécessaire au respect du contenu sonore. Cela peut paraître gigantesque étant donnée la tendance actuelle de miniaturisation. Cependant, pour rétablir une juste échelle, un grand haut-parleur ne fait pas 31 cm, mais 55 à 80 cm de diamètre, tel les voies d'extrême-grave utilisées dans les salles de spectacle. Contrairement aux apparences, un haut-parleur de grand diamètre ne produit pas un son plus grave, ni plus fort, ni plus ample ou lourd, mais au contraire plus rapide, plus léger et nerveux, grâce à des déplacements de membrane nettement plus faibles, ainsi qu'à une absence de tassement dynamique et de traînage.

Les voies de médium et d'aigu demandent quant à elles des puissances beaucoup plus faibles, de l'ordre de 20 à 30 W en crête, avec des haut-parleurs traditionnels, et encore moins, de 1 à 5 W avec des haut-parleurs à pavillon.

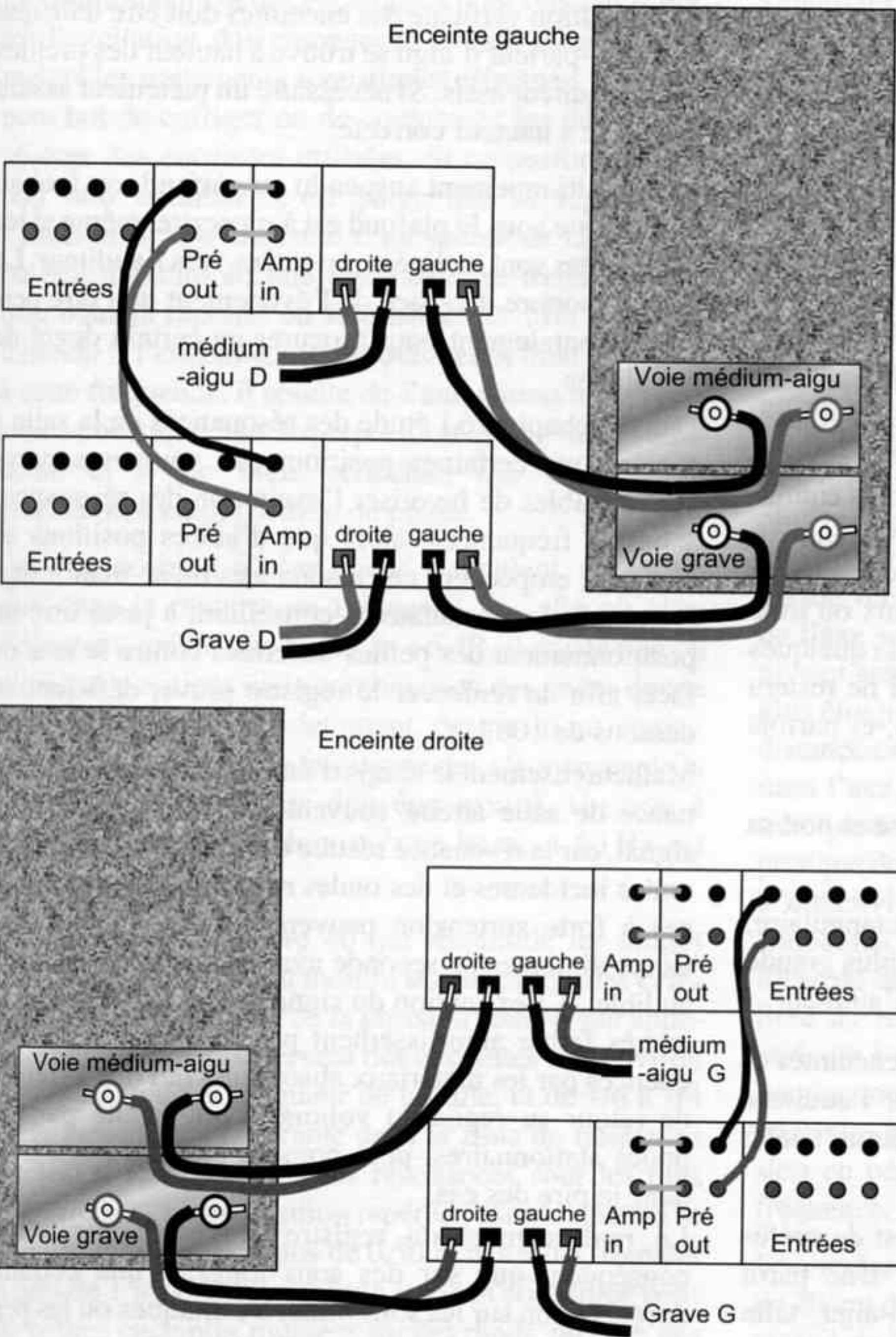


Figure 115 - La bi-amplification passive est possible avec deux amplificateurs intégrés identiques, à condition que les sorties de la section préampli et entrées de la section ampli soient accessibles sur le panneau arrière. En utilisation normale, des straps de métal assurent la liaison entre ces deux sections. Straps retirés, il est possible de n'utiliser que la section amplificatrice, comme ici pour la voie grave. Il est préférable dans ce cas d'utiliser la section préampli de l'appareil dédié au secteur médium-aigu, car son alimentation sera plus silencieuse, étant moins sollicitée. Le réglage des niveaux relatifs n'est possible que si la section amplificatrice est munie d'un atténuateur d'entrée en façade.

Figure 116 - Lorsque la section amplificatrice n'est pas équipée d'un atténuateur d'entrée, c'est le réglage de volume de la section préampli qui est utilisé. Dans l'exemple ci-contre, l'appareil du bas est utilisé comme préampli principal et amplificateur pour la voie grave. L'appareil du haut, identique, est utilisé en atténuateur, pour le réglage de niveau relatif des voies médium-aigu, qu'il est chargé d'amplifier. Les rôles des deux préamplis peuvent être inversés, avec parfois des résultats qualitatifs différents, dépendant des qualités des circuits d'alimentation de l'appareil, très variables avec la bande de fréquence considérée. Un essai est donc recommandé.

Le filtrage actif associé à la multi-amplification sera détaillé au chapitre suivant (8), car cette pratique tient plus de la conception du système que de sa mise en œuvre, la réalisation du filtre actif devant être effectuée sur mesures en fonction des haut-parleurs et des objectifs.

POSITIONNEMENT DES ENCEINTES

J'ai déjà fait remarquer que l'habitat moderne n'est pas adapté à la reproduction musicale. Faire cohabiter dans une salle un ameublement de confort et de vie familiale avec des éléments de système haute-fidélité n'est pas simple. Si de plus des contraintes liées aux ouvertures, portes et fenêtres, ou aux passages, aux escaliers, viennent s'y ajouter, on ne s'étonne plus de voir les appareils cachés dans un placard à un bout de la pièce et les enceintes cachées, l'une derrière un

canapé, l'autre dans un coin entre la bibliothèque et la fenêtre. Quant à la place d'écoute idéale, c'est la distance au téléviseur qui l'impose, sans reflets de la fenêtre s'il vous plait...

Tout cela est exagéré bien sûr (quoique...) et sans atteindre cette situation extrême qui n'apportera jamais le moindre réalisme, de nombreux systèmes n'exploitent pas correctement l'espace disponible. La règle est pourtant simple : donnez de l'espace à votre système, il vous le rendra au centuple.

Il ne s'agit pas seulement de l'installer dans une grande pièce, une surface de 35 m² est déjà suffisante la plupart du temps, et les pièces de plus de 80 m² commencent à poser de sérieux problèmes de réverbération. Il s'agit plutôt de bien utiliser l'espace de la salle. La recherche du réalisme sonore impose de donner une priorité à la mise en œuvre du système, qui

devient l'élément directeur de la disposition de l'ameublement. Au lieu de subir les contraintes du mobilier, le système s'impose, prend sa place. Comme un interprète occupe la scène, le système occupe la pièce, prend possession de l'espace. Rien de plus normal puisqu'il doit le remplir.

Refuser cette idée, c'est continuer de croire que deux mini-enceintes cachées sur une étagère de livres peuvent remplir l'espace et donner l'illusion du concert.

Les enceintes ne doivent pas être cachées, ni reléguées dans les encoignures pour des raisons esthétiques. Elles devraient être distantes de 2,50 à 3,50 m environ et former avec l'auditeur un triangle à peu près équilatéral. Sur un plan de votre salle, posez un triangle à l'échelle, découpé dans du papier et vous constaterez qu'il y a la plupart du temps seulement deux ou trois dispositions possibles. Si vous ajoutez à cela quelques conseils simples dictés par l'expérience, il ne restera bientôt qu'une ou deux solutions valables, et parfois plus du tout :

- L'axe d'écoute est la longueur de la pièce et non sa largeur ou sa diagonale
- Si la pièce a une forme en L ou non rectangulaire, l'axe d'écoute gagne à être choisi sur la plus grande dimension, pour laisser de l'air derrière l'auditeur.
- Le triangle d'écoute formé par les deux enceintes et l'auditeur est centré, c'est-à-dire que l'auditeur occupe la médiane de la salle, et les enceintes sont à égale distance des murs latéraux.
- La paroi derrière la position d'écoute est de préférence absorbante, à la rigueur neutre. Une paroi réfléchissante, surtout dans le médium-aigu, telle qu'une fenêtre ou un meuble vitré, un mur lisse et nu, est à éviter absolument. Si c'est le cas, un traitement même simple est à envisager : tentures, tapisseries, paravent lourd, ou panneaux acoustiques, portes persiennées.
- La distance séparant la zone d'écoute et le mur du fond doit être suffisante. Une position située entre $1/4$ et $1/3$ de la longueur de la salle semble bien un minimum. Si possible une position plus avancée, vers $3/8$ de la longueur, assure que l'auditeur est dans le champ direct, à une distance inférieure à la distance critique.
- Le rayonnement des haut-parleurs n'est pas entravé par un obstacle tel qu'un meuble, un canapé. Entre les enceintes et la position d'écoute, seuls des meubles bas sont acceptables, ainsi que des tapis.
- La position verticale des enceintes doit être telle que le haut-parleur d'aigu se trouve à hauteur des oreilles de l'auditeur assis. Si nécessaire un piétement assure la mise à hauteur correcte.
- Le positionnement suspendu au plafond, ou fixé au mur juste sous le plafond est à proscrire, même si les enceintes sont inclinées, orientées vers l'auditeur. La scène sonore, l'espace de l'événement doit être perçue frontalement pour procurer un certain degré de réalisme.

Dans le chapitre 6 l'étude des résonances de la salle a montré que certaines positions des sources sonores sont capables de favoriser l'excitation des résonances à basses fréquences, alors que d'autres positions au contraire empêchent ces résonances de se manifester. De nombreux installateurs conseillent à juste titre un positionnement des petites enceintes contre le mur de face, afin de renforcer le registre grave, déficient en dessous de 100 Hz.

Malheureusement le temps d'établissement d'une résonance de salle atteint souvent plusieurs périodes du signal, car la résonance résulte d'un effet cumulatif des ondes incidentes et des ondes réfléchies. Les résonances à forte surtension peuvent ainsi demander plusieurs dixièmes de seconde avant de procurer un effet audible. À l'extinction du signal, c'est encore pire car le très faible amortissement procuré aux basses fréquences par les matériaux absorbants fait que le temps de retour au repos du volume d'air, excité par des ondes stationnaires, peut prendre plusieurs secondes dans le pire des cas.

Le renforcement du registre grave n'apparaît par conséquent que sur des sons longs, d'une certaine durée, et non sur les sons brefs, les attaques ou les percussions. Les résonances d'instruments, dues au volume d'air qu'ils contiennent, à l'étendue de leurs parois, sont donc exagérées par rapport aux sons du mouvement musical, ceux de la partie "active" de l'instrument.

La sensation d'espace ainsi créée est artificielle, la sonorité de la salle d'écoute remplaçant celle de la salle de concert. La sensation de matière sonore est faussée également, la constance de taille et d'énergie de l'instrument n'étant pas assurée. Bref, le réalisme n'est pas au rendez-vous, et seul l'équilibre tonal trop montant des mini enceintes actuelles peut y trouver son compte. Les petites enceintes n'ont jamais pu et ne pourront jamais procurer le réalisme sonore. Ce n'est pas une question de technologie, cela est lié à la densité de l'air que nous respirons et à la célérité de déplacement des ondes sonores dans l'air. L'impédance (résistance aux vibrations) de l'air est très faible, et les longueurs d'ondes très grandes. Le progrès n'y changera rien. L'informatique non plus...

Le positionnement des enceintes a pour objectif d'éviter l'excitation des résonances restant dans la salle malgré les traitements acoustiques effectués. Il n'a pas pour but de corriger ou de compenser les déficiences sévères des enceintes utilisées. Si ce positionnement doit être optimisé, c'est parce que la réponse de l'enceinte située dans une zone sourde de la pièce, là où elle n'excite aucune résonance, se traduit par un trou dans la réponse en fréquence. Ce trou n'est pas inhérent à l'enceinte, qui produit bel et bien un signal à cette fréquence, il résulte de l'annulation de la pression acoustique par superposition d'une onde incidente et d'une onde réfléchie, qui se trouvent précisément en opposition de phase.

Entre la position où ces ondes s'annulent, créant un trou dans la réponse en fréquence, et celle où elles s'ajoutent, créant une bosse de +6 dB, il existe une ou plusieurs positions où la combinaison des ondes donne un niveau correct. Évidemment, ces positions convenables dépendent de la fréquence des résonances de la salle, et un compromis doit être trouvé. Un trou à 30 Hz est inaudible alors qu'une bosse à 80 Hz est horriblement gênante.

Le schéma de la figure 40 qui récapitule les modes vibratoires de la salle et montre les zones sourdes et les zones de renforcement de la pression sonore, fait apparaître qu'un positionnement des enceintes aux environs de $1/8$ à $1/6$ de la longueur de la salle, et de $1/6$ à $1/4$ de la largeur, est favorable dans la zone de fréquence de 100 à 125 Hz, là où les résonances sont les plus désastreuses. Cette position repérée D sur le schéma se situe généralement à plus de 0,50 m des murs, souvent à près de 1 m. C'est la position souvent conseillée pour de petites enceintes montées sur des pieds, ou pour des colonnes. Les événements parfois disposés sur la face arrière gagnent également à être éloignés des murs. Poser les enceintes sur une étagère ou dans une bibliothèque est donc une mauvaise idée. La position E située au $1/4$ de la longueur et au $1/3$ de la largeur procure un renforcement de cette bande de fréquence, ce qui ne me paraît pas indispensable.

C'est en commençant par un positionnement au point D, puis en rapprochant petit à petit les enceintes des points E, que l'on trouve la position donnant la meilleure homogénéité au registre grave. Des essais avec différents disques sont préférables, chacun devant procurer un registre grave différent, des sonorités graves particulières. Si tous les disques donnent les mêmes sons graves, c'est que manifestement une (ou plusieurs...) résonance est excitée. Certaines enceintes mal conçues procurent des graves résonnants, quelle que soit leur position, car la résonance se produit à

l'intérieur de l'ébénisterie. Dans ce cas même en plein milieu de la pièce l'enceinte donne un grave lourd. Allez tout de suite au chapitre 8...

Enfin l'existence de lobes de diffusion parfois assez étroits, d'une part aux fréquences de raccordement des filtres séparateurs de voies, et d'autre part dans le registre aigu, à cause des faibles longueurs d'onde mises en jeu, impose une orientation angulaire de 30° environ vers la zone d'écoute. Cette valeur est un minimum et un angle supérieur procure des avantages en terme de confort d'écoute : si les faisceaux sonores issus des deux enceintes se croisent en avant de la position d'écoute, la focalisation des sources virtuelles est plus précise et plus stable, et dépend beaucoup moins de la position de l'auditeur. En effet, si ce dernier est décalé vers la gauche, il perçoit l'enceinte gauche hors de l'axe sous un angle important qui fait diminuer le niveau sonore perçu, mais il entend l'enceinte droite, plus éloignée, dans l'axe. La baisse de niveau due à la distance est compensée par le niveau supérieur obtenu dans l'axe, et la scène stéréophonique reste alors centrée, perdant seulement un peu de profondeur. Cette pratique donne d'excellents résultats avec les pavillons à directivité contrôlée et les tweeters à diaphragme annulaires, tous deux peu directifs et procurant des lobes de diffusion larges, avec une décroissance régulière du niveau hors de l'axe. Par contre, les haut-parleurs à rayonnement direct filtrés à des fréquences un peu trop élevées, comme c'est le cas pour toutes les enceintes à deux voies, produisent des lobes de diffusion en pétales de marguerite, très variables avec la fréquence. Ils doivent donc être écoutés dans l'axe.

Une remarque pour terminer : une enceinte miniature de 20 cm de base et 30 cm de haut, montée sur un pied massif de 80 cm de haut, et disposée à 0,60 m du mur du fond et du mur latéral, occupe autant d'espace au sol qu'une enceinte colonne de 40 cm de base, et de 1,30 m de haut et disposée à environ 0,40 m des murs.

La première, à deux voies, est équipée d'un H-P grave de 13 cm chargé par un volume de 5 dm^3 . La seconde, à 3 voies, contient 2 H-P grave de 26 cm chargés par un volume de plus de 100 dm^3 . Le choix d'une petite enceinte pour des raisons de place ne se justifie absolument pas. Les raisons seraient-elles esthétiques ? Il ne s'agit alors sûrement pas d'esthétique sonore...

BILAN DE L'OPTIMISATION

À ce stade de la démarche d'amélioration de la reproduction sonore, un petit coup d'œil en arrière afin de mesurer le chemin parcouru me semble bienvenu, autant pour se situer et apprécier les obstacles franchis que pour orienter la suite éventuelle du processus. Un

retour au schéma figure 8 permet de faire le point des limites qui ont été repoussées et de celles qui restent à étudier.

Ce sont tout d'abord les perturbations du domaine temporel qui ont été éloignées, par un aménagement convenable du lieu d'écoute. L'**élimination de plusieurs résonances** gênantes de basses fréquences, responsables d'un allongement du temps d'établissement des notes graves et d'un traînage important, se traduisant par un empâtement, un alourdissement des sons, a permis de libérer et d'éclaircir, **d'alléger ce registre grave** qui emplissait l'espace. Le **traitement de la réverbération** excessive, responsable d'un étalement de l'énergie des attaques en créant une masse sonore confuse, noyant les extinctions de notes, a **libéré l'espace** sonore, autorisant la perception de l'acoustique propre au lieu de la prise de son, situant l'auditeur dans une perspective large et profonde, aux premiers plans présents et proches et aux arrières plans dégagés, nets et transparents malgré l'impression de distance. La **suppression des réflexions** sur les surfaces proches des enceintes acoustiques a apporté une **aération** supplémentaire à cet espace, en diminuant l'étalement spatial des sources virtuelles, en les focalisant de manière plus **ponctuelle** et plus **stable**, ce qui contribue à une impression de taille et d'énergie rayonnée plus réaliste car plus constante, de ces sources virtuelles.

La sensation d'espace a beaucoup gagné en réalisme après ces interventions.

Ce sont ensuite les perturbations du côté inférieur du domaine dynamique, dues aux divers bruits perturbateurs couplés et induits qui ont été supprimées. L'**ouverture ou la réduction des boucles de masse** ainsi que la symétrisation de l'alimentation secteur, ont abaissé grandement le **seuil de bruit**, tout d'abord aux basses fréquences, 50 Hz et harmoniques du courant secteur, en supprimant une grande partie des ronflements. La mise en œuvre d'un **filtrage secteur** adapté a d'autre part libéré, éclairci les fréquences élevées en filtrant les pics parasites couplés par le secteur sur l'ensemble des appareils. L'utilisation de cordons de liaison a également contribué à cette amélioration vers le bas de la dynamique, en particulier si des transformateurs d'isolement sont utilisés, soit implantés en entrée ou sortie des appareils, soit sur le câble lui-même. La mise en œuvre de moyens de lutte contre les vibrations parasites, induisant des effets microphoniques, a permis la **suppression des couplages acousti-**

ques directs ou indirects, responsables d'échos et de réverbération ajoutant des traînages indésirables. Les meubles, supports et bases stables, ainsi que les accessoires destinés à éliminer ces vibrations parasites ont abaissé également le seuil des bruits couplés, agissant par la même occasion sur le domaine temporel.

Enfin l'optimisation du couplage amplificateur-enceintes, grâce au **bi-câblage** ou mieux à la bi-amplification, a diminué les **interactions**, d'une part entre haut-parleurs grave et aigu en séparant leurs lignes de câblage, et d'autre part entre haut-parleur et amplificateur. C'est encore l'aération de l'espace sonore qui se trouve améliorée.

Cependant ces pratiques n'ont eu que peu d'effet sur le domaine fréquentiel, ni sur la dimension **dynamique** vers le haut, les crêtes de niveau, en particulier dans le **registre grave**, ni non plus sur la **finesse** du dessin rythmique. L'amélioration de ces différents points peut maintenant être envisagée, avec pour commencer une extension de la dimension fréquentielle vers les **basses fréquences**, grâce à l'utilisation de haut-parleurs graves de **grand diamètre** et à **haut-rendement**. Ces haut-parleurs permettent du même coup une **puissance acoustique maximale** suffisante pour reproduire les crêtes de niveau des attaques de note, et repoussent donc les limites hautes de la reproduction de la dynamique. La mise en œuvre d'un **filtrage séparateur** de fréquence respectant la **dimension temporelle** permet de reproduire de manière plus réaliste les différents grains des **matières** sonores, ce dernier point méritant d'être encore amélioré par l'utilisation d'amplificateurs à **lampes**, triodes de préférence, équipés de liaison par transformateurs, les seuls à même de reproduire avec finesse et légèreté, vivacité et expressivité, les nuances du **trait musical**, qui dessine le **mouvement** rythmique.

Matière sonore et mouvement demandent par conséquent un approfondissement important des connaissances concernant les transducteurs et les amplificateurs, ainsi qu'une remise en cause complète des moyens technologiques mis en œuvre, commençant par une analyse complète de leurs limitations, afin de fixer des exigences précises, des seuils inférieurs incontournables. Franchir ces seuils demande de dépasser les compromis habituels, pour accéder au réalisme sonore. Les deux chapitres suivants (8, 9) analysent les enceintes et les amplificateurs avec cet objectif clairement défini.

8. ENCEINTES ACOUSTIQUES

« La nature pour être commandée doit être obéie. »

Francis Bacon

8.1 Autour du haut-parleur de grave

ENCORE LA MÉCANIQUE... voir annexe 3, p. 351

Le terme de transducteur est utilisé ici pour rappeler que le haut-parleur est avant tout chargé de transformer de l'énergie, de réaliser le passage de l'énergie électrique en énergie mécanique. En effet, l'onde sonore n'est rien d'autre qu'un flux d'énergie mécanique se propageant dans le milieu ambiant, l'air. La pression acoustique se propage par déformation élastique du milieu, c'est-à-dire par déplacement des "molécules", oscillant autour de leur position d'équilibre. L'intensité sonore est tout simplement le produit de la pression acoustique par la vitesse des particules, cette dernière étant liée à la pression car l'impédance de l'air est à peu près constante.

Cette pression est transmise au milieu par déplacement d'une surface vibrante. Quelle que soit la forme de cette surface, quel que soit le principe permettant de créer ce mouvement vibratoire, l'obtention d'une pression acoustique suffisante demande, à cause de la faible "résistance" de l'air, à la fois une force élevée et une étendue de la surface vibrante importante.

Comme dans toute transduction, la grandeur fondamentale, celle dont l'importance est non seulement capitale, mais conditionne toutes les autres caractéristiques, est le **rendement** énergétique. Ce rendement exprime l'efficacité avec laquelle la transformation d'énergie est effectuée. Dans la plupart des appareils effectuant une transformation d'énergie, le rendement se situe dans une fourchette allant de 80 % parfois même un peu plus, pour un moteur électrique par exemple, à 25 ou 30 %, pour un moteur thermique, ce qui est déjà moins flatteur puisque dans ce cas la plus grande partie de l'énergie, 70 à 75 %, est perdue en chaleur qu'il faut évacuer !

Le haut-parleur traditionnel a un rendement compris entre 0,05 et 0,5 % pour une écrasante majorité. Ce n'est ni une plaisanterie, ni une faute d'impression. Plus de 99 % de l'énergie électrique envoyée par

l'amplificateur au moteur du haut-parleur est transformée en chaleur. Exprimer la puissance d'une chaîne Hi-Fi en watts électriques, en sortie de l'ampli, est donc parfaitement inutile, à moins que vous ne l'utilisiez comme chauffage d'appoint...

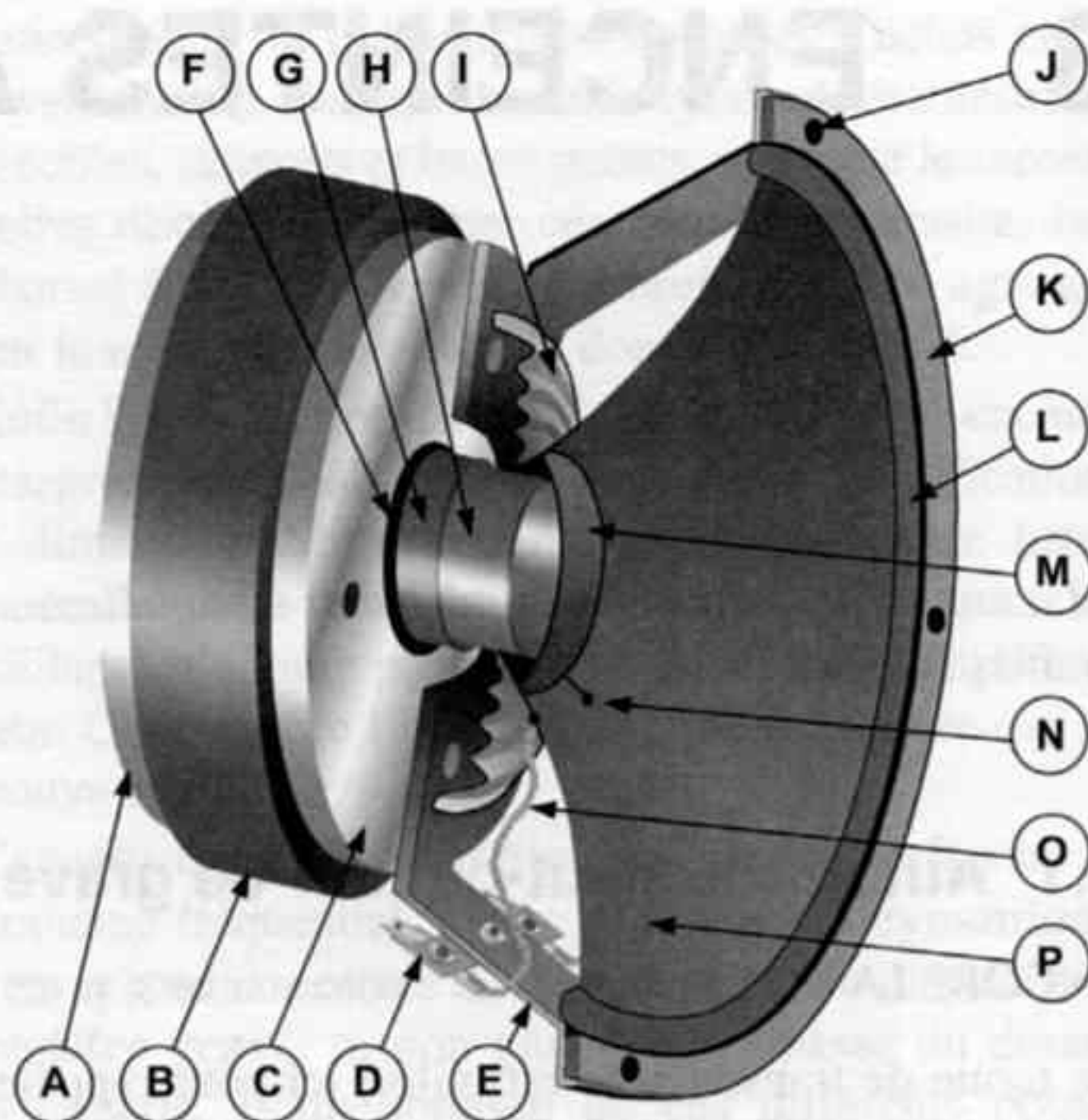
Les haut-parleurs professionnels ont un rendement compris entre 1 et 10 % environ et sont qualifiés de "haut rendement" ce qui est encore un peu optimiste. Seuls quelques haut-parleurs rarissimes, utilisant des pavillons de grandes dimensions, parviennent à une efficacité correcte de l'ordre de 20 à 50 %, tels les pavillons repliés conçus par Western Electric pour le cinéma, dans les années 30, et qui se contentaient des 2 W produits par les tout premiers amplificateurs à lampes, pour sonoriser une salle de plusieurs milliers de places !

Considérer d'autres grandeurs, telles la fréquence de coupure ou la linéarité de la bande passante, alors que ces mesures concernent une part d'énergie ridiculement faible, me paraît absolument inutile ! Au lieu de chercher à savoir ce que donnent ces malheureux 0,5 % d'énergie transformée, il me semble infiniment plus utile de chercher à récupérer les 99,5 % perdus. Une fois qu'il seront retrouvés, transformés en énergie acoustique, il sera temps de se questionner sur la manière de les rendre harmonieux et "linéaires" !

Ce que je souhaite faire émerger à la conscience du lecteur, c'est qu'un énorme travail d'optimisation est effectué par les constructeurs dans le but d'améliorer les **qualités** attribuées à cette très faible part d'énergie transmise, alors que c'est la **quantité** qui est notoirement insuffisante. Une seule comparaison me vient à l'esprit : c'est un peu comme si on essayait d'améliorer la souplesse et la régularité de fonctionnement d'un moteur de scooter pour lui faire déplacer une berline de 1 500 kg. Il y a disproportion évidente, et l'équation n'a pas de solution réelle sans changement du paramètre essentiel. Ce moteur fonctionnera très bien, silencieusement et économiquement... au ralenti !

Figure 117 - Le dessin ci-contre en coupe partielle montre la constitution d'un haut-parleur de grave classique :

- A** : plaque de champ arrière, comportant un noyau non visible ici, venant à l'intérieur de la bobine mobile.
- B** : aimant en couronne, généralement en ferrite, collé aux plaques de champ.
- C** : plaque de champ avant, alésée.
- D** : plaquette à bornes.
- E** : saladier ou châssis, en tôle emboutie ou alliage léger moulé, serti ou vissé sur la plaque de champ avant.
- F** : entrefer entre plaque de champ avant et noyau.
- G** : bobine mobile, coulissant avec jeu dans l'entrefer.
- H** : support de bobine, tube de papier, fibre de verre ou synthétique.
- I** : suspension intérieure ou spider en tissu gaufré.
- J** : trou de fixation.
- K** : joint périphérique.
- L** : suspension externe en tissu enduit ou néoprène, PVC.
- M** : cache-noyau ou dôme anti-poussière en papier, tissu, carbone etc.



- N** : collage des fils de bobine.
- O** : tresse de raccordement.
- P** : membrane en papier pressé, ou fibres de verre, de carbone, ou synthétique.

Reproduire un orchestre symphonique dans votre salon avec deux haut-parleurs de 17 cm relève de la même disproportion. Ce n'est pas une question de volume de la pièce ni de niveau sonore, mais une question de rapidité de réponse, indispensable à la vivacité du trait musical, à la transparence de l'espace.

Une deuxième grandeur, intimement liée à l'efficacité de la transformation d'énergie, est très limitée pour la plupart des haut-parleurs courants. Il s'agit de la **puissance mécanique maximale** de sortie, dont la valeur est si basse qu'aucun constructeur n'ose la divulguer, d'autant qu'elle est encore plus limitée aux basses fréquences.

Il est vrai que les puissances acoustiques des sources habituelles sont faibles, voire très faibles, généralement inférieures au dixième de watt ! Un piano de concert parvient à rayonner environ 0,5 W et un orchestre philharmonique au grand complet développe rarement plus de quelques watts...

Un haut-parleur de 13 à 17 cm, taille considérée comme normale à l'heure actuelle, rayonne péniblement 25 mW, peut-être 50 pour les meilleurs. Cette puissance maximale produit, lors des crêtes du signal, un niveau sonore de l'ordre de 95 dB à 1 m. Même avec une dynamique réduite à 40 dB, ce qui est peu mais réaliste avec les prises de son actuelles, cela correspond à un niveau moyen de l'ordre de 75 dB à 1 m, donc environ 66 dB à 3 m, ce qui est notoirement insuffisant pour parler de réalisme, sauf peut-être pour la musique de chambre.

Une écoute à niveau normal demande environ 15 dB de plus, ce qui ne semble pas énorme. Pourtant cela correspond à une puissance rayonnée 32 fois supérieure, ce qui impose soit une amplitude de vibration de la membrane presque 6 fois plus forte, ce qui est techniquement irréalisable, soit un diamètre de haut-parleur près de 3 fois plus grand. La miniaturisation des enceintes constitue par conséquent une barrière infranchissable vers la recherche de réalisme sonore, en imposant un niveau crête et une dynamique apparente correspondant à peu près à celles obtenues lors de l'écoute de l'événement réel à une distance 3 à 4 fois trop grande. Quel mélomane considère que la meilleure place est au fond de la salle ?

Quelques formules simples permettent de fixer des ordres de grandeur, afin d'illustrer ces propos. Le dessin figure 117 rappelle la constitution d'un haut-parleur traditionnel. La plus grande part de la puissance rayonnée, souvent 75 à 80 %, est émise par le haut-parleur de grave, qui mérite donc une attention particulière. Le lecteur se reportera à la bibliographie (P. Loyez) pour retrouver la description des parties constitutives ainsi que toutes les définitions des grandeurs caractéristiques et des paramètres fondamentaux.

Sans rentrer dans les détails, rappelons qu'un haut-parleur traditionnel est muni d'une membrane vibrante de diamètre D , de surface $S_d = \pi \cdot D^2 / 4$ et de masse M_m comprenant l'ensemble de l'équipage mobile, c'est-à-

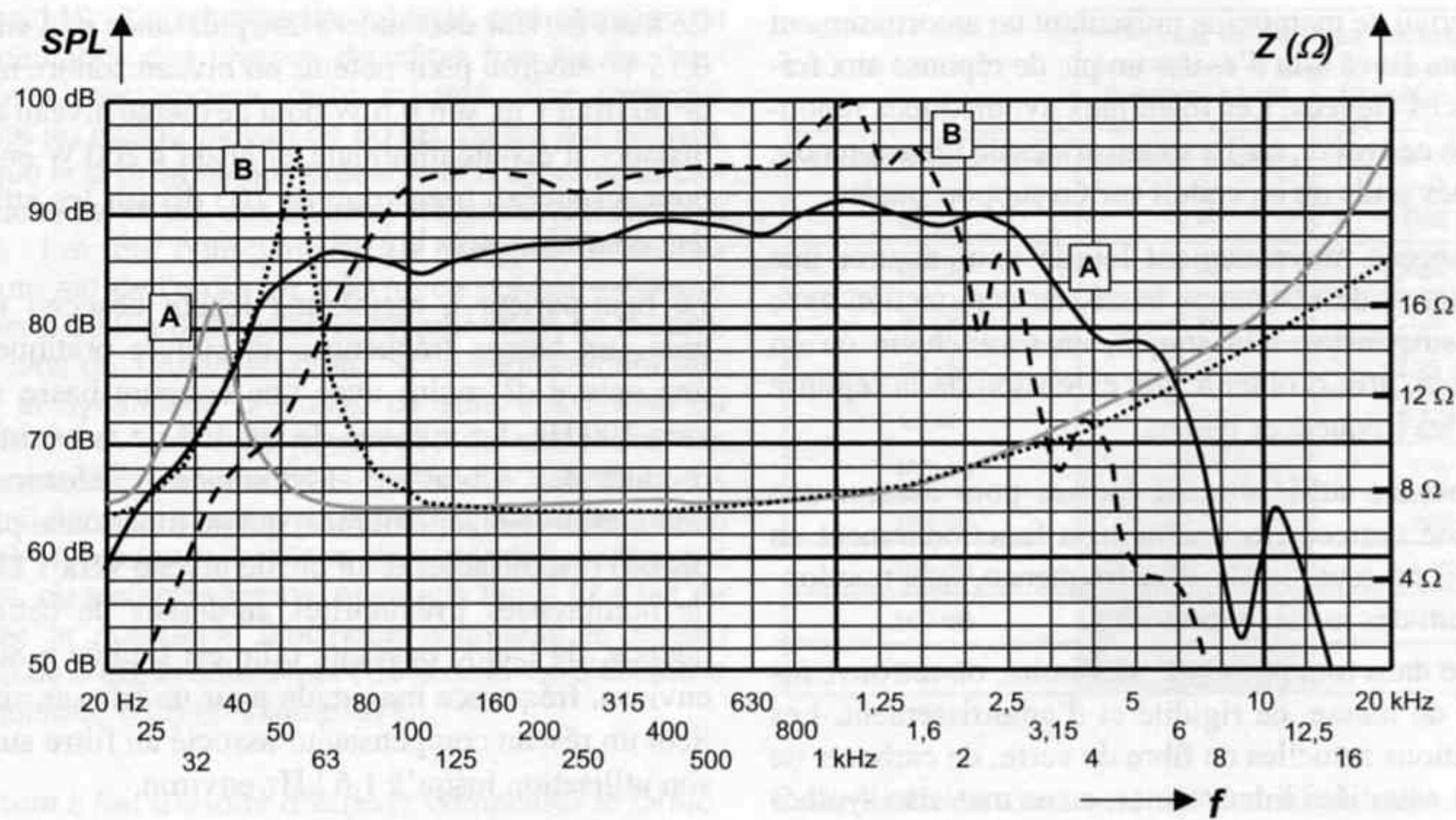


Figure 118 - Réponses fréquentielles de deux H-P de 21 cm.

dire membrane et ses suspensions, bobine mobile et son support, cache-noyau, ainsi que la masse de l'air déplacé. C'est la partie mécanique du transducteur.

Ce transducteur rayonne l'énergie mécanique de sortie dans un milieu, l'air ambiant, dont la masse volumique est $\rho_0 = 1,3 \text{ g / dm}^3$ et dans lequel la célérité des ondes est $C = 344 \text{ m/s}$, dans les conditions normales.

Son moteur électrique est constitué d'un aimant en couronne, et d'un circuit magnétique fait de deux plaques de champ et d'un noyau central. Un entrefer est aménagé dans ce circuit, où il règne une induction magnétique B . La bobine mobile de résistance électrique R_e plonge dans cet entrefer, une longueur L de fil étant soumise au champ magnétique.

Le rendement énergétique est :

$$\eta_0 = (\rho_0 / 2\pi \cdot C) \cdot (B^2 \cdot L^2 / R_e) \cdot [1 / (M_m / S_d)^2]$$

La présentation de cette formule fait volontairement apparaître trois termes :

- Un terme lié au **milieu** : $\rho_0/2\pi C$, sur lequel aucune intervention n'est envisageable. Le progrès ne peut réduire la longueur d'onde !
- Un terme **électrique** : $B^2 L^2 / R_e$ lié aux caractéristiques du moteur magnétique.
- Un terme **mécanique** : $1/(M_m/S_d)^2$ qui correspond à une masse surfacique au carré, au dénominateur.

Le rendement est donc proportionnel au carré de la force magnétique du moteur. L'induction magnétique B intervient au carré, ainsi que la longueur L de fil sou-

mis au champ, ce qui justifie le choix d'un gros aimant pour augmenter B , associé à un entrefer étroit, et d'une bobine de grand diamètre pour augmenter L , ainsi que de plaques de champ épaisses pour qu'un plus grand nombre de spires baignent dans le flux magnétique. La résistance électrique R_e de la bobine doit être minimale, sans atteindre un seuil dangereux pour l'amplificateur.

Ce rendement est inversement proportionnel au carré de la masse surfacique de la membrane, d'où l'intérêt d'une grande membrane légère, devant toutefois rester rigide et résistante.

Habituellement réalisée en pâte à papier, la membrane a été depuis longtemps l'objet de toutes les attentions de la part des constructeurs. C'est en effet la partie visible du haut-parleur, celle qui attire le regard de l'éventuel acheteur, et qui doit par conséquent devenir le support des arguments de vente, autant que la vitrine du savoir-faire et des capacités de recherche du fabricant.

Un éventail de matériaux légers et rigides est employé aujourd'hui, chacun présentant avantages et inconvénients sans qu'aucun d'eux ne se démarque de manière définitive. L'objectif prioritaire du fabricant étant d'obtenir un fonctionnement en piston, sans déformation non contrôlée de la membrane, sur une bande passante la plus large possible, ceci afin de faciliter le filtrage et d'obtenir un raccordement correct dans le cas d'une enceinte deux voies. La tendance actuelle obéit par conséquent à plusieurs critères :

- Matériau de membrane présentant un amortissement interne élevé afin d'éviter un pic de réponse aux fréquences élevées. Les matériaux synthétiques répondent à ce critère, qu'ils soient armés de fibres ou non, utilisés seuls ou en enduit sur un support papier.
- Membrane moyennement lourde pour assurer une fréquence de résonance basse, en conjonction avec une suspension très souple, en caoutchouc ou en mousse, afin d'obtenir une extension de la réponse vers les fréquences basses.
- Membrane suffisamment épaisse pour assurer une rigidité correcte, permettant un fonctionnement en piston sur toute la plage de fréquence, sans fractionnement des modes vibratoires.

Comme dans tout problème vibratoire, on retrouve les termes de masse, de rigidité et d'amortissement. Les fabrications actuelles en fibre de verre, de carbone, de Kevlar, associées à des résines, ou en matériau synthétiques tels que bextrène, polypropylène, acrylique (Aérogel) répondent à ces critères. Elles permettent la réalisation de haut-parleurs dont la réponse fréquentielle est très large et linéaire... à faible niveau sonore. Par contre, la fabrication de membranes très légères, donc plus minces, est beaucoup plus difficile à cause des inévitables dispersions de fabrication se traduisant par des épaisseurs non constantes, des hétérogénéités de structure, et au final des performances difficilement prévisibles et reproductibles en série, ainsi qu'une mauvaise résistance mécanique. La bande passante d'un haut-parleur à membrane légère étant moins large, tant vers les basses fréquences à cause d'une résonance placée plus haut, que vers les fréquences élevées à cause d'un manque de rigidité et d'amortissement, l'utilisation de ce type de membrane se fait de plus en plus rare dans les productions actuelles.

Malheureusement c'est le rendement du haut-parleur qui est le grand perdant de cette évolution. Les graphiques figure 118, comparent les réponses en fréquence, courbes du haut, et les impédances, courbes du bas, de deux haut-parleurs de même diamètre, équipés du même moteur magnétique, l'un avec membrane synthétique épaisse et rigide repéré A, en trait plein, l'autre avec membrane papier, légère et moins amortie, repéré B en trait pointillé.

Le haut-parleur à membrane synthétique est utilisable en grave-médium et permet aisément la réalisation d'une enceinte deux voies. Sa réponse utile s'étend depuis 50 Hz jusqu'à 2,5 kHz environ avec une sensibilité moyenne de l'ordre de 88 dB/1 W à 1 m, exprimée selon la norme pour une tension de 2,83 V, soit une puissance électrique de 1 W sur 8 Ω , et mesurée à une distance de 1 m, le haut-parleur installé sur un baffle plan normalisé.

Ce haut-parleur demandera une puissance moyenne de 0,15 W environ pour obtenir un niveau sonore moyen de 80 dB à 1 m, soit 0,6 W pour ce même niveau à 2 m, distance d'écoute minimale, et jusqu'à 200 W en crête pour un niveau transitoire de 105 dB sur les attaques de percussions très brèves.

Le haut-parleur à membrane légère descend moins bien aux basses fréquences, et couvre pratiquement une octave de moins avec une coupure basse située vers 100 Hz. Le manque de rigidité de sa membrane produit des vibrations fractionnées (déformations, ondulations de la membrane, qui ne fonctionne plus en piston) responsables d'un pic de niveau vers 1 kHz, et de nombreuses irrégularités au-dessus de cette fréquence. Sa bande passante utile est limitée à 800 Hz environ, fréquence maximale pour un filtrage simple. Seul un réseau compensateur associé au filtre autorise son utilisation jusqu'à 1,6 kHz environ.

En revanche son rendement est de 6 à 8 dB supérieur, avec une valeur moyenne de 94 dB/1 W à 1 m, et il demandera par conséquent une puissance électrique 4 à 6 fois plus faible, ce qui est sans conséquence sur le niveau moyen mais décisif pour reproduire les crêtes, où il se contentera de moins de 50 W.

Le réalisme de la reproduction sonore, en particulier les sensations de présence des sources sonores, de matière sonore sur les impacts, d'énergie du mouvement, de vivacité du trait musical, sont étroitement liées au respect des attaques de notes, produisant des crêtes de niveau sonore, aussi brèves qu'intenses. Le tableau figure 119, permet de comparer les efficacités de deux haut-parleurs, l'un à bas rendement, de 0,2 % correspondant à une sensibilité de 85 dB/1 W à 1 m, de diamètre 13 cm et couramment rencontré dans les mini-enceintes actuelles, et l'autre à très haut rendement, de 6 % soit une sensibilité de 100 dB/1 W à 1 m, de diamètre 38 cm, utilisé en sonorisation professionnelle. En se fixant un niveau crête de 105 dB, la comparaison est déjà éloquent, mais pour être vraiment réaliste, en particulier sur les percussions ou les instruments puissants tels que le piano, enregistrés à proximité, c'est un niveau de 110 dB crête à 1 m qu'il convient de viser. Un tel niveau de crête correspond à un niveau d'écoute réaliste assez élevé, de l'ordre de 75 à 85 dB selon la dynamique de l'enregistrement, inférieur toutefois aux limites dangereuses pour l'oreille. C'est l'écoute à fort niveau moyen imposée par une dynamique réduite qui est dangereuse. Plus la dynamique est élevée, plus le niveau moyen est faible, à niveau de crête identique ! À 105 dB en crête, les limites d'un petit haut-parleur sont depuis très longtemps dépassées...

Figure 119 - La reproduction réaliste des attaques de note demande des niveaux de crêtes très élevés, bien que le niveau moyen reste modéré. Par exemple, l'écoute au niveau moyen de 80 dB, ce qui est réaliste, implique si la prise de son présente une dynamique plutôt réduite de 40 dB, des niveaux crêtes de 105 dB environ à 1 m du haut-parleur. La distance habituelle d'écoute est de l'ordre de 2,50 m, ce qui correspond à une perte de 6 à 8 dB selon la réverbération de la salle, soit moins de 100 dB en crête. Si l'enregistrement respecte la dynamique originale, ce sont des crêtes de 110 dB à 1 m qu'il sera nécessaire de reproduire. Un petit haut-parleur sature avant d'atteindre 100 dB, ce qui apparaît dans les cases gris clair, et est détruit bien avant 110 dB en quelques fractions de secondes, cases gris moyen, ou instantanément cases gris foncé ! Le fait de doubler la puissance électrique augmente le niveau sonore de 3 dB, le doublement de la distance d'écoute le fait chuter de 6 dB en champ libre.

Il est tout à fait illusoire d'espérer compenser le faible rendement en appliquant une puissance électrique énorme. Tout d'abord parce que le petit haut-parleur ne peut être équipé d'une bobine de grand diamètre capable de dissiper toute la puissance électrique, un maximum de 50 à 70 W pour un diamètre de bobine de 25 à 30 mm correspond au petit haut-parleur de 13 cm. Ensuite parce que la sensibilité diminue lorsque la puissance électrique augmente, autant à cause de l'échauffement de la bobine qui fait augmenter sa résistance, et par conséquent chuter le rendement, que par augmentation des pertes mécaniques dans les suspensions lorsque l'amplitude des déplacements augmente.

Enfin, aux fréquences basses, le niveau sonore maximal dépend de l'amplitude maximale des déplacements de la membrane, qui dépasse rarement 4 mm de part et d'autre de la position de repos, avant que la bobine mobile ne sorte en partie du champ magnétique dans l'entrefer.

La transduction électrique-mécanique n'est donc pas linéaire par rapport à la puissance électrique appliquée, comme le montrent les courbes de la figure 120. Ces courbes sont édifiantes à plus d'un titre, à tel point qu'elles ne sont pratiquement jamais publiées par les constructeurs. Celles que je présente ici ont été établies à la fréquence de 200 Hz sur quelques haut-parleurs à ma disposition, représentatifs de la production actuelle. La première constatation est que quel que soit le haut-parleur considéré, il existe une limite à l'efficacité de la transduction, au-delà de laquelle le fait d'augmenter la puissance électrique appliquée en entrée ne provoque plus d'augmentation de la puissance acoustique en sortie.

	Puissance électrique nécessaire	
	Diamètre 13 cm	Diamètre 38 cm
Niveau crête dB SPL	85 dB/1 W à 1m	100 dB/1 W à 1m
85 dB	1 W	0,032 W
88 dB	2 W	0,063 W
91 dB	4 W	0,125 W
94 dB	8 W	0,25 W
97 dB	16W	0,5 W
100 dB	32 W	1 W
103 dB	64 W	2 W
106 dB	128 W	4 W
109 dB	256 W	8 W
112 dB	512 W	16 W

Cette limite se situe vers 60 W environ pour le petit haut-parleur diamètre 13 cm déjà présenté plus haut, qui ne peut rayonner qu'un peu moins de 0,1 W. Le niveau maximal qu'il peut produire est par conséquent limité à un peu plus de 100 dB à 1 m. C'est pourtant un excellent modèle dont l'élongation maximale est de 8 mm et capable de descendre vers 50 Hz. La puissance maximale qu'il peut supporter en continu étant de 40 W (donnée constructeur) il ne peut fonctionner en limite de saturation que de manière passagère. La plupart de ses homologues de même diamètre rayonnent seulement 25 à 50 mW...

Un modèle de plus grand diamètre également de très haute qualité, de 17 cm et de rendement nettement plus élevé, avec une sensibilité de 91 dB/1 W à 1 m présente des limitations du même type bien qu'un peu plus éloignées. Il sature vers 50 W bien qu'il soit capable d'en supporter 60, et peut rayonner environ 0,3 W, ce qui est acceptable. Remarquons au passage qu'un plus grand haut-parleur ne supporte pas forcément une plus grande puissance d'entrée.

C'est en comparant ces haut-parleurs à faible rendement avec leurs concurrents à rendement élevé, supérieur à 1 % que l'on peut constater une énorme différence dans les valeurs de puissance acoustique rayonnée, avec environ 1 W pour le haut-parleur de 30 cm, et plus de 3 W pour le 38 cm professionnel. La linéarité de la transformation est également supérieure, avec une courbe qui commence à s'incurver dès 15 W pour le 13 cm, soit 35 mW acoustiques, vers 20 W pour le 17 cm, soit 130 mW acoustiques, et seulement vers 40 W pour les 30 et 38 cm, soit respectivement 0,6 W et plus de 2 W acoustiques.

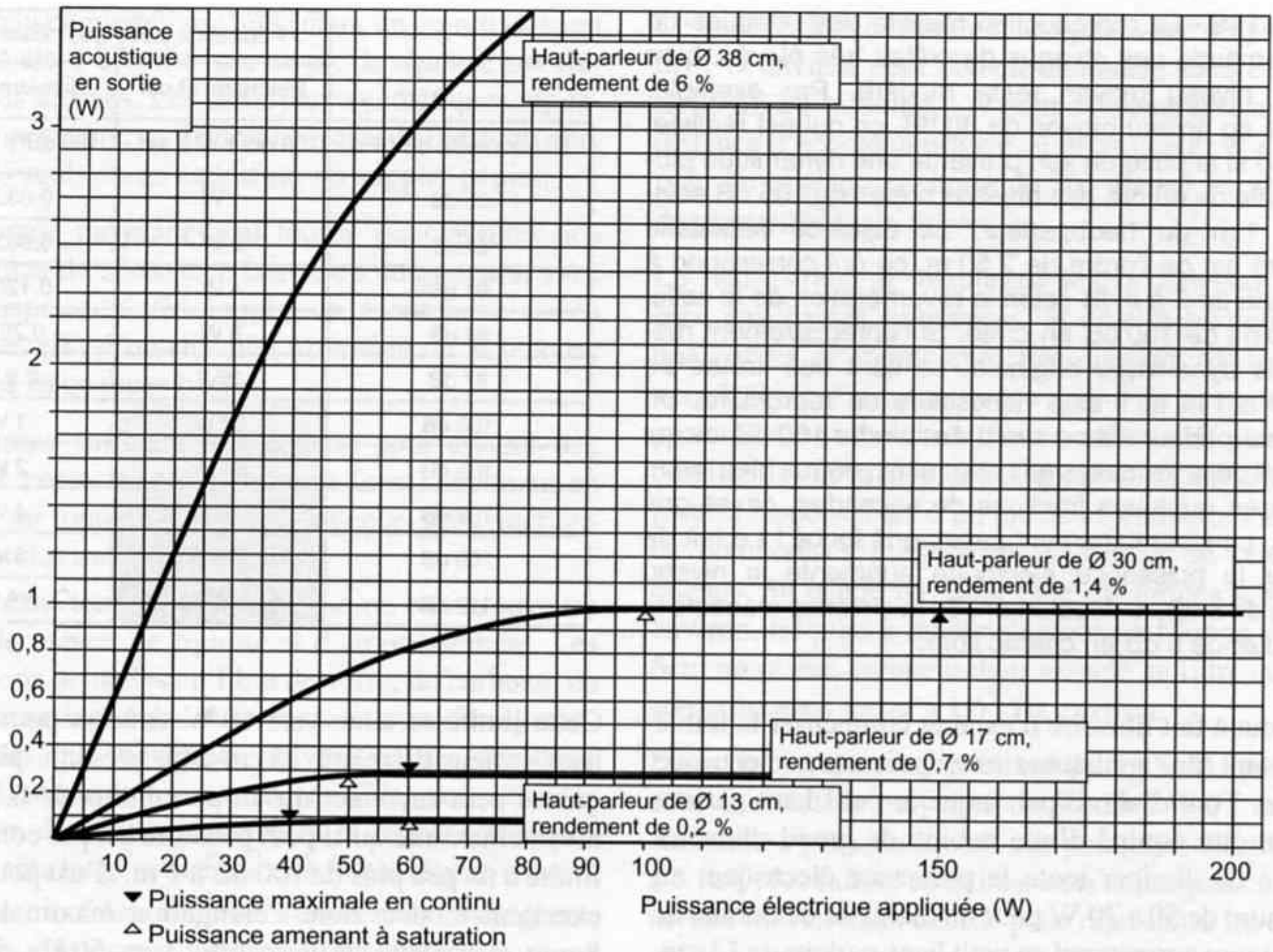


Figure 120 - Courbes de transfert de puissance de différents H-P.

Une conclusion peut immédiatement être tirée de l'examen de ces courbes : pour obtenir un transfert d'énergie linéaire jusqu'à une puissance acoustique maximale de l'ordre de 0,5 W, un diamètre minimal de haut-parleur de 30 cm est requis. Il pourra produire un niveau acoustique de crête d'un peu moins de 108 dB à 1 m, soit 100 à 102 dB à la distance normale d'écoute. C'est tout juste suffisant pour parler de réalisme.

Un tel haut-parleur a une sensibilité comprise typiquement entre 92 et 98 dB/1 W à 1 m, soit un rendement compris entre 1 % et 4 %, et il demandera par conséquent des puissances électriques de 50 W dans le premier cas et de seulement 12,5 W dans le second.

Je crois utile de rappeler que ces niveaux de crête sont atteints pendant des temps très brefs, de quelques ms seulement, et ne sont mesurables qu'à l'aide d'un sonomètre équipé pour détecter et mémoriser ces crêtes. Un sonomètre intégrateur habituel ne donnera que le niveau équivalent pendant le temps de mesure sélectionné, c'est-à-dire le niveau moyen qui est de l'ordre de 20 à 30 dB inférieur au niveau de crête, selon la dynamique du signal. Un niveau de 105 dB crête ne correspond absolument pas à un volume sonore élevé. Bien sûr, si vous essayez de produire ce niveau avec

des haut-parleurs de 17 cm, vous n'y arriverez pas : avec un niveau moyen de 75 dB les crêtes seront aux environs de 100 dB et c'est la limite mécanique des haut-parleurs. Que se passe-t-il si vous montez le volume sonore de 5 dB ? Le niveau moyen passe à 80 dB, mais les crêtes restent à 100 dB, la dynamique est donc réduite, tassée, surtout pour les sons graves. Si vous montez encore de 5 dB, le niveau moyen passe à 85 dB, ce qui commence à être désagréable, et les crêtes restent inchangées. Le résultat est que vous avez l'impression d'un son très fort parce que le niveau moyen est trop élevé, alors que les crêtes ne sont pas assez fortes, et manquent d'impact. Au contraire, l'écoute de haut-parleurs de grand diamètre à haut rendement donne l'impression que le son n'est pas très fort, mais tout à fait normal, naturel, à la fois ample et clair, alors qu'une mesure du niveau crête laisse l'auditeur stupéfait, avec des indications de 105 à 110 dB !

Finalement, la taille du haut-parleur est le prix à payer pour respecter la dynamique et la vivacité de la musique, c'est-à-dire les niveaux de crête, avec l'immense avantage de sauvegarder nos précieux tympans, en les préservant des niveaux moyens trop intenses, générateurs de fatigue auditive.

Figure 121 - Le rendement énergétique des haut-parleurs habituels est très faible, avec une très large majorité entre 0,2 % et 0,6 %, ce qui correspond à des sensibilités de 85 à 90 dB/1 W à 1 m. Ce n'est qu'à partir de 1 % que l'on parle un peu abusivement de haut-rendement. Le vrai haut-rendement se situe plutôt au-delà d'une sensibilité de 100 dB/1 W à 1 m, ce qui correspond à une efficacité de plus de 5 %. Seuls quelques haut-parleurs professionnels, à chambre de compression, dépassent 20 % et atteignent parfois 40 à 45 %.

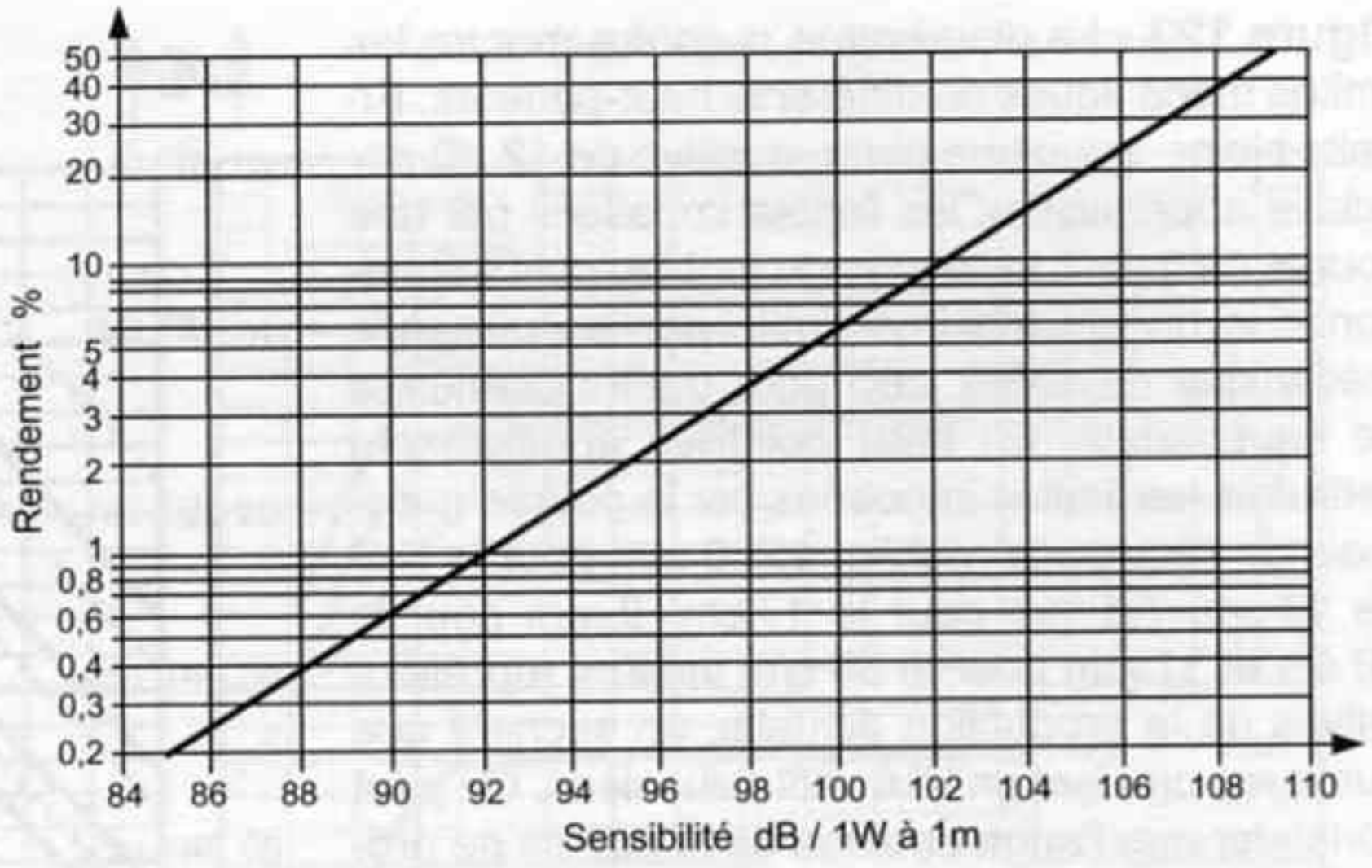
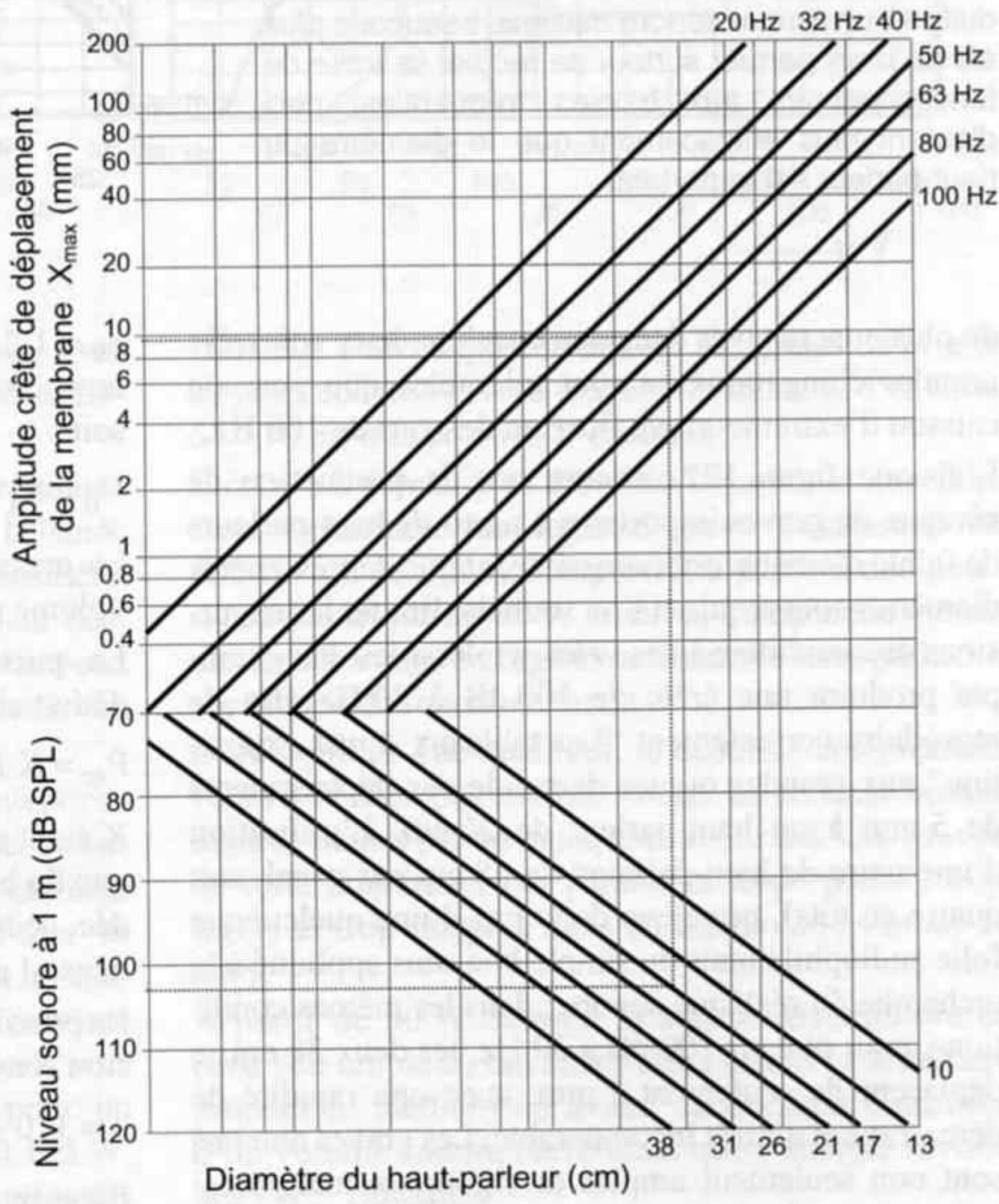


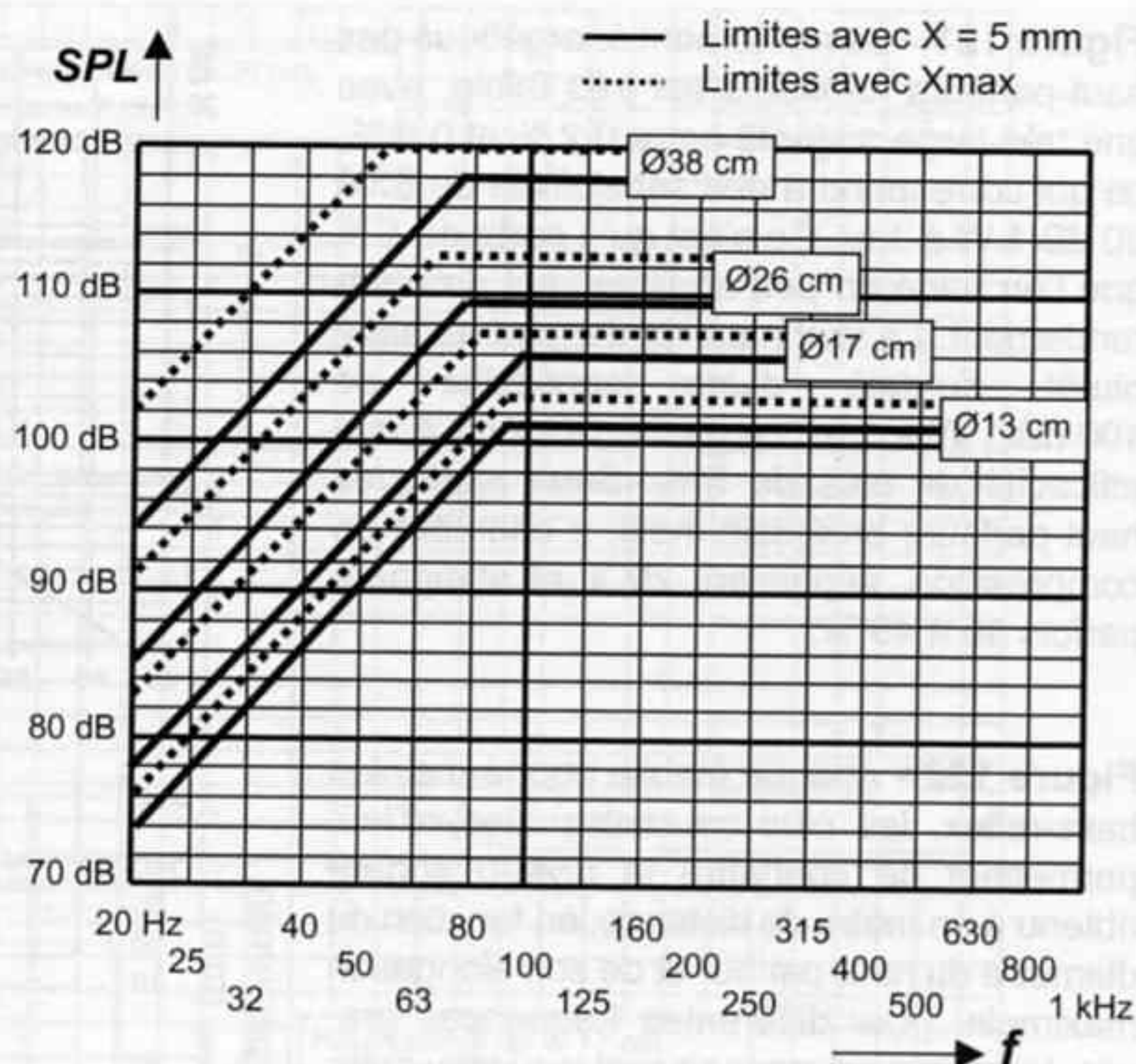
Figure 122 - Abaque établie pour enceintes bass-reflex, les plus courantes aujourd'hui, permettant de connaître le niveau sonore obtenu à un mètre de distance, en fonction du diamètre du haut-parleur et de son élancement maximale, pour différentes fréquences graves. Inversement, connaissant le niveau crête requis et le diamètre du haut-parleur, cet abaque permet de connaître le déplacement de la membrane à différentes fréquences. Par exemple, pour obtenir un niveau de 100 dB à 1 m, à 100 Hz, un H-P de 10 cm aura une élancement de 8 mm, ce qui représente sa limite mécanique. Un niveau à 60 Hz de 103 dB à 1 m demande à un H-P de 17 cm des déplacements de 10 mm (pointillés). En considérant cette performance comme suffisante, il convient de garder à l'esprit qu'elle est obtenue à la limite de fonctionnement, pour des vitesses de déplacement telles que l'inertie de la masse mobile produit des attaques lentes et des traînages importants. En prenant pour limite basse 50 Hz, car il y a très peu de signaux aux fréquences inférieures, 105 dB à 1 m comme niveau crête, et 4 mm comme déplacement maximal de membrane sans problème d'inertie, on constate qu'un H-P de 31 cm est nécessaire. Tout diamètre inférieur entraîne une dégradation du registre grave.



Un second critère en faveur des haut-parleurs de grand diamètre concerne la reproduction des basses fréquences. Pour un même niveau sonore, si la fréquence du signal est divisée par deux, l'amplitude de déplacement de la membrane est multipliée par quatre ! Autrement dit, si un petit haut-parleur de 17 cm nécessite une excursion de membrane de 3 mm pour produire le niveau requis de 110 dB crête à 100 Hz, il exige des déplacements de 12 mm pour obtenir le même niveau à 50 Hz, ce qui dépasse la limite de faisabilité actuelle en matière de linéarité des suspensions, rarement supérieure à 8 mm. Oublions l'extrême grave qui demande-

rait 48 mm de déplacement à 25 Hz... De grandes excursions se traduisent par des vitesses de déplacement élevées d'où un effet microphonique important. De plus les distorsions par non-linéarité des suspensions, effet Doppler (vitesse de déplacement de la source sonore non négligeable par rapport à la vitesse du son) et les traînages importants liés à l'inertie de la masse mobile, augmentent avec le carré de l'amplitude vibratoire. Les déplacements de membrane doivent être les plus réduits possibles, surtout si le haut-parleur est appelé à reproduire une bande de fréquence relativement large,

Figure 123 - Le diagramme ci-contre montre les limites mécaniques de différents haut-parleurs. En traits pleins, avec une pente positive de 12 dB par octave apparaissent les limites imposées par une course de 5 mm de l'équipage mobile, puis à l'horizontal le niveau maximal limité par la puissance mécanique de sortie, ceci pour quatre diamètres de haut-parleur. En traits pointillés apparaissent cette fois les limites imposées par la course maximale de l'équipage mobile, soit 6 mm pour le H-P de 13 cm, 7,5 mm pour le 17 cm, 9 mm pour le 26 cm et 11 mm pour le 38 cm, valeurs représentatives de la production actuelle, en sachant que quelques-uns font un tout petit peu mieux. On peut constater que l'augmentation de la course ne produit pas un niveau sonore maximal beaucoup plus élevé, mais permet surtout de reculer la limite de fonctionnement aux basses fréquences, ceci d'autant plus efficacement que le diamètre du haut-parleur est important.



de plusieurs octaves dans une enceinte deux voies. De grandes elongations ne sont tolérables que pour un caisson d'extrême-grave filtré en dessous de 100 Hz.

L'abaque figure 122, montre que la production de niveaux de graves importants à partir de haut-parleurs de faible diamètre est impossible, et que de très grands diamètres sont requis si l'on souhaite limiter les excursions de membrane à des valeurs tolérables. Par exemple produire une crête de 100 dB à 30 Hz afin de reproduire correctement "Les tableaux d'une exposition" aux grandes orgues demande des déplacements de 5 mm à un haut-parleur de 26 cm. L'utilisation d'une paire de haut-parleurs de 38 cm par canal, soit quatre au total, ne relève donc pas d'une quelconque folie audiophile mais du simple bon sens appliqué à la recherche du réalisme sonore : dans les mêmes conditions, pour obtenir 100 dB à 30 Hz, les deux 38 cm se déplacent de seulement 1 mm, avec une rapidité de démarrage et d'arrêt incomparable. Les graves obtenus sont non seulement amples et vigoureux mais aussi rapides et légers. Bien sûr la musique romantique et encore plus la musique de chambre se contenteront de performances moins élevées, et des haut-parleurs de 25 cm ou même 21 cm à longue course peuvent suffire dans ce cas précis. Le jazz et les percussions, étant généralement pris à proximité, et sans compresseur de dynamique, sont en revanche extrêmement exigeants sur ce critère.

Cet abaque a été établi à partir de la formule donnant la pression acoustique à la distance r d'une source omnidirectionnelle rayonnant dans un espace de 4π (c'est le cas d'un HP aux très basses fréquences) :

$$p = S_d(2\pi f)^2 \cdot \rho_0 \cdot X_{\max} / 4\pi \cdot r = (2\pi f)^2 \cdot \rho_0 \cdot V_d / 4\pi \cdot r$$

$\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$ étant la masse volumique de l'air et V_d le volume maximal d'air déplacé par la membrane, soit :

$$V_d = S_d \cdot X_{\max} = \pi \cdot D^2 \cdot X_{\max} / 4$$

La pression acoustique est obtenue en Pascal avec le volume déplacé en m^3 .

La puissance acoustique totale rayonnée P_{ar} s'en déduit aisément :

$$P_{\text{ar}} = K \cdot f^4 \cdot V_d^2 \text{ soit encore : } P_{\text{ar}} = K \cdot f^4 \cdot (\pi \cdot D^2 \cdot X_{\max} / 4)^2$$

K étant un coefficient dépendant de la charge acoustique du haut-parleur, égal à 3 pour une enceinte accordée, de type bass-reflex ou équivalent. Cette puissance dépend du diamètre émissif D à la puissance 4 !

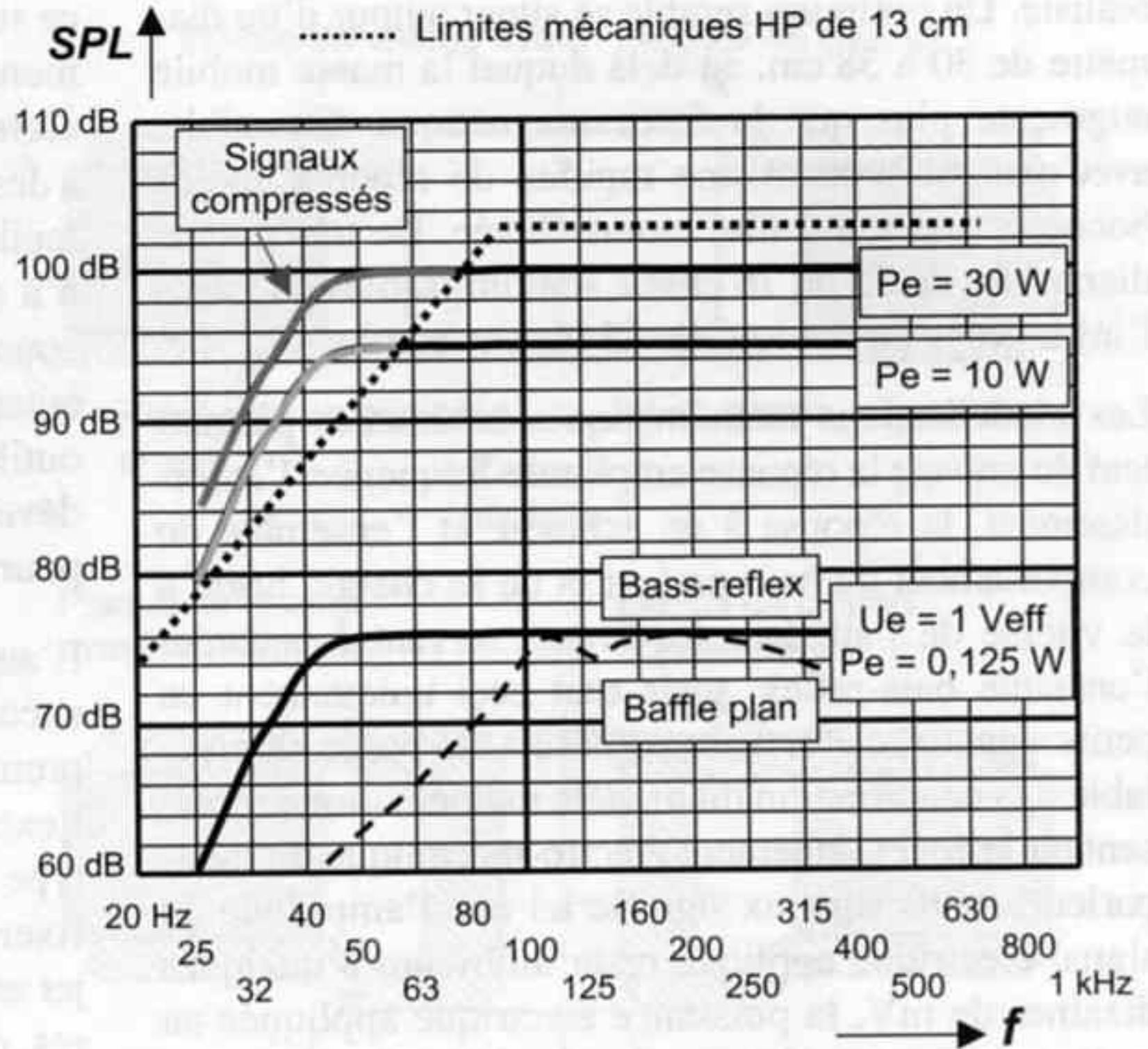
La pression acoustique est exprimée en niveau de pression sonore à 1 m en dB SPL :

$$n = 110 + 20 \log(p)$$

Il est intéressant à partir de ces courbes de définir le niveau sonore maximal, pour un déplacement donné de valeur réalisable, par exemple 5 mm, et pour différentes fréquences. Cette courbe présentant une pente de l'ordre de 12 dB par octave en dessous d'une fréquence de 50 à 60 Hz environ, pente qui ne dépend pas du diamètre du haut-parleur, représente la limite de fonctionnement mécanique. Au-dessus de cette fréquence, c'est la limite de saturation vue auparavant qui intervient, indépendamment de la fréquence, par une droite horizontale (figure 123).

Le rendement n'intervient absolument pas sur ces limites mécaniques, liées uniquement au volume d'air déplacé par la membrane. Un haut-parleur a haut ren-

Figure 124 - Le petit haut-parleur de diamètre 13 cm pris pour exemple, présente sur baffle plan une réponse atténuée dans le registre grave, avec une pente de 12 dB par octave en-dessous de 100 Hz. Son montage dans une enceinte bass-reflex accordée vers 35 Hz permet d'obtenir en petits signaux une coupure basse proche de 40 Hz à -3 dB, ce qui paraît avantageux. Malheureusement cette coupure basse remonte énormément lors de la reproduction d'un programme musical, atteignant 70 Hz environ lors des crêtes. Cette modulation de la fréquence de coupure produit une variation du contenu spectral des sons graves selon leur niveau. La perception de l'espace se trouve sérieusement altérée, et l'inconstance des sensations de matière et de taille des instruments rend ces derniers peu réalistes. Le niveau d'écoute doit donc rester très modéré avec ces petits haut-parleurs, adaptés à la musique de chambre...



dement permet seulement d'atteindre cette limite avec une puissance électrique moindre, donc un échauffement plus limité et une meilleure linéarité.

Ces courbes ne constituent aucunement des "réponses fréquentielles" et ne rendent aucun compte de la bande passante utilisable pour le haut-parleur considéré. Elles indiquent les limites mécaniques au-delà desquelles le transducteur est incapable de fonctionner, quelle que soit la forme des signaux électriques à son entrée.

Afin de faire apparaître comment ces limites interviennent lors du fonctionnement en situation réelle, considérons le petit haut-parleur de diamètre 13 cm déjà pris en exemple. La figure 124 fait apparaître sa réponse en fréquence mesurée sur baffle plan normalisé, et sa réponse lorsque chargé par une enceinte bass-reflex alignée classiquement avec accord vers 35 Hz, ces deux réponses étant mesurées pour un signal d'attaque faible, de 1 V efficace soit 0,125 W, donc en régime de petits signaux, très en dessous des limites mécaniques de fonctionnement.

Aux forts signaux, pour 10 W électriques appliqués, puis pour 30 W électriques, les réponses en fréquences théoriques tracées dépassent nettement, voire très largement les limites mécaniques aux fréquences basses. On constate que pour 10 W le niveau de grave est compressé, autour de 40 Hz, de plus de 5 dB, courbe gris clair.

Avec 30 W la compression est encore plus sévère, et le manque de niveau s'étend pratiquement sur l'ensemble du secteur grave en-dessous de 80 Hz, courbe gris moyen, avec un manque de 10 dB autour de 40 Hz. Pourtant le niveau de pression sonore n'est que de

100 dB à 1 m, ce qui correspond aux crêtes de niveau lors de l'écoute à niveau moyen très modéré, d'environ 65 à 70 dB à la position d'écoute.

L'écoute à niveau plus élevé est impossible, car alors c'est l'ensemble du registre grave en-dessous de 100 Hz qui se trouve compressé, à partir d'une puissance électrique de 60 W environ, l'amplitude élevée des signaux dans ce registre amenant le haut-parleur à ses limites de fonctionnement.

D'un point de vue qualitatif, le début de compression vers 10 W n'est pas audible comme un écrêtage brutal, mais se traduit par un manque d'assise des sons graves de forte amplitude, qui paraissent trop "petits", trop légers et trop maigres mais en même temps mous et lents.

À partir de 30 W environ le son se déséquilibre et perd son ampleur, devenant alors criard et semblant projeter le médium en avant, en donnant l'illusion d'un volume sonore élevé alors que l'énergie rayonnée est... ridicule !

Le passage à un HP de diamètre supérieur apporte incontestablement une expressivité très supérieure au registre grave, avec une liberté retrouvée sur les attaques. Cette qualité est évidemment liée aux capacités à reproduire les crêtes de niveau dans ce registre, en particulier les bruits de transition dont il a été question au chapitre 5. Je rappelle que ces bruits brefs présentent un spectre continu en basses et très basses fréquences, correspondant à un échange brutal d'énergie pendant un temps bref parfois inférieur à 1 ms.

La rapidité autant que l'amplitude de la réponse impulsionnelle du haut-parleur grave sont donc deux paramètres prépondérants dans l'obtention d'une reproduction

réaliste. Un optimum semble se situer autour d'un diamètre de 30 à 38 cm, au-delà duquel la masse mobile augmente plus que la force magnétique disponible, avec par conséquent une rapidité de réponse moins bonne et une sensibilité moins élevée. De très grands diamètres, de 55 ou 76 cm ne sont utilisables que dans l'infra-grave en-dessous de 63 Hz environ.

Les modélisations mathématiques habituelles permettent de prévoir la réponse amplitude-fréquence, l'amortissement, la réponse à un échelon, et l'ensemble du comportement du haut-parleur et de sa charge, jusqu'à la vitesse de l'air dans les événements servant à accorder l'enceinte bass-reflex, mais tout ceci uniquement en petits signaux, car cette hypothèse a été posée en préalable à la construction du modèle mathématique représentant le fonctionnement électro-mécanique du haut-parleur. Petits signaux signifie ici que l'amplitude du signal électrique appliqué reste inférieure à quelques dizaines de mV, la puissance électrique appliquée au haut-parleur pour définir ses paramètres étant souvent inférieure à 1 mW. On est donc très loin des conditions de fonctionnement réelles en régime musical, où la puissance moyenne est de quelques dizaines à quelques centaines de mW, et la puissance crête souvent proche de 100 W !

Les paramètres habituels, mesurés en petits signaux, indiqués par les constructeurs et décrits dans la plupart des ouvrages consacrés aux haut-parleurs ne rendent donc absolument pas compte du comportement musical du haut-parleur, ni de ses limitations mécaniques aux basses fréquences. Dans ces conditions réelles de fonctionnement, ces paramètres peuvent être très différents des valeurs indiquées, parfois d'un facteur dix. Néanmoins l'utilisation de ces paramètres reste absolument indispensable, tout d'abord aux stades de la conception et de la fabrication du haut-parleur, afin de le caractériser, puis ensuite lors de son utilisation dans une enceinte acoustique dont le volume, la fréquence d'accord et "l'alignement" sont déduits de la connaissance de ces paramètres, avec l'objectif d'optimiser le comportement global de l'ensemble haut-parleur plus enceinte, en terme de bande passante et de linéarité de celle-ci, et en terme d'amortissement, lié à la réponse transitoire.

C'est pourquoi j'ai préféré présenter le haut-parleur tout d'abord en tant que système mécanique de transduction, afin de faire clairement ressortir les grandeurs physiques mises en jeu, **rendement** et **puissance acoustique** de sortie, et les paramètres géométriques qui leur sont liés, **diamètre** de membrane et **élongation** maximale. C'est à partir de ces principales considérations que le choix du haut-parleur de grave doit être effectué, les autres grandeurs étant secondaires à

ce stade. Passer directement à l'étape du dimensionnement de l'enceinte et de l'optimisation de son accord, alors que le choix du haut-parleur obéit à des a priori, à des idées préconçues, et ne suit aucune démarche formelle, alors qu'aucune contrainte de fonctionnement n'a été fixée, analysée, me semble constituer un raccourci très risqué quant à la validité du résultat final, autant qu'une utilisation abusive et détournée des outils mathématiques. Ces derniers ont en effet été développés pour optimiser ce qui fonctionne, et non pour faire fonctionner ce qui est sous-dimensionné...

L'audiophile qui souhaite réaliser lui-même ses enceintes acoustiques est donc amené à se poser en premier lieu la question du niveau de crête requis, et de l'extension des fréquences basses nécessaire, selon le type de musique et les habitudes d'écoute, afin de se fixer des exigences précises à partir desquelles le projet est construit. Si ces exigences s'avèrent trop sévères, c'est en connaissance de cause qu'une concession est faite, en terme de réalisme de la restitution, afin de rendre le projet faisable. Il s'agit donc de préciser l'**intention** avant d'entamer une démarche aboutissant au choix technologique et à sa mise en œuvre, comme je l'ai précisé au chapitre 1 « Perspectives », page 15.

Les audiophiles qui ont l'intention de rechercher un réalisme sonore limité seulement par la prise de son se voient donc contraints par leurs exigences, complètement réalistes et non démesurées, à faire usage de très grands haut-parleurs dans des caissons gigantesques, la démarche de conception et les choix technologiques étant alors facilités par la pureté, la simplicité de l'intention, sans compromis, car c'est le compromis qui est difficile...

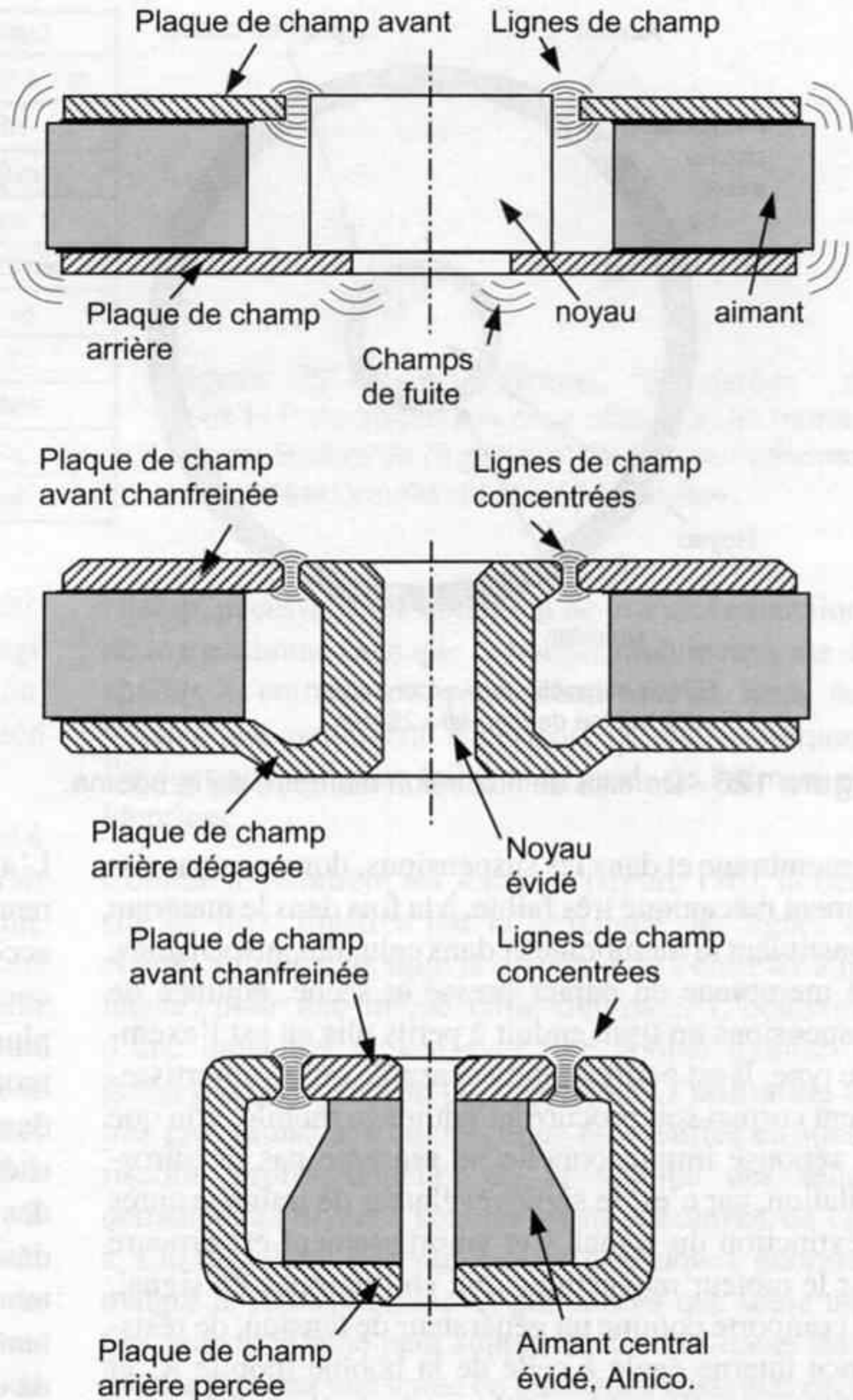
La mise en œuvre de petits haut-parleurs débouche sur des compromis d'autant plus ardues que le diamètre est faible, et les concessions accordées amputent la restitution de sa partie la plus vivante, la plus réaliste. Face à cette limitation mécanique propre aux haut-parleurs de petit diamètre, l'auditeur a naturellement tendance à conserver un volume sonore modéré, afin de ne pas comprimer les crêtes de niveau. Cette pratique a l'énorme avantage de conserver en partie la dynamique du signal, plus précisément l'ensemble des signaux émergents situés au-dessus du niveau moyen, tout en préservant de la fatigue auditive et des maux de tête associés à l'écoute à niveau sonore élevé. Par contre un niveau d'écoute modéré fait passer en dessous du seuil de bruit perturbateur une grande partie des signaux de faible amplitude, en particulier les informations d'espace liées à la réverbération, et les harmoniques de rangs élevés apportant aux timbres toute leur richesse et leur matière.

Figure 125 - Ci-contre en haut, un circuit magnétique simple de modèle courant, avec plaques de champ embouties, en tôles minces de 4 à 6 mm, non rigoureusement planes, collées à l'aimant. Le noyau est serti et l'entrefer est relativement large, afin d'accepter les tolérances dimensionnelles des pièces polaires ainsi que leur centrage imprécis. La concentration imparfaite et irrégulière des lignes de champ se traduit par une induction B peu élevée, de l'ordre de 0,6 à 0,9 T, non uniforme tout autour du noyau, et avec des champs de fuite avant et arrière dissymétriques. Les fuites de champ vers l'extérieur sont importantes.

Au milieu, un circuit beaucoup plus élaboré, avec plaque de champ épaisses, de 8 à 10 mm, rectifiées afin de minimiser les pertes au contact de l'aimant, et chanfreinées dans le but de guider les lignes de champ. Le collage est réalisé en couche très mince. Noyau et plaque arrière sont forgés en une seule pièce, évidée afin de ménager un orifice de ventilation. L'entrefer est étroit et régulier grâce à un centrage lors de l'assemblage. Des chanfreins et une forme étudiée du noyau amènent une forte concentration des lignes de champ, se traduisant par une induction de 1,1 à 1,4 T, avec un aimant identique au précédent. Le facteur de force BL du moteur est par conséquent nettement supérieur, dans un rapport de 2 ou 3 pour un même diamètre de bobine mobile (BL intervient au carré). Le dégagement de la plaque de champ arrière autour du noyau permet une plus grande excursion de la bobine mobile. Le noyau est souvent bagué ou plaqué de cuivre afin de court-circuiter les courants induits (courants de Foucault).

Enfin en bas, un circuit avec aimant central au cobalt, genre Alnico, Ticonal ou équivalents, et plaques de champ forgées, très épaisses en acier au cobalt, acceptant une plus forte induction avant saturation. L'induction dans l'entrefer atteint aisément 1,5 à 2 T, et

Cependant, si le système est correctement mis en œuvre, dans un local traité, et sans couplages acoustiques ou électriques parasites, donc avec un seuil des bruits perturbateurs assez bas, le résultat global obtenu est tout à fait réaliste, bien qu'il corresponde à une place de concert plutôt reculée par rapport à la scène, au-delà de la moitié de la profondeur de la salle. Sur un programme de musique de chambre ou classique, c'est la globalité de l'événement musical qui est perçue, avec une présence des instruments atténuée, distante, dans une perspective lointaine mais peu profonde, tous les interprètes paraissant éloignés.

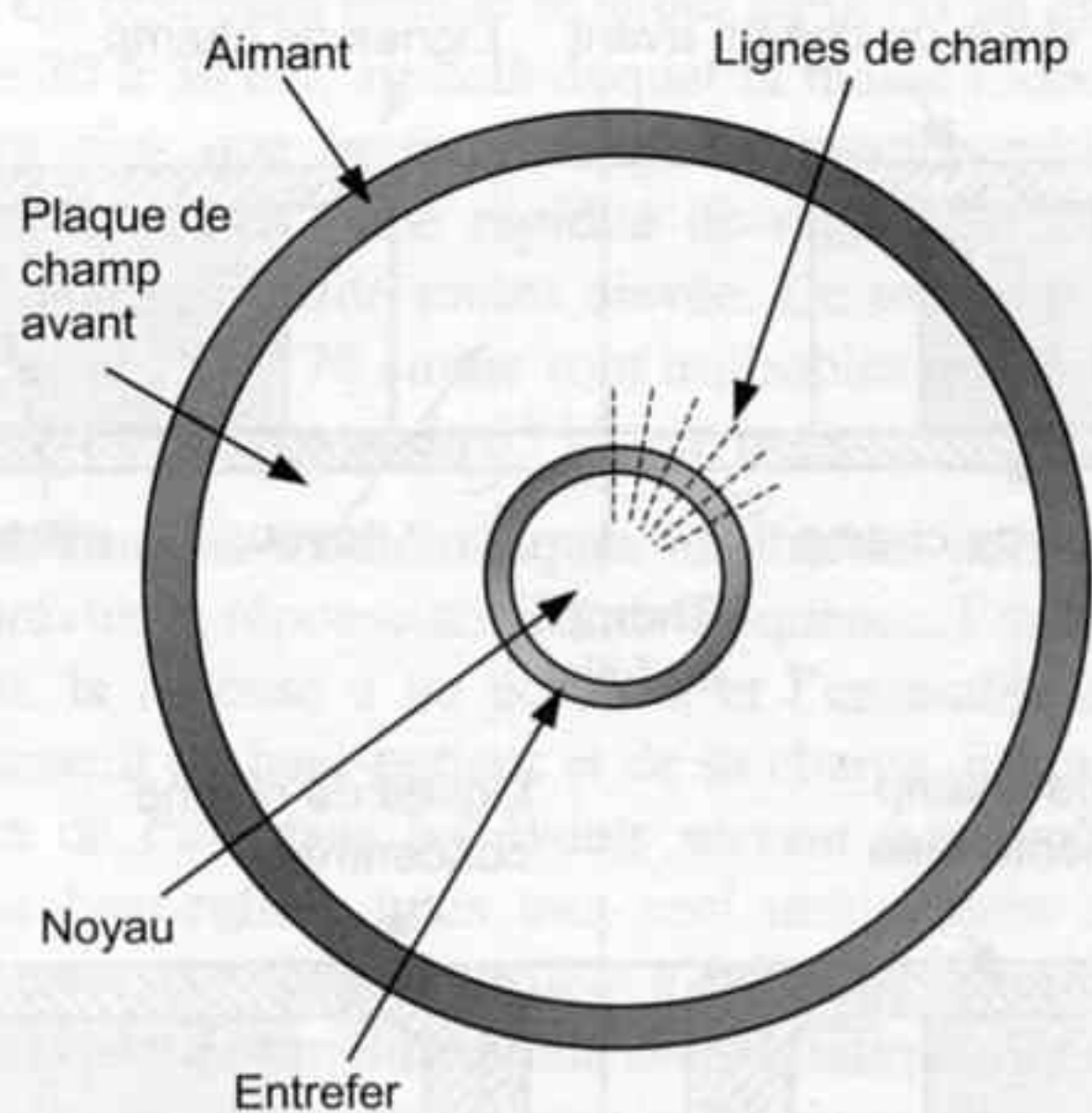


même jusqu'à 2,2. Les fuites sont très faibles. Devenus rares aujourd'hui, les aimants Alnico sont remplacés par de nouveaux matériaux à base de terres rares : néodyme-fer-bore ou samarium-cobalt, moins encombrants et procurant des flux très élevés.

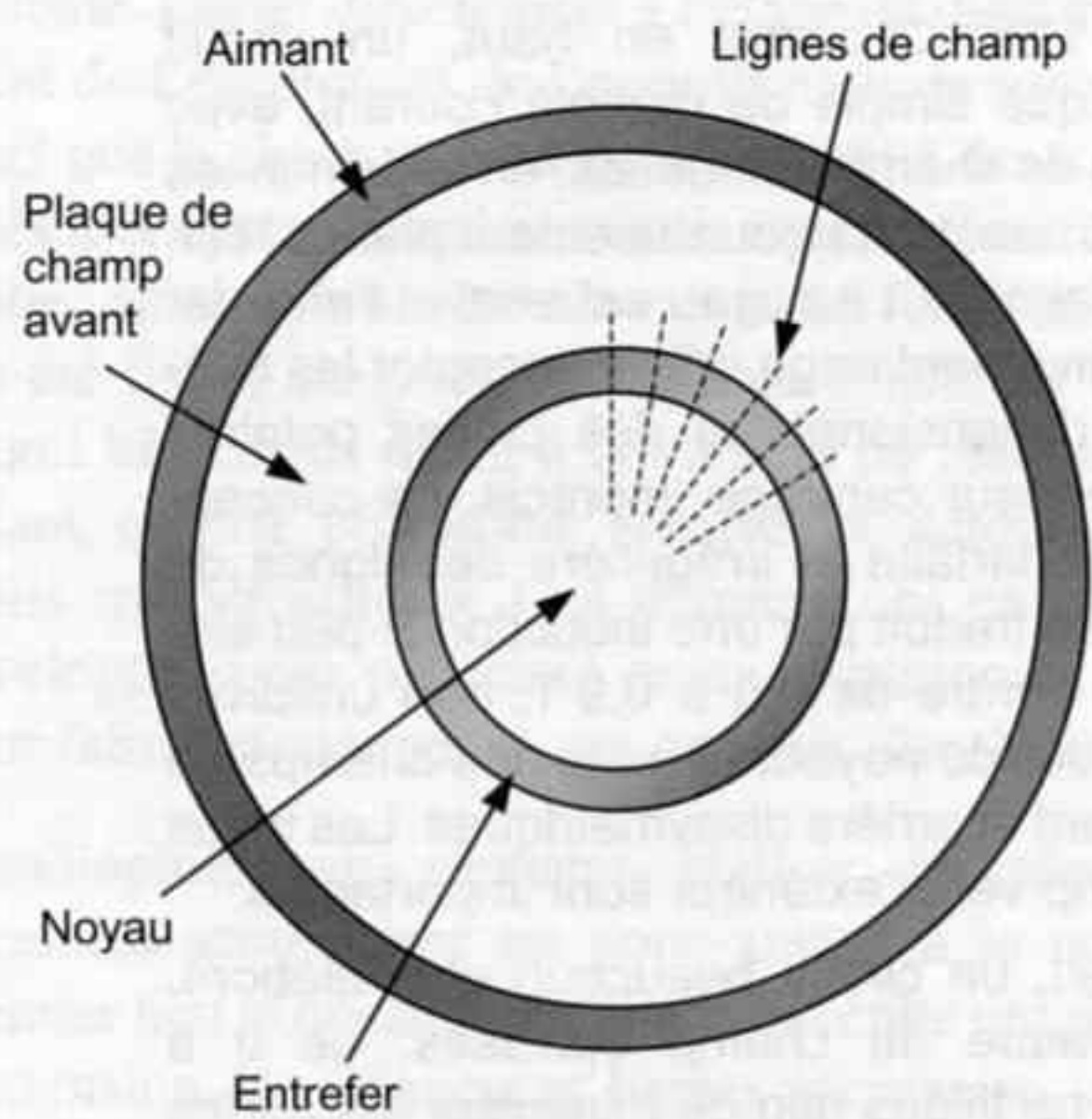
L'usage d'un caisson "subwoofer" pour assister des mini-enceintes n'augmente pas leur rendement, ne diminue pas leur saturation en crête, n'améliore pas leur linéarité de transfert d'énergie. Ce caisson n'agit que dans le domaine fréquentiel, alors que ce sont les dimensions dynamique et temporelle qui sont amputées...

TOUJOURS LA MÉCANIQUE

Un haut-parleur de grand diamètre avec une membrane légère, c'est très bien pour le rendement et la puissance acoustique rayonnée. Mais ce rendement élevé impose des pertes mécaniques très faibles dans



Circuit magnétique avec entrefer pour bobine de diamètre 25 mm



Circuit magnétique avec entrefer pour bobine de diamètre 40 mm

Figure 126 - Densité de flux selon diamètre de la bobine.

la membrane et dans les suspensions, donc un amortissement mécanique très faible, à la fois dans le matériau constituant la membrane et dans celui des suspensions. La membrane en papier pressé et séché, équipée de suspensions en tissu enduit à petits plis en est l'exemple type. Il est pourtant indispensable qu'un amortissement correct soit procuré à l'équipage mobile, afin que sa réponse impulsionnelle ne présente pas de suroscillation, car c'est le signe révélateur de traînage après l'extinction du signal. Cet amortissement est procuré par le moteur magnétique qui, en l'absence de signal, se comporte comme un générateur de tension, de résistance interne égale à celle de la bobine mobile R_e et débitant sur l'impédance de sortie de l'amplificateur, très faible. On peut aisément constater ces deux types d'amortissement mécanique et électrique du haut-parleur en poussant ou tapotant légèrement la membrane, tout d'abord lorsque l'amplificateur est éteint, auquel cas seul l'amortissement mécanique intervient, les déplacements étant assez libres, puis dans un second temps avec l'amplificateur en fonction mais sans aucun signal, avec cette fois des déplacements beaucoup moins libres, et un retour plus lent et sans rebond en position de repos.

Les modèles mathématiques habituels considèrent que ces deux amortissements, mécanique appelé $1/Q_m$ et électrique appelé $1/Q_e$ s'additionnent. L'amortissement global $1/Q_t$ est par conséquent égal à :

$$1 / Q_t = 1 / Q_m + 1 / Q_e$$

Les constructeurs indiquent généralement dans leurs fiches de caractéristiques les valeurs de Q_e , Q_m et Q_t .

L'amortissement global $1/Q_t$ nécessaire à un fonctionnement correct du haut-parleur dans une enceinte accordée se situe dans la fourchette de 2 à 5, soit un coefficient Q_t compris entre 0,2 et 0,5. Des valeurs plus faibles de Q_t produisent un comportement suramorti, se traduisant par une coupure basse brutale en dessous de la fréquence de résonance, d'où une sonorité plutôt mate, sans aucune rondeur. Au contraire, des valeurs plus élevées traduisent un comportement désamorti, avec des sons graves plus amples, moins tenus, plutôt ronds à cause d'un traînage plus important. La valeur exacte de Q_t importe peu à l'intérieur de cette fourchette, car la conception et l'accord final de la charge constituée par l'enceinte permettent d'optimiser l'amortissement global de l'ensemble haut-parleur plus enceinte.

À partir de ces considérations, l'obtention à la fois d'un rendement élevé et d'un amortissement idéal impose **$1/Q_m$ faible**, donc de faibles pertes mécaniques, et **$1/Q_t$ élevé**, c'est-à-dire un amortissement total suffisant. Cela n'est possible qu'avec **$1/Q_e$ élevé**, donc un amortissement électrique important.

L'expérience montre que les réalisations les plus abouties font usage de haut-parleurs de grand diamètre présentant un coefficient Q_t d'environ 0,25 en tenant compte des résistances des selfs et des câbles en série avec le haut-parleur. Ce coefficient est obtenu avec de faibles pertes mécaniques, Q_m étant compris entre 5 et 15 environ, et un circuit magnétique très puissant, avec Q_e compris entre 0,2 et 0,3 environ.

	PR380M0	PR380M2
Sensibilité	96,5 dB/1 W à 1 m	98 dB/1 W à 1 m
Puissance maximale	150 W	350 W
Ø bobine mobile Øb	70 mm	100 mm
Hauteur entrefer He	7 mm	7 mm
Ø × H aimant	184 × 20 mm	224 × 23 mm
Poids aimant	1,91 kg	3,43 kg
Induction B	1,2 T	1,2 T
Facteur de force BL	19,2 N/A	23,4 N/A
Masse mobile Mms	115 g	136 g
Excursion Xmax	7,6 mm	11 mm

Figure 127 - Caractéristiques comparées de deux H-P de 38cm, l'un pour utilisation en monitoring ou audiophile (à gauche) l'autre pour sonorisation professionnelle de qualité (à droite) .

Cela revient à considérer que c'est le moteur magnétique qui tient la membrane et lui impose son freinage lors du mouvement de retour, et non la suspension, celle-ci se limitant à sa fonction de rappel en position repos et d'étanchéité.

Cet amortissement électrique $1/Q_e$ est proportionnel à la force magnétique du moteur B^2L^2/R_e qui apparaît dans l'expression du rendement. Un petit H-P présente un facteur B^2L^2/R_e de l'ordre de 10 à 20, alors que pour un modèle professionnel, ce terme dépasse 50 et atteint parfois 80 ! La mise en parallèle de deux H-P produit un doublement de leur force BL, et divise par deux la résistance R_e , procurant un produit compris entre 80 et 400. Voilà encore un argument en faveur des H-P à haut rendement, qui présentent du même coup grâce à leur puissant circuit magnétique un amortissement électrique efficace. Le produit BL, appelé facteur de force et mesuré soit en Tesla-mètre (Tm), soit en Newton/Ampère (N/A), est donc un très bon indicateur de la qualité du H-P.

Les schémas figure 125 représentant différents circuits magnétiques, avec un diamètre d'entrefer identique, montrent qu'une densité de flux magnétique élevée demande avant tout une fabrication précise et un montage rigoureux du circuit magnétique, une conception élaborée autorisant alors des caractéristiques supérieures. L'utilisation de matériaux nobles, permettant d'atteindre des densités de flux énormes, entraîne inévitablement un coût très élevé. L'avantage principal, en plus d'un rendement et d'un amortissement très élevés, est que la très haute perméabilité des plaques de champ, associée à la valeur élevée de l'induction, entraînent une très faible variation du flux magnétique avec la modulation du courant audio traversant la bobine.

La difficulté d'obtention d'une induction élevée est encore augmentée pour les haut-parleurs de grand diamètre, par le diamètre supérieur de la bobine, donc de l'entrefer, et l'épaisseur supérieure des plaques de

champ, nécessaire à l'obtention de grandes excursions de la membrane sans que la bobine mobile ne sorte du champ. L'entrefer est plus grand et plus haut, son volume est nettement supérieur, et par conséquent l'induction y est plus faible si le poids de l'aimant est identique.

Comme le montrent les schémas (figure 126), la densité de flux, illustrée par la proximité des lignes de champ, diminue lorsque le diamètre de l'entrefer augmente, pour une même taille d'aimant. L'obtention d'une induction élevée avec une bobine mobile de grand diamètre impose par conséquent l'utilisation de très gros aimants. Cette pratique est justifiée en sonorisation professionnelle, où le volume des salles demande des niveaux sonores à 1 m très élevés, de 125 à 130 dB, donc des puissances électriques énormes malgré le rendement élevé, puissances que seule une très grande bobine peut supporter. La très haute fidélité n'exige pas une tenue en puissance aussi élevée, et dans ce cas des bobines mobiles de diamètre plus réduit sont mieux adaptées, permettant une induction supérieure donc un meilleur rendement, un amortissement supérieur, une masse mobile plus faible, et au final un comportement dynamique plus vif, plus rapide, avec un traînage plus réduit.

Le tableau figure 127 compare deux haut-parleurs de 38 cm de diamètre, l'un utilisé comme moniteur de studio et dans le milieu audiophile, l'autre en sonorisation professionnelle (documentation Audax).

La comparaison permet de constater que pour une même induction B de 1,2 T, le haut-parleur à bobine de diamètre 100 mm exige un aimant pratiquement deux fois plus lourd. La plus grande bobine mobile ainsi qu'une membrane plus rigide afin de supporter les contraintes mécaniques sévères entraînent une masse mobile plus grande. Le rendement est donc pratiquement identique, par contre la tenue en puissance est plus de deux fois supérieure pour le modèle avec une grande bobine, ce qui permet, avec une excursion

	JBL 2226 H	DAVIS 40RCA15
Diamètre hors tout	388 mm	402 mm
Sensibilité	97 dB SPL / 1 W à 1 m	97 dB SPL / 1 W à 1 m
Puissance maximale en continu	600 W	200 W
Matériau et Taille d'aimant	Ferrite Ø220 mm	Ferrite Ø185 mm
Induction B	1,2 T	1,2 T
Facteur de force BL	19,2 N/A	19,4 N/A
Hauteur de l'entrefer He	8 mm	10 mm
Ø bobine	100 mm	68 mm
Matériau du fil	Ruban aluminium	Cuivre
Support de bobine	----	Kapton
Matériau membrane	Papier fibre de verre	Carbone tressé traité
Profil membrane	Droite corruguée	Exponentielle
Suspension externe	Tissu enduit	Tissu enduit
Fréquence de résonance Fs	40 Hz	27 Hz
Résistance en continu Re	5 Ω	4,8 Ω
Qm	5	8,7
Qe	0,33	0,23
Qt	0,31	0,21
Masse mobile Mmd	98 g	77 g
Surface active Sd	880 cm²	804 cm²
Excursion maximale Xmax	7,6 mm	10 mm

Figure 128.

maximale également supérieure, des volumes d'air déplacés et une puissance acoustique rayonnée plus importants.

La recherche du réalisme de la reproduction sonore n'obéit pas aux mêmes critères que la sonorisation professionnelle, et les grands haut-parleurs, fabriqués par des marques réputées telles que JBL, Audax, PHL audio, RCF, Beyma, Altec, Gauss, Fane, Fostex, TAD et d'autres ne sont finalement pas très bien adaptés à un usage audiophile. Leur fréquence de résonance est souvent placée un peu trop haut, vers 40 à 60 Hz, ce qui en liaison avec un amortissement électrique important, Q_e étant inférieur à 0,25 pour la plupart, produit une coupure basse assez rapide. Cela évite la destruction de l'équipage mobile par talonnement en fin de course à très basse fréquence et très forte puissance, mais interdit la reproduction de l'extrême grave (transmis alors par d'autres haut-parleurs, de 55 à 76 cm de diamètre). Leurs suspensions raides ne laissent que peu de liberté sur les petits déplacements, d'où une tendance à gommer les signaux faibles, porteurs d'informations d'espace.

Un haut-parleur spécifiquement adapté à la très haute fidélité possède bien sûr un grand diamètre, 30 à 38 cm, mais une bobine moyennement grande, de 50 à 70 mm, afin de conserver un entrefer pas trop grand. L'aimant assez grand, de 150 à 190 mm, associé à des plaques de champ épaisses, 8 à 10 mm, rectifiées et chanfreinées, produit une induction élevée de 1,2 à 1,4 T dans un entrefer le plus étroit possible, où coulissera une bobine à une seule couche de spires. L'étroitesse de l'entrefer demande un centrage très précis de

l'équipage mobile, à la fabrication ainsi qu'au montage mais aussi pendant toute la durée de fonctionnement, ce qui impose une suspension périphérique en tissu enduit à petits plis, les demi-rouleaux en mousse, en PVC ou néoprène ne procurant pas un centrage rigoureux, en plus de pertes internes élevées. La membrane légère et rigide mais peu amortie est en papier pressé, en carbone ou kevlar, de profil exponentiel pour présenter une rigidité élevée, les corrugations, sortes de plis concentriques, destinés à étendre la réponse en fréquence vers le haut de manière homogène, ne sont pas nécessaires car néfastes du point de vue des pertes internes.

Les haut-parleurs répondant à ces critères sont rares. Le modèle Altec 416-8A très réputé et apprécié de nombreux audiophiles dans le monde entier en est sans doute l'exemple idéal, il n'est malheureusement plus fabriqué aujourd'hui. La recherche d'un modèle capable de le remplacer débouche sur peu de choses : les anciens modèles Audax comme le PR380M0 de la gamme Pro ne sont plus fabriqués, bien qu'encore disponible pour quelques temps chez les revendeurs. Les modèles Fostex FW305, FW405 et ses dérivés sont à nouveau disponibles, l'importation étant maintenant assurée par Selectronic. TAD, Focal, Davis, ainsi que Goto, Audiodynamique et Supravox ou Fertin proposent des haut-parleurs de 31 ou 38 cm spécialement étudiés pour la très haute fidélité, sans oublier PHL, et JBL avec le modèle 2226. Parmi ceux-ci le Davis 40RCA15 me semble mériter l'attention de l'audiophile exigeant car il réunit sous une apparente simplicité un faisceau de qualités, ainsi que des paramètres

Spécifications 400-2000 EXC	
Sensibilité 1 W à 1 m	90 à 99 dB
Bande passante	23 Hz à 4 kHz
Impédance	8 Ω
Puissance max. RMS	120 W
Poids	10,7 kg
Montage	
Diamètre HP	404 mm
Épaisseur saladier	Alu 10 mm
Distance trous de fixation	382 mm
Diamètre de montage	358 mm
Profondeur HP	215 mm
Paramètres	
Suspension	Toile
Fréquence de résonance	23 Hz
Excursion linéaire	10 mm
Poids équipement mobile	55 g
Alimentation	0 à 13 V - CC
Induction magnétique	0 à 1,6 T

Paramètres de Thiele et Small							
Alimentation	5 V	7 V	9 V	11 V	13 V	14 V	15 V
Qts	1,011	0,598	0,431	0,309	0,236	0,215	0,195
Qe	1,082	0,627	0,446	0,317	0,242	0,219	0,200
Qm	15,349	13,531	12,801	11,490	10,06	9,935	9,334
Bl	8,381	10,879	12,964	15,496	17,626	18,491	19,596
SPL ref.	91,5	94	95,4	96,8	98,1	98,7	99,1

Figure 129 - Un haut-parleur de grave de qualité audiophile : le 400-2000 EXC offre de très hautes qualités de réponse (rapidité et large bande) car il est construit autour de la même membrane que le 400-2000. Son avantage demeure la possibilité de réglage de ses paramètres grâce à un puissant moteur électromagné-

parfaitement adaptés à la recherche de réalisme, pour un prix abordable. Je donne à la figure 128 ses caractéristiques complètes à titre d'exemple, ainsi que celles du JBL 2226 H, sachant qu'il ne sont ni les seuls, ni les meilleurs sur tous les critères.

Le plus haut degré de réalisme est cependant atteint avec les haut-parleurs à excitation, c'est-à-dire équipés d'un électro-aimant en lieu et place de l'aimant permanent. Cette technologie a été abandonnée depuis l'avènement des aimants permanents en céramique (appelée improprement ferrite) car elle nécessite une puissante alimentation en courant continu, d'où une mise en œuvre plus complexe, une consommation élevée, un encombrement important. Les avantages obtenus sont ceux procurés par la forte induction magnétique, avec

400-2000 EXC
Haut-parleur de grave



tique. Adaptable de ce fait à de nombreuses enceintes, il nécessite une alimentation extérieure (idéale de 10 V à 14 V pour 5 A). Pour les audiophiles en quête d'absolu, le 400-2000 EXC est disponible en bobine argent (99,99 %).

des performances proches des moteurs magnétiques Alnico, et la possibilité supplémentaire d'ajustage des paramètres électromécaniques en fonction du courant d'excitation. Le Supravox 400 EXC présenté figure 129 est considéré comme une référence incontournable.

Membrane ultra légère et circuit magnétique puissant, c'est finalement très simple ! Remarquons au passage que les haut-parleurs réputés pour leur musicalité ont tous un circuit magnétique procurant une "ombre" acoustique réduite à l'arrière de la membrane, ne créant pas de retour d'onde, ni de résistance au flux d'air déplacé, ainsi qu'un saladier aux branches bien dégagées et nervurées. Le Davis 40RCA15 partage d'ailleurs le même saladier que le Supravox, figure 129, lequel existe également en version Alnico, avec les

Ø du haut-parleur	Ø membrane	Fréquence de résonance	Fréquence fd	Fréquence fp
38 cm	33 cm	25 Hz	500 Hz	700 à 1 kHz
30 cm	25 cm	30 Hz	650 Hz	800 à 1,5 kHz
24 cm	19 cm	40 Hz	875 Hz	1 à 2 kHz
17 cm	13 cm	50 Hz	1300 Hz	1,5 à 4 kHz
8 cm	5 cm	800 Hz	3500 Hz	4 à 10 kHz

Figure 130 -

mêmes performances mais sans possibilité de réglage des paramètres. La décompression ainsi que la ventilation indispensable de l'entrefer sont obtenus la plupart du temps par un orifice aménagé dans le noyau, pièce polaire centrale. Cet orifice débouche derrière le cache-noyau, évitant ainsi une résonance de cavité de l'air emprisonné. Très rarement, c'est le cache noyau qui est percé, comme c'est le cas pour le modèle Altec 416-8 ou le Focal Audiom 15, ou poreux en tissu ou fibres, comme celui du Davis 40RCA15 en carbone tressé non enduit. La fuite d'air entre le volume intérieur de l'enceinte et l'extérieur constitue alors une difficulté supplémentaire, source d'erreur dans les calculs de la charge acoustique.

La possibilité d'ajuster le fonctionnement du haut-parleur est extrêmement intéressante pour l'audiophile. En général, le constructeur d'enceinte adapte la forme et les dimensions de la boîte au haut-parleur choisi, et effectue de nombreux essais, en construisant à chaque fois une boîte différente, jusqu'à optimisation définitive. L'audiophile qui souhaite réaliser un caisson équipé de deux 38 cm, caisson dont les dimensions frôlent le mètre-cube, ne peut se permettre d'en construire plusieurs juste pour essayer ! Les modifications d'un tel caisson étant très difficiles, il est plus pratique dans ce cas de régler l'alignement, l'accord précis haut-parleur/enceinte en modifiant légèrement les paramètres du haut-parleur, ce qui est aisé avec un moteur à excitation, puisqu'il suffit de faire varier la tension d'alimentation.

Notre haut-parleur de grave étant maintenant choisi en respectant les critères détaillés ci-dessus, il reste à définir sa charge, ainsi que sa plage d'utilisation. Cette dernière est limitée vers les fréquences élevées par la directivité de la membrane, augmentant avec le diamètre du haut-parleur. Le tableau figure 130 indique les valeurs de fréquences f_d à partir desquelles la membrane devient directive, et également les fréquences f_p , dépendant grandement du matériau, au-delà desquelles les modes vibratoires de la membrane sont fractionnés, celle-ci ne se comportant plus en piston (d'après P. Loyez, Technique des HP et enceintes acoustiques).

Il apparaît donc évident que nos haut-parleurs de grand diamètre ne peuvent être utilisés dans des enceintes à deux voies, faire monter un 38 cm à 1,5 kHz, et même

plus haut comme cela est fait sur quelques modèles de sonorisation est un non-sens. Une fréquence de coupure si élevée est indispensable dans ce cas pour raccorder correctement le haut-parleur grave avec un pavillon de médium-aigu incapable de descendre plus bas que 1,5 à 2 kHz. Malheureusement, la directivité du H-P grave de 38 cm est très importante à cette fréquence, avec un coefficient Q de l'ordre de 40, associé à un angle de rayonnement de 30° environ, dans lequel le niveau sonore varie de moins de 6 dB, et en dehors duquel il chute très rapidement. Les diagrammes figure 131 montrent les lobes de directivité d'une surface vibrante en fonction du rapport entre diamètre de cette surface et longueur d'onde λ . La fréquence de 2 kHz correspond à une longueur d'onde $\lambda = C / f$ avec $C = 344$ m/s célérité du son dans l'air, soit $\lambda = 0,172$ m. Une membrane de 33 cm de diamètre vaut alors près de 2λ , figure 131 en bas à gauche.

La mise en parallèle de deux haut-parleurs, comme cela est fait dans le caisson Onken W où dans les enceintes TAD TSM1, avec les deux haut-parleurs disposés l'un à côté de l'autre, peut également créer des lobes de directivité dans le plan horizontal. Cela peut être bénéfique car le rayonnement latéral étant alors moins intense, les réflexions sur les parois de la pièce sont moins importantes. Cependant, si l'auditeur n'est pas à la même distance des deux H-P, il peut se trouver hors du lobe principal de directivité. Les deux H-P de 38 cm commencent à poser ce problème à partir de 400 Hz environ, comme le montre la figure 131, schéma en haut à droite. Une orientation du caisson vers le centre de la zone d'écoute permet de solutionner ce problème, un angle de 15 à 20° étant suffisant. La disposition verticale ne présente pas cet inconvénient, mais ce sont les voies de médium et d'aigu qui se trouvent alors à une hauteur trop importante. Une solution élégante consiste à disposer le pavillon de médium-aigu entre les deux H-P de grave, comme cela est fait sur certains modèles JBL ou Rey-Audio.

La voie grave équipée de deux H-P de 38 cm est idéalement filtrée en dessous de 500 Hz, valeur portée à 650 Hz avec des H-P de 30 cm. C'est donc la voie de médium qui doit descendre assez bas, et cela pose un autre problème qui est abordé un peu plus loin.

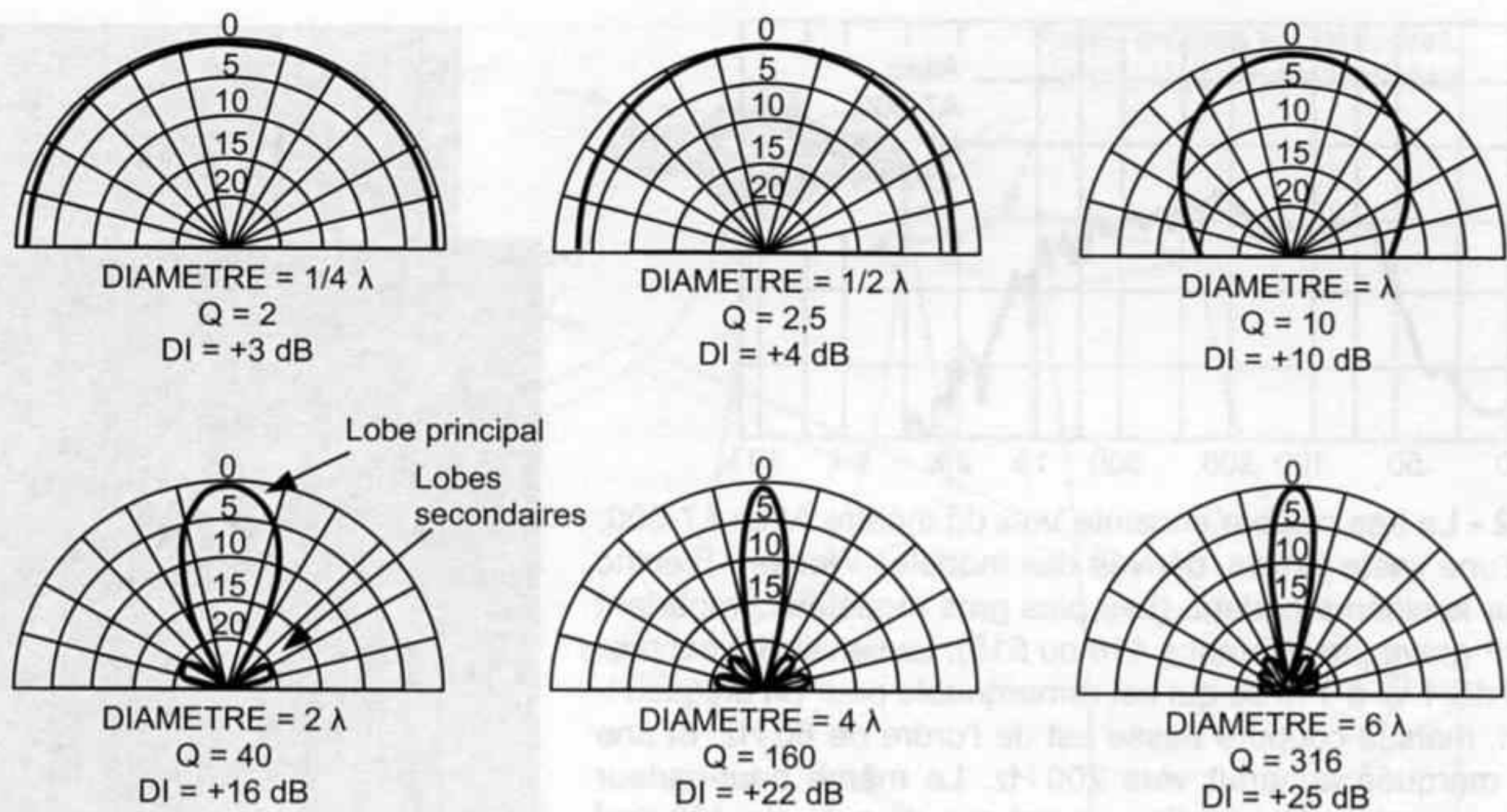


Figure 131 - Lobes de diffusion d'une membrane plane circulaire, en fonction de la longueur d'onde émise λ , rapportée au diamètre. Pour une membrane

de diamètre 33 cm, les diagrammes correspondent aux fréquences 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz en haut, et 2, 4 et 8 kHz en bas. (documents JBL)

HISSER LE PAVILLON !

En ce qui concerne la limite basse de la bande passante, celle-ci est conditionnée à la fréquence de résonance du haut-parleur, mais aussi à son amortissement, à l'élasticité de ses suspensions, et à la résonance du volume interne de l'enceinte, laquelle peut être accordée de différentes manières, produisant chacune des réponses fréquentielles différentes et surtout des réponses temporelles plus ou moins tourmentées. À l'heure actuelle, l'enceinte à évent appelée bass-reflex est universellement employée par la quasi-totalité des constructeurs. L'enceinte close, pour un volume supérieur, procure une fréquence de coupure basse moins intéressante, et des déplacements de membrane plus importants, elle est pratiquement abandonnée aujourd'hui, sauf pour quelques caissons d'extrême-grave. Ces derniers utilisent parfois une charge symétrique, à partir de deux haut-parleurs de diamètre moyen de 21 à 25 cm, et procurent sous un volume relativement réduit une coupure basse très intéressante, avec l'inconvénient d'une largeur de bande réduite limitée à moins de deux octaves. Il existe bien d'autres types de charge, tel que le baffle-plan, présentant l'avantage d'une absence totale de résonances de boîtes, et pour cause ! Les dimensions en sont imposées par la plus grande longueur d'onde, donc la plus basse fréquence à reproduire, et à moins d'utiliser un trou dans le mur pour y installer le haut-parleur, la réponse dans le grave, avec des baffles de côté inférieur à 2,50 m, est immanquablement écourtée. L'excellente réponse transitoire de ce montage le fait apprécier en voie de bas-médium avec un haut-

parleur large bande de 25 ou 30 cm, descendant jusqu'à 150 Hz, parfois un peu plus bas si la place le permet. Pavillons ou lignes de transmission sont assez peu répandus pour la voie de grave, pas seulement pour de simples raisons d'encombrement. Une ligne accordée en quart d'onde doit mesurer environ 3 m de long pour prétendre reproduire des fréquences aussi basse que 30 Hz, et sa section qui doit être supérieure à celle de la membrane entraîne un volume de charge très important. Même si la ligne est repliée, l'enceinte obtenue reste très volumineuse, est souvent sujette à des résonances de tuyau, et le temps d'établissement est relativement long, comme chaque fois qu'une longue colonne d'air doit être excitée à une fréquence basse. L'amortissement idéal de ce type de charge est très délicat à obtenir. Elle permet à de petits haut-parleurs de descendre assez bas mais avec un rendement limité. Le même genre de problème est rencontré avec les pavillons, dont les caractéristiques sont détaillées plus loin. Une fréquence de coupure basse demande soit une grande longueur imposant un pavillon replié, donc un temps d'établissement et un traînage importants, soit une surface de gorge élevée, obtenue par deux ou quatre haut-parleurs de 38 cm. Les enceintes de sonorisation professionnelle, construite autour de modèles JBL ou Altec, chargés à l'avant par un pavillon très court, moins de 50 cm, et à l'arrière par une charge de faible volume accordée, sont extrêmement performantes dans la bande 60 Hz/500 Hz. Malheureusement, le pavillon court présente une coupure basse brutale en dessous de 80 Hz, la charge arrière accordée un peu

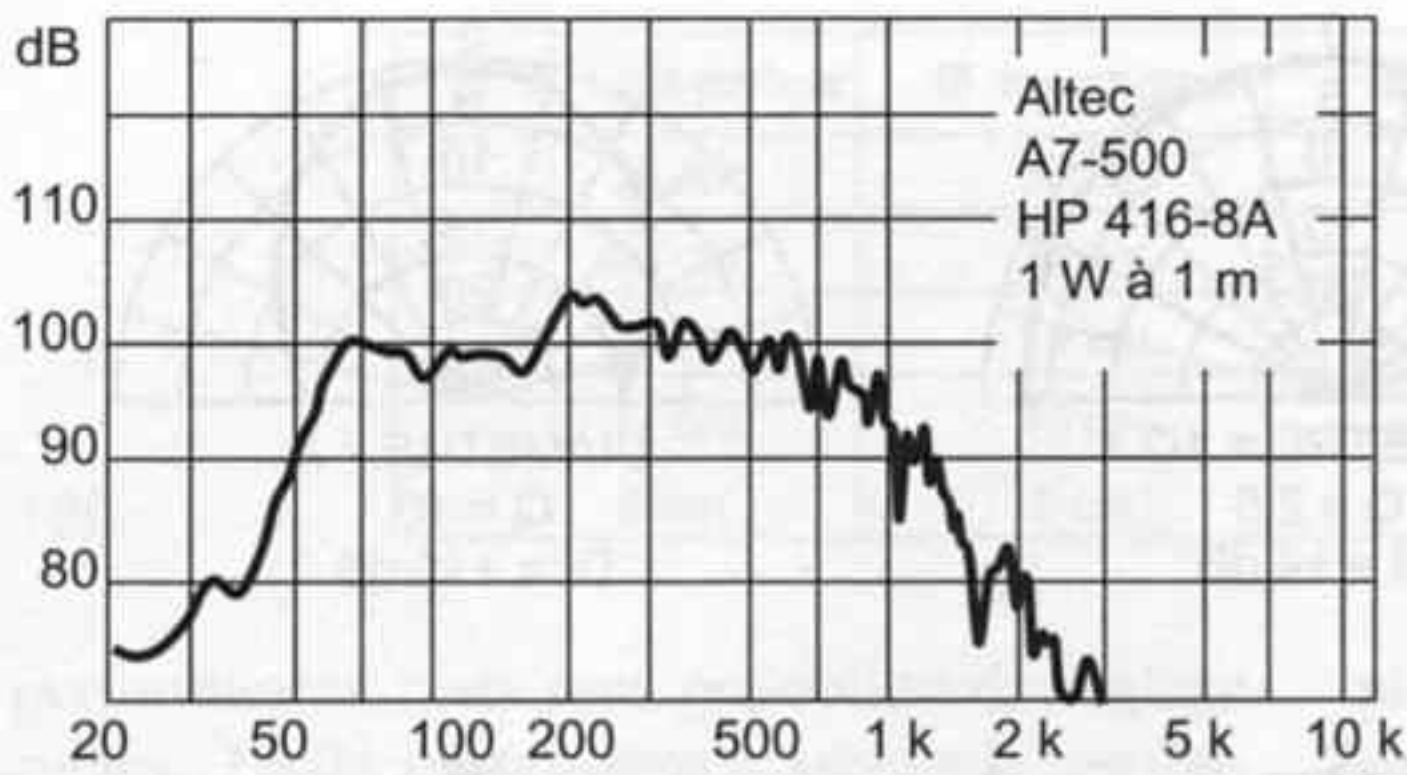
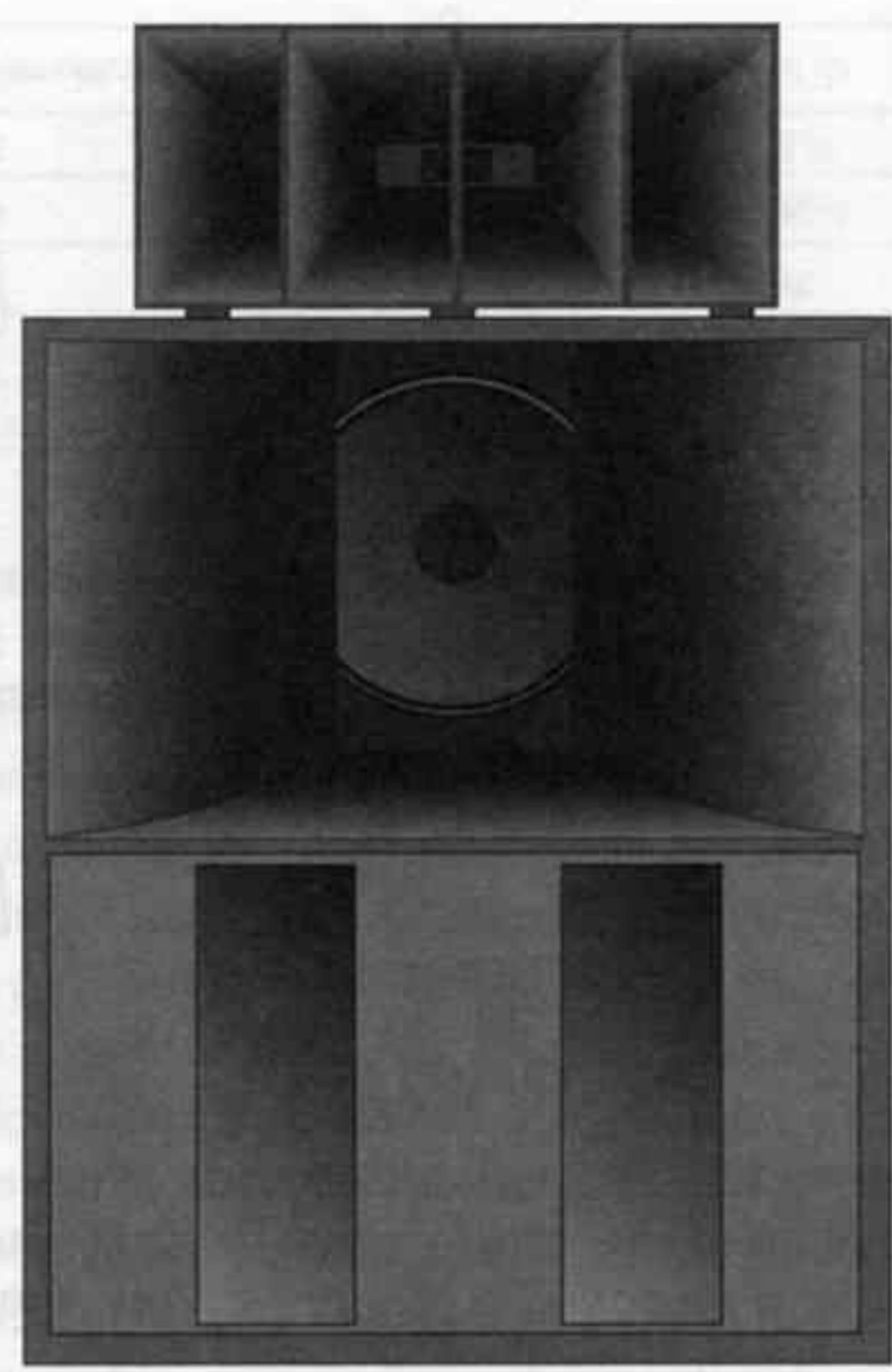


Figure 132 - La très célèbre enceinte Voix du théâtre Altec A7-500, fait partie d'une vaste famille, dérivée des modèles Western-Electric étudiés pour le cinéma parlant. (Les plus gros modèles comportent jusqu'à 6 HP grave, de référence 416 ou 515). La sensibilité est proche de 100 dB/1 W à 1 m ce qui est remarquable pour un unique H-P de 38 cm, mais la coupure basse est de l'ordre de 60 Hz, et une résonance marquée apparaît vers 200 Hz. Le même haut-parleur demande en enceinte Bass-reflex un volume de près de 400 dm³ pour descendre une octave plus bas. Les audiophiles japonais ont construit et utilisé de nombreuses répliques de cette enceinte, avant de passer aux caissons Onken à événements laminaires, ou petite Onken, puis Onken W avec deux H-P de 38 cm montés en bass-Reflex.



plus bas permettant de récupérer un peu d'énergie jusqu'à 60 Hz, fréquence en dessous de laquelle le rendement s'effondre.

Ces enceintes sont optimisées pour procurer le rendement le plus élevé possible, au détriment de la bande passante, laquelle est complétée dans le bas du spectre par des caissons d'extrême grave. Rendement et résonance basse sont en effet deux paramètres antinomiques du haut-parleur. Pour un moteur magnétique et un équipage mobile donné, c'est en augmentant la raideur des suspensions que le rendement est amélioré. Une suspension raide se traduit par une fréquence de résonance élevée. La restitution de fréquences inférieures à la fréquence de résonance n'est possible qu'avec un haut-parleur très peu amorti procurant alors une réponse transitoire lente et suivie de suroscillations, de traînages.

Un haut-parleur de diamètre 38 cm professionnel à très haut rendement résonne généralement à une fréquence comprise entre 40 et 60 Hz, et son amortissement 1/Qt est compris entre 3 et 15. Son montage dans une enceinte de "petit" volume produit obligatoirement une coupure basse trop haute pour une utilisation audiophile.

La relation qui existe entre rendement et fréquence de résonance montre que cette dernière apparaît au cube :

$$\eta_0 = (4\pi^2 / C^3) \cdot (Fs^3 \cdot Vas / Qe)$$

Le premier terme $4\pi^2/C^3$ étant relatif à l'impédance de l'air, irréductible, et Vas étant le volume d'air équivalent à la souplesse des suspensions.

Faire passer Fs de 30 Hz au double, soit 60 Hz, en raidissant les suspensions et en diminuant la masse mobile, permet de multiplier le rendement théorique par 8, donc de gagner jusqu'à 9 dB environ de sensibilité. La comparaison des deux courbes de réponse figure 118, comparant un haut-parleur traditionnel, résonnant à 35 Hz environ, avec un modèle à haut rendement résonnant vers 55 Hz, illustre cela. Les fréquences de résonances sont dans un rapport $55 / 35 = 1,57$ qui élevé au cube montre un rapport des rendements respectifs de $1,57^3 = 3,88$ et par conséquent une différence de sensibilité de : $\Delta = 10 \log (3,88) = 5,89$ dB soit pratiquement 6 dB.

Le montage dans une charge de volume limité, procurant la compression nécessaire au fonctionnement du pavillon frontal, fait encore remonter la fréquence de résonance du haut-parleur, l'empêchant de descendre assez bas en fréquence. Le registre grave perd alors en aération, en espace, en ampleur, ce qu'il gagne en impact, en niveau crête sans tassement dynamique. Les percussions montrent ainsi une matière sonore rarement perçue, ce qui renforce le côté démonstratif, accentuant l'impression de présence, de proximité des sources virtuelles. Par contre, la profondeur de la scène, le volume d'air de la salle, le rayonnement sonore de ces sources s'étendant dans cet espace, n'est pas rendu car il est indispensable pour cela de reproduire avec un niveau non atténué la bande de fréquence s'étendant entre 30 et 60 Hz environ. Une atténuation de cette bande de plus de 6 dB la fait passer facilement en dessous du seuil de perception, relativement élevé à ces fréquences. La perception réaliste des

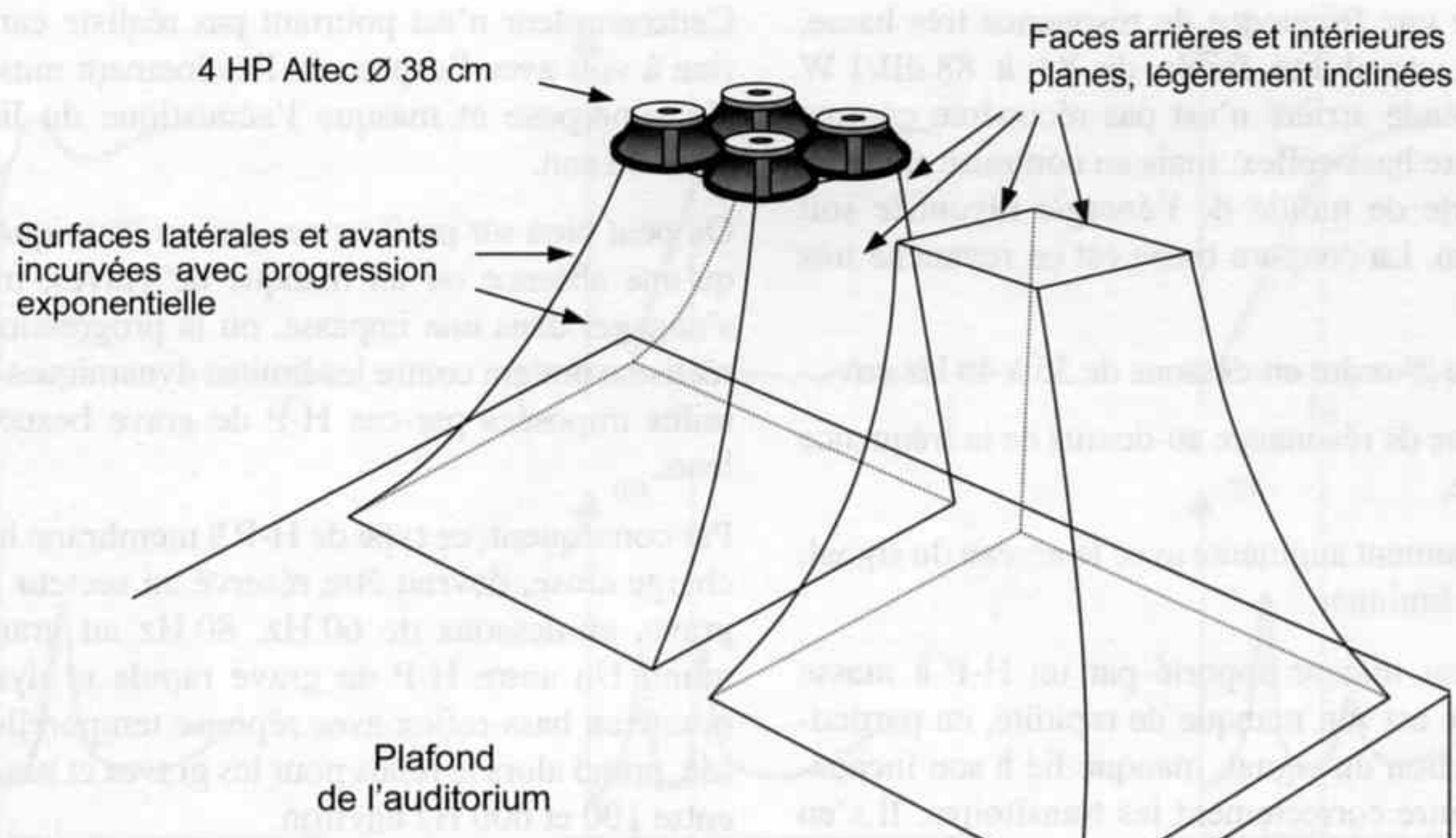


Figure 133 - Exemple de pavillons grave en béton, intégrés à la construction, avec 4 HP Altec 515, de diamètre 38 cm. La fabrication en béton a nécessité la réalisation

d'une dalle au plafond de l'auditorium. Les pavillons de 1,50 m de long occupent une partie des combles. Coupure basse vers 30 Hz, selon les HP utilisés.

très grands volumes d'air, cathédrale, hall, et des résonances ou échos qui s'y produisent, ou encore de grands déplacements d'air créés par le passage d'un train, d'un hélicoptère, demandent la restitution d'une octave supplémentaire vers le bas, à partir de 16 Hz environ pratiquement sans atténuation.

Les possibilités de réalisation d'une voie grave à pavillon donnant à la fois un rendement élevé, une coupure basse inférieure à 40 Hz environ, une réponse transitoire rapide et propre, et une absence de vibration des parois, sont envisageables à partir de pavillons intégrés à la construction de l'auditorium. Le plafond ou les murs, en béton ou en parpaings sablés et enduits, forment les parois d'un pavillon de très forte section, la surface de bouche atteignant parfois 6 m². Ainsi, la longueur reste limitée à 2 ou 3 m afin d'éviter les phénomènes de colonne d'air, et les parois de la salle constituent un prolongement naturel de ce pavillon, procurant ainsi une coupure basse plus douce. La figure 133 montre un schéma d'une réalisation de ce type.

ET LA PREMIÈRE OCTAVE ?

L'exemple figure 133 montre combien il est difficile d'obtenir une extension convenable vers l'extrême-grave à partir de réalisations à pavillons. Ces derniers apportent une augmentation de la sensibilité, au détriment de la bande passante, à moins d'utiliser des surfaces de gorges (et par suite de bouche) gigantesques, nécessitant plusieurs H-P pour les charger correctement. Si ces H-P ont une résonance assez basse, un peu moins de 25 Hz semblant idéal, la première octave

sera reproduite avec peu d'atténuation bien que le pavillon, à ces fréquences, ne constitue pas une charge suffisante.

Ces réalisations restent bien sûr exceptionnelles, et face à cette nécessité d'étendre la réponse vers les plus basses fréquences, la tendance actuelle privilégie la combinaison suivante :

- petite boîte, de volume limité, accordée en Bass-reflex à fréquence assez basse,
- H-P de diamètre moyen, 13 à 21 cm, de faible masse mobile et suspension très souple.

Il en découle une fréquence de résonance basse, un amortissement élevé, ainsi qu'une sensibilité acceptable d'un point de vue commercial, autour de 90 dB/1 W à 1 m. La coupure basse ainsi obtenue se situe majoritairement près de 40 Hz, mais certains inconvénients apparaissent :

- Coupure basse raide du 4^e ordre, ou plus, en dessous de 40 Hz .
- Bosse de niveau vers 50-70 Hz, juste au-dessus de la coupure, lorsque le niveau du signal augmente, d'où un son de tonneau.
- Bande passante "vendable" d'après les mesures, sans rapport avec la réponse subjective.

Il existe pourtant une autre manière de couvrir plus efficacement les deux premières octaves, 16-32 et 32-64 Hz :

- grande boîte close, de volume interne élevé,
- H-P de grand diamètre, 30 à 76 cm, de masse mobile élevée, et moyennement amorti.

Il en découle une fréquence de résonance très basse, ainsi qu'une sensibilité faible de 84 à 88 dB/1 W à 1 m, car l'onde arrière n'est pas récupérée comme dans l'enceinte bass-reflex, mais au contraire amortie, d'où une perte de moitié de l'énergie rayonnée soit -6 dB environ. La coupure basse est en revanche très différente :

- Coupure au 2^e ordre en-dessous de 35 à 40 Hz env.,
- Pas de bosse de résonance au-dessus de la fréquence de coupure,
- L'amortissement augmente avec le niveau du signal, au lieu de diminuer.

L'inconvénient majeur apporté par un H-P à masse mobile élevée est son manque de rapidité, en particulier à l'extinction du signal, manque lié à son incapacité à reproduire correctement les transitoires. Il s'en suit un traînage important, se traduisant par des sur-oscillations parasites après chaque déplacement de la membrane, aussi bien à l'aller qu'au retour en position repos, au lieu d'un arrêt rapide et net du mouvement.

La réponse en signal sinusoïdal est par contre excellente, ce qui permet l'obtention de chiffres de distortion très bas en-dessous de 100 Hz, même à fort niveau lorsque la bobine mobile sort du champ. Ce type de H-P ne semble capable de produire que des ondes sinusoïdales, certains modèles à membrane volontairement alourdie donnant une réponse sinus même lorsqu'on leur envoie un signal carré !

Ces H-P se comportent donc comme de véritables filtres passe-bas mécaniques, à fréquence de coupure très basse souvent inférieure à 100 Hz.

La reproduction du secteur grave et bas-médium par ce type de H-P donne un son ample –fausset– plutôt lent et généreux mais peu réaliste, qui convient assez bien à la musique symphonique mais pas du tout au jazz. Le traînage est en effet responsable d'une "chaleur" artificielle, produisant une sorte de réverbération supplémentaire et répétitive. Les masses orchestrales, des contrebasses, violoncelles, ou d'instruments à vent aux notes graves, sont reproduites avec ampleur, mais les timbales, pizzicati de contrebasses, et d'une manière générale tous les sons transitoires d'attaques, caractérisés par un "bruit de transition" riche en graves (tel que présenté au chapitre 5) sont amputés d'une grande part de leur énergie. La matière sonore est absente, l'événement est perçu dans son ensemble avec la sensation d'un éloignement important de la scène.

Sur un système où la restitution de l'espace sonore est insuffisante, faute de dynamique et d'ouverture, l'utilisation de tels H-P apporte une correction de l'ambiance tout à fait bénéfique.

Cette ampleur n'est pourtant pas réaliste car elle n'a rien à voir avec l'espace de l'événement musical, elle s'y superpose et masque l'acoustique du lieu de la prise de son.

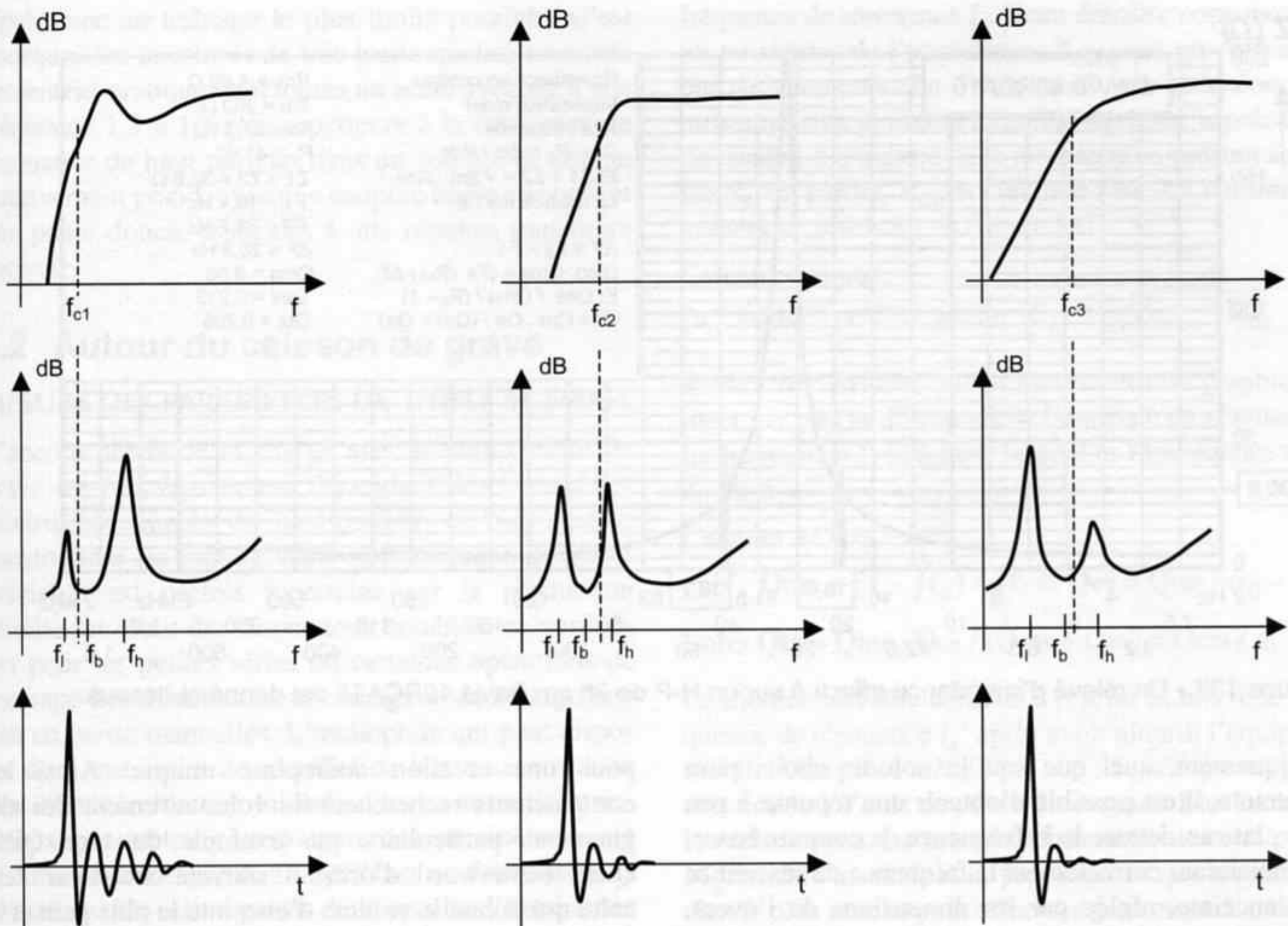
On peut bien sûr préférer ces graves "fabriqués" plutôt qu'une absence ou un manque de graves, mais c'est s'engager dans une impasse, où la progression vers le réalisme buttera contre les limites dynamiques et transitoires imposées par ces H-P de grave beaucoup trop lents.

Par conséquent, ce type de H-P à membrane lourde, en charge close, devrait être réservé au secteur extrême-grave, en-dessous de 60 Hz, 80 Hz au grand maximum. Un autre H-P de grave rapide et dynamique, monté en bass-reflex avec réponse temporelle optimisée, prend alors le relais pour les graves et bas-médium entre 100 et 600 Hz environ.

DES ALIGNEMENTS PAS TOUJOURS TEMPORELS...

L'optimisation de l'accord entre haut-parleur et enceinte bass-reflex a fait l'objet de nombreuses études, tout d'abord par Olson en 1943, Beranek en 1954, puis Novak en 1959, entre autres, qui ont établi les circuits équivalents du haut-parleur et de son enceinte, sorte de modèle électrique décrivant le fonctionnement, aussi bien du point de vue électrique que mécanique, et permettant la mise en équation ouvrant la voie à l'optimisation. Thiele en 1961 décrivit une méthode d'alignement, par analogie avec les filtres électroniques, méthode que Small étendit ensuite à partir de 1973. Les paramètres d'alignement d'un haut-parleur dans son enceinte sont encore appelés paramètres de Thiele et Small. Ces paramètres sont tous déductibles de la courbe d'impédance du haut-parleur, car cette dernière rend compte intégralement du fonctionnement mécanique, grâce aux interactions réciproques courant/déplacement. La bibliographie rappelle les titres des références en la matière.

Il existe une infinité de possibilités de charge pour un haut-parleur donné, en fonction du volume interne de l'enceinte et de la fréquence de résonance de cette dernière. La courbe de réponse obtenue est très variable avec ces deux paramètres, et on parle d'alignement lorsque cette réponse correspond à celle d'un circuit électrique connu, pour lequel le fonctionnement est décrit par un polynôme particulier, de Butterworth, de Chebychev ou autres. Ces différents alignements peuvent être classés en trois grandes catégories, selon que l'accord de l'enceinte est établi à la fréquence de résonance propre du haut-parleur, en dessous de celle-ci, ou au-dessus de celle-ci.



Figures 134 - 135 - 136 - Enceinte accordée :

Plus bas que la fréquence
de résonance du haut-parleur.

Exactement sur la fréquence
de résonance du haut-parleur.

Plus haut que la fréquence
de résonance du haut-parleur.

Dans le premier cas, figure 135 au centre, la réponse en fréquence est linéaire et la coupure basse assez raide, de l'ordre de 24 dB par octave. La courbe d'impédance du haut-parleur chargé par l'enceinte présente deux bosses d'égale amplitude, aux fréquences repérées f_l et f_h de part et d'autre de sa résonance f_s à l'air libre, ces bosses étant séparées par un creux à la fréquence d'accord de l'enceinte f_b qui dans ce cas est égale à f_s . La fréquence de coupure basse f_{c2} est comprise entre f_s et $2 f_s$ donc un peu supérieure à la fréquence de résonance du haut-parleur. La réponse impulsionnelle montre quelques oscillations amorties révélant un traînage audible.

Dans le deuxième cas, figure 134 à gauche, la réponse présente des ondulations plus ou moins importantes, et la coupure basse est brutale, jusqu'à 36 dB par octave, avec une réponse transitoire dégradée, montrant un traînage important. La courbe d'impédance correspondante présente aussi deux bosses, mais cette fois la bosse à la fréquence f_l est d'amplitude plus faible que celle à la fréquence f_h . Cette bosse d'impédance à f_h se traduit par un creux dans la courbe de réponse, le haut-parleur recevant, pour une tension d'attaque constante, un courant plus faible. La fréquence de coupure basse

f_{c1} est comprise entre $0,7 f_s$ et f_s donc un peu inférieure à la fréquence de résonance du haut-parleur, ce qui rend ce type de réglage très attractif car permettant de publier des bandes passantes flatteuses...

Dans le troisième cas, figure 136 à droite, la réponse en fréquence est un peu arrondie, mais avec une pente plus faible de 18 dB par octave, et une réponse transitoire plus rapide et plus propre. La courbe d'impédance comporte toujours deux bosses, mais cette fois c'est la bosse à la fréquence f_b qui présente une amplitude supérieure, ce qui a pour effet de diminuer le niveau acoustique juste en dessous de la fréquence d'accord de l'enceinte, et d'adoucir la pente de la coupure. La fréquence de coupure basse f_{c3} est comprise entre $1,5 f_s$ et $3 f_s$ donc nettement supérieure à la fréquence de résonance du haut-parleur, ce qui peut paraître médiocre.

C'est pourtant ce type de réglage qui procure à l'écoute, lorsqu'il est associé à des haut-parleurs dont le coefficient Q_t est compris entre 0,2 et 0,3, les sons graves les plus légers et naturels, et l'extrême grave le plus profond, avec beaucoup plus d'aération que dans les deux cas précédents.

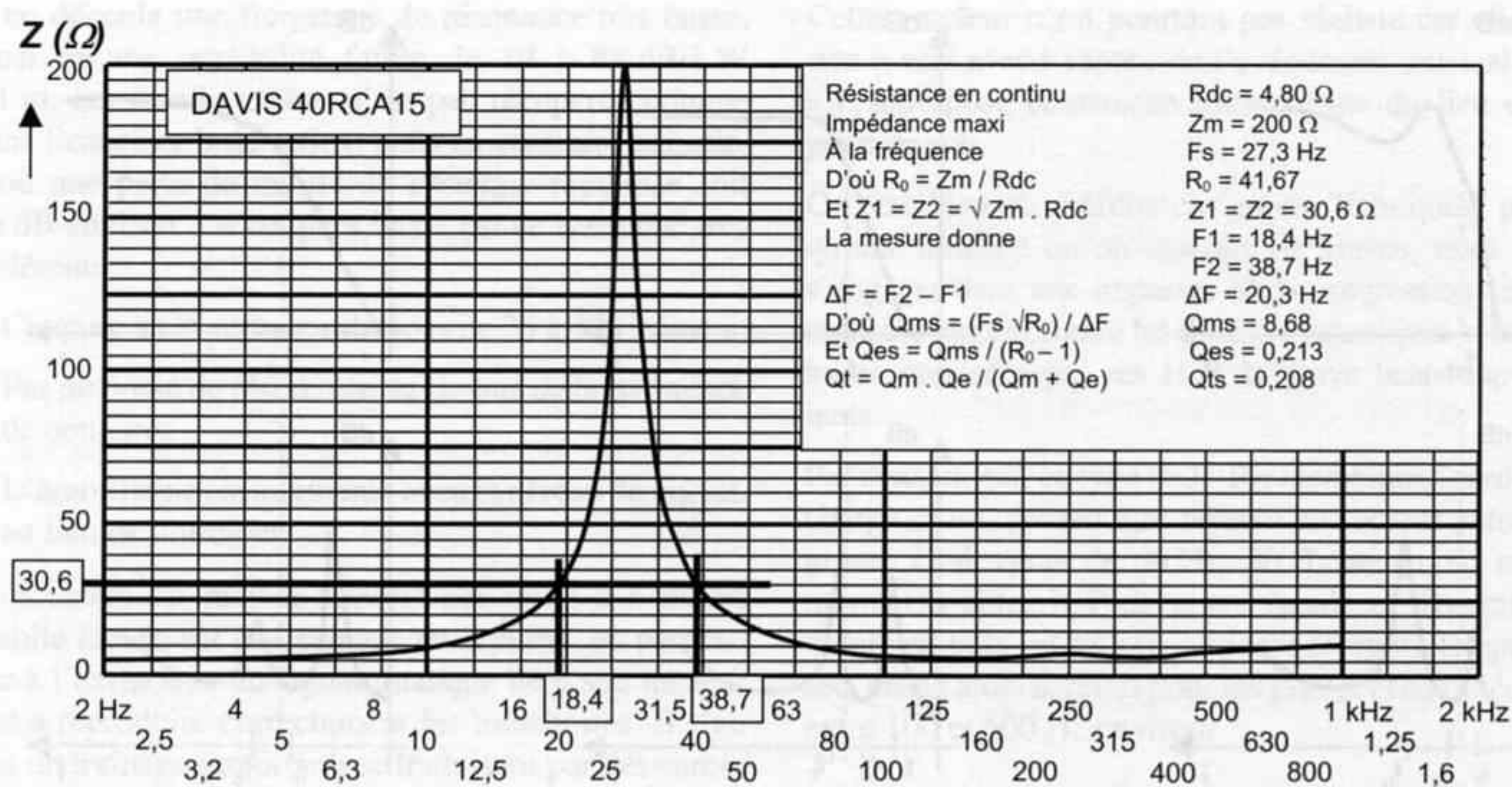


Figure 137 - Un relevé d'impédance effectué sur un H-P de 38 cm Davis 40RCA15 est donné ci-dessus.

Pratiquement, quel que soit le volume choisi pour l'enceinte, il est possible d'obtenir une réponse à peu près plate au-dessus de la fréquence de coupure basse, en choisissant correctement la fréquence de résonance de l'enceinte, réglée par les dimensions de l'évent. Cette ouverture des possibilités donne lieu à des excès de la part des constructeurs, qui pour rivaliser dans la course à la miniaturisation, diminuent outrageusement les volumes de charges, tout en les accordant très bas en fréquence afin de récupérer un niveau de grave correct. Cette pratique, si elle donne des résultats de mesure satisfaisants, en petits signaux bien sûr, se traduit à l'écoute par un registre grave à la sonorité artificielle.

La réponse temporelle de ce type d'enceinte est mauvaise, avec un temps d'établissement trop long, demandant plusieurs périodes du signal avant que le régime de fonctionnement ne soit établi, ceci au démarrage comme à l'arrêt du signal. Le son semble lent, avec des attaques molles, pratiquement aucun impact, et un traînage important, le registre grave est alors constitué d'une masse sonore confuse et pâteuse sans aucune aération. On compte alors sur le registre médium pour restituer les attaques, mais l'énergie rayonnée dans le grave arrive de toute manière trop tard, et la cohérence des registres est absente.

Rechercher la minimalisation du volume pour une fréquence de coupure basse donnée, et récupérer le grave ainsi perdu par un accord à fréquence plus basse, ne relève pas d'une quelconque recherche de réalisme, l'optimisation vise alors les coûts de production, l'encombrement et le poids, ce qui se comprend d'un point de vue industriel mais n'a pas de justification

pour une création audiophile unique. Ainsi les constructeurs recherchent-ils volontairement des alignements particuliers, par exemple du type QB3, Quasi-Butterworth d'ordre 3, souvent choisi car c'est celui qui donne le volume d'enceinte le plus petit et la fréquence de coupure la plus basse.

Les réalisations sans compromis, ou plutôt sans contraintes industrielles ni commerciales, celles de l'audiophile, peuvent s'affranchir de ces contraintes de production et de transport, et partir dans une direction différente, avec pour unique risque d'aboutir à une enceinte de dimensions importantes et non optimales, dotée d'une fréquence de coupure théorique peu brillante. En revanche, la réponse transitoire peut-être nettement supérieure à celle des réalisations industrielles courantes, avec une absence de traînage et une rapidité étonnantes.

Autrement dit, il est dommage de se contenter de refaire en plus gros ce que les grands constructeurs font déjà. Leurs laboratoires de recherche ont optimisé un délicat compromis, et les coûts de production ont été minimisés. Je ne vois vraiment pas l'intérêt de refaire en moins bien et en plus cher ce qui existe déjà, d'autant plus que cela ne répond pas à nos critères d'exigence de réalisme ! L'audiophile qui souhaite réaliser lui-même ses enceintes acoustiques doit par conséquent définir ses propres contraintes, et dimensionner lui-même les grandeurs définissant l'accord, avec l'assistance informatique si nécessaire.

Le point de départ de la démarche de dimensionnement de l'enceinte est le choix d'un type d'alignement procurant un réalisme sonore satisfaisant. C'est la rapidité de la réponse transitoire qui est l'objectif prin-

cial, avec un traînage le plus limité possible. C’est pourquoi les enceintes de très haute qualité musicale présentent pratiquement toutes un accord réalisé à une fréquence 1,3 à 1,5 fois supérieure à la fréquence de résonance du haut-parleur, dans un volume de charge relativement grand, avec une coupure basse arrondie et une pente douce, associées à une réponse transitoire correcte.

8.2 Autour du caisson de grave

MESURE DES PARAMÈTRES DE THIELE ET SMALL

L’accord précis de la charge avec le haut-parleur de grave est très étroitement dépendant des paramètres électro-mécaniques du haut-parleur, et bien que le constructeur les indique dans sa fiche technique, leur précision est parfois incertaine car la production sérielle introduit des dispersions notables, en particulier pour les petites séries où certaines opérations de pressage des membranes, d’usinage et de collage restent en partie manuelles. L’audiophile qui peut disposer d’un minimum de matériel de laboratoire a donc tout intérêt à effectuer lui-même les mesures des principaux paramètres. La plupart des paramètres sont déduits de la mesure de l’impédance en fonction de la fréquence. Un relevé précis de la courbe d’impédance constitue donc la première étape. Plusieurs méthodes existent et sont décrites dans la littérature spécialisée, la seule permettant une mesure aisée sans nécessiter de précautions particulières ou de correction spécifique, est la méthode à courant constant. Un impédancemètre pour haut-parleur fonctionne sur ce principe, le modèle en kit disponible sur catalogue chez Selectronic convient tout à fait et est relativement précis. Le matériel requis est le suivant :

- Un générateur de signaux basse fréquence, GBF. Une gamme de 1 Hz à 100 kHz en signaux sinusoïdaux suffit. Un fréquencemètre numérique intégré facilite grandement la manipulation.
- Un impédancemètre numérique précis à 0,01 Ω avec étalonnage intégré.
- Un compteur fréquencemètre   résolution de 0,1 Hz.
- Un multimètre numérique avec résolution de 0,05 Ω.

Le haut-parleur à tester est rodé pendant au moins une heure à basse fréquence et niveau moyen, aux alentours de 25 à 30 Hz, avec un débattement de 1 ou 2 mm, ceci afin d’assouplir par un vieillissement accéléré les suspensions. Ce haut-parleur est de préférence suspendu loin de toute surface, et non posé sur une table ou au sol, ce qui fausserait les mesures. Après rodage, un relevé point par point de l’impédance est effectué, en prenant soin de choisir des points très rapprochés autour de la

fréquence de résonance f_s . Cette dernière correspond à un maximum de l’impédance, Z_{max} qui est recherché par tâtonnements afin d’être cerné avec précision. Un moyennage de plusieurs mesures augmente la précision du résultat. La mesure de la résistance en continu appelée R_e ou parfois R_{dc} est réalisée avec un multimètre numérique précis à 1 % (figure 137).

Calculer ensuite :
 $r_0 = Z_{max} / R_{dc}$ Puis $Z_1 = Z_2 = \sqrt{Z_{max} \cdot R_{dc}}$

Rechercher ensuite, par la mesure et non graphique-ment, de part et d’autre de la fréquence de résonance, les fréquences f_1 et f_2 pour lesquelles l’impédance vaut Z_1 ou Z_2 .

Calculer $\Delta f = f_2 - f_1$
puis $Q_{ms} = (f_s \cdot \sqrt{r_0}) / \Delta f$ et $Q_{es} = Q_{ms} / (r_0 - 1)$

Enfin $Q_{ts} = Q_{ms} \cdot Q_{es} / (Q_{ms} + Q_{es}) = Q_{ms} / r_0$

La mesure suivante consiste à relever la nouvelle fréquence de résonance f_s' après avoir alourdi l’équipage mobile. Une pièce métallique non magnétique est pour cela collée à l’aide de pâte à fixer genre Blu-Tack sur le cache-noyau. La masse additionnelle de cette pièce M_a doit être mesurée avec précision, ce que le pharmacien le plus proche peut effectuer gentiment. La masse de l’équipage mobile complet se déduit de l’abaissement constaté de la fréquence de résonance :

$M_{md} = M_a / (f_s^2 / f_s'^2) - 1$

Diamètre H-P (en cm)	55	46	38	33	31	26	24	21
Masse d’air déplacé (en g)	50	27	15,3	8,8	7	3,5	2,5	1,9

Figure 138.

Il convient d’ajouter à cela la masse M_r de l’air déplacé par la membrane, qui dépend de sa surface.

La masse mobile totale est $M_{ms} = M_{md} + M_r$

Le calcul suivant donne le volume d’air équivalent à l’élasticité de la suspension :

$V_{as} = 140\,449 \cdot R^4 / 4f_s^2 \cdot M_{ms}$
avec R rayon actif de la membrane

puis le facteur de force du moteur :
 $B \cdot L = \sqrt{(2\pi) \cdot f_s \cdot M_{ms} \cdot R_{ds} / Q_{es}}$

Et enfin le rendement en rayonnement dans un demi-espace (sur 2π) :

$n = 9,6 \cdot 10^{-7} \cdot f_s^3 \cdot V_{as} \cdot 100 / Q_{es}$ en pourcentage,
soit en dB SPL : $\eta = 10 \log (n / 0,065) + 80$

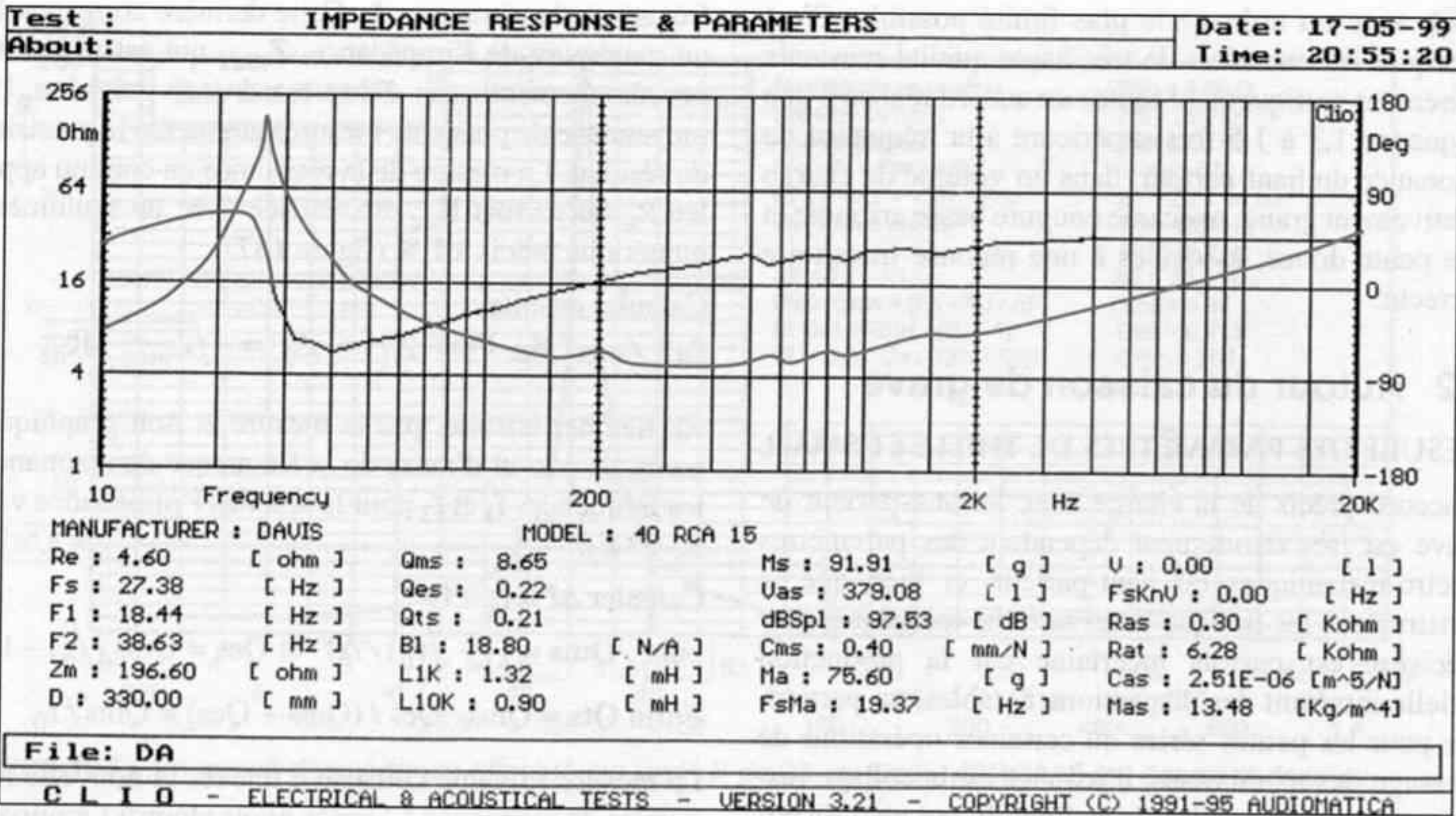


Figure 139 - Mesure avec CLIO du H-P Davis.

Ces calculs ne tiennent pas compte de la résistance d’une éventuelle self de filtrage en série avec le haut-parleur. Si elle existe, sa résistance est simplement ajoutée au terme R_{dc} ce qui fait diminuer Q_{ms} et augmenter Q_{es} donc baisser le rendement et diminuer l’amortissement électrique. Un exemple de paramétrage prenant en compte cette résistance en série est donné plus loin.

Appliquée à l’exemple précédent du haut-parleur Davis 40RCA15, cette procédure a donné les résultats suivants:

Avec une masse additionnelle de $M_a = 75,6$ g la nouvelle fréquence de résonance est $f_s' = 19,4$ Hz

D’où : $M_{md} = 75,6 / (27,3^2 / 19,4^2) - 1 = 77,12$ g auxquelles s’ajoutent $M_r = 15$ g

Ce qui donne : $M_{ms} = 92,12$ g

On en tire, avec $R = 16,5 \cdot 10^{-2}$ m : $V_{as} = 379$ dm³

Et $B \cdot L = 18,87$ Tm ou N/A

D’où un rendement de $\eta = 3,4755$ % équivalent à $\eta = 97,28$ dB / 1 W à 1 m

Ces valeurs obtenues avec des moyens très simples recourent tout à fait celles fournies par le constructeur, avec une précision meilleure que 2,5 %. Les variations de ces paramètres dues aux dispersions de fabrication sont souvent supérieures à 5 % ce qui fait qu’une plus grande précision de mesure est illusoire.

La procédure complète pour mesurer une paire de haut-parleur (ou deux...) demande plusieurs heures de travail, l’assistance informatique à l’aide de système

CLIO ou MLSSA réduit ce temps à quelques minutes, ce qui est intéressant pour le spécialiste mais rarement à la portée de l’amateur.

La précision obtenue n’est pas supérieure, étant conditionnée par la connaissance des valeurs de résistance R_{dc} , de rayon R , et de masse additionnelle M_a . Faire confiance aux valeurs données sur les fiches techniques est risqué, à cause des dérives qui apparaissent après quelques mois de fabrication, ou pour des raisons de réglages optimisés des procédés, la mise à jour des données des fiches techniques n’étant pas obligatoire.

La figure 139 donne les résultats obtenus avec CLIO pour le haut-parleur pris en exemple. Les valeurs recourent assez bien celles obtenues manuellement.

Le haut-parleur étant maintenant complètement défini, la méthode de calcul de la charge à la fois la plus accessible et laissant le plus de liberté au concepteur, est celle décrite par Snyder, et reposant sur le choix d’un paramètre d’alignement n , compris entre 2 et 16, figure 140, conditionné par la forme de la courbe de réponse souhaitée. Les calculs nécessaires ensuite sont relativement simples :

Le volume net de l’enceinte est : $V_b = n \cdot V_{as} \cdot Q_t^2$
et la fréquence d’accord est : $f_b = 0,39 f_s / Q_{ts}$

Ils donnent un réglage assez bien optimisé dont il est très risqué de s’éloigner sans l’aide d’un outil informatique, au risque de désaligner le couple enceinte/haut-parleur et d’obtenir ainsi un joli son de barrique...

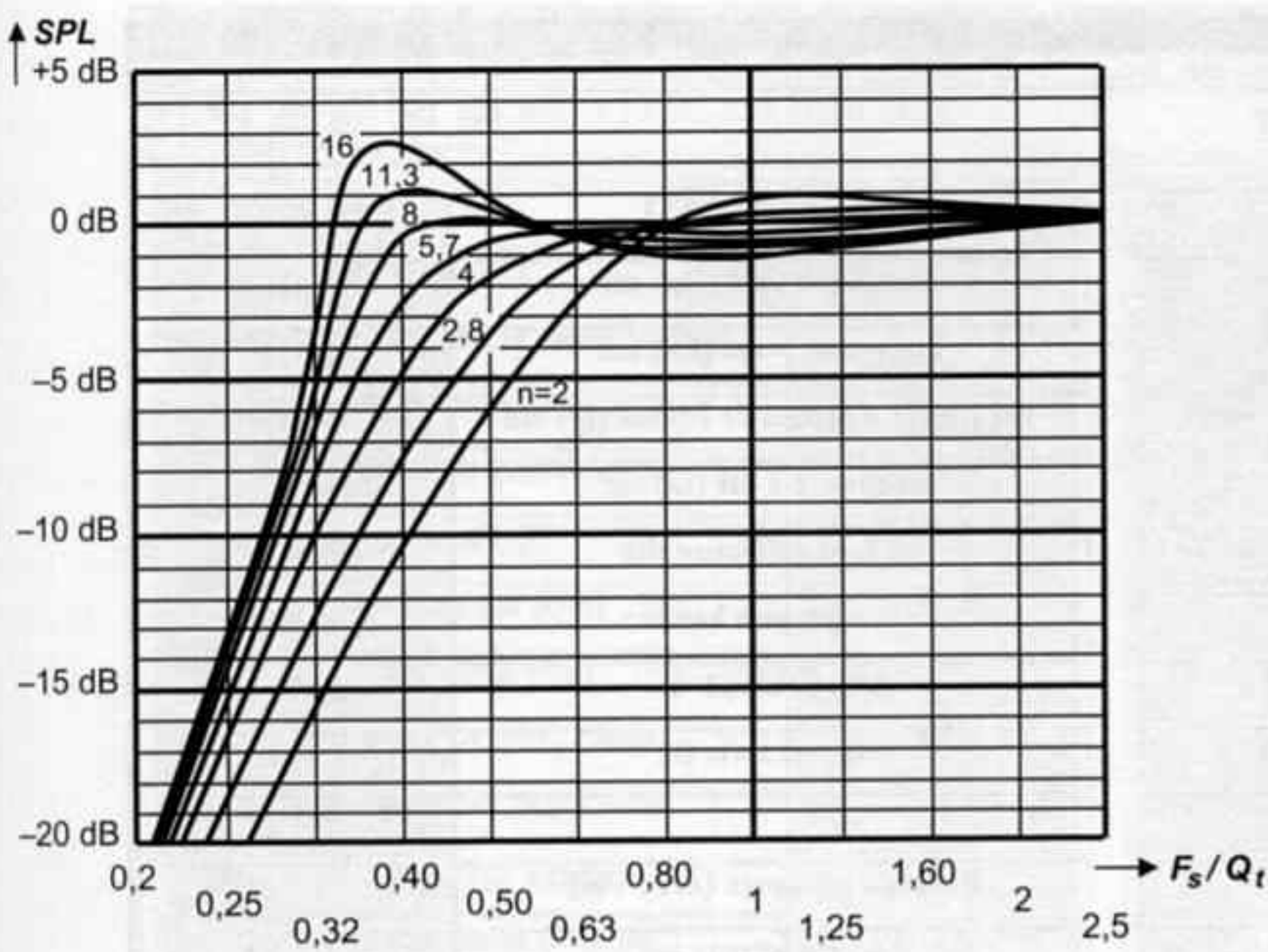


Figure 140 - Diagramme montrant les différentes formes de réponse pour des valeurs de n comprises entre 2 et 16.

Ce sont les valeurs de 4 à 5,7 qui donnent les réponses les plus plates. Les valeurs supérieures à 8 sont à éviter car donnant une résonance marquée, s'accroissant encore lorsque le niveau du signal augmente. L'axe des abscisses est gradué en valeurs de f_s/Q_t afin d'être utilisable quelle que soit la fréquence de résonance du haut-parleur utilisé. Avec le haut-parleur pris en exemple ici, $f_s / Q_t = 130 \text{ Hz}$, qui correspond à la graduation 1. Celle de 0,5 correspond alors à 65 Hz...
(d'après Snyder, JAES)

Un petit logiciel convivial tel que CAAD permet à l'amateur d'introduire les données de son haut-parleur et de faire varier les paramètres de l'accord afin d'optimiser selon ses critères personnels la réponse de l'ensemble. Avec le haut-parleur Davis 40RCA15 pris en exemple, le calcul de l'enceinte optimale correspondant à un accord de type Butterworth d'ordre 3, avec $n = 4$, donne un volume très réduit de 70 dm^3 environ avec cependant une coupure basse située vers 58,5 Hz, la réponse étant plate. Les résultats apparaissent figure 141, sous le repère "alignement optimal".

Le choix d'un plus grand volume de 150 dm^3 , correspondant à un accord avec $n = 9$ entraîne évidemment un gain appréciable vers les basses fréquences, avec une fréquence de coupure de 45 Hz environ, au prix d'une résonance marquée autour de 50 Hz, inacceptable. Les résultats sont repérés "alignement à éviter" figure 142.

C'est finalement un volume moyen de 120 dm^3 , correspondant à $n = 6$, accordé vers 32 Hz qui donne la réponse la plus intéressante, avec une pente douce jusqu'à 40 Hz et un niveau d'extrême grave plus important. Les résultats sont repérés "alignement préférable" figure 143.

À l'écoute c'est cette version qui donne les résultats les plus naturels. La pente de coupure étant douce, la réponse transitoire est nettement plus favorable. D'autre part cette pente douce est facilement compensée par un réglage de tonalité à condition que sa fréquence d'intervention soit placée assez bas, ce qui est rarement le cas. Il est préférable d'introduire une correction de l'extrême grave fixe, soit dans le préampli soit dans l'ampli de puissance. Des exemples de telles corrections sont donnés plus loin. Elles procurent lorsqu'elles sont correctement établies une extension

appréciable de l'extrême grave sans aucune lourdeur, car le secteur des fréquences situées autour de 100 à 150 Hz n'est pas affecté, et les infra-graves peuvent être filtrés afin de ne pas "affoler" la membrane par des excursions démesurées.

L'informatique n'aide malheureusement pas à faire les bons choix de départ, qui demandent une bonne connaissance des limites du modèle utilisé. Les paramètres de Thiele et Small établis en petits signaux ne sont valables qu'autour de la fréquence de résonance, et aux niveaux faibles. Lorsque la fréquence ou le niveau augmentent, la vitesse de déplacement de la membrane augmente également, et avec elle l'amortissement mécanique $1/Q_m$, qui peut varier d'un facteur supérieur à 2. De même aux forts niveaux à très basses fréquences, la bobine mobile en position de fin de course ne baigne plus entièrement dans le champ magnétique, ce qui fait qu'à la fois le facteur de force BL et l'amortissement électrique Q_e diminuent. Autrement dit, en dessous de sa fréquence de résonance, le haut-parleur a tendance à être moins amorti que ne le prévoit le modèle, alors qu'au-dessus de cette fréquence il a tendance à être plus amorti que prévu. Un modèle mathématique plus perfectionné devrait peut-être prendre en compte ces variations de l'amortissement avec la fréquence ?

En tenant compte seulement de la diminution de Q_m aux forts niveaux, il apparaît que cette variation est plus sensible sur les haut-parleurs mécaniquement très amortis. En effet, si l'on considère un haut-parleur de qualité moyenne avec $Q_m = 2$, $Q_e = 0,5$, et $V_{as} = 50 \text{ dm}^3$, le calcul donne $Q_t = 0,4$ et un alignement prévu pour $n = 5$ aboutit à une enceinte de volume :

$$V_b = n \cdot V_{as} \cdot Q_t^2 = 40 \text{ dm}^3.$$

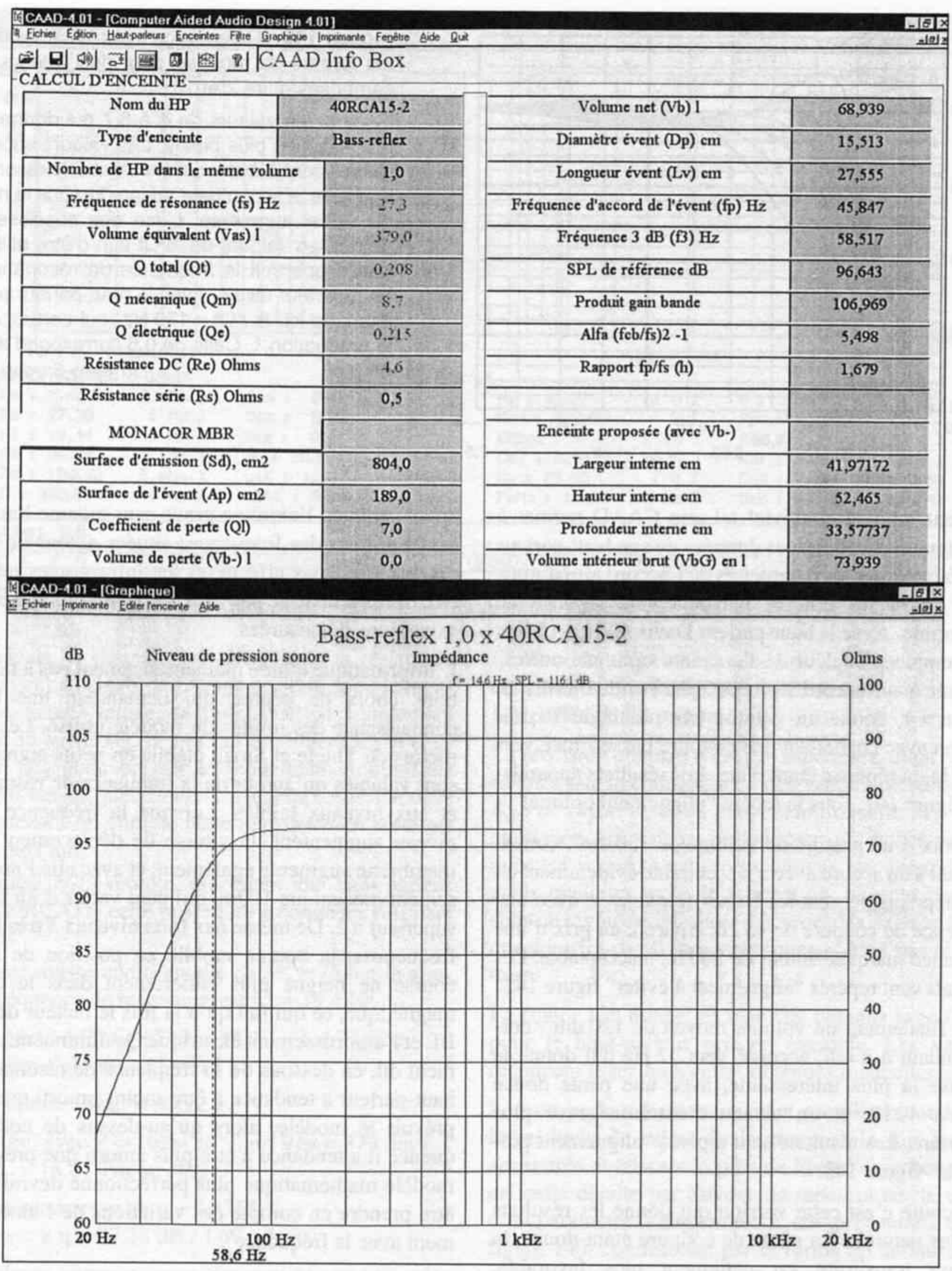


Figure 141 - Tableau de calcul et prévision de la réponse en fréquence pour l'alignement optimal, correspondant à n = 4. Le compromis volume/coupure

Si aux forts niveaux l'amortissement est doublé, le facteur Qm devient Qm' = 1 ce qui donne Qt' = 0,333. Le volume de l'enceinte étant toujours Vb = 40 dm³, cela équivaut à un facteur d'alignement :

basse est remarquable. À l'écoute le registre grave manque d'aération et de liberté.

$$n' = Vb / (V_{as} \cdot Qt'^2) = 7,2.$$

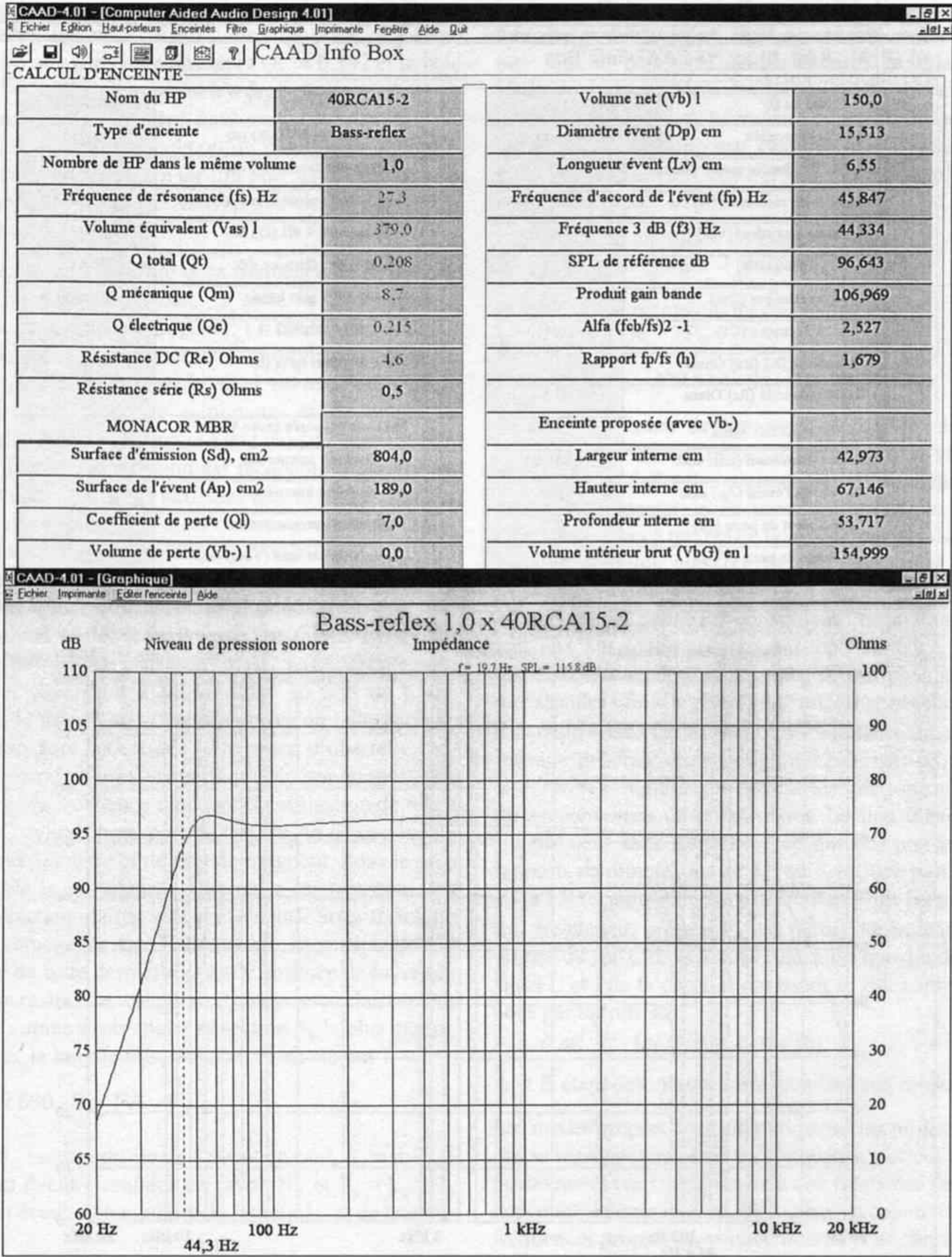


Figure 142 - Tableau de calcul et prévision de réponse en fréquence pour l'alignement à éviter, correspondant à n = 9. La coupure basse est un peu plus intéressante.

La réponse dans le grave aux forts niveaux est donc très différente de celle prévue par le calcul, qui est relativement plate. En réalité les crêtes de niveau aux basses fréquences subissent une accentuation localisée

À l'écoute le registre grave est monocorde, avec une résonance de tonneau, produisant des voix masculines aboyantes, trop épaisses.

autour de la bosse de réponse correspondant à l'ondulation propre aux facteurs d'alignement supérieurs à 6 environ, cette accentuation donnant une sonorité répétitive artificielle.

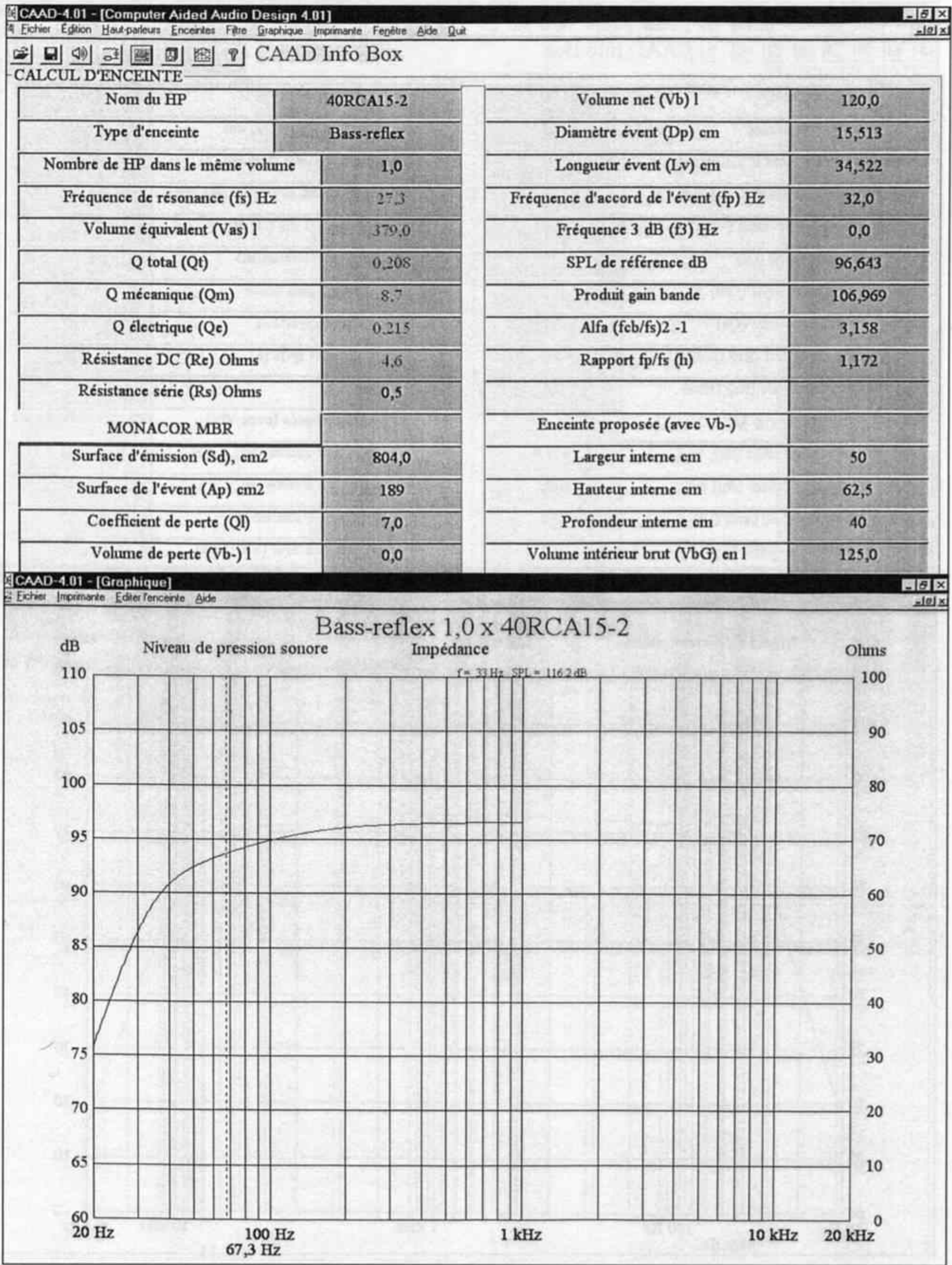


Figure 143 - Tableau de calcul et prévision de la réponse en fréquence de l'alignement préférable, avec n = 6,5. La coupure basse est un peu décevante

et la réponse peu linéaire. Cependant, à l'écoute le registre grave est naturel et léger, ample mais rapide, et l'extrême-grave n'est pas masqué.

Au contraire, pour un haut-parleur mécaniquement peu amorti et de grand diamètre, donc avec des déplacements de membrane faibles, la diminution de Qm est moins sensible, d'un facteur inférieur à 2. Dans le pire

des cas, même si Qm se trouve divisé par deux, les conséquences sont très faibles : si l'on considère un haut-parleur de 38 cm avec Qm = 10, Qe = 0,2 et Vas = 300 dm³, le calcul donne Qt = 0,196 et un ali-

gnement correct avec $n = 5$ aboutit à un volume d'enceinte de $V_b = 58 \text{ dm}^3$. En supposant que Q_m' passe à 5 aux forts niveaux, alors $Q_t' = 0,192$ et le facteur $n' = 5,25$, l'alignement n'a donc pratiquement pas changé, et reste constant quel que soit le niveau du signal. C'est aussi en cela qu'un grand haut-parleur à haut-rendement procure un son plus naturel, avec une constance de timbre et de rapidité indépendante de l'amplitude du signal.

Le volume de l'enceinte et sa fréquence de résonance étant maintenant connus, il reste à dimensionner l'évent, en surface et longueur. Là encore, les vitesses de déplacement doivent être minimisées, afin de conserver une faible inertie, donc un temps d'établissement et un traînage minimaux, et de maintenir l'amortissement mécanique à une valeur constante. Un évent de petite dimension est incapable d'assurer un débit volumique d'air suffisant aux niveaux crête, et l'enceinte se comporte alors comme si elle était close, avec une résonance interne mal maîtrisée, qui peut conduire à un son très retenu, très mat, si l'enceinte est de grand volume, ou au contraire à une bosse désagréable, un son enflé, si le volume est faible. Même un évent de grande surface n'est pas parfaitement linéaire, cependant à partir d'une section de tuyau égale à la moitié de la surface active du haut-parleur, ces effets sont acceptables. Un tuyau d'une telle section demande bien sûr une longueur importante pour respecter la fréquence d'accord. L'utilisation de tubes de PVC cylindriques pour la réalisation de ces événements de grand diamètre et de grande longueur, pose le problème de la résonance de tuyau, c'est pourquoi des événements rectangulaires sont préférables. Sous forme de tunnels aménagés dans l'ébénisterie, ils participent à la rigidité de cette dernière, et à son absence de rayonnement parasite. Le calcul de l'évent est relativement simple : après avoir choisi sa section S_v la plus grande possible, la longueur L_v est donnée en cm par :

$$L_v = 29\,630 \cdot S_v / F_b^2 \cdot V_b$$

Avec S_v section droite de l'évent en cm^2 , $S_v = \pi \cdot R_v^2$ pour un évent circulaire de rayon R_v et $S_v = L_v \cdot H_v$ pour un évent rectangulaire de largeur L_v et de hauteur H_v .

F_b est la fréquence d'accord de l'enceinte de volume V_b en litres, ces grandeurs ayant été définies précédemment.

D'autres formules apparaissent dans la littérature technique, avec des coefficients différents liés à des valeurs particulières de vitesse du son, comprises entre 340 et 344 m/s, et de masse volumique de l'air, variant de 1,2 à 1,3 kg/m^3 . Elles donnent des résultats très proches.

La masse d'air proche de l'extrémité de l'évent exerce une charge sur le rayonnement acoustique de ce dernier, qui se comporte alors comme si sa longueur effective était supérieure. C'est pourquoi une correction d'extrémité est nécessaire, correction qui est retranchée de la longueur calculée afin d'obtenir la longueur définitive. Cette correction L' dépend de la forme de l'évent :

Pour un évent circulaire de grand diamètre

$$L' = 0,825 \cdot \sqrt{S_v} = 1,462 \cdot R_v$$

Pour un évent rectangulaire très mince

$$L' = 1,4 \cdot \sqrt{S_v / 2\pi}$$

Finalement $L_v = [29\,630 \cdot S_v / F_b^2 \cdot V_b] - L'$

La sonorité finale de l'enceinte dépend également d'autres facteurs. Les modes de résonance du volume interne créent des ondes stationnaires à l'intérieur de la caisse, l'augmentation de pression acoustique résultante passe alors à travers de la membrane, acoustiquement transparente, ainsi que par l'évent. Tout ce qui se passe à l'intérieur s'entend à l'extérieur ! Les modes vibratoires des panneaux constituant l'enceinte apportent eux aussi une coloration supplémentaire. Il est donc nécessaire de tenir compte de ces phénomènes indésirables afin d'obtenir un résultat harmonieux.

En ce qui concerne les modes de résonance interne, la formule générale donnée figure 27 permet un calcul aisé, et les règles concernant les proportions des dimensions vues au chapitre 6 « Le lieu d'écoute » s'appliquent sans restriction, ce qui fait préférer les rapports de dimensions de 1,2 ou 1,4 d'une part, et de 1,8 à 1,9 ou autour de 2,2 d'autre part (voir figure 32). Les fréquences propres F_p des parois dépendent de la vitesse du son C dans le matériau, ainsi que des dimensions L et l de la paroi, d'épaisseur h . Elles sont données par la formule :

$$F_p = 0,48 \cdot C \cdot h[(A / L^2) + (B / l^2)]$$

A et B étant des entiers correspondant aux modes.

Les modes propres des différents panneaux ne devraient pas se regrouper autour d'une fréquence particulière, et ne devraient pas correspondre à une fréquence de résonance du volume interne. Un tableau récapitulatif des fréquences propres du volume interne et de chacun des panneaux, en particulier latéraux et du fond, montre s'il existe des regroupements de mode. Le changement d'une seule dimension suffit souvent à étaler les résonances, à les répartir de manière homogène.

Les proportions acceptables étant définies, il est nécessaire de lutter contre les vibrations parasites des parois. Classiquement comme dans tout problème vibratoire, c'est par la masse, la rigidité et l'amortissement que les vibrations sont atténuées. Les parois de l'enceinte sont

Résonances du volume d'air L x P x H						Panneau de fond		Panneau latéral	
mode	fréquence	mode	fréquence	mode	fréquence	mode	fréquence	mode	fréquence
1-0-0	179,2	2-0-0	358,3	1-2-0	574,7	1-0	57,1	1-0	95,6
0-1-0	273	0-2-0	546	1-0-2	685,4	0-1	98,2	0-1	98,2
0-0-1	330,8	0-0-2	661,6	2-1-0	450,5	1-1	155,3	1-1	193,7
1-1-0	326,5			2-0-1	487,7	1-2	253,5	1-2	291,9
1-0-1	376,2			0-1-2	715,7	2-1	212,5	2-1	289,3
0-1-1	428,9			0-2-1	638,4	2-0	114,3	2-0	191,1
1-1-1	464,8					0-2	196,3	0-2	196,3

Figure 144 - Fréquences de résonances du caisson Fidel.

donc épaisses afin d’apporter la masse, rigides à base d’un matériau assez raide, et fortement amorties. C’est la combinaison des propriétés de différents matériaux qui permet de réunir ces qualités.

Encore une fois le multiplis de hêtre semble tout à fait approprié, surtout pour les grands panneaux qui demandent une rigidité élevée. Les plus petits panneaux sont plus neutres lorsque réalisés en médite de forte épaisseur. Une rigidification supplémentaire est indispensable dans la zone centrale des panneaux, zone dont l’amplitude vibratoire peut atteindre plusieurs dixièmes de millimètre en crête. Un tasseau de bois raide, chêne ou multiplis, collé et vissé, disposé de manière dissymétrique, divise le panneau en plusieurs parties qui vibrent de façon indépendante. Les surfaces différentes de ces parties résonnent à des fréquences décalées, supérieures à la fréquence propre du panneau seul, et sont faciles à amortir par produits visqueux. Des plaques de bitume armé de fibres, une couche de pâte bitumineuse, ou un rouleau de matériau goudronné assurent cet amortissement.

La rigidité de l’ensemble est encore augmentée par le couplage des différents panneaux, dans les angles où des tasseaux collés et vissés assurent leur liaison, et en leur centres, où un tasseau permet le couplage des parois opposées. Le même effet est obtenu avec des panneaux ajourés reliant quatres faces du coffret. Les découpes dans ce panneau doivent représenter au moins la moitié de la surface afin de ne pas créer deux volumes distincts couplés. Les découpes rectangulaires, de dimensions inégales évitent la formation de résonances de cavité.

Un point faible d’un grand nombre de caissons de grave se situe dans la face avant, près du haut-parleur de grave ou entre les deux haut-parleurs, par manque de rigidité de cette zone évidée, qui est directement soumise à l’énergie vibratoire transmise par les châssis. L’épaisseur de la face avant doit être augmentée en

conséquence, et une valeur de 60 mm n’est parfois pas suffisante. Un panneau sandwich de multiplis et liège de 70 à 80 mm semble une solution valable, un renfort épais et rigide prenant appui sous le H-P ou entre les deux H-P améliore le comportement. Tout ces renforts gagnent à être disposés sur tranche, c’est-à-dire avec leur plus faible surface en contact avec le panneau. Ils travaillent en effet en flexion, et sont donc beaucoup plus rigide sur tranche qu’à plat. Un tasseau de 25 x 50 mm est 4 fois plus rigide s’il est utilisé dans le bon sens.

Des parois sablées, constituées de deux panneaux séparés par une couche de sable fin tassé, réunissent les qualités de masse et de rigidité élevée, l’amortissement étant par contre mal réparti, concentré plutôt sur les secteurs médium et aigu, et assez faible dans le grave. Pour un caisson grave, les parois sablées ne me semblent pas idéales, et de meilleurs résultats sont obtenus avec des parois sandwichs, réalisées avec deux panneaux de multiplis d’épaisseur différentes, 25 et 32 mm par exemple, séparés par une couche de liège expansé assez épaisse, 3 à 5 mm, collée avec une colle restant souple, néoprène par exemple, et non avec la colle à liège habituelle qui durcit en vieillissant.

Les résonances du volume interne sont également légèrement amorties par une couche de feutre de 10 à 15 mm agrafée aux parois, ainsi que par un rideau de feutre suspendu au tiers de la profondeur. Si l’enceinte est bien conçue, la laine de verre remplissant le volume interne n’est pas utile, et même néfaste, enlevant une part de liberté au registre grave.

Un exemple concret, développé autour du haut-parleur Davis 40RCA15 pris comme support jusqu’ici permet d’illustrer l’ensemble des règles de construction énoncées ci-dessus. Les choix liés à l’intention de départ sont-ils plus importants que le sérieux et les détails de réalisation ?

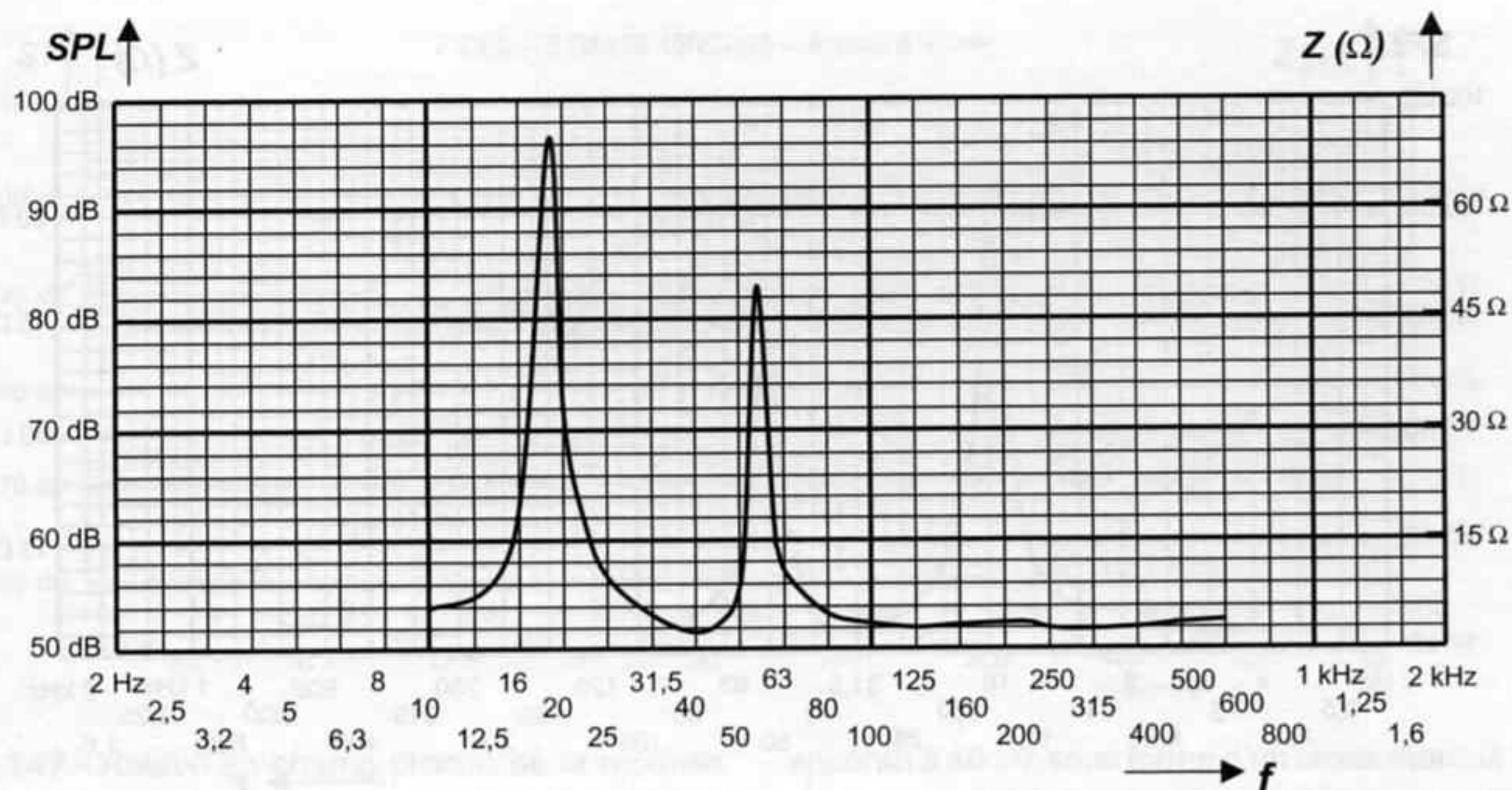


Figure 145 - Relevé d'impédance du caisson sans aucun amortissant, révélant la fréquence d'accord de 39,6 Hz et les deux bosses typiques du système bass-reflex, la première bosse à $F_1 = 18,2$ Hz étant d'ampli-

tude plus grande, avec 69,5 Ω, que la bosse à $F_2 = 55,1$ Hz d'amplitude 49,5 Ω. L'impédance minimale est de 3 Ω.

8.3 Fidel, un caisson exemplaire ?

DIMENSIONNEMENT voir annexe 4, p. 353

FIDEL est un caisson concrétisant les idées qui me paraissent à la fois fondamentales, incontournables, et en même temps orientées volontairement dans une direction différente des conceptions habituelles. Il n'est absolument pas optimisé, sous aucun point de vue. Il respecte simplement tous les seuils minimums définis précédemment, ceci sans a priori, et présente par conséquent des inconvénients : lourd, encombrant, difficile à fabriquer autant qu'à déplacer et à positionner, son impédance faible n'est pas un cadeau pour les amplificateurs anémiques. Pourtant je ne lui vois actuellement qu'une alternative possible : le pavillon de grave intégré au mur ou au plafond avec une ou deux paires de 38 cm, mais ça, c'est une autre histoire...

Je l'ai nommé par jeu Fidel, F.I. (de mes initiales) Davis Events Laminaires, et il n'est exemplaire que dans la mesure où il me sert... d'exemple.

Le choix du haut-parleur Davis 40RCA15 a été orienté par la recherche d'un facteur B^2L^2/Re maximal, ainsi que d'une fréquence de résonance basse inférieure à 30 Hz et une excursion importante dans le but avoué d'établir une égalisation de l'extrême grave. Gagner quelques dB à 20 Hz demande des déplacements de membrane importants, c'est pourquoi dès le départ la mise en parallèle de deux H-P juxtaposés a été décidée. Avec un BL de 19,3 N/A et une résistance en continu

$R_{dc} = 4,6 \Omega$ la mise en parallèle de deux unités produit un facteur $B^2L^2 / Re = 648$, valeur plus qu'intéressante pour le rendement et surtout pour l'amortissement électrique. L'efficacité prévue est de 103 dB/2,83 V avec une coupure basse de l'ordre de 50 Hz sans correction, et de 25 Hz avec correction active. Cette extension du registre grave étant obtenue sans aucune lourdeur, avec rapidité et légèreté, par le choix d'un alignement (devrais-je parler de désalignement ?) particulier, avec un assez grand volume de charge correspondant à $n = 6,8$, et une fréquence d'accord plus haute que l'optimal.

Avec les paramètres prévisionnels fournis par le constructeur, $Q_{ts} = 0,24$ et $V_{as} = 398 \text{ dm}^3$, le volume de charge pour deux haut-parleurs s'établit à :

$$V_b = 2 \cdot n \cdot V_{as} \cdot Q_{ts}^2 = 312 \text{ dm}^3$$

Ce volume est obtenu par des dimensions internes respectant les proportions des caissons Onken, avec des rapports de dimensions de 1/1,2/1,8 qui sont favorables, avec une tolérance de 1,1 à 1,2 et de 1,8 à 1,9. Cela aboutit à des dimensions internes de **H = 52 × P = 63 × L = 97 cm**.

Les épaisseurs des parois sandwichs sont de 68 mm pour la face avant, avec deux couches de multiplis de 32 mm séparées par une feuille de liège, et de 56 mm pour les panneaux latéraux et du fond, avec deux couches de multiplis de 26 mm séparés par du liège. Les parois des événements sont en une couche de multiplis de 32 mm.

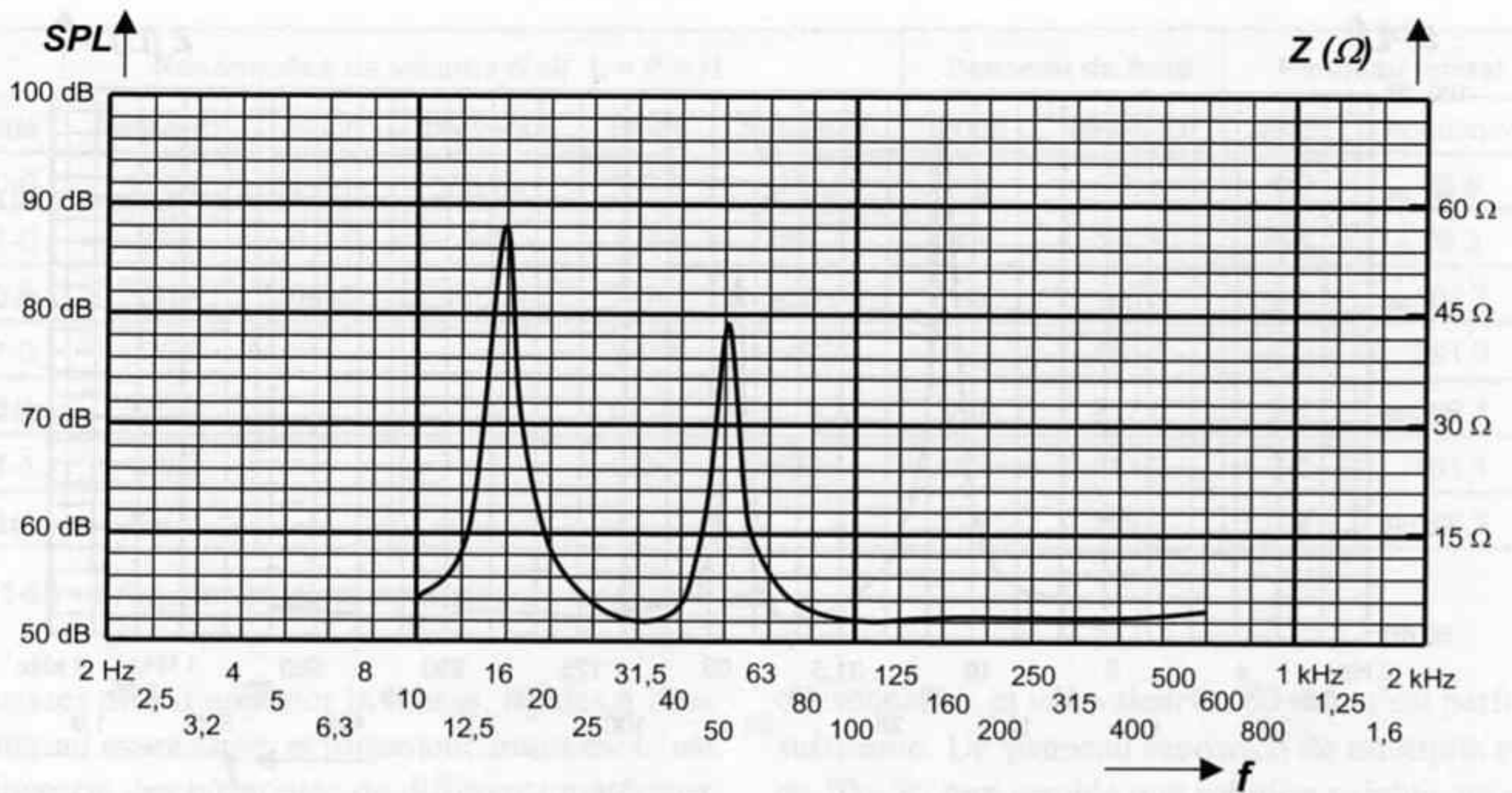


Figure 146 - Relevé d'impédance du caisson avec amortissant, deux événements étant fermés hermétiquement par des plaquettes de bois, et amortis par un bloc de feutre. La fréquence d'accord est de 32 Hz environ et l'amplitude des deux bosses a diminué. L'impédance

aux environ de 200 à 300 Hz est plus régulière qu'auparavant, les événements fermés étant apparemment devenus des résonateurs internes accordés sur cette fréquence.

Les dimensions des panneaux sont par conséquent :

- Panneau de fond : 97 × 74 cm
- Face avant : 97 × 58 cm
- Panneaux latéraux : 75,4 × 74 cm
- Dessus et dessous : 107 × 75,4 cm
- Cloisons événements : 97 × 46 cm

Les modes de résonance à basse fréquence du volume interne ainsi que les premiers modes de vibration des panneaux du fond et latéraux sont récapitulés dans le tableau (figure 144). Seuls les fondamentaux et modes d'ordre deux sont reportés, les autres modes se situant à des fréquences faciles à amortir. Les panneaux des événements et la face avant, équipés de raidisseur, vibrent sur des modes complexes à des fréquences également aisées à amortir.

Pour ce qui concerne le volume d'air, le plus gênant est le mode 0-1-0 en profondeur, de fréquence 273 Hz et multiples, qui crée un retour d'onde traversant les membranes donc audible. Un rideau de feutre, disposé verticalement et distant du fond amortira ce mode. Quelques modes bidimensionnels se superposent autour de 350 Hz environ mais ils sont faciles à amortir. La plupart font intervenir la plus grande dimension, un rideau de feutre vertical situé à mi-longueur amortira ces modes. Les modes de fréquence plus élevée sont amortis par le revêtement interne de toutes les parois par un feutre de 10 mm.

Les panneaux de fond et latéraux présentent des modes regroupés entre 95 et 100 Hz. De plus ces modes sont couplés car les panneaux sont fixés ensemble rigidement. Il est indispensable de briser ces modes vibratoires. Pour cela le panneau de fond est renforcé de deux traverses, une horizontale au 3/5 de la hauteur et une verticale au milieu, divisant ainsi le panneau en 4 parties inégales dont les fréquences propres sont environ 4 fois plus élevées, entre 200 et 250 Hz. Les panneaux latéraux reçoivent également un renfort vertical situé au 3/5 de leur longueur. Les parois reçoivent un revêtement amortissant Matson d'épaisseur 10 mm, à base de bitume et de fibres, livré en dalles que l'on peut couper, fixé à la colle souple.

Les événements laminaires ont été choisis pour leur sonorité moins résonante que les habituels tuyaux, ainsi que pour des raisons de rigidité et de neutralité de la caisse, les parois doubles délimitant les tunnels étant par construction très inertes sur le plan vibratoire. Une section totale d'évent de **1 400 cm²** pratiquement égale à la surface totale des deux membranes a été choisie. Ces événements disposés en deux lignes de part et d'autre des haut-parleurs rappellent par leur cloisonnement les caissons Onken-Jensen. Ces séparateurs définissent 4 événements en haut et quatre en bas, chacun de dimension **22 cm × 8 cm**. Il est intéressant de noter à propos de ces divers caissons, qu'il s'agisse du "vrai" Onken, de la petite Onken ou de la mini-Onken Focal, que leurs événements laminaires respectent des proportions particulières. Si l'on considère que les résonances de tuyaux

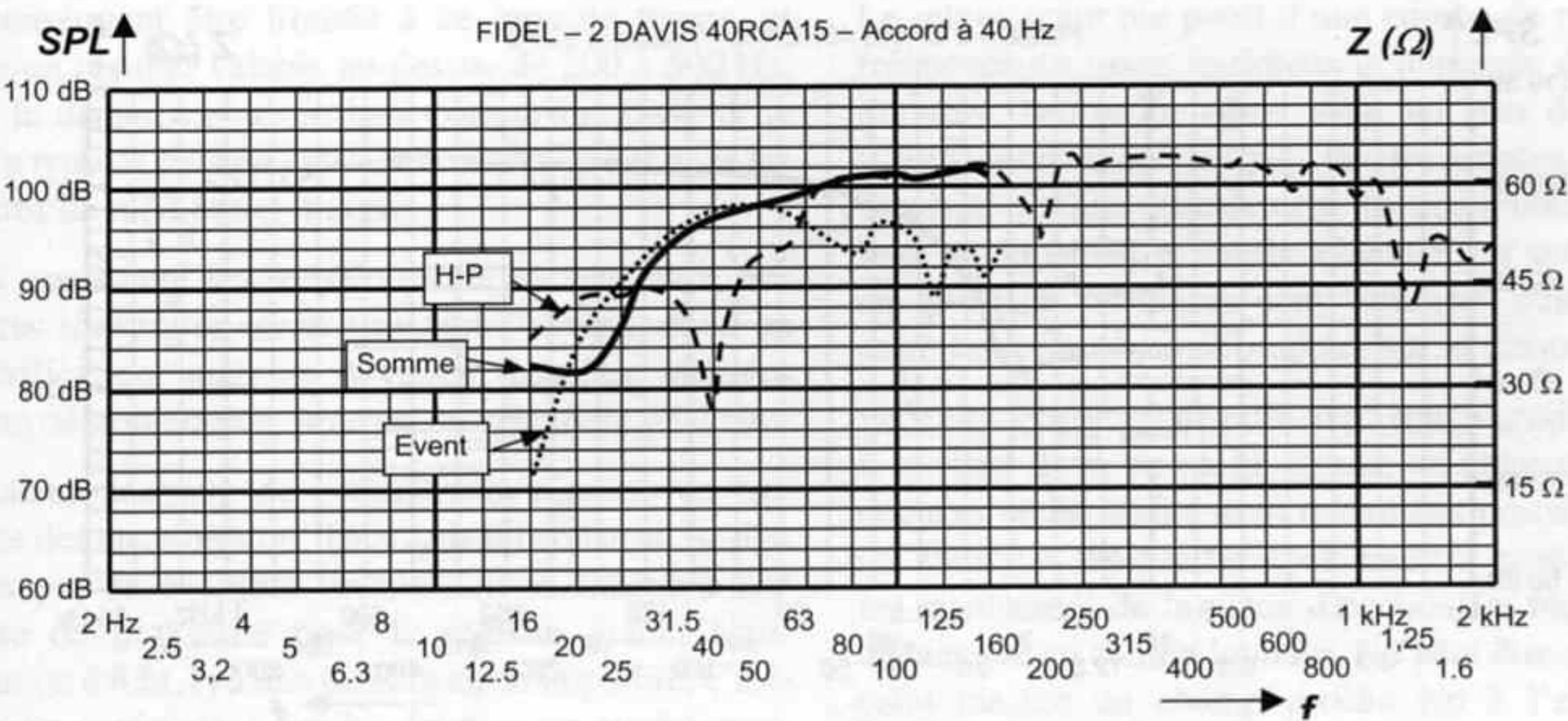


Figure 147 - Relevé en champ proche de la réponse niveau/fréquence, effectué à 5 cm au bord du cache-noyau du haut-parleur grave, et en face d'un des événements. La réponse de l'événement est corrigée selon le calcul page 177 de $-0,6$ dB avant d'être additionnée vectoriellement à la réponse du haut-parleur. L'accord

sont amorties dans ce type d'événement, cet amortissement est dû au frottement de l'air sur la surface intérieure du tunnel. Ce frottement est fonction de la vitesse de l'air, comme dans tout événement, mais aussi de l'étendue de la surface intérieure, et de l'épaisseur de la veine d'air qui se trouve réellement laminée. Le frottement peut être estimé proportionnel au carré de la vitesse de l'air et à l'aire S_{tot} de la surface intérieure, et inversement proportionnel à l'épaisseur de la veine d'air, donc à la largeur h de l'événement. Sur tous les caissons Onken, le rapport S_{tot}/h est le même et vaut environ 3 300, avec S en cm^2 et h en cm . Le caisson Fidel respecte cette géométrie spécifique.

La fréquence d'accord choisie initialement vers 40 Hz aboutit par suite à une longueur d'événement :

$$L_v = 29\,630 \cdot S_v / F_b^2 \cdot V_b = 83\text{ cm}$$

Et la correction d'extrémité est :

$$L' = 0,825 \sqrt{S_v} = 31\text{ cm d'où}$$

$$L_v = [29\,630 \cdot S_v / F_b^2 \cdot V_b] - L' = 52\text{ cm}$$

Par la suite, deux des huit événements ont été bouchés afin de faire descendre la fréquence d'accord vers 32 Hz, ce qui donne de meilleurs résultats dans la pièce d'écoute habituelle. Ce réglage est aisé sachant qu'il est plus facile de fermer un événement à l'aide d'une plaque de bois, que d'en rajouter un...

Une vérification par le calcul, non présentée ici, à partir du relevé d'impédance, a donné pour coefficient de qualité de l'enceinte la valeur $Ql = 25,8$, ce qui montre que la fuite introduite par le cache-noyau poreux et la

apparaît à 40 Hz sous forme d'un creux marqué dans la réponse du haut-parleur. L'ensemble procure une coupure basse difficile à situer, vers 60 Hz. Au-dessus de 300 Hz les résultats ne sont pas exploitables, ils sont donnés à titre indicatif (niveau du signal 2,83 V).

suspension tissu ne perturbe pas le fonctionnement. Avec les produits amortissants, le facteur Ql redescend vers 15 environ. Les relevés d'impédance figures 145 et 146 montrent l'accord bass-reflex.

La mesure de la réponse en fréquence réellement atteinte n'est à mon sens absolument pas nécessaire. Les résultats subjectifs très largement supérieurs à ceux obtenus avec des réalisations commerciales, se rapprochent de ceux des caissons Onken W. En comparaison, des enceintes professionnelles étudiées pour la sonorisation de salles de spectacle, comme les Voix du théâtre ou les modèles JBL avec pavillon frontal, donnent un son grave nettement moins ample et léger, mais plutôt massif et percutant, sec et puissant. Cette sonorité peut être attribuée à la charge de faible volume faisant office de chambre de compression et qui empêche le haut-parleur de descendre très bas en fréquence, la coupure basse est alors assez haute, vers 60 Hz, et la pente de coupure très raide, de 24 à 30 dB par octave. Par contre le rendement est exceptionnel, et augmente même légèrement avec la fréquence, ce qui met en avant une partie du bas-médium entre 200 et 500 Hz environ.

Le caisson Fidel produit au contraire un extrême grave présent, ample mais léger et rapide, sans effet de bourdonnement ou de gonflement, avec une excellente sensation de volume d'air dans lequel les sons s'éteignent. Cette faculté est mise en valeur de manière très variable selon les enregistrements, et d'énormes différences de spatialisation et d'aération sont mises en évidence entre des disques que l'on croyait connaître. Le grave

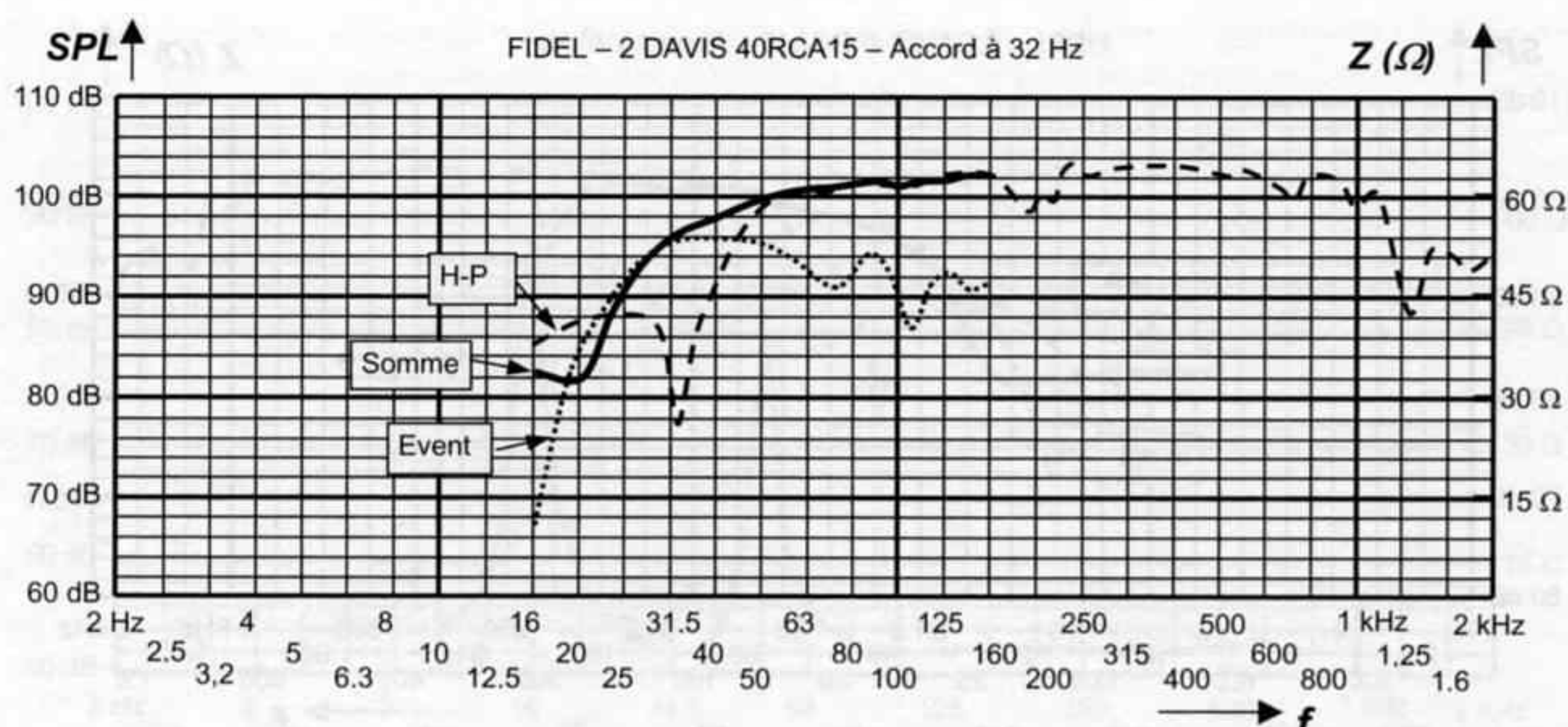


Figure 148 - Relevé en champ proche avec accord à 32 Hz. La coupure basse a un peu baissé, vers 45 Hz

est percutant et sans aucune retenue sur les crêtes de niveau, et les percussions retrouvent leur puissance d'origine, sans prendre d'épaisseur pour autant. La contrebasse ou le violoncelle sont un enchantement, et la matière sonore est très aisément perceptible, autant le volume d'air important qui résonne dans le coffre de l'instrument, que la masse et l'énergie des cordes, ou l'archet, râpeux et tendu en même temps. Bref, le réalisme est au rendez-vous, alors que demander de plus ? Une courbe mesurée selon la norme, pour faire office de preuve ? Cette réalisation n'a rien à prouver. Elle est conçue dans une philosophie qui oriente, cadre et cerne dès le départ les qualités du résultat, en fixant l'objectif, et qui définit en conséquence des choix capables d'assurer ce résultat.

La mesure permet pourtant de rattacher les performances à quelque chose de connu, ce qui situe la réalisation, la place dans une hiérarchie, différente pour chacun de nous selon sa propre expérience. Une mesure est donc interprétée alors qu'elle devrait seulement être comparée, et en l'absence de corrélation établie entre résultats de mesures et résultats subjectifs, ces mesures ne donnent qu'une connaissance erronée. Je donne par conséquent des résultats de mesure, en précisant les moyens et méthodes mis en œuvre, et en autorisant toutes les interprétations possibles... Les relevés apparaissent figures 147 et 148.

Pour plus de détails, le lecteur se reportera à : J. D'Appolito "Le Haut-Parleur", cité en bibliographie. Le relevé de la réponse en fréquence d'une enceinte acoustique n'est généralement pas à la portée de l'amateur. Les constructeurs qui disposent d'une chambre sourde de taille suffisante effectuent des relevés à la distance normalisée de 1 m, parfois notoirement insuffisante au regard de la distance séparant les

et elle est plus régulière. L'ensemble gagne en netteté et en légèreté (niveau du signal 2,83 V).

différents haut-parleurs, et plus rarement à 3 ou 4 m, sous des angles de mesure variables afin de cerner précisément les caractéristiques de directivité. De puissants moyens sont ensuite nécessaires pour moyenner l'ensemble de ces mesures et en tirer une courbe de réponse synthétisant les résultats de manière convaincante. Parfois pour s'affranchir des réflexions de la salle de mesure, la réponse dans le registre grave est effectuée en pression à proximité immédiate du haut-parleur. Cette mesure est dite en champ proche, et les résultats obtenus ne sont valables qu'aux fréquences inférieures à $F_{max} = 11\,000 / D$, D étant le diamètre du haut-parleur. La mesure en champ proche d'un haut-parleur de 38 cm est donc utilisable jusqu'à environ 300 Hz.

Cette mesure en champ proche est ensuite "collée", raboutée à une mesure en champ lointain, le point, ou la zone de collage, de fusion des deux résultats étant laissé à l'appréciation du technicien... La mesure en proximité des événements doit être corrigée afin de tenir compte des surfaces différentes de la membrane et de l'événement, et le relevé est également "collé" pour obtenir la courbe complète. Le résultat publié révèle par conséquent autant la maîtrise de l'outil informatique utilisé et de la procédure de mesure, que les qualités de l'enceinte mesurée !

Les réponses fréquentielles déduites de la réponse impulsionnelle ne sont utilisables que sur un domaine temporel réduit, compris entre l'instant d'arrivée de l'onde directe au point de mesure, sur le microphone, et l'instant d'arrivée de la première réflexion. Cette première réflexion se produisant généralement sur le sol, intervient dans un laps de temps très bref, entre 2 et 5 ms après l'onde directe. La réponse impulsionnelle utilisée pour déduire la réponse fréquentielle doit

par conséquent être limitée à ce laps de temps, et donne un résultat valable au-dessus de 200 à 500 Hz, selon la distance entre le haut-parleur de grave et le sol. Ce type de mesure est valable uniquement dans les registres de médium et d'aigu.

Quels que soient les techniques mises en œuvre, ces mesures sont utiles comme moyen d'investigation ou de vérification, mais ne devraient pas être utilisées comme démonstration, preuve, ou argument de vente.

L'amateur désireux de connaître la réponse en fréquence des enceintes qu'il a acquies ou construit ne disposant pas de chambre sourde doit se limiter à une mesure de proximité pour le registre grave, haut-parleur ou évent, et à une mesure en champ libre, c'est-à-dire en extérieur, pour les fréquences supérieures. Ces mesures sont tout à fait suffisantes pour vérifier l'exactitude de l'accord à la fréquence désirée de l'enceinte, ou la fréquence et la pente de coupure introduites par le filtre séparateur. La mise au point précise de l'enceinte peut donc être effectuée sans chambre sourde et sans système de mesure informatisé, elle prend simplement plus longtemps. Les seuls instruments nécessaires sont d'une part un générateur basse fréquence, fournissant des signaux sinusoïdaux de 10 Hz à 100 kHz, attaquant un ampli de puissance, et d'autre part un sonomètre linéaire. Les appareils du commerce, généralement prévus pour le contrôle des nuisances sonores, fournissent une mesure intégrée sur un temps relativement long, et pondérée selon les courbes normalisées A ou C, qui tiennent compte des sensibilités réduites de l'oreille aux basses fréquences. Ils ne sont pas utilisables pour la mesure des enceintes acoustiques, à moins qu'ils ne disposent d'une position linéaire. Leur étalonnage est indifférent, sachant que ce n'est pas la valeur exacte du niveau qui importe, mais ses variations en fonction de la fréquence. Un sonomètre linéaire relativement précis, équipé d'un micro de mesure Sennheiser de haute qualité, est disponible en kit chez Selectronic. Il peut facilement être étalonné si on le désire par comparaison avec un sonomètre agréé, comme les modèles B&K utilisés par les forces de l'ordre pour le contrôle des véhicules.

Cet appareil dispose d'une sortie ligne permettant de visualiser le signal sur un oscilloscope, ce qui permet accessoirement de constater la forme extrêmement pointue des signaux musicaux, et l'existence de crêtes violentes, trop brèves pour être indiquées par l'aiguille ou à fortiori par l'afficheur numérique des sonomètres classiques. Cette sortie sur oscilloscope est mise à profit pour analyser la réponse impulsionnelle de l'ensemble des haut-parleurs, afin de réaliser la mise en phase indispensable à l'obtention de la cohérence temporelle du système (détaillé plus loin au paragraphe filtrage).

Le relevé point par point d'une courbe de réponse en fréquence est assez fastidieux et demande de longues minutes (heures ?) même avec un peu d'habitude. L'utilisation d'un disque de fréquences en tiers d'octave facilite grandement la manipulation, mais lisse quelque peu la courbe obtenue, car certains pics ou creux de résonance sont "oubliés" s'ils tombent entre les fréquences disponibles sur le disque.

Le sonomètre étant disposé avec son microphone situé à environ 5 cm du cache-noyau, un balayage en fréquences sinusoïdales avec relevé des pressions sonores aboutit à une courbe assez lisse car ne révélant pas les résonances de la pièce d'écoute. La réponse à la distance d , en champ lointain, N_d peut être déduite de cette mesure en champ proche N_p à l'aide de la formule :

$$N_d = N_p - 20 \cdot \log(2d/R)$$

si le haut-parleur rayonne sur un espace de 2π

$$N_d = N_p - 20 \cdot \log(4d/R)$$

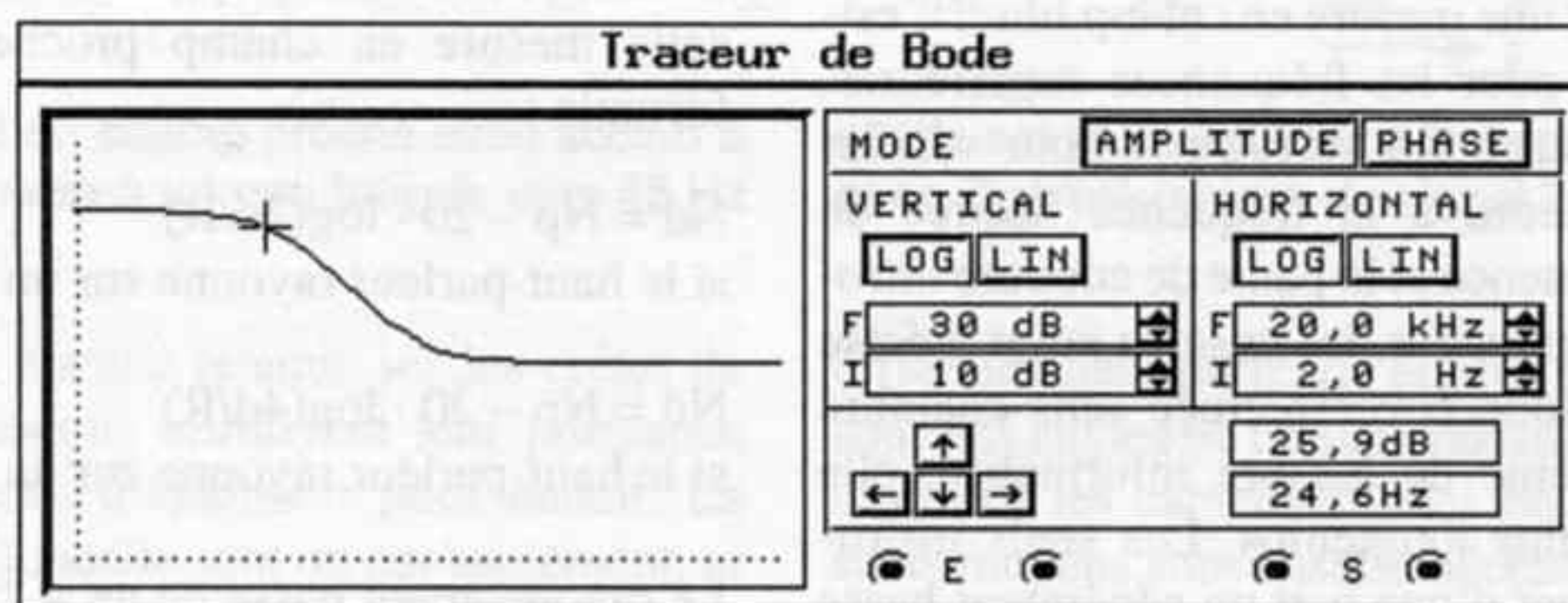
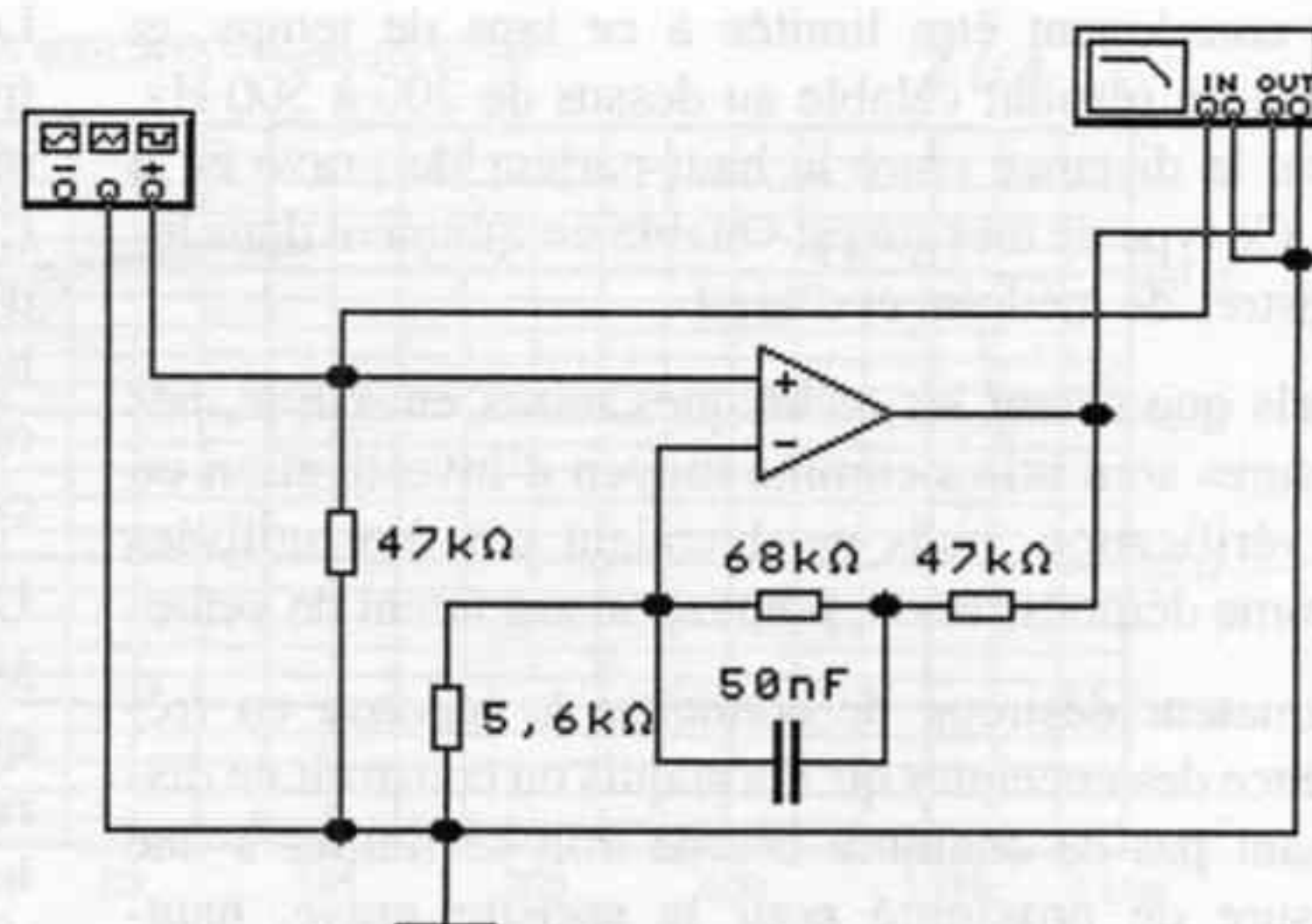
si le haut-parleur rayonne sur un espace de 4π

Le rayonnement passe de 4π à 2π lorsque la longueur d'onde diminue et devient inférieure aux dimensions de la face avant de l'enceinte, ce qui intervient vers 350 Hz pour une dimension de 1 m. Ce phénomène est appelé perte par dispersion. La mesure en champ proche dans le grave n'est donc généralement pas perturbée par les phénomènes de dispersion. La mesure de la pression acoustique en sortie de l'évent doit par contre être corrigée par un coefficient prenant en compte le rapport des surfaces totales des membranes ΣS_d d'une part, et des surfaces totales des événements ΣS_v d'autre part, la correction C est :

$$C = 20 \cdot \log(\Sigma S_v / \Sigma S_d)^{1/2} = 10 \cdot \log(\Sigma S_v / \Sigma S_d)$$

L'addition des réponses des événements et des haut-parleurs doit tenir compte des relations de phase entre les ondes émises par chacun d'eux. À la fréquence d'accord de l'enceinte F_b , le rayonnement de l'ensemble des événements est au moins de 20 dB SPL au-dessus du rayonnement du haut-parleur, et la somme des deux est égale à très peu de chose près au rayonnement de l'évent seul. Au-dessus de F_b , à la fréquence où les deux pressions sonores sont égales, les ondes sont déphasées de $\pi/2$, et leur somme est donc 3 dB au-dessus de la pression rayonnée par le haut-parleur seul. Aux très basses fréquences, les rayonnements sont en opposition de phase, et les pressions se soustraient. Ces considérations permettent d'établir une réponse globale, de l'ensemble haut-parleurs plus événements. L'assistance d'un logiciel est indispensable pour effectuer une sommation rigoureuse des deux rayonnements.

Figure 149 - Le préamplificateur Kanéda propose dans la contre-réaction de son étage ligne, dont le schéma de principe est donné ici sous forme simplifiée, une correction de l'extrême-grave. Un simple réseau passif permet de faire varier le gain, qui passe de 20 dB aux fréquences supérieures à 500 Hz, à environ 26 dB en dessous de 25 Hz. La pente est faible et la correction se fait sentir jusqu'à plus de 300 Hz, son amplitude étant limitée pour conserver un peu de contre-réaction d'une part, et pour éviter le talonnement des membranes des haut-parleurs d'autre part. Cette correction du premier ordre, soit 6 dB/octave, n'est pas assez localisée.



UNE BONNE CORRECTION ?

Déjà très satisfaisant avec l'alignement obtenu, le fonctionnement est encore amélioré sur certains enregistrements en introduisant une correction active. Cette pratique est connue mais très rarement appliquée car elle oblige l'utilisateur à disposer un filtre actif électronique en amont de l'amplificateur, et ce filtre dégrade la qualité de transmission du signal. Sa présence impose une paire de cordons audio supplémentaire, et son alimentation par le secteur ajoute une boucle de masse, et des bruits de fond. Les composants utilisés ne sont pas totalement transparents à l'écoute, en particulier les amplificateurs opérationnels en boîtier intégré. Il est d'autre part dommage d'obliger le signal dans son ensemble à transiter par ce filtre alors que seul le secteur grave est concerné. La correction active ne peut donc se concevoir que dans le cas d'une multi-amplification, où le filtre actif est indispensable. Dans ce cas, l'étage supplémentaire n'entraîne pas de dégradation audible, et les avantages procurés peuvent compenser largement les inconvénients.

Une correction limitée à la fois en amplitude et en pente, du premier ordre, peut toutefois être implantée dans le préampli, soit au niveau de la contre-réaction de l'étage ligne, figure 149, soit autour du potentiomètre de volume, à l'aide de quelques composants passifs.

Si cette correction est calculée de manière à procurer une réponse globale enceinte plus filtre linéaire, cela correspond à un alignement d'ordre 6. Quelques rares descriptions de ces alignements apparaissent dans la littérature, et tous introduisent un filtrage des infra-graves afin d'éviter la surcharge du haut-parleur. Ils se contentent donc de gonfler le niveau sonore dans la bande de fréquence de 50 à 100 Hz et coupent brutalement en dessous de 30 Hz environ, car leur but est de faire gagner artificiellement 1/2 et parfois jusqu'à une octave à une petite enceinte équipée d'un petit haut-parleur, telle la grenouille de la fable... La réponse fréquentielle est favorisée, tout au moins en petits signaux, au détriment de la réponse temporelle, avec les conséquences néfastes déjà signalées. La coupure est encore plus brutale que sans correction, avec un coude brusque et une pente importante de plus de 36 dB par octave, et la réponse transitoire est très dégradée.

La correction qu'il convient d'établir a pour objectif d'adoucir autant que possible la réponse dans l'extrême grave, en évitant justement de créer un point d'inflexion. L'obtention d'une courbe de réponse arrondie présentant une pente faible et régulière s'accompagne d'une réponse transitoire non dégradée. La correction doit par conséquent être établie à une fréquence très basse, de l'ordre de 15 à 30 Hz selon les cas, avec une bosse importante et très localisée, afin de

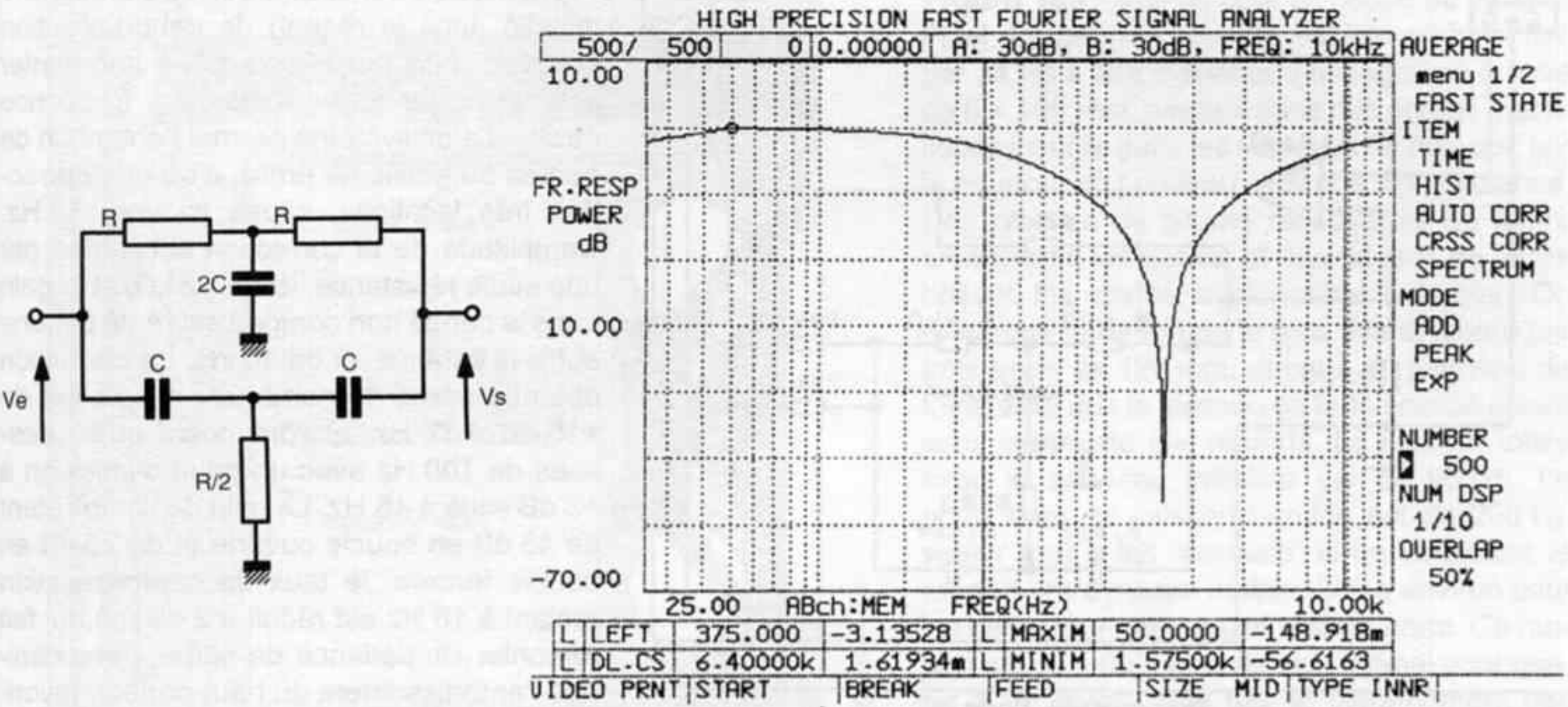


Figure 150 - À gauche, filtre en double-T symétrique et à droite sa fonction de transfert. Elle est du second degré à cause de l'égalité de certains composants,

compenser le plus complètement possible la chute de niveau de l'enceinte, et une surtension élevée, c'est-à-dire une pente importante de part et d'autre de la bosse. Le moyen le plus élégant pour mettre en place cette correction est de l'implanter directement dans l'amplificateur dédié à la voie grave, ce qui évite d'introduire un appareil supplémentaire dans le système, et économise une paire de cordon. La forme de correction recherchée est obtenue à l'aide d'un réseau en double-Té, dont l'étude complète sort du cadre de cet ouvrage. Ce filtre, schéma figure 150, réalise une fonction de réjecteur de bande, avec une largeur de bande rejetée et une fréquence centrale toutes deux réglables en ajustant les composants, et une réjection théoriquement infinie, limitée par les pertes internes des composants. Ce filtre installé dans le réseau de contre-réaction d'un amplificateur supprime la contre-réaction autour de la fréquence choisie, ce qui produit une augmentation du gain, figure 151. Cette augmentation est limitée par la valeur du gain en boucle ouverte de l'amplificateur. En pratique, le taux de contre-réaction aux fréquences basses de la plupart des amplificateurs transistorisés est assez grand, souvent de 20 à 50 dB, pour qu'une correction de 8 à 16 dB soit possible. Il est évidemment hors de question d'obtenir par cette méthode une correction supérieure au taux de contre-réaction de l'ampli ! Ce principe ne peut pas être appliqué aux amplis à lampes, car leur taux de contre-réaction est faible et leur transformateur de sortie ne supporterait pas l'augmentation

mais en introduisant une dissymétrie, il est possible de modifier sa forme, qui passe au troisième ordre, plus intéressant.

de puissance qui est imposée par la correction. En effet, une augmentation de seulement 6 dB correspond à une puissance 4 fois plus grande, et l'examen des réponses dans l'extrême grave fait apparaître des "manques" de l'ordre de 10 à 20 dB dans les premières octaves.

La puissance électrique supplémentaire nécessaire en sortie de l'ampli pour obtenir une correction de N dB se calcule aisément par :

$$Pe = 10^{N/10}$$

Une petite enceinte de sensibilité 90 dB/1 W à 1 m, valeur tout à fait courante, et équipée d'un H-P grave de 21 cm, présentant une coupure basse de 50 Hz avec une pente de 18 dB par octave, demande environ 21 dB de correction à 25 Hz. Si la puissance de crête nécessaire est de 10 W dans le registre grave, une telle correction la ferait passer à plus de 1 000 W dans l'extrême grave !

Ce type de filtre ne peut s'envisager qu'avec un caisson spécialement étudié pour supporter le surcroît de puissance, pour accepter les excursions de membrane qui en découlent, surtout à ces fréquences très basses, et dont le rendement est suffisant pour que la puissance demandée ne dépasse pas les limites thermiques des haut-parleurs ni celles de l'ampli. De plus la réponse dans le grave doit présenter une pente douce, faute de quoi il se produira une bosse gênante. Des essais effectués sur deux paires de caissons Mini-Onken avec H-P

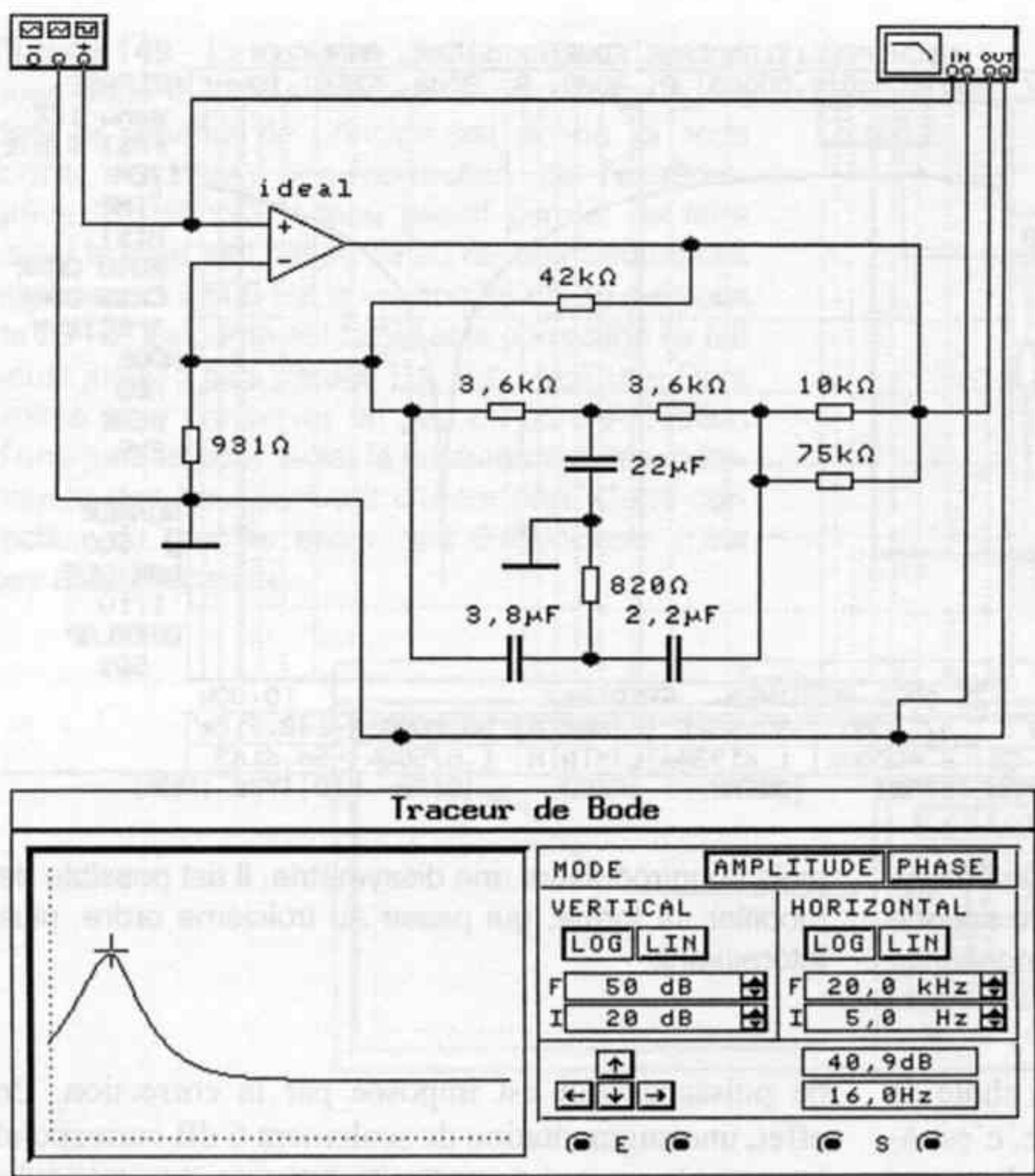


Figure 151 - Le filtre réjecteur en double-T installé dans le réseau de contre-réaction négative d'un amplificateur fait augmenter son gain sur une bande de fréquence étroite. La dissymétrie permet l'obtention de pentes du troisième ordre, d'où une correction très localisée, située ici vers 16 Hz. L'amplitude de la correction est réglée par une seule résistance, ici de 42 kΩ, et le gain dans la bande non corrigée est réglé par une autre résistance ici de 10 kΩ. La correction obtenue après de nombreux essais est de +15 dB à 16 Hz, et n'intervient qu'en dessous de 100 Hz avec un point d'inflexion à +3 dB situé à 46 Hz. Le gain de l'ampli étant de 43 dB en boucle ouverte et de 26 dB en boucle fermée, le taux de contre-réaction restant à 16 Hz est réduit à 2 dB, ce qui fait remonter l'impédance de sortie, donc diminue l'amortissement du haut-parleur, favorisant encore la réponse infra-grave.

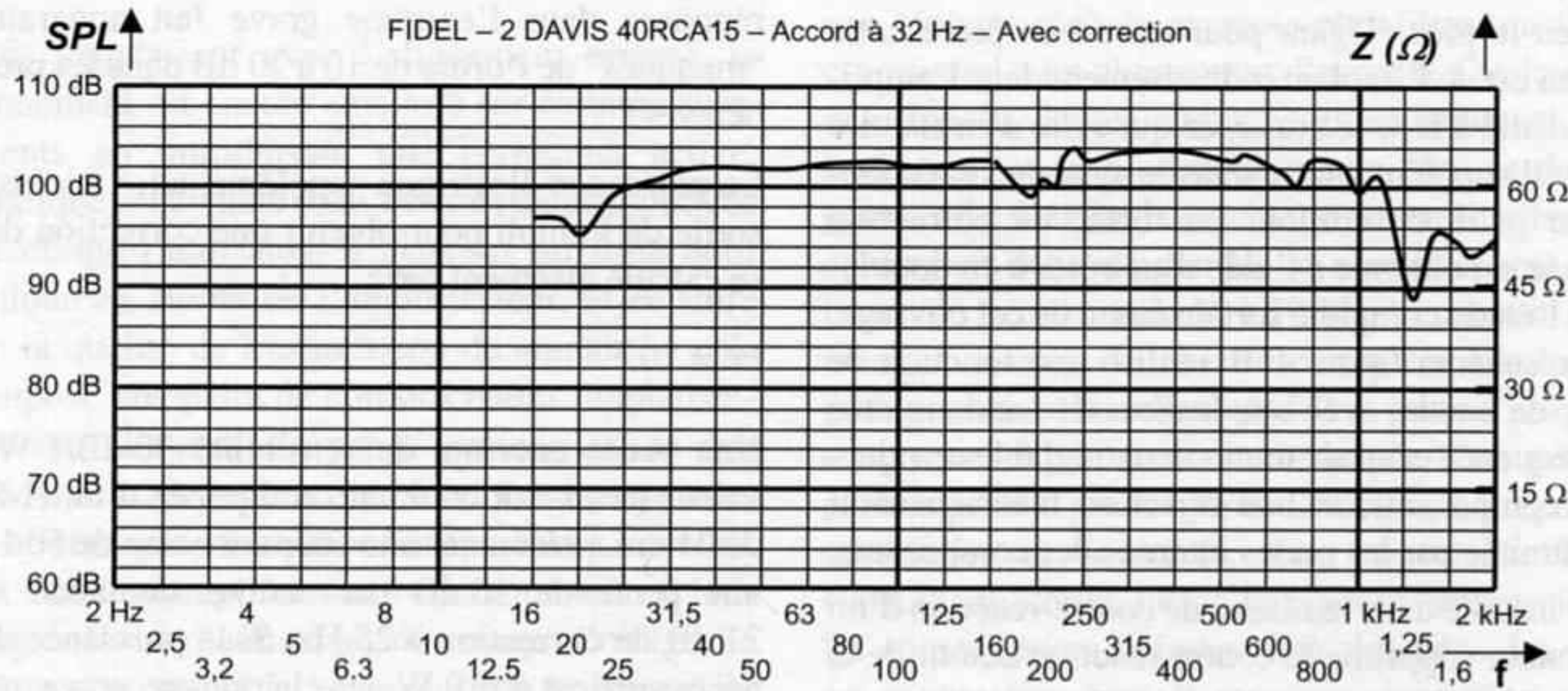


Figure 152 - Réponse globale de l'ensemble haut-parleur et événements mesurés en champ proche. La coupure basse à -3 dB est à peu près à 25 Hz, avec le 16 Hz à -5 dB. La sensibilité moyenne est de 103 dB/2,83V à 1 m. La puissance crête nécessaire est donc de 2 W au-dessus de 100 Hz, mais elle culmine à

environ 60 W, soit 30 fois plus pour 15 dB de gain, dans l'infra-grave, quand le disque en contient. Les limites d'excursion des membranes ne sont cependant pas dépassées. Quant à celles de la salle et des voisins ? C'est une autre histoire... Filtrage idéal vers 200 Hz, possible à 500.

Focal de 26 cm, installés dans deux systèmes différents ont donné des résultats intéressants, et bien que la correction ait été limitée à 8 ou 10 dB vers 32 Hz, l'extension dans l'extrême grave est appréciable.

Le caisson Fidel, dont les plans et photo sont donnés figures 153 à 155 supporte des corrections beaucoup plus méchantes sans broncher, et après de très nombreux essais et simulations informatiques, la correction finalement établie est celle du schéma figure 151. La réponse en fréquence est donnée figure 152.

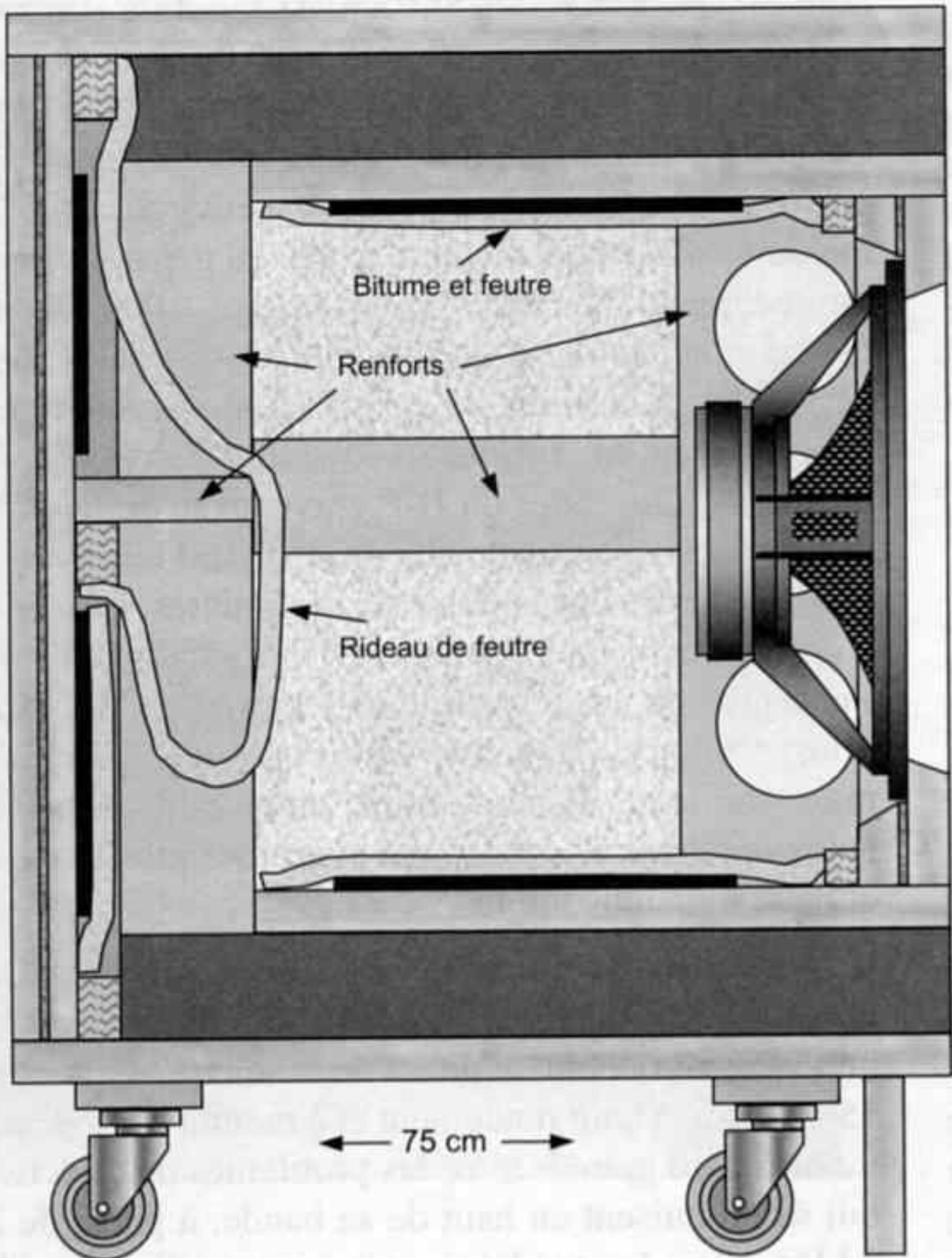


Figure 153 - Vue de côté en coupe du caisson Fidel. Le panneau arrière est amovible et fixé par 34 vis à tête cylindrique hexagonale creuse de 6 × 100 mm, prenant dans des écrous métalliques insérés dans les tasseaux de bois dur, sur le pourtour du panneau ainsi que ses médianes. Des plaques de bitume recouvertes de feutre amortissent les parois, et des rideaux de feutre brisent les ondes stationnaires internes. On remarque le renfort de la face avant, ajouré par trois trous de 120 mm, et ceux du panneau de fond, ainsi que le tasseau de forte section reliant sous contrainte ces renforts. La hauteur totale avec le bandeau inférieur est de 95 cm. Le poids total du caisson terminé est de 200 kg, valeur tout à fait "normale" si on considère le rapport entre masse mobile, 200 g environ pour les deux haut-parleurs, et masse inerte. Ce rapport est de 1 000, quoi de plus normal pour rejeter à un niveau très bas le rayonnement des parois, et respecter ainsi une dynamique de 60 dB ?

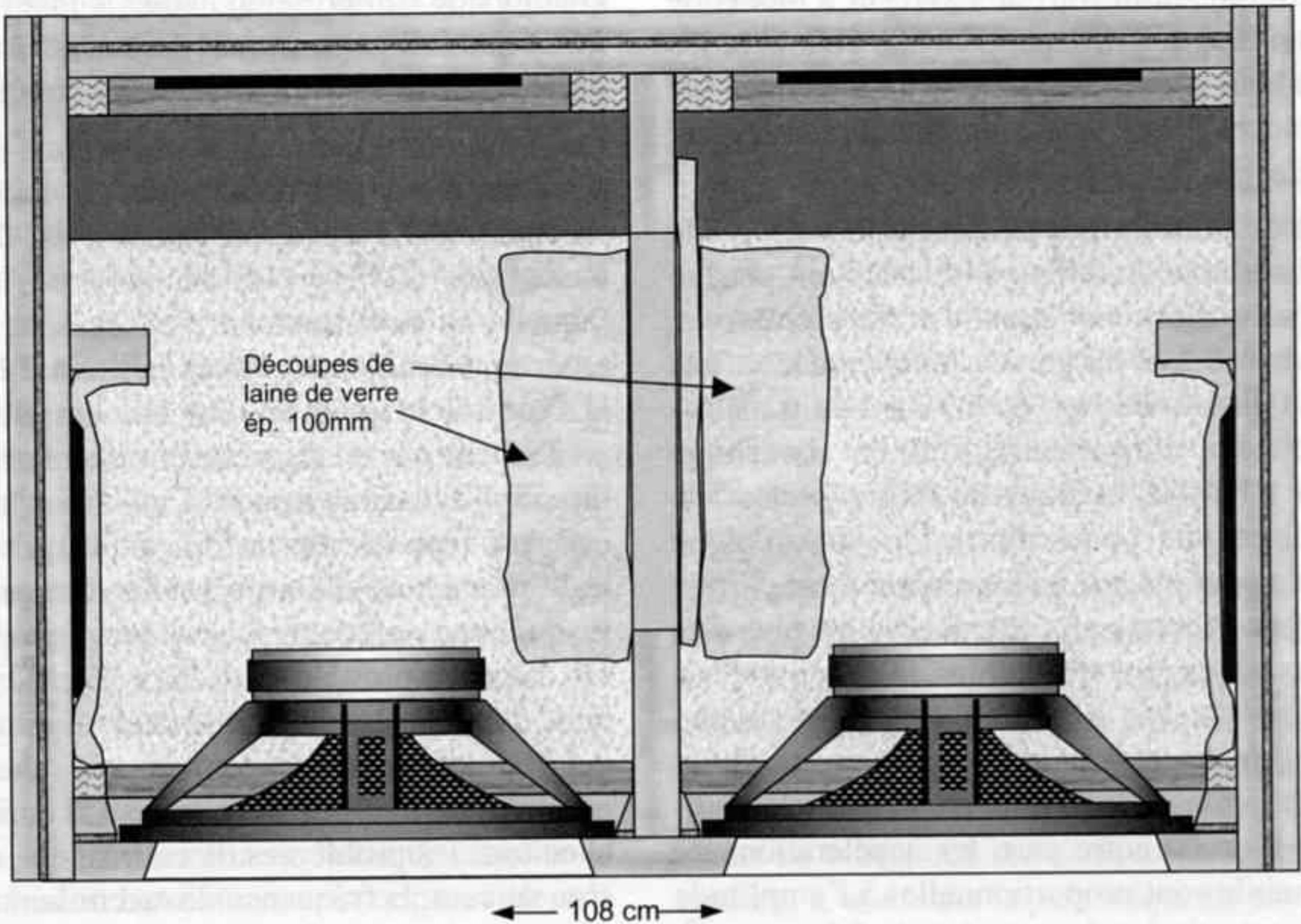


Figure 154 - Vue de dessus en coupe, où l'on remarque les renforts des panneaux latéraux, situés aux 3/5 de la profondeur. Un rideau de feutre et deux découpes de laine de verre sont disposés verticalement du haut en

bas au milieu afin d'amortir les ondes stationnaires longitudinales. Les découpes dans la face avant pour les deux haut-parleurs sont légèrement coniques et masquent une partie de la suspension périphérique.

8.4 Les voies supérieures

DES PAVILLONS ET DES LOBES... DE DIRECTIVITÉ

Toutes les considérations établies pour la voie grave, concernant le rendement et les niveaux de crête, sont valables également pour les bandes de fréquence médium et aiguë. Toutefois, le rendement élevé ne peut ici être obtenu par une grande surface émissive pour des raisons de directivité, le diamètre devant rester petit par rapport aux longueurs d'ondes les plus courtes des fréquences émises.

Un petit coup d'œil en arrière aux diagrammes de la figure 131, en se rappelant que la longueur d'onde est de 3,44 m à 100 Hz, de 34 cm à 1 kHz et de seulement 3,4 cm à 10 kHz, permet de constater que le diamètre du transducteur doit être choisi inférieur à la plus courte longueur d'onde émise, si l'on souhaite conserver un angle de diffusion suffisamment ouvert, car une atténuation de 6 dB mesurée à 45° hors de l'axe est communément admise comme dernière limite tolérable des effets de la directivité. Cela correspond au diagramme en haut à droite de la figure 131. Pour être vraiment à l'abri des problèmes de directivité, c'est un diamètre de membrane inférieur à 1/2 longueur d'onde qui doit être choisi. Cela correspond à moins de 10 mm pour un tweeter devant monter à 20 kHz, à moins de 34 mm pour un médium filtré à 5 kHz, et à moins de 34 cm pour un H-P de grave coupé à 500 Hz. Avec les diamètres de haut-parleurs habituels, les enceintes ont toutes les chances d'être beaucoup plus directives aux fréquences élevées.

L'adaptation de la haute impédance de la source à la très faible impédance du milieu ambiant, l'air, peut se faire soit à partir d'une très grande surface émissive, comme c'est le cas dans les graves, mais avec les effets néfastes de la directivité, soit en utilisant un transformateur adaptateur d'impédance, qui en acoustique s'appelle un pavillon, et dont la forme permet de contrôler la directivité. Le pavillon est le seul et unique moyen valable pour obtenir un fonctionnement correct de la membrane vibrante aux fréquences les plus élevées, avec des excursions très faibles, indispensables à un traînage réduit, car à niveau sonore identique, l'excursion d'un haut-parleur à rayonnement direct varie en $1/f^2$ alors qu'elle évolue en $1/f$ pour le haut-parleur à pavillon. D'autre part, les accélérations de l'équipage mobile sont proportionnelles à l'amplitude des déplacements ainsi qu'au carré de la fréquence. À excursion identique, une membrane vibrant à 5 kHz subit des accélérations 10 000 fois plus fortes qu'à 50 Hz, ce qui revient, si l'on souhaite conserver des accélérations du même ordre, à imposer des déplacements à 5 kHz d'amplitude 10 000 fois plus faibles

qu'à 50 Hz. Évidemment, la masse mobile des haut-parleurs de médium et d'aigu étant faible, ces transducteurs peuvent subir des accélérations assez fortes. Cependant le rapport des masses mobiles entre H-P grave, avec une membrane de 100 g environ, et H-P de médium, avec une membrane de 10 g par exemple, impose quand même des déplacements 1 000 fois plus faibles pour ce dernier, à accélérations égales. Il est nécessaire de diminuer la masse mobile à moins de 1 g pour pouvoir lui infliger des accélérations 100 fois plus fortes que celles du H-P grave, avec des amplitudes de déplacements devenant alors 100 fois plus faibles, de l'ordre du centième de millimètres. Encore ici, c'est bien la mécanique qui régit le fonctionnement de l'ensemble et lui fixe des limites. Seule l'utilisation d'un pavillon correspond à cette contrainte de déplacement minimal, la membrane travaillant alors sous haute impédance, c'est-à-dire avec une pression élevée et des excursions faibles.

Une transduction correcte des fréquences médium jusqu'à quelques kHz peut donc être obtenue soit par un H-P à rayonnement direct de diamètre assez grand, 15 à 20 cm, à haut rendement et à membrane légère de moins de 10 g, mais avec les problèmes de directivité qui se produisent en haut de sa bande, à partir de 2 à 3 kHz selon les modèles, soit à partir d'un pavillon excité par un haut-parleur traditionnel, ou par une chambre de compression, laquelle présente les avantages d'un équipage mobile très léger et d'une bande passante étendue vers les hautes fréquences.

Les solutions à partir de haut-parleurs à rayonnement direct sont très peu nombreuses, et les contraintes de raccordement avec la voie grave, à une fréquence aussi basse que 400 Hz parfois, et avec la voie aiguë, laquelle ne peut descendre en dessous de 4 à 5 kHz environ, entraînent un choix optimal d'un diamètre de H-P de 17 cm, avec un diamètre émissif de l'ordre de 13 à 14 cm. Un tel diamètre commence à présenter une directivité sensible à partir d'une fréquence de 2,5 kHz environ, bien que des artifices tels qu'une ogive centrale permettent d'élargir le diagramme de directivité jusqu'à une octave plus haut dans le meilleur des cas. Un diamètre plus élevé, de 20 à 25 cm, n'est utilisable que dans la bande bas-médium entre 300 Hz et 1,5 kHz maximum, ce qui impose une voie supplémentaire de haut-médium entre 1,5 et 5 kHz environ, avec tous les problèmes de couplage et de filtrage qui s'en suivent, la fréquence de raccordement se trouvant alors dans la zone de plus grande sensibilité de l'oreille et les déphasages introduits par le filtre étant alors nettement détectables. Au contraire un diamètre plus petit, de 13 cm ou moins, ne peut descendre en dessous de 1 kHz environ, à moins d'abaisser sa fréquence de résonance, donc de sacrifier son rendement. Seuls



Figure 155 - Le réalisme de la restitution sonore se situe au-delà d'une frontière, définie autant par des limites physiques mesurables, que par notre aptitude à dépasser les cadres posés par la société, ses modes, ses valeurs, ses normes, et à remettre en cause des dogmes bien ancrés par les pratiques commerciales. On accepte un piano de taille normale et il ne viendrait à l'idée de personne d'en exiger un miniature, sauf comme jouet d'enfant. On accepte un téléviseur de 70 cm et plus, avec la certitude que l'émotion du spectacle est plus intense devant une grande image. Pourtant, accepter une paire de caissons "Fidel" dans son salon, c'est prendre le risque d'accueillir le regard critique des visiteurs, parfois leurs jugements peu amènes, leur argumentation technique très critique, voire désapprobatrice, en tout les cas leur incompréhension... ou leur étonnement. Question habituelle : "Faut-il vraiment aller jusque là pour réussir à reproduire des sons ?" Réponse pertinente : "Il n'y a nulle part où aller, il n'y a rien à réussir. Seule l'intention compte, seule la quête importe, qui amène à dépasser des bornes arbitraires, à se dépasser".

quelques large-bandes réputés peuvent prétendre reproduire un spectre assez étendu, de 200 ou 250 Hz jusqu'à 5 ou 6 kHz avec à la fois un rendement satisfaisant, une linéarité correcte et une directivité pas trop perturbée.

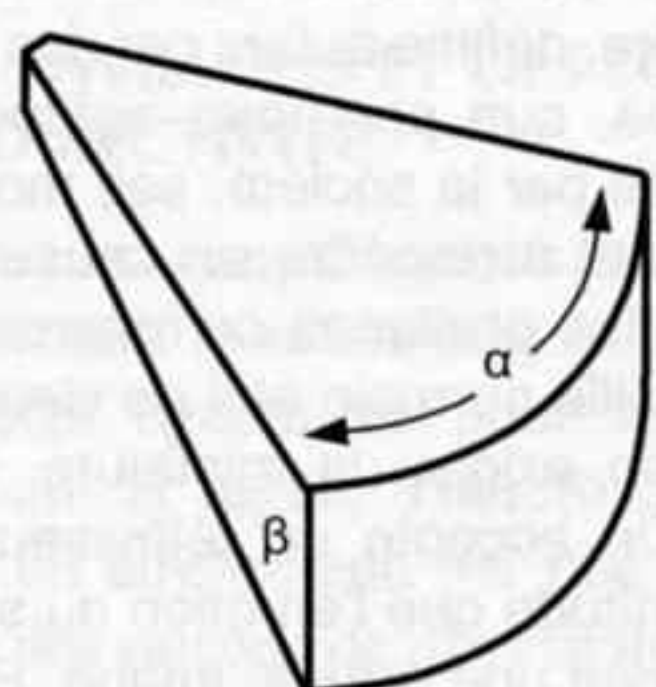
Le raccordement correct des différentes voies impose donc des contraintes de trois ordres aux transducteurs des différentes bandes. Autour de la fréquence de séparation, ils doivent être en correspondance :

- Dans leur réponse **niveau/fréquence** mesurée dans l'axe, laquelle ne doit pas présenter d'atténuation marquée avant la fréquence de coupure choisie, 3 dB de chute doit être considéré comme un maximum tolérable. De plus la pente de coupure doit être régulière, à moins que la fréquence de séparation ne soit située loin de la coupure naturelle, ce qui est assez rare. Cette condition est liée au choix des transducteurs, elle est assez facile à respecter, et le problème est bien documenté depuis plusieurs décennies dans la littérature technique. Les moyens informatiques permettent la synthèse de circuits de filtrage combinant habilement les coupures électriques avec les coupures acoustiques naturelles des H-P, tout au moins dans l'axe.
- Dans leur réponse **phase/fréquence** non seulement dans l'axe mais aussi hors de l'axe, dans un angle solide suffisamment large. Cette condition est liée au filtre séparateur de fréquences, et la littérature

renseigne, de manière souvent incomplète, depuis moins d'une dizaine d'années. Les ébauches de solutions sont souvent partielles, parfois approximatives. Un paragraphe est consacré plus loin à ce problème.

- Dans leur réponse **directivité/fréquence**, ce critère étant assez mal documenté dans la littérature. C'est pourtant à partir des conditions de directivité que les choix des transducteurs sont effectués, la plupart du temps par habitude, à tel point que ce choix n'est même plus discuté et est devenu un postulat, un a priori, un préalable, la démarche de conception étant alors établie en conséquence de ce choix non exprimé.

Il me paraît au contraire très important de remonter aux considérations déterminant le choix des diamètres de transducteurs et de leurs fréquences de raccordement, afin de faire apparaître les critères et surtout les seuils de décision. C'est en constatant les défauts les plus couramment rencontrés au niveau des raccordements de voies, que ces critères de choix sont mis en lumière. L'anomalie la plus fréquente est sans doute le manque d'homogénéité de la restitution de part et d'autre de la fréquence de coupure du filtre, l'incohérence des timbres. Pour être plus précis, c'est tout à la fois l'inconstance de la sensation d'espace, qui peut paraître plus aéré, plus ample et moins "rempli" d'un côté de cette fréquence de coupure que de l'autre,



α = ANGLE DE DISPERSION HORIZONTALE

β = ANGLE DE DISPERSION VERTICALE

$$DI = 10 \log \left[\frac{180^\circ}{\arcsin(\sin \alpha / 2 \cdot \sin \beta / 2)} \right]$$

$$Q = \frac{180^\circ}{\arcsin(\sin \alpha / 2 \cdot \sin \beta / 2)}$$

Les formules ci-contre permettent de calculer DI ou Q lorsque les angles de diffusion horizontale et verticale sont différents, ce qui est le cas de tous les pavillons rectangulaires.

Figure 156 - Une source sonore rayonnant uniformément dans toutes les directions, avec $\alpha = \beta = 360^\circ$ présente un indice de directivité $DI = 0$. Si elle rayonne la même énergie dans un demi-espace, avec $\alpha = \beta = 180^\circ$ la puissance dans l'axe est doublée, et le niveau sonore dans l'axe est augmenté de 3 dB. L'indice de directivité DI indique l'augmentation de niveau dans l'axe apportée par la réduction de l'angle de rayonnement, ce qui s'écrit dans ce cas $DI = 3$. Si l'angle est encore réduit de moitié, avec $\beta = 90^\circ$, alors $DI = 6$, et ainsi de suite. On préfère souvent utiliser le coefficient de directivité Q qui est directement relié à l'angle de dispersion. $Q = 2$ indique un rayonnement en demi-espace sur 180° en horizontal et vertical, $Q = 4$ en quart d'espace sur $180^\circ H \times 90^\circ V$ par exemple, $Q = 8$ en $1/8$ d'espace sur $90^\circ \times 90^\circ$. (d'après doc. JBL)

l'inconstance de la sensation de matière, de grain du timbre de l'instrument, qui paraît fait de matériaux différents selon la hauteur de la note jouée, et l'inconstance de la sensation de taille, d'énergie, de position de la source sonore, qui peut paraître plus grande, plus étalée et plus proche, également selon la hauteur de la note.

La courbe de réponse niveau/fréquence dans l'axe ne donne absolument aucune indication sur ce phénomène. C'est en considérant la puissance totale rayonnée par chacun des transducteurs que l'on peut trouver des éléments de réflexion. Cette puissance est directement liée à l'angle solide de rayonnement, défini figure 156, et plus cet angle est grand, plus une quantité importante d'énergie est envoyée sur les parois de la salle, où elle est réfléchi. Le traitement contre la réverbération l'amortira peu à peu au fil des réflexions successives, mais les premières réflexions, de niveau important car non encore amorties, se combinent à l'onde directe pour la renforcer, surtout dans les premières 20 ms. Autrement dit, les fréquences émises avec peu de directivité, donc dans un angle solide important, sont renforcées par ces réflexions, alors que les fréquences émises par une source directive ne sont pas renforcées. Dès lors, si un haut-parleur de grand diamètre est coupé à une fréquence de quelques kHz à laquelle il rayonne dans un angle de 60° , et relayé par un tweeter, naturellement peu directif dans le bas de sa bande où il rayonne dans un angle de 180° , les énergies réfléchies par la salle de part et d'autre de la fréquence de raccordement, sont très différentes. Subjectivement, un raccord en escalier est perçu, avec une énergie bien plus grande au-dessus de la coupure, alors que la réponse en pression dans l'axe est linéaire, figure 157 et 158.

La répartition des fréquences entre les différentes voies, dans le but de respecter le réalisme sonore qui impose la constance des sensations d'espace, de matière, de taille, est donc établie sur des considérations de **directivité**, et non sur l'observation de la courbe de réponse dans l'axe. Celle-ci est néanmoins très utile pour estimer la sensibilité réelle dans la bande de fréquence souhaitée. Cette sensibilité peut différer de celle annoncée dans les caractéristiques, parfois moyennée, parfois mesurée dans une zone de fréquence non réellement utilisable.

Raccorder correctement des haut-parleurs à rayonnement direct, à 3 dB près, dans un angle de 180° n'est possible qu'en respectant la contrainte de diamètre inférieur à $1/2$ longueur d'onde. Cette contrainte peut paraître sévère, pourtant une variation de 3 dB du niveau hors de l'axe représente une puissance acoustique divisée par deux pour les ondes réfléchies, et 180° ne représente qu'un demi-espace de rayonnement, alors qu'aux plus basses fréquences le haut-parleur grave est omnidirectionnel. Tolérer des variations du simple au double tant sur la puissance rayonnée que sur l'angle de rayonnement est loin d'être sévère...

D'autre part cette similitude des diagrammes de rayonnement doit s'étendre sur au moins $1/2$ octave de part et d'autre de la fréquence de coupure, car l'atténuation du filtre dans la bande rejetée n'est pas totale, et les deux transducteurs rayonnent ensemble dans une plage assez large autour du raccordement.

Dans le cas d'utilisation de pavillons, la connaissance précise de leurs caractéristiques de directivité est indispensable, en particulier les couvertures angulaires horizontale et verticale à -3 dB et -6 dB, figure 159.

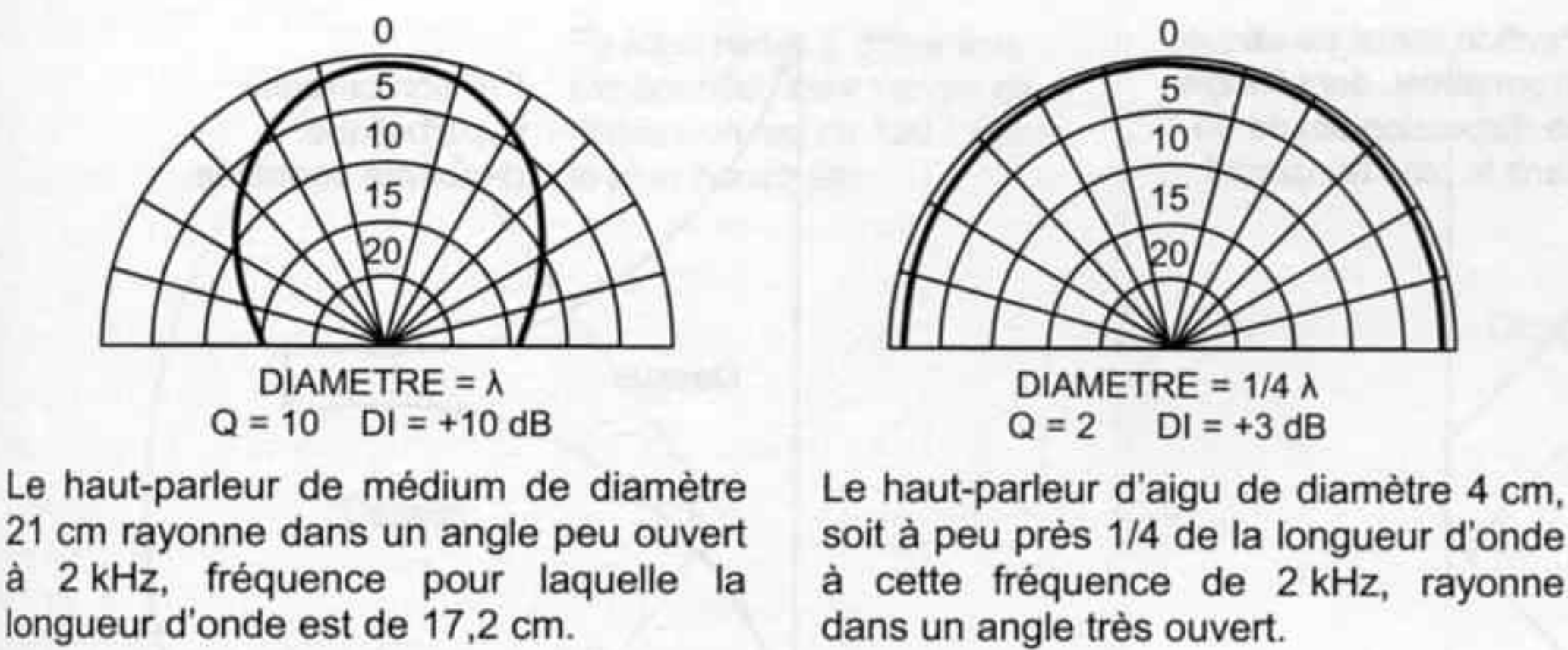


Figure 157 - Raccorder à 2 kHz un médium de grand diamètre, 21 cm dans l'exemple ci-contre, avec un tweeter de faible diamètre, ici 4 cm, entraîne le non-recouvrement des lobes de directivité. Seul le tweeter émet hors de l'axe, et les sons réfléchis ont alors un contenu spectral plus riche en fréquences aiguës qu'en médium. Le son paraît tiré vers le haut.

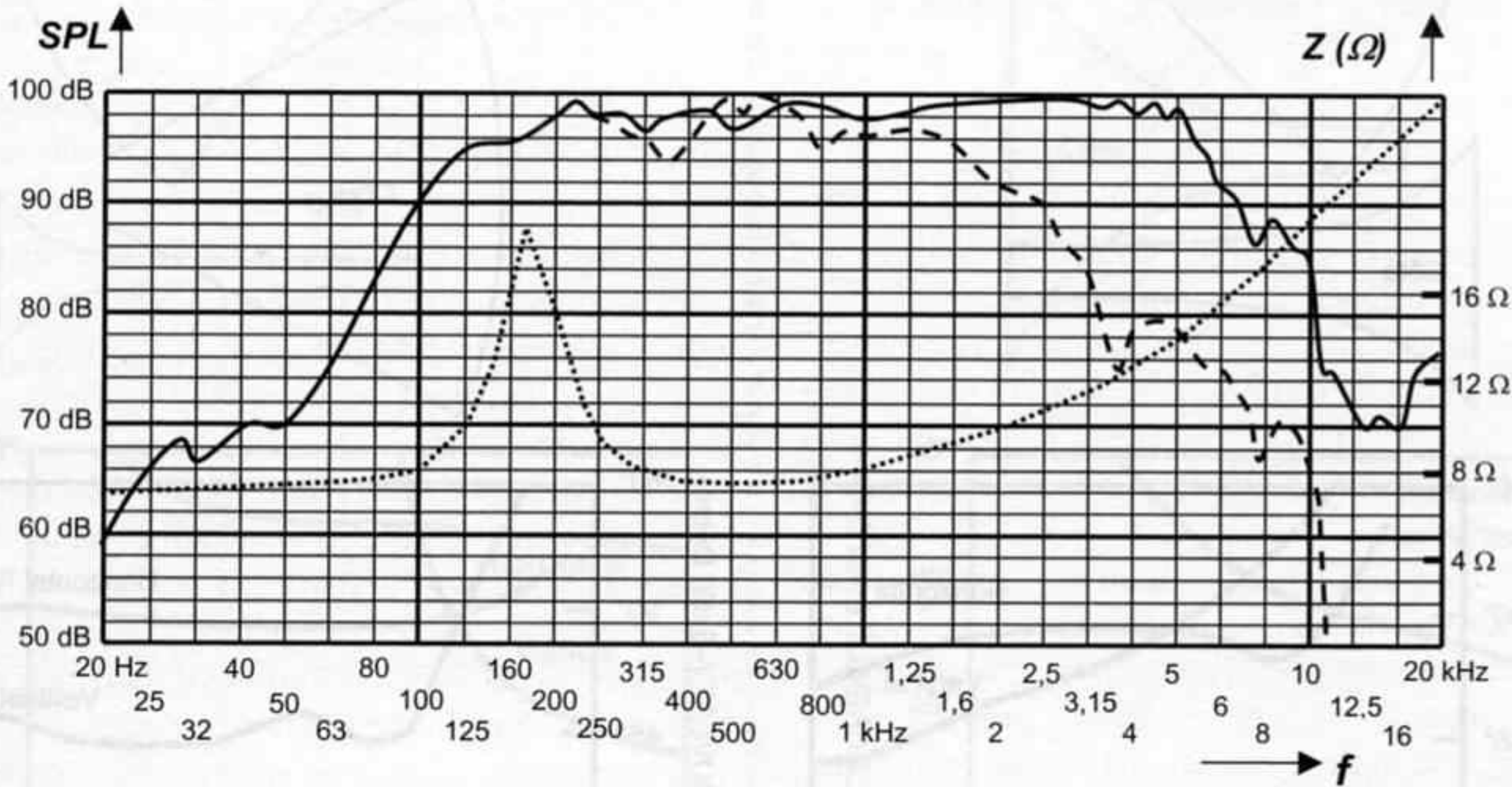


Figure 158 - Courbes relevées sur le haut-parleur professionnel Audax de diamètre 21 cm pris en exemple. Si la courbe de réponse dans l'axe, reprise des données constructeur en trait plein, laisse rêver d'un fonctionnement en large bande, la réponse à 45° en trait tireté montre que la directivité se manifeste dès 800 Hz, sans conséquences graves jusqu'à environ 1,25 kHz. Au-delà la réponse chute rapidement, imposant une fré-

quence de raccordement vers 1,5 kHz avec la voie de haut-médium. La courbe d'impédance montre d'autre part que la résonance, située vers 175 Hz à l'air libre, mais qui remontera à près de 250 Hz dans une charge close, oblige à prévoir un filtrage passe-haut au-dessus de 350 à 400 Hz. Ce haut-parleur à très haut rendement ne couvre donc convenablement qu'un peu moins de deux octaves.

Comme le montrent les schémas de la figure 159, les caractéristiques angulaires des pavillons courants ne laissent que peu de liberté quant au choix d'une fréquence de coupure. Le pavillon radial typique présente une variation régulière de sa directivité verticale, nécessaire à l'obtention d'une directivité horizontale à peu près constante. Dans le bas de sa bande, il arrosera copieusement sol et plafond, qui se feront un plaisir de réfléchir ces ondes. Dans le haut de sa bande, l'énergie réfléchiée par les parois sera nettement moindre. Le pavillon biradial assure une couverture angulaire beaucoup plus constante, aussi bien en vertical qu'en horizontal, sur une bande de fréquence assez étendue. Cependant la directivité verticale présente un coude,

une brusque remontée en dessous de 1 kHz environ, souvent plus accentuée encore que sur le tracé donné en exemple. Raccorder un haut-parleur à une fréquence où sa directivité varie rapidement nuit gravement à l'homogénéité de la restitution, par conséquent les pavillons bi-radiaux ne sont utilisables pour une application audio-phile qu'au-dessus de 1,2 à 1,5 kHz environ, selon les modèles. Le pavillon à diffraction, figure 160, est intéressant par sa constance de directivité horizontale, et en le raccordant assez bas si le moteur utilisé le permet, on bénéficie de son angle de couverture important. Par contre il est déconseillé de le faire monter trop haut, car alors sa couverture verticale devient très faible, d'où un

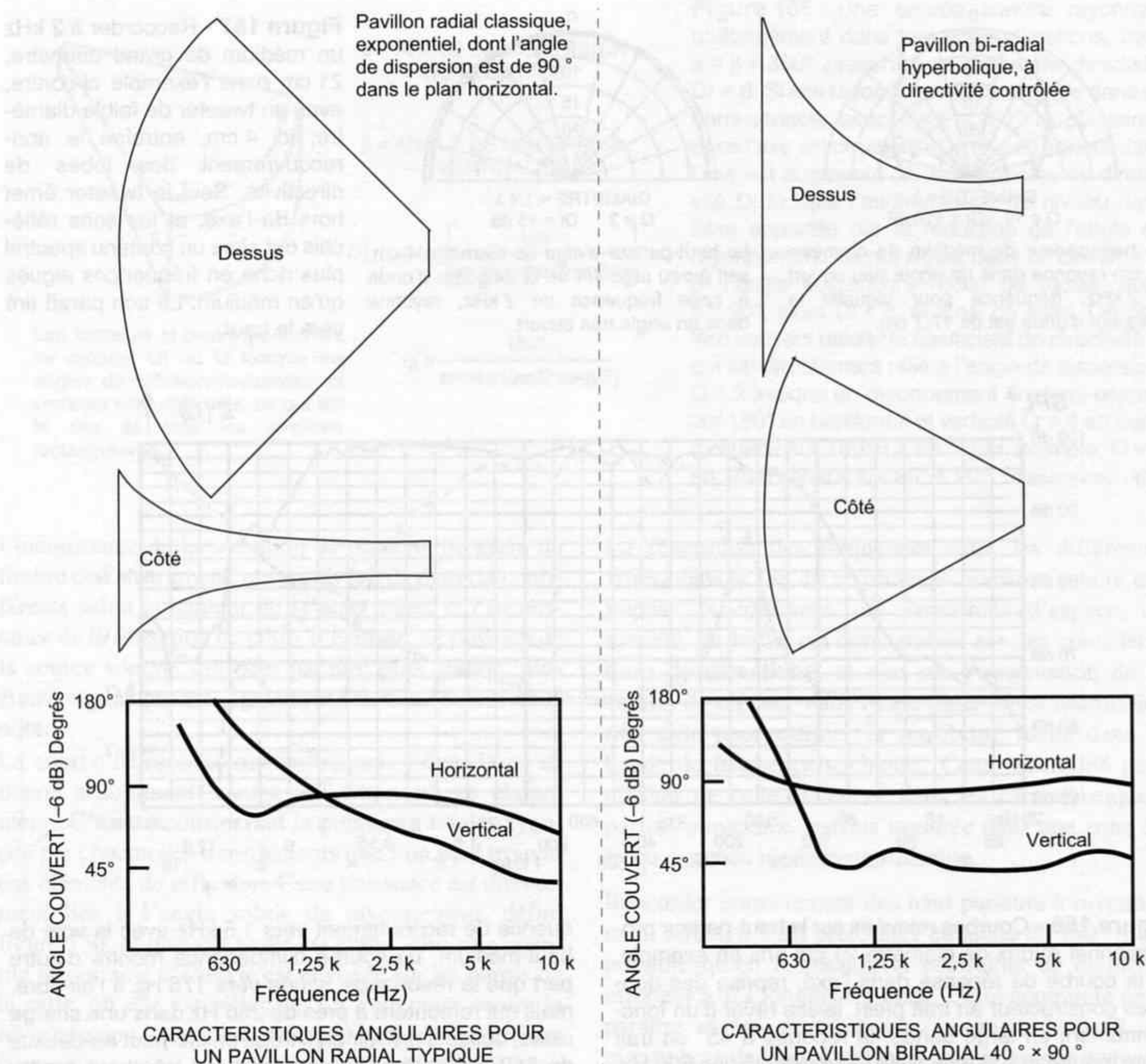


Figure 159 - Quel que soit le type de pavillon envisagé, la directivité en bas de la bande en dessous de

1 kHz est faible, avec des angles de couverture très larges, atteignant parfois plus de 180°.

mauvais recouvrement des lobes du médium et du tweeter. De plus cette directivité prononcée entraîne la formation d'un lobe de diffusion qui s'aplatit fortement quand la fréquence augmente, créant une hausse de niveau dans l'axe pouvant atteindre +5 à +6 dB entre 5 et 10 kHz. Il est nécessaire de prévoir une fréquence de raccordement avec le tweeter en dessous de 5 kHz, ce que très peu de tweeters permettent. Son utilisation n'est pas très répandue chez les audiophiles.

Les pavillons circulaires ont en commun avec les pavillons Tractrix, figure 160, la particularité de présenter des directivités horizontale et verticale identiques, comme d'ailleurs les haut-parleurs à rayonnement direct. Le raccordement d'un pavillon rond avec un haut-parleur lui aussi rond ne pose donc pas de pro-

blème particulier, il suffit de rechercher la fréquence à laquelle les angles de diffusion du haut-parleur et du pavillon sont à peu près égaux. La plupart du temps le pavillon descend assez bas pour choisir la fréquence de filtrage dans une zone où le haut-parleur de grave n'est pas directif, les deux voies rayonnant alors sur 180° environ. Sa fabrication sur tour à commande numérique est assez simple et ne pose pas de problème particulier de gabarit.

Si maintenant on considère le couplage avec la pièce d'écoute, dont l'excès de réverbération a été absorbé par des traitements adaptés, on se souvient qu'une valeur correcte de distance critique était difficile à atteindre en dessous de 500 Hz, à cause du peu d'efficacité des matériaux de traitement à ces fréquences. Il

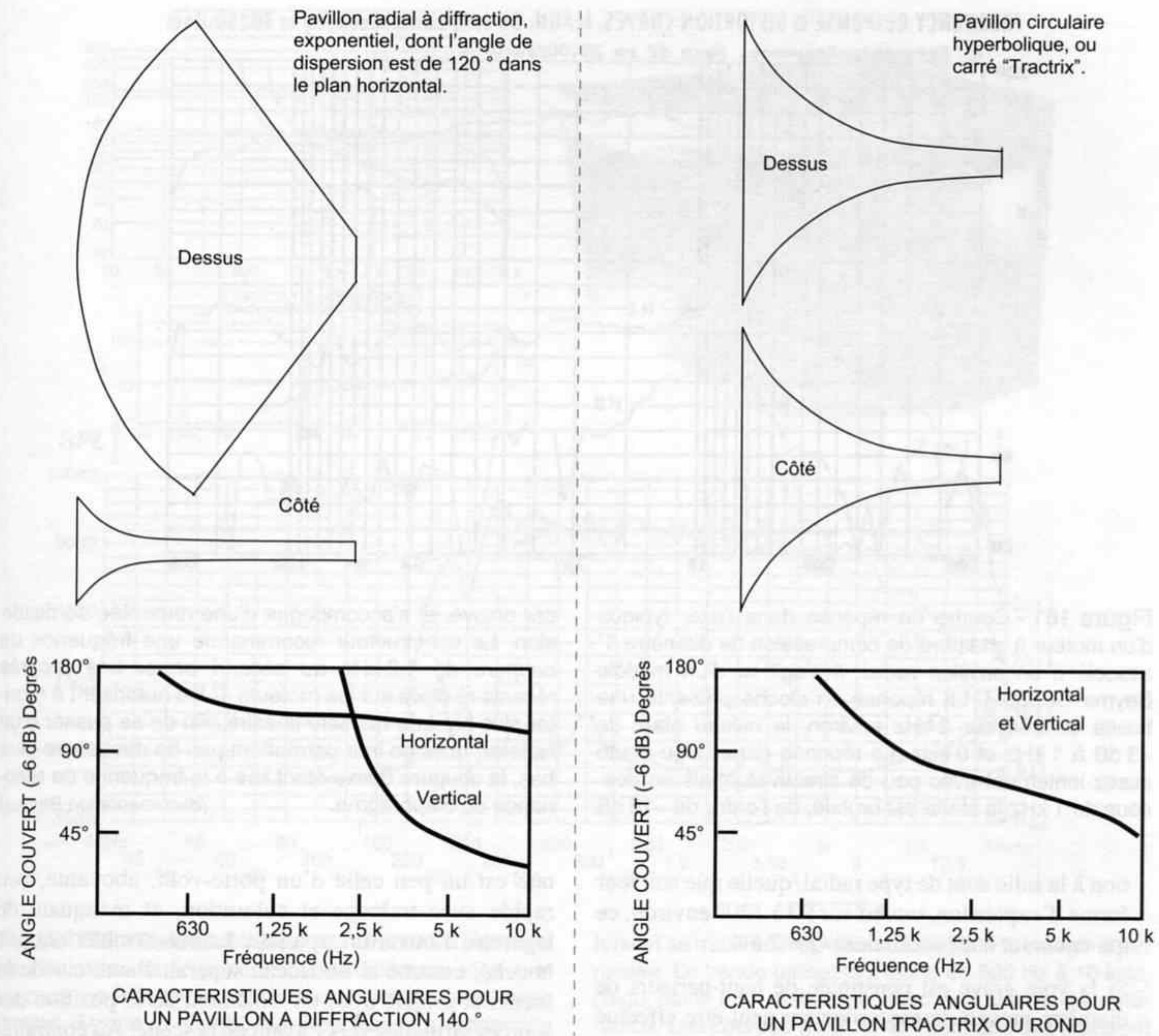


Figure 160 - Le pavillon à diffraction maintient une couverture horizontale large et constante, mais au prix d'une directivité verticale présentant une énorme varia-

tion. Les pavillons ronds ou carrés ont des variations identiques sur les deux axes, que ces variations soient linéaires ou non.

est donc préférable de choisir un transducteur médium qui présente une certaine directivité horizontale à cette fréquence, c'est-à-dire dans le bas de sa bande, avec un angle de couverture horizontal de seulement 90 à 120°, et inférieur à 120° si possible en vertical. Cela correspond à un coefficient de directivité Q compris entre 3 et 6 environ, ce qui améliore la distance critique, en comparaison avec un haut-parleur médium à rayonnement direct qui présente un Q de l'ordre de 1,5 à 2 seulement dans cette bande de fréquence. C'est aussi en cela que les systèmes à pavillons donnent de meilleurs résultats que les haut-parleurs à radiation directe : la distance critique est améliorée par la directivité, ce qui situe l'auditeur dans le champ direct.

Seuls les pavillons radiaux permettent cette adaptation avec la salle d'écoute, ainsi que les pavillons bi-radiaux à la condition impérative de les filtrer au-dessus de la fréquence où l'angle de couverture verticale augmente. Cela aboutit finalement à des conclusions assez simples, qu'il ne faudrait absolument pas généraliser :

- Si la voie grave est constituée de haut-parleurs de grand diamètre, ce qui est préférable, le raccordement avec la voie de médium est effectué vers 500 Hz maximum pour des 38 cm, et vers 630 Hz pour des 31 cm, avec une très faible variation de directivité (-3 dB à 90°, soit Q = 2,5 environ). Les pavillons qui permettent à la fois un recouvrement correct des lobes de diffusion et une bonne adapta-

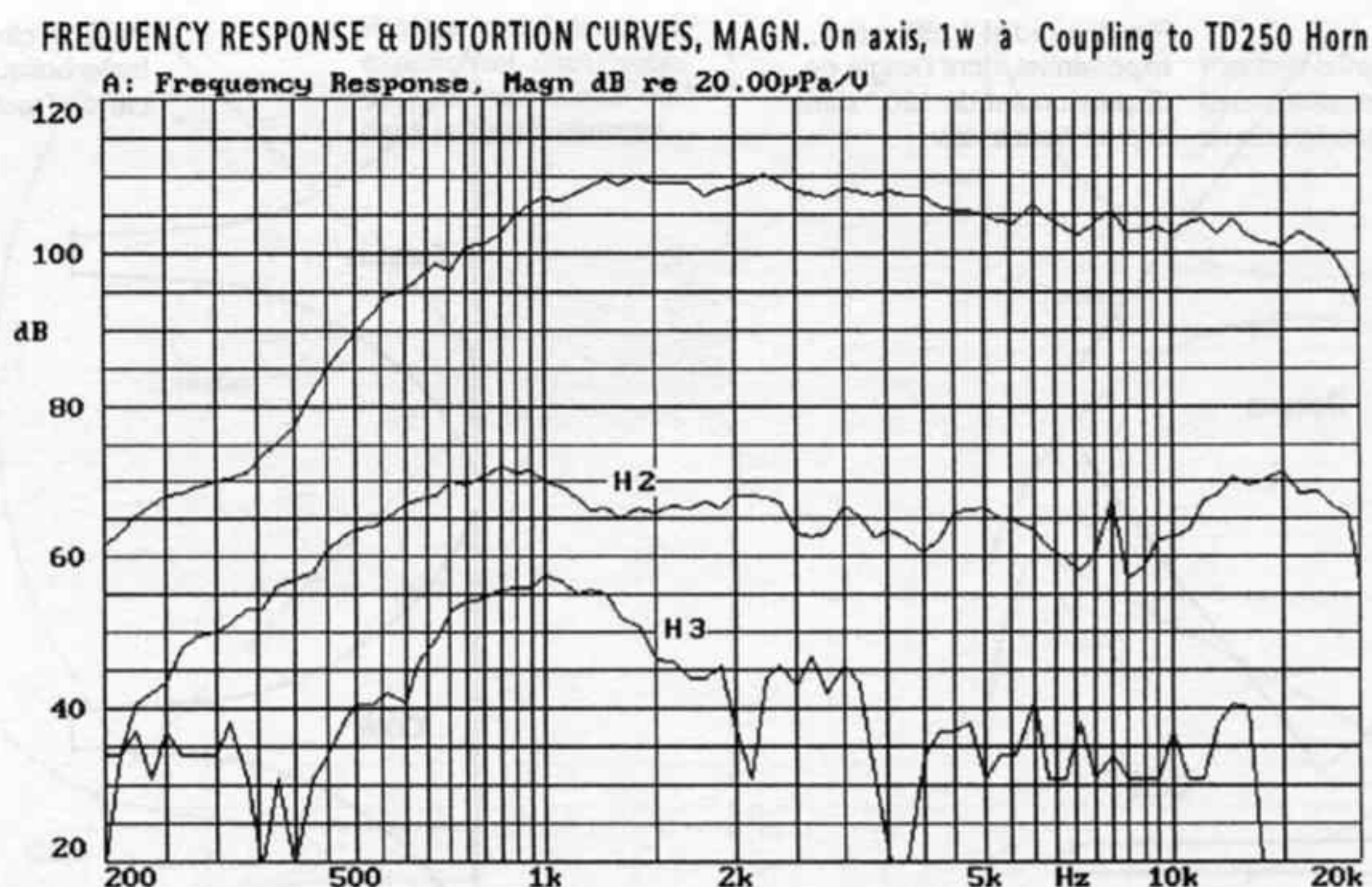


Figure 161 - Courbe de réponse dans l'axe, typique d'un moteur à chambre de compression de diamètre 1" associé à un pavillon radial. Il s'agit ici d'un modèle Beyma CP380M. La réponse en cloche présente une bosse centrée sur 2 kHz environ, le niveau étant de -3 dB à 1 kHz et 6 kHz. La réponse dans l'aigu chute assez lentement avec peu de directivité, mais en dessous de 1 kHz la chute est brutale, de l'ordre de -18 dB

par octave, et s'accompagne d'une remontée de distortion. Le constructeur recommande une fréquence de coupure de 1,2 kHz au second ordre. Les progrès récents réalisés sur les moteurs 1" les autorisent à monter plus haut de manière linéaire afin de se passer d'un tweeter, mais ne leur permettent pas de descendre plus bas, la coupure basse étant liée à la fréquence de résonance du diaphragme. (documentation Beyma)

tion à la salle sont de type radial, quelle que soit leur forme d'expansion, ouvert sur 90 à 120° environ, ce qui équivaut à un coefficient $Q = 2$ à 4.

- Si la voie grave est constituée de haut-parleurs de diamètre moyen, le raccordement peut être effectué vers 1 kHz avec des 28 cm, et vers 1,2 kHz avec des 24 cm, fréquences où la directivité commence tout juste à apparaître (-3 dB à 60°, soit $Q = 6$ environ). Les pavillons qui amènent un recouvrement correct des lobes grave et médium sont de type bi-radial, avec un peu plus de 100° en horizontal, et 50 à 60° en vertical, ce qui équivaut à un coefficient $Q = 6$ à 9.

Dans le second cas, on raccorde plus haut, avec plus de directivité. Cela ne constitue nullement un défaut, les lobes grave et médium présentant à peu près la même couverture angulaire. Cette configuration convient théoriquement mieux aux salles un peu réverbérantes. Cependant très peu de haut-parleurs grave ou grave-médium donnent des résultats homogènes dans le médium, entre 600 Hz et 1,2 kHz. Vers 1 kHz un H-P de plus de 20 cm rayonne dans un faisceau étroit, à partir d'une membrane relativement lourde, et présentant des fractionnements mal amortis, ainsi que des résonances de cache-noyau ou de cavité (volume d'air emprisonné derrière le cache-noyau). La sonorité obte-

nue est un peu celle d'un porte-voix, aboyante, peu rapide avec traînage et coloration, et manquant de légèreté, d'ouverture spatiale. Le son semble à la fois bouché, comme si un rideau séparait l'auditeur de la scène, et projeté avec un étalement de la position des sources virtuelles vers l'avant de la scène. Au contraire, vers 2 kHz, juste après la coupure, le pavillon rayonne à partir d'une membrane nettement plus légère. La sonorité obtenue est plus vive, rapide et transparente, bien plus légère et la sensation d'espace plus ouverte. Les crêtes de niveau ne sont pas tassées, et la dynamique semble plus importante dans cette bande haut-médium. Le couplage de ces deux voies est très délicat, et faire descendre le pavillon plus bas, vers 800 ou même 600 Hz comme cela se voit parfois fait apparaître d'autres problèmes. Dans ce cas c'est le pavillon qui procure un son de porte-voix, avec un manque d'énergie dans le bas de sa bande car la réponse niveau-fréquence présente la plupart du temps une forme en cloche, avec une chute sensible du niveau en dessous de 1 kHz. D'autre part, le pavillon remplit mal son rôle d'adaptateur d'impédance à des fréquences aussi basses, la membrane travaille alors avec des excursions trop importantes qui produisent une variation de la compression de l'air, génératrice de distortions importantes décelables à l'écoute.

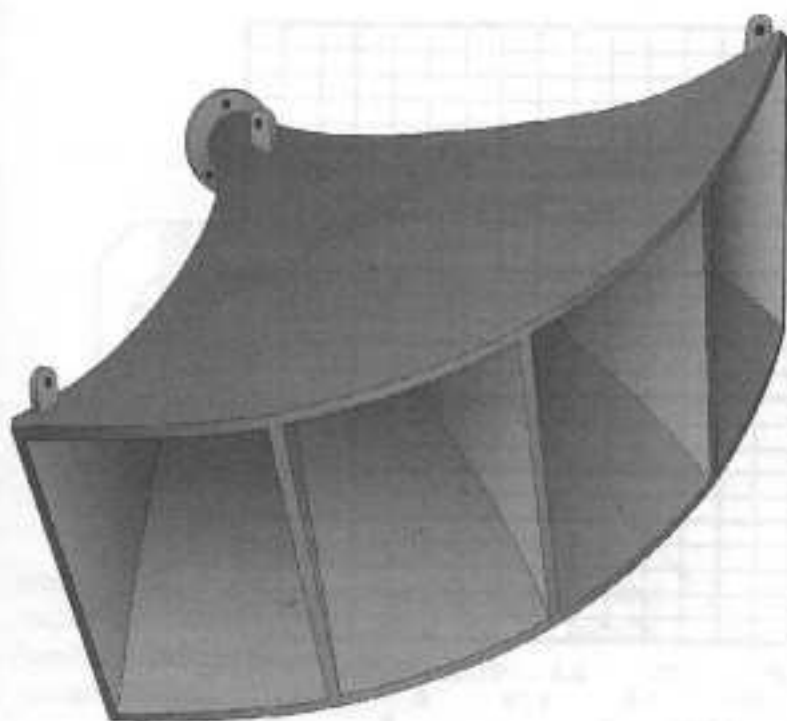


Figure 162 - La forme d'un pavillon est dictée par la formule d'expansion et le choix des angles de dispersion. Les différents pavillons calculés à partir de données proches se ressemblent donc fortement. Ici le pavillon Altec 311B-90°, cousin du 511B plus connu, en métal moulé laqué. Les 4 cellules permettent une dispersion angulaire améliorée jusqu'à plus de 5 kHz. L'expansion est exponentielle avec des angles de dispersion de 90 °H et 40 °V. La fréquence de coupure basse du pavillon est environ de 220 Hz. Prévu pour montage direct des moteurs 1,4" Altec 288 et 290.

Des versions en bois sablé ont été réalisées par Onken (SC500W) ou J. Le Dauphin (PBS). Les parois intermédiaires rigidifient l'ensemble et donnent son qualificatif de sectoriel à ce type de pavillon radial. Une excellente neutralité des parois est obtenue par construction en deux couches de contreplaqué mince enfermant une couche de sable fin.

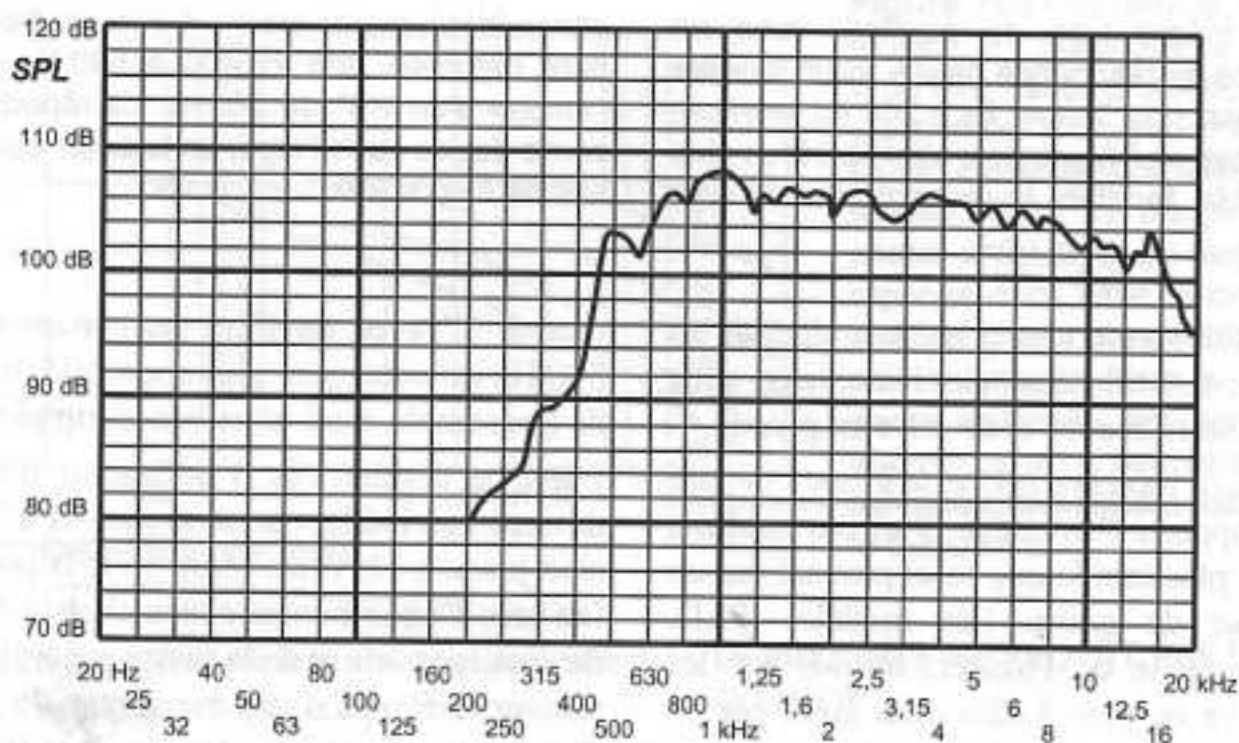


Figure 163 - Courbe de réponse dans l'axe. Chutant rapidement en dessous de 500 Hz, elle montre que le moteur 1", par sa fréquence de résonance située un peu trop haut, ne permet pas de profiter de la coupure basse du pavillon. Ici le filtrage raccordera vers 630 Hz

avec la voie grave, et vers 8 kHz avec la voie aiguë pour un recouplement correct des lobes de directivité. Les moteurs 1" utilisables avec adaptateurs sont assez peu nombreux : TAD2001, Altec 802, JBL 2420 à 2426. Le relevé a été effectué avec un ancien moteur Beyma.

Les haut-parleurs à chambre de compression, encore appelés "moteurs", ont été, pour une très large majorité, étudiés pour la sonorisation professionnelle, de spectacle ou de studio. Cela ne signifie pas qu'ils n'ont pas les qualités requises pour une écoute domestique de haute qualité. Cela implique seulement que leur optimisation a été effectuée sur des points, et avec des critères propres à leur domaine d'application. En particulier la réponse en puissance de l'ensemble moteur/pavillon est plus importante que la réponse dans l'axe, et l'extension de la bande passante vers le bas ne présente que des inconvénients, tels que longueur importante du pavillon, mauvaise tenue en puissance aux basses fréquences d'où mauvaise fiabilité, distorsions plus fortes. Les voies de bas-médium professionnelles sont équi-

pées de haut-parleurs coniques à haut rendement, parfois chargés par des pavillons courts en bois. Le moteur à chambre de compression n'est donc pas étudié pour reproduire des fréquences bas-médium, aussi la plupart des moteurs à sortie 1" sont prévus pour un filtrage à 1,2 ou 1,5 kHz, figure 161, et les moteurs 2" pour un filtrage à 800 Hz, parfois 500 Hz. Les évolutions les plus récentes, facilitées par la modélisation informatique des propagations des ondes, et mises au point par les divisions professionnelles des grands constructeurs, comme JBL ou Altec pour ne citer que les plus connus, ont pour objectif la linéarisation de la réponse aux fréquences élevées, dans l'axe et hors de l'axe, ceci afin d'obtenir une couverture angulaire constante, indépendante de la fréquence, sans nécessi-

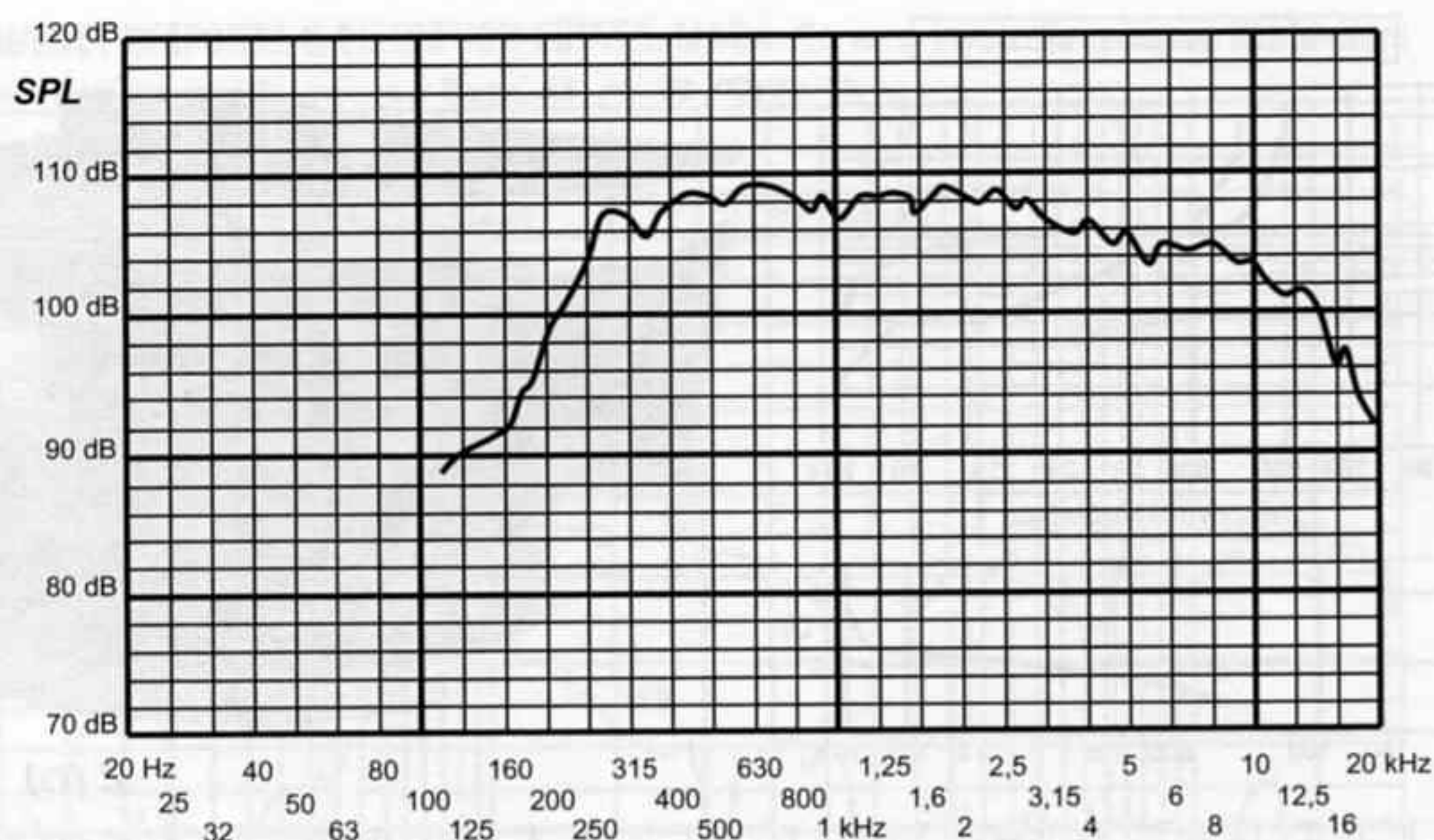


Figure 164 - Le même type de pavillon, avec un moteur à fréquence de résonance basse, ici un modèle à suspension Mylar, pour lequel $F_s = 200$ Hz environ, procure une réponse en fréquence s'étendant bien plus bas, jusqu'à 270 Hz, facilitant le raccord avec la voie

ter l'adjonction d'une voie aiguë, qui entraînerait un filtrage actif et une amplification supplémentaire, avec des problèmes d'interférences et de mise en phase.

Seuls quelques rares moteurs permettent une coupure assez basse, qui apporte l'avantage d'un bas-médium plus aéré et léger, plus rapide que celui procuré par un grand haut-parleur de grave. Les modèles TAD, division professionnelle de Pioneer, utilisés sur les enceintes Exclusive ou Rey-Audio mais aussi par de nombreux audiophiles, en sont le meilleur exemple. Les versions anciennes à sortie 2" sont utilisables entre 600 Hz et 20 kHz. Leur prix élevé leur fait préférer les modèles Altec ou JBL, qui sont disponibles aisément en occasion, les anciens modèles à aimant Alnico étant très recherchés. Quelques fabricants s'intéressent au secteur audiophile, tel Fostex, Beyma ou Radian, ce dernier proposant des chambres de compression à suspension Mylar (plastique fin et souple) produisant une fréquence de résonance relativement basse. Le modèle Beyma CP850 Nd à aimant néodymium et membrane titane, présente une fréquence de résonance assez basse pour descendre à 250 Hz, avec toutefois une puissance admissible plutôt limitée (20W) à ces fréquences. Son association avec un pavillon carré Tractrix assez long permet de couvrir la bande 300 Hz/8 kHz avec une linéarité et une musicalité extraordinaires. Sa résonance haute vers 17 kHz l'empêche de couvrir le registre aigu. L'utilisation d'un H-P grave de 38 cm associé à un moteur 1", avec une fréquence de raccordement de 1 à 1,5 kHz n'est donc pas recommandée, bien que cette association soit souvent réalisée par des amateurs. Un

grave, idéalement vers 1,5 à 2 fois la fréquence de coupure naturelle, soit ici 400 à 500 Hz, ce qui permet l'emploi d'un H-P de 38 cm. La réponse descend en pente douce dans l'aigu, un tweeter est requis au-dessus de 5 ou 6 kHz.

moteur 2" avec pavillon permettant de descendre à 500 Hz est nettement plus approprié, le prix de revient de l'ensemble étant alors beaucoup plus élevé.

Dans ce dernier cas, l'utilisation d'une voie aiguë devient inévitable, car si un moteur 1" peut faire illusion jusqu'à 12, voire 15 ou 16 kHz pour les meilleurs (au prix d'une résonance bien choisie de la membrane, de sa suspension et de la cavité arrière) en revanche un moteur 2" équipé d'une membrane de 75 à 100 mm de diamètre ne peut prétendre dépasser 10 kHz sans coloration désagréable ou atténuation marquée. D'ailleurs la plupart d'entre eux gagnent à être soulagés de cette partie haute du spectre, par un filtre passe-bas d'ordre 1 accompagné d'un traitement amortissant le capot arrière (Blackson) ainsi que le volume interne de cette cavité arrière. La mousse ignifugée imposée par les normes de sécurité gagne subjectivement à être remplacée par une couche de 5 à 10 mm (selon l'espace disponible) de feutre de laine, quantité ajustée par essais successifs.

Les formes d'expansion des pavillons ont été abondamment décrites dans la littérature, mais la plupart d'entre eux ont été optimisés pour une utilisation professionnelle avec les impératifs cités plus haut. Seuls les modèles TAD, certains modèles Fostex, Westlake ou JBL rencontrés dans la gamme "monitor", et quelques productions peu diffusées comme Zingali, Audio-dynamique, Le Dauphin, JF-Guigue ont été spécialement développés pour une utilisation domestique, souvent en association avec un moteur choisi pour ses aptitudes particulières en haute fidélité. La plupart

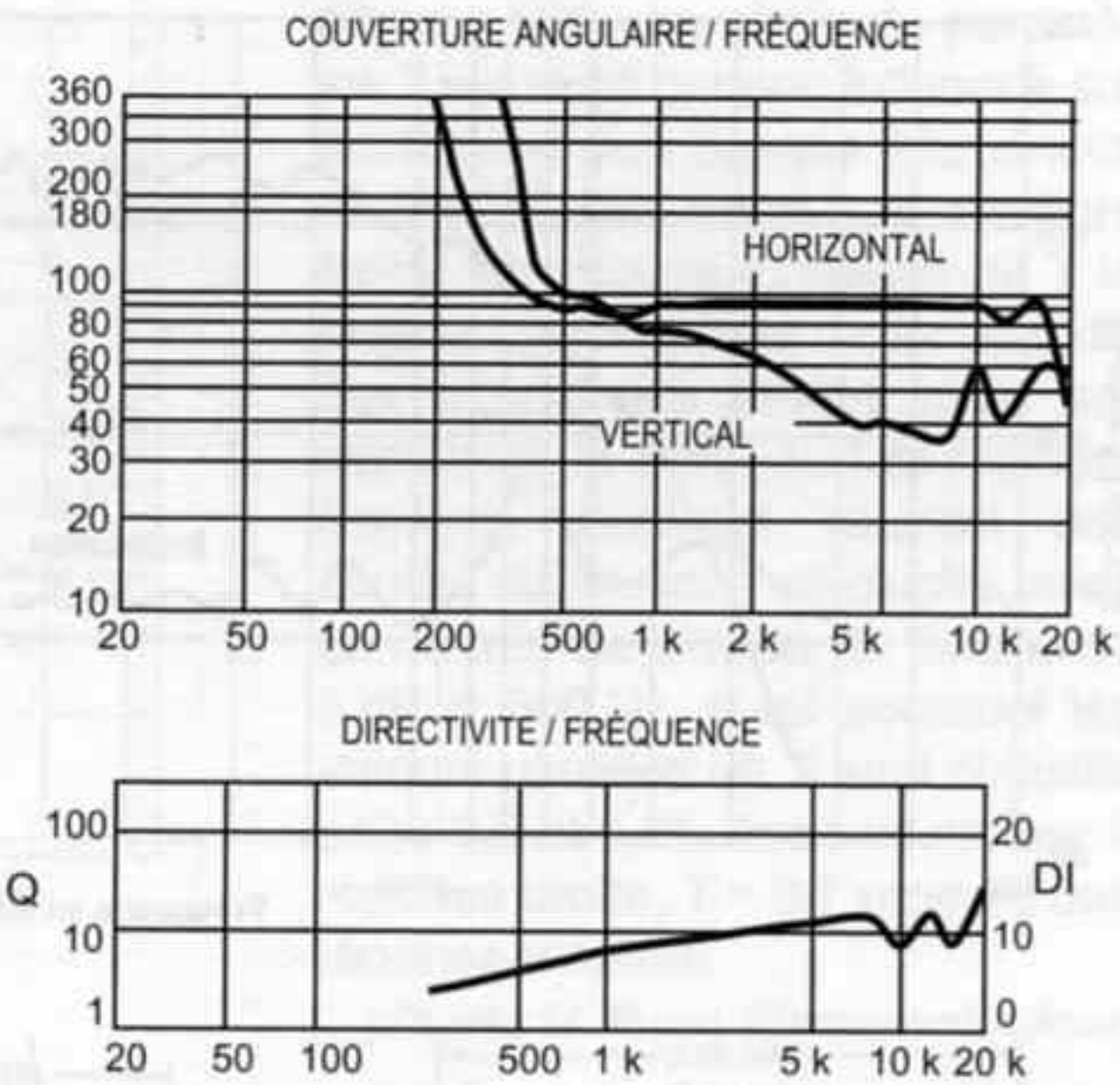
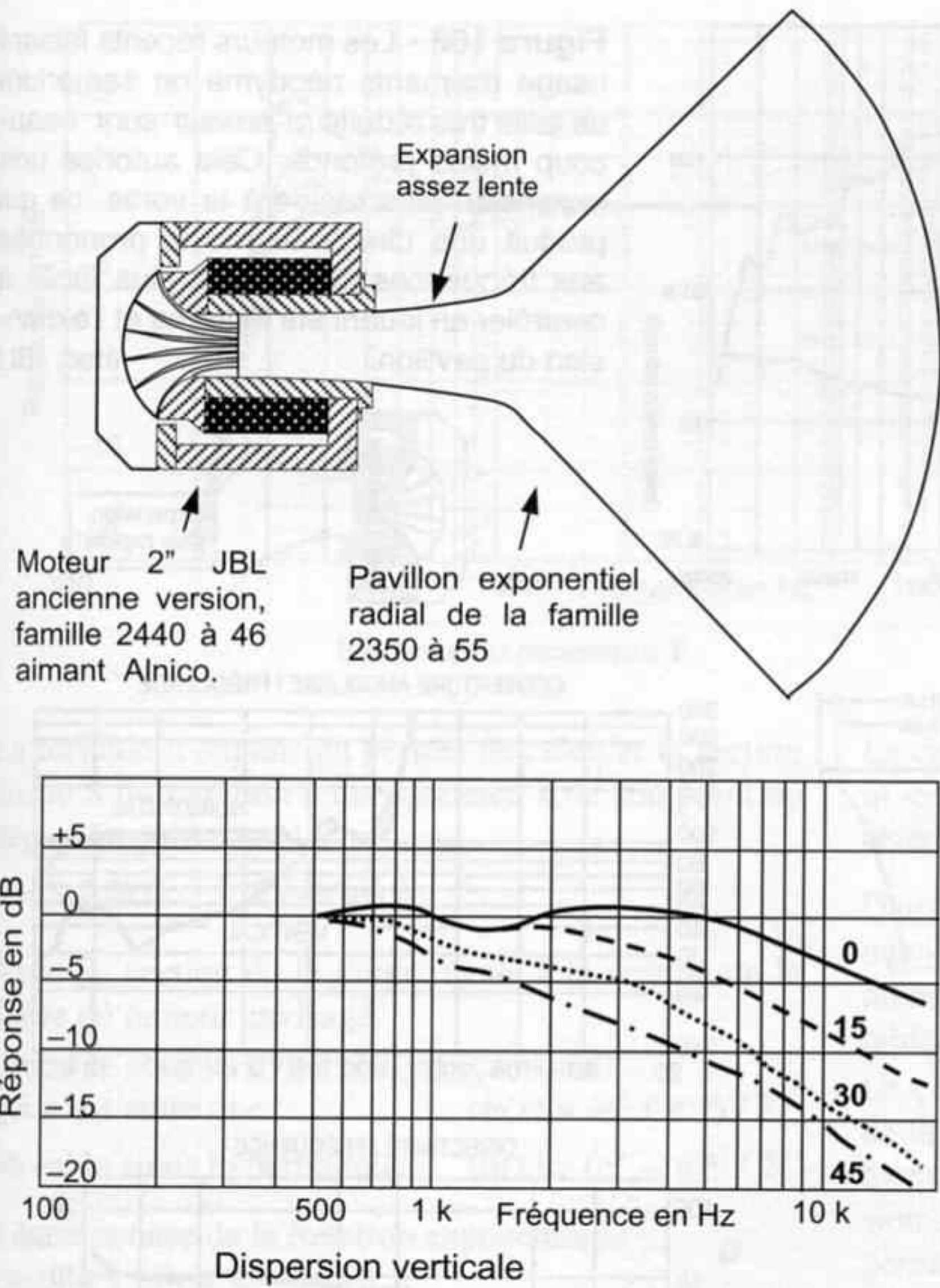


Figure 165 - Ci-dessus, le couple formé du moteur 2" classique à sortie conique de Ø 50 mm, assez profond, associé à un pavillon exponentiel d'ouverture horizontale 90°, présente une expansion assez lente à la sortie du moteur. Cela se traduit par une directivité assez irrégulière au-dessus de 10 kHz. La réponse dans l'axe, ci-contre, est étendue et linéaire, mais hors de l'axe la directivité verticale augmente avec la fréquence. La puissance rayonnée diminue quand la fréquence augmente, et ne peut être égalisée qu'en tolérant un niveau sonore dans l'axe montant avec la fréquence. (d'après doc. JBL)

d'entre eux sont de section rectangulaire, et présentent des formes d'expansion régulières, sans rupture de continuité du profil, ni de la vitesse d'expansion, afin de ne pas perturber la propagation du front d'onde. La section rectangulaire produit un angle de dispersion horizontal plus régulier, peu variable avec la fréquence, ce qui amène une grande homogénéité de timbre, d'espace, de matière.

Les matériaux de construction sont choisis pour leur aptitude à lutter contre les vibrations de parois (encore elles) et sont soit la pierre reconstituée, soit le bois massif, ou sablé, soit des matériaux synthétiques inertes très massifs et rigides. Les pavillons en métal moulés, donnant un beau son de cloche, ou en plastique mince peu rigide, sont responsables en grande partie des opinions négatives parfois émises. Les schémas suivants donnent quelques exemples de pavillons très réputés pour leurs qualités de reproduction. J'indique pour chacun d'eux la forme d'expansion, les formules de calcul lorsqu'elles sont connues, les moteurs ayant servi pour l'étude et ceux qui y sont adaptables, ainsi que la bande de fréquence où ils sont utilisables. Un exemple de réalisation est décrit.

LE PROGRÈS NE RÉDUIT PAS LA LONGUEUR D'ONDE

Associés aux moteurs récents, munis d'aimants plats permettant une plus grande conicité de la sortie, les pavillons bi-radialtm comme le modèle JBL 2380 figure 167, procurent un meilleur contrôle de la directivité aux fréquences élevées. La comparaison des angles de couverture d'un ancien pavillon type 2350 (figure 165) et d'un pavillon biradial (figures 166 et 167) montre que ce dernier présente moins de variations de l'angle de couverture horizontale au-dessus de 10 kHz. Entre 1 kHz et 10 kHz son indice de directivité est beaucoup plus constant, et au-delà de 10 kHz la variation est progressive. Par contre, entre 500 Hz et 1 kHz, l'ancien modèle est beaucoup plus régulier. De plus son profil progressif, sans rupture de continuité de l'expansion, perturbe moins la forme du front d'onde. Sa fréquence de coupure naturelle est plus basse, ce qui est normal puisqu'il est plus long. Les progrès effectués permettent donc l'utilisation du moteur en médium-aigu sans adjonction de tweeter, avec un poids et un encombrement réduits grâce à la plus faible profondeur, et un montage facilité dans l'enceinte par

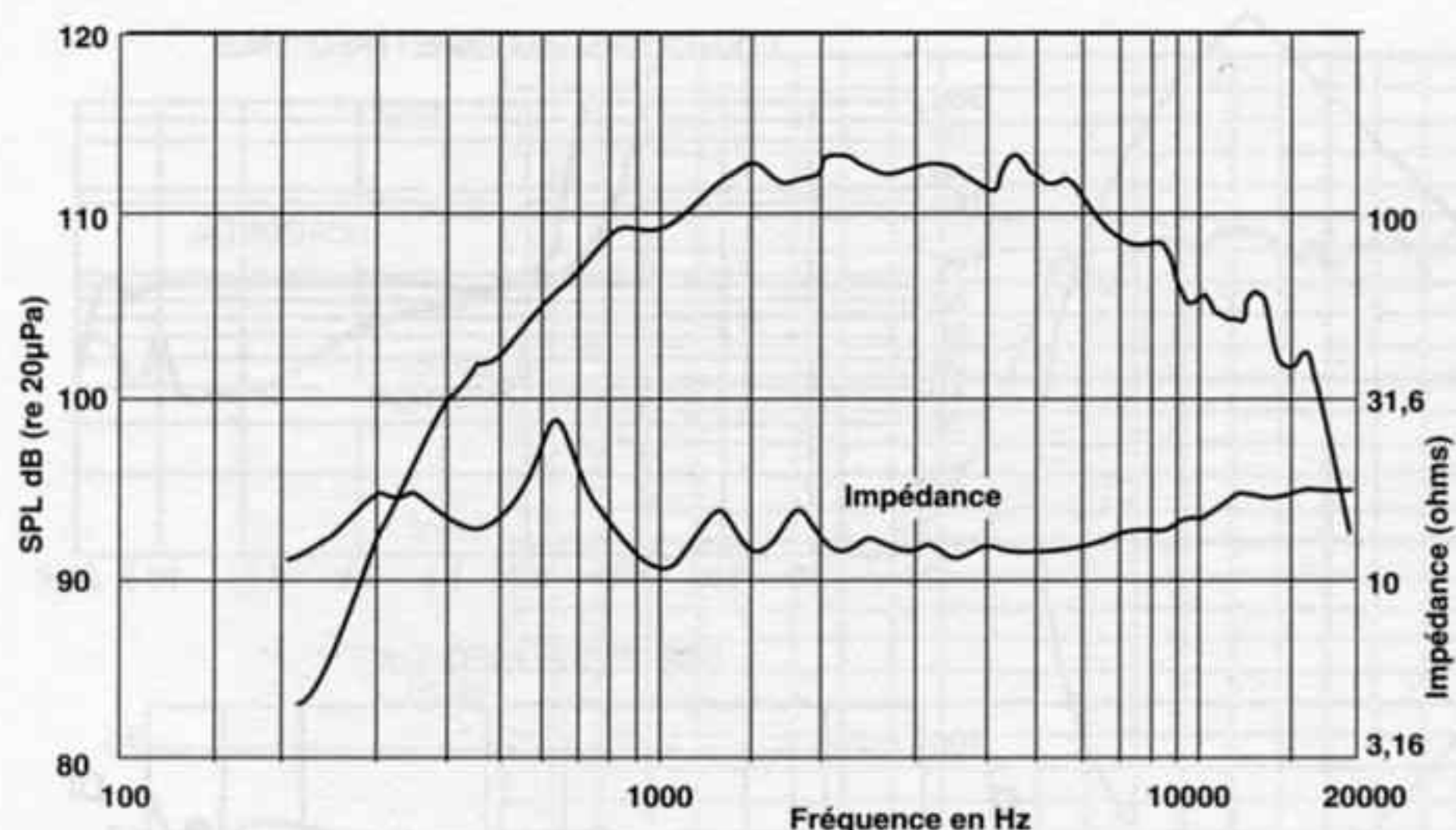


Figure 166 - Les moteurs récents faisant usage d'aimants néodyme ou samarium de taille très réduite (*ci-dessous*) sont beaucoup moins profonds. Cela autorise une expansion plus rapide à la sortie, ce qui produit une directivité moins prononcée aux fréquences élevées, et plus facile à contrôler en jouant sur la forme et l'expansion du pavillon. (doc. JBL)

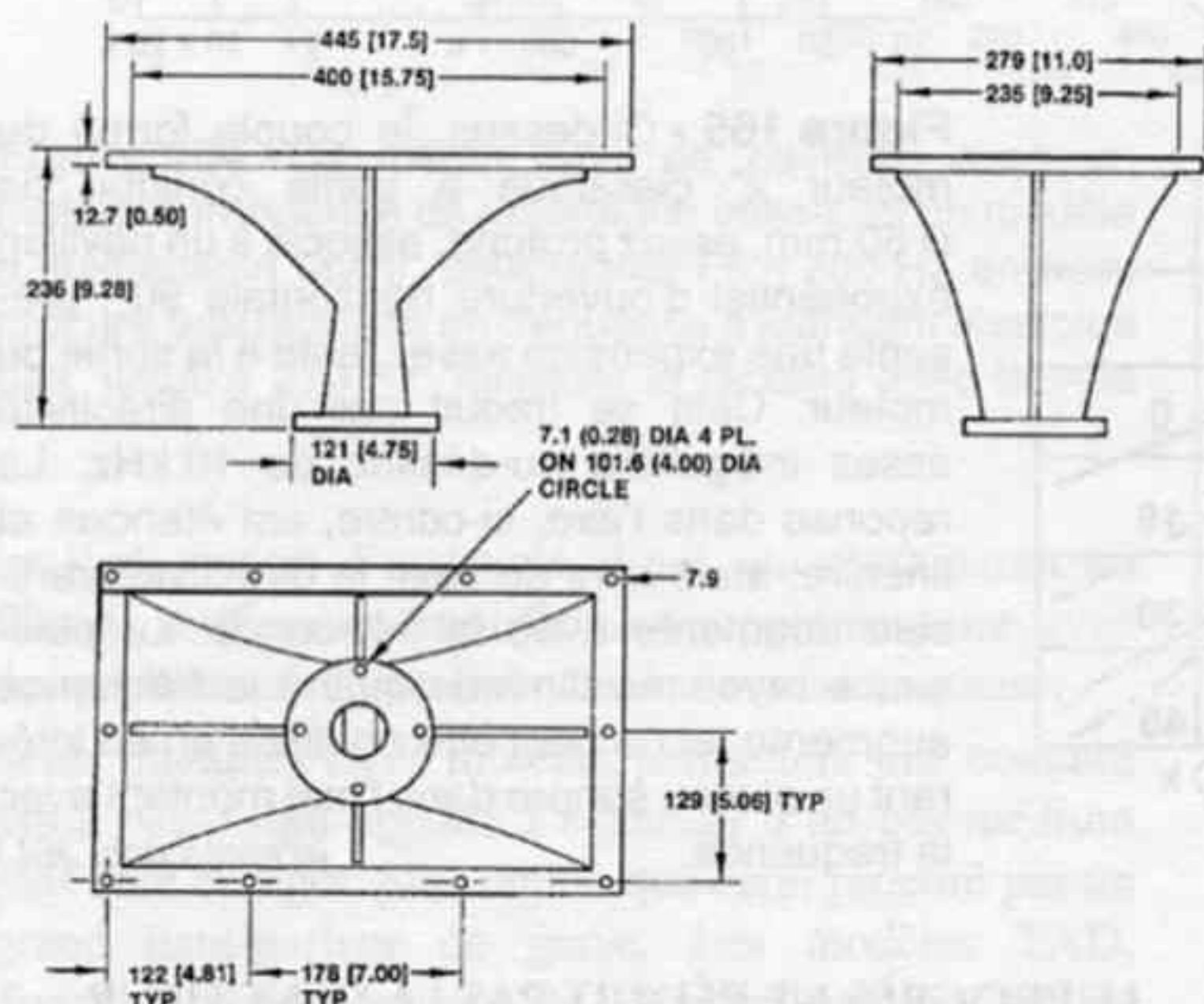
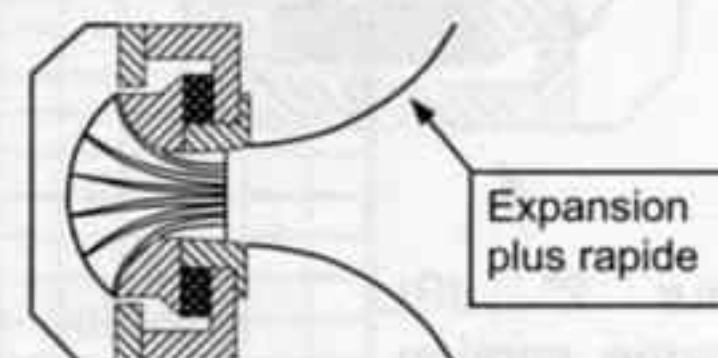
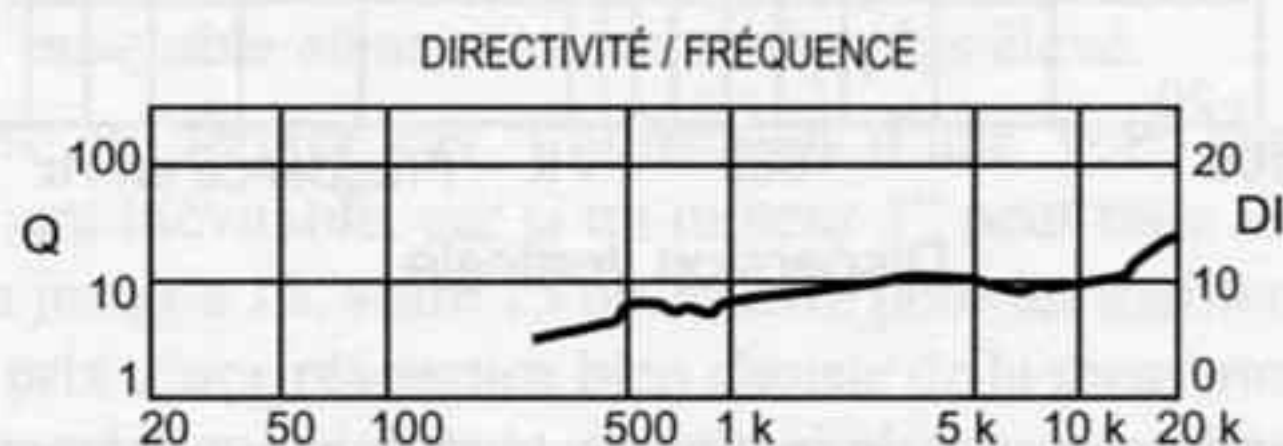
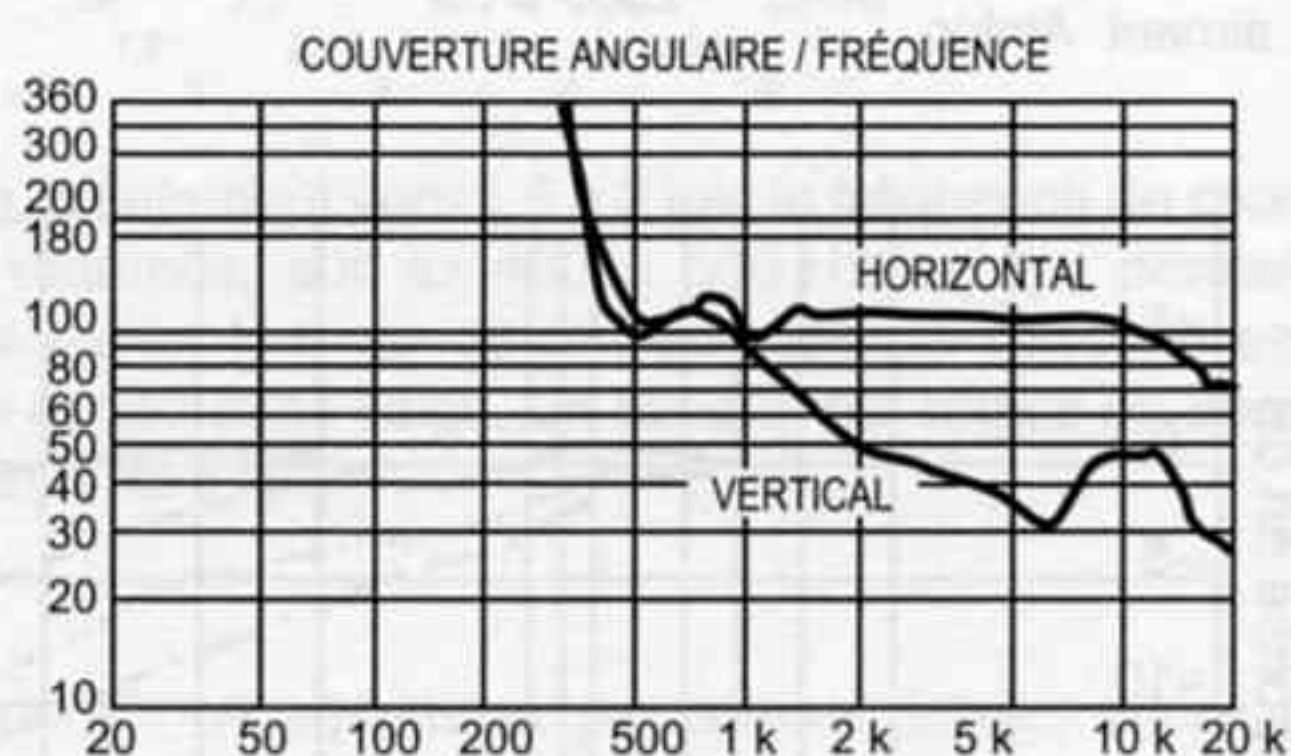


Figure 167 - Pavillon biradial JBL 2380.

la forme de sortie parfaitement plane. Ces progrès se traduisent par une réponse en puissance, hors de l'axe, à peu près parallèle à la réponse dans l'axe, ce qui autorise une égalisation par filtrage actif ou passif sans créer une bosse dans la réponse axiale. Cet avantage est décisif en sonorisation professionnelle.

Pour l'audiophile qui recherche une fréquence de coupure de 500 Hz, une directivité régulière en bas de la bande entre 500 Hz et 1 kHz, et qui, plutôt que d'égaliser la réponse en relevant le niveau des aigus, préfère utiliser un tweeter à partir de 5 à 7 kHz, ces progrès n'apportent rien. C'est peut-être en partie pour cela que les anciens modèles de moteur sont recherchés, en plus de leur aimant Alnico, et que les anciennes formes de pavillons radiaux sont toujours utilisées, avec une fabrication en matériaux inertes, bois massif ou sablé.

D'ailleurs les hauts de gamme de JBL tels les K2-S9500 puis S5500 et S9800, et d'autres fabricants comme TAD, ou Solo pour ne citer qu'eux, sont équipés de pavillons radiaux de forme régulière, avec



moteurs à sortie 1,5" si les H-P graves sont de 31 cm, ou moteur 2" avec des 38 cm. Ces formes d'expansion parfaitement progressive, sans inflexion, ont été décrites par l'ingénieur japonais Iwata.

MATHÉMATIQUES ET FORMULES MAGIQUES

Les pavillons radiaux ou biradiaux, de section rectangulaire, font partie d'une unique famille dont la caractéristique d'expansion, d'accroissement de la section, obéit à une formule mathématique complexe. Cette dernière, qui est donnée ci-dessous, comporte des coefficients qui, selon leurs valeurs, déterminent le type de progression, exponentielle, hyperbolique, caténoïdale ou même mixte avec des portions qui suivent des lois de progressions différentes. Cependant, l'expérience montre que dans ce cas, le raccordement de ces sections de formules d'expansions différentes doit se faire sans rupture de continuité ni du profil, ni de la vitesse d'expansion.

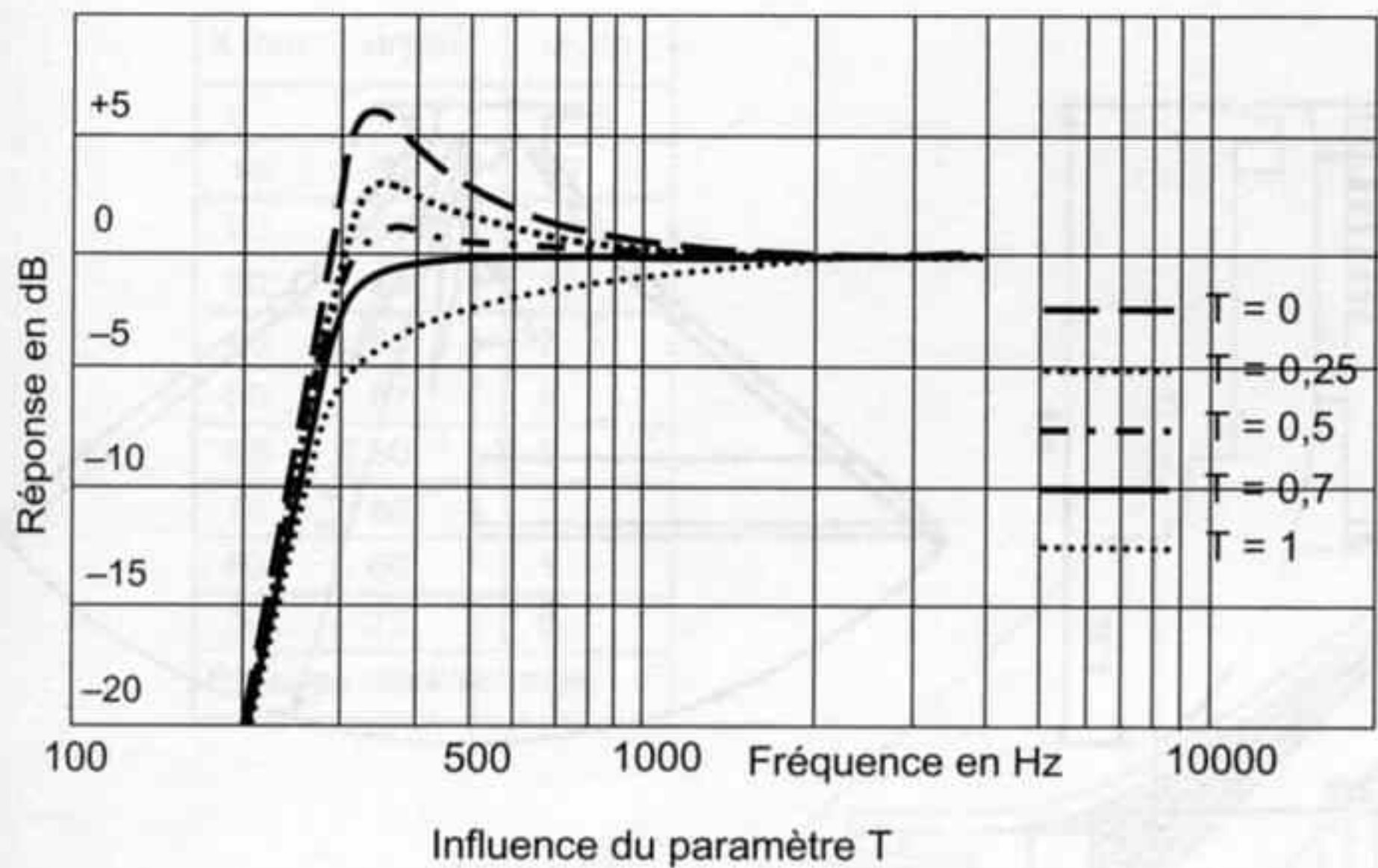


Figure 168 - Le choix du paramètre T est dicté par son influence sur la réponse aux basses fréquences de l'ensemble moteur et pavillon. Entre les valeurs extrêmes de T le niveau de sortie peut varier de 6 dB aux fréquences situées juste au-dessus de la coupure. Les moteurs courants montrent souvent une courbe de réponse en cloche, avec une chute de niveau de l'ordre de 3 dB à 500 Hz, c'est pourquoi les valeurs usuelles de T sont choisies entre 0,5 et 0,25. Avec un moteur à réponse droite, T = 0,7 procure une réponse méplate.
(d'après M. Rossi, *Electro-acoustique*)

La formule d'expansion permet de calculer la section droite S du pavillon à une distance x de son point de départ (appelé Apex) :

$S = S_0[\text{ch}(mx) + T \cdot \text{sh}(mx)]$

Avec S₀ section de la gorge, égale à la section de la sortie du moteur envisagé,

Ch est le cosinus hyperbolique (ça existe) qui n'est autre que : $\text{ch}(x) = (e^x + e^{-x}) / 2$

Sh est le sinus hyperbolique : $\text{sh}(x) = (e^x - e^{-x}) / 2$

e étant la base de la fonction exponentielle : Ln(e) = 1 d'où e = 2,718...

Pour faciliter le calcul, on pose généralement : $\alpha = (1 + T) / 2$ et $\beta = (1 - T) / 2$

ce qui permet d'écrire l'expansion sous la forme : $S = S_0 [\alpha \cdot e^{mx} + \beta \cdot e^{-mx}]$

Cette formule générale correspond à une progression hyperbolique. Si le coefficient T prend des valeurs particulières, la forme d'expansion se simplifie :

Avec T = 1, cela donne $\alpha = 1$ et $\beta = 0$ et l'expansion est $S = S_0 \cdot e^{mx}$ qui est une simple exponentielle.

Avec T = 0, cela donne $\alpha = 0,5$ et $\beta = 0,5$ et l'expansion est $S = S_0 \cdot \text{ch}(mx)$ qui est une caténoïde.

Les deux coefficients qui maîtrisent l'expansion du pavillon sont donc m, coefficient d'expansion, et T coefficient d'amortissement. Plus la valeur de m est forte, plus l'expansion est rapide, mais plus la fréquence de coupure naturelle fc est élevée. Cette dernière doit se situer 1,5 à 2 fois plus bas que la coupure du filtre séparateur. Un pavillon destiné à être associé à un H-P grave de 38 cm, avec raccordement à 500 Hz, doit par conséquent présenter une coupure naturelle située autour de 250 à 330 Hz.

Le choix de m doit respecter : $m < 4\pi \cdot f_c / C = 0,0365 f_c$ avec C = 344 m/s célérité du son dans l'air.

Dans l'exemple choisi, m doit donc être inférieur à 10, une valeur de 12 devant être considérée comme maximum tolérable car imposant un filtrage à pente très raide.

Le coefficient T agit sur la rapidité d'expansion près de la gorge. Une valeur faible de T se traduit par une forme de pavillon présentant une partie à faible expansion assez longue, suivie d'une ouverture rapide. Cela permet de conserver une certaine charge acoustique aux basses fréquences, grâce à la "résistance" offerte aux ondes par cette partie "tubulaire". Le moteur, plus chargé dans ces conditions, travaille à plus haute impédance et le niveau de sortie ne chute donc pas dans le bas de la bande. Au contraire une valeur élevée de T produit une expansion rapide dès le départ du pavillon, ce qui est favorable à une faible directivité aux fréquences élevées, mais entraîne une charge faible aux fréquences basses, du fait que l'onde ne trouve pas de résistance, ne peut s'appuyer sur les parois qui divergent rapidement. Cette faible "résistance de charge" entraîne un travail du moteur à basse impédance aux fréquences les plus basses de sa bande, d'où un niveau de sortie plus faible, ainsi que des excursions de membrane supérieures, responsables de distorsions.

La valeur de T se répercute donc directement sur la forme de la courbe de réponse aux basses fréquences, la valeur $T = \sqrt{2} / 2 = 0,707$ donnant une réponse plate, si le moteur est lui-même linéaire en fréquence (figure 168).

C'est pourquoi il est indispensable de connaître la courbe de réponse du moteur avant de calculer son pavillon. C'est en effet en fonction de la chute de niveau présentée par le moteur dans le bas de sa bande, entre 500 Hz et 1 kHz environ, que le choix du para-

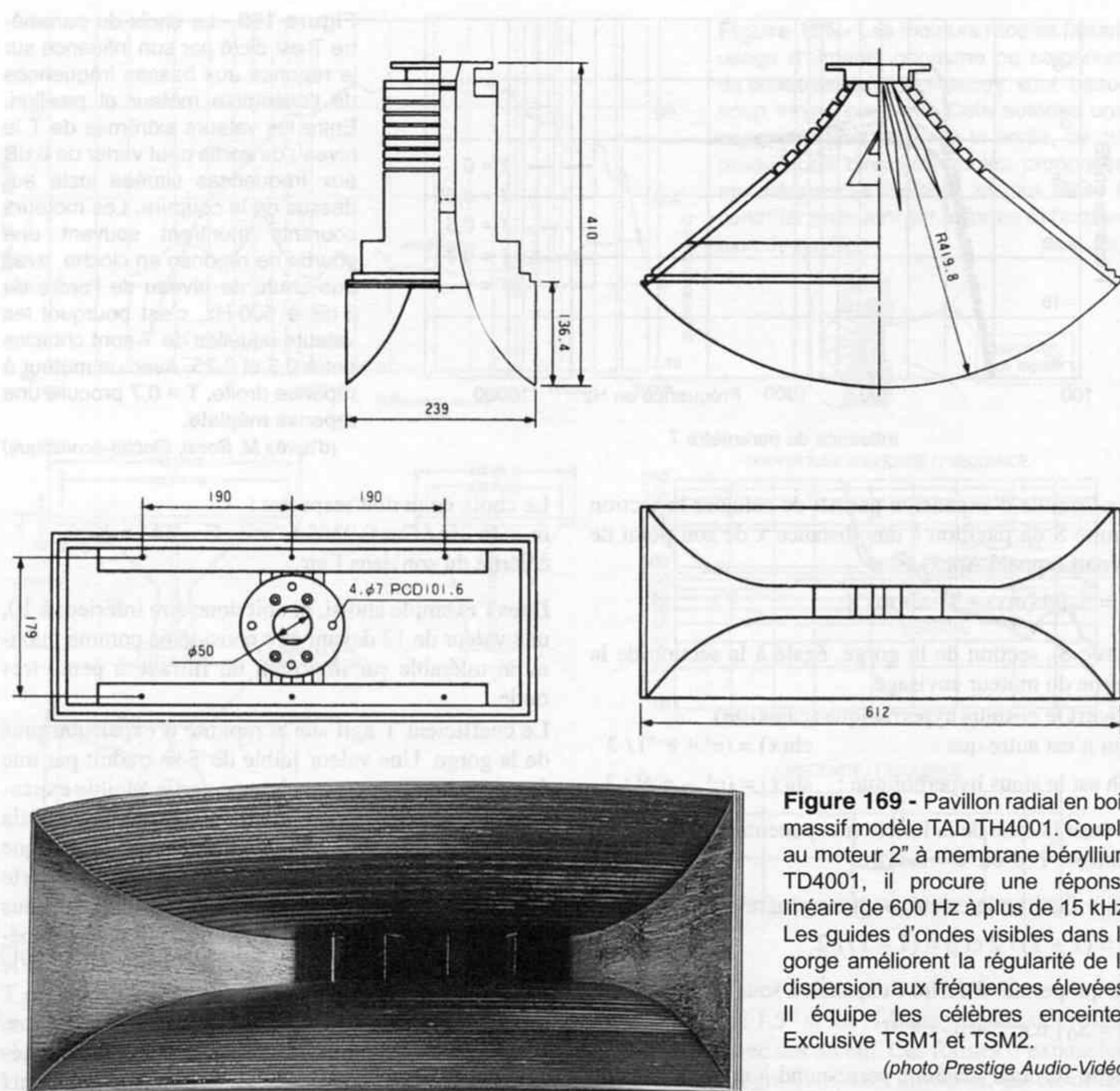


Figure 169 - Pavillon radial en bois massif modèle TAD TH4001. Couplé au moteur 2" à membrane béryllium TD4001, il procure une réponse linéaire de 600 Hz à plus de 15 kHz. Les guides d'ondes visibles dans la gorge améliorent la régularité de la dispersion aux fréquences élevées. Il équipe les célèbres enceintes Exclusive TSM1 et TSM2.

(photo Prestige Audio-Vidéo)

mètre T est effectué, un choix judicieux permettant de compenser assez précisément cette chute de niveau (voir l'ouvrage de M. Rossi : Electro-Acoustique).

Les formules d'expansion les mieux adaptées à une utilisation domestique, procurant un couplage plus naturel avec la salle d'écoute, semblent bien être de type mixte, hyperbolique puis exponentielle. La partie hyperbolique près de la gorge procure une expansion lente, la partie exponentielle présentant ensuite une expansion seulement horizontale, la hauteur de la section du pavillon étant constante dans cette zone. Cette forme évite la rupture de continuité rencontrée sur les pavillons exponentiels s'ouvrant directement et brutalement à l'angle choisi de 60, 90 ou 120°. Au contraire le pavillon mixte, dit Hypex, amène progressivement

le profil à l'angle souhaité, souvent proche de 90 à 100°. À partir de là, l'expansion horizontale devient linéaire ou presque, les faces latérales du pavillon étant pratiquement planes, et c'est l'expansion verticale qui apparaît, de progression assez rapide. Les réalisations en bois massif de ce type d'expansion sont assez aisées et donnent, avec les moteurs appropriés, des résultats exceptionnels.

On peut remarquer sur les dessins en coupe du pavillon TAD TH4001, figure 169, que la première partie, près de la gorge, démarre par deux petites pentes visibles sur la vue de côté en coupe. Elles assurent le passage progressif de la section circulaire à la section rectangulaire avec une légère rupture de profil, mais sans discontinuité de la vitesse d'expansion. Cette portion

X mm	largeur	rayon
0	49	24,5
10	50	19
20	51,5	14
30	53	10
40	55	7
50	57	5
60	60	3
70	63	2
80	66	1
90	72	0
Passage rond/rectangle		

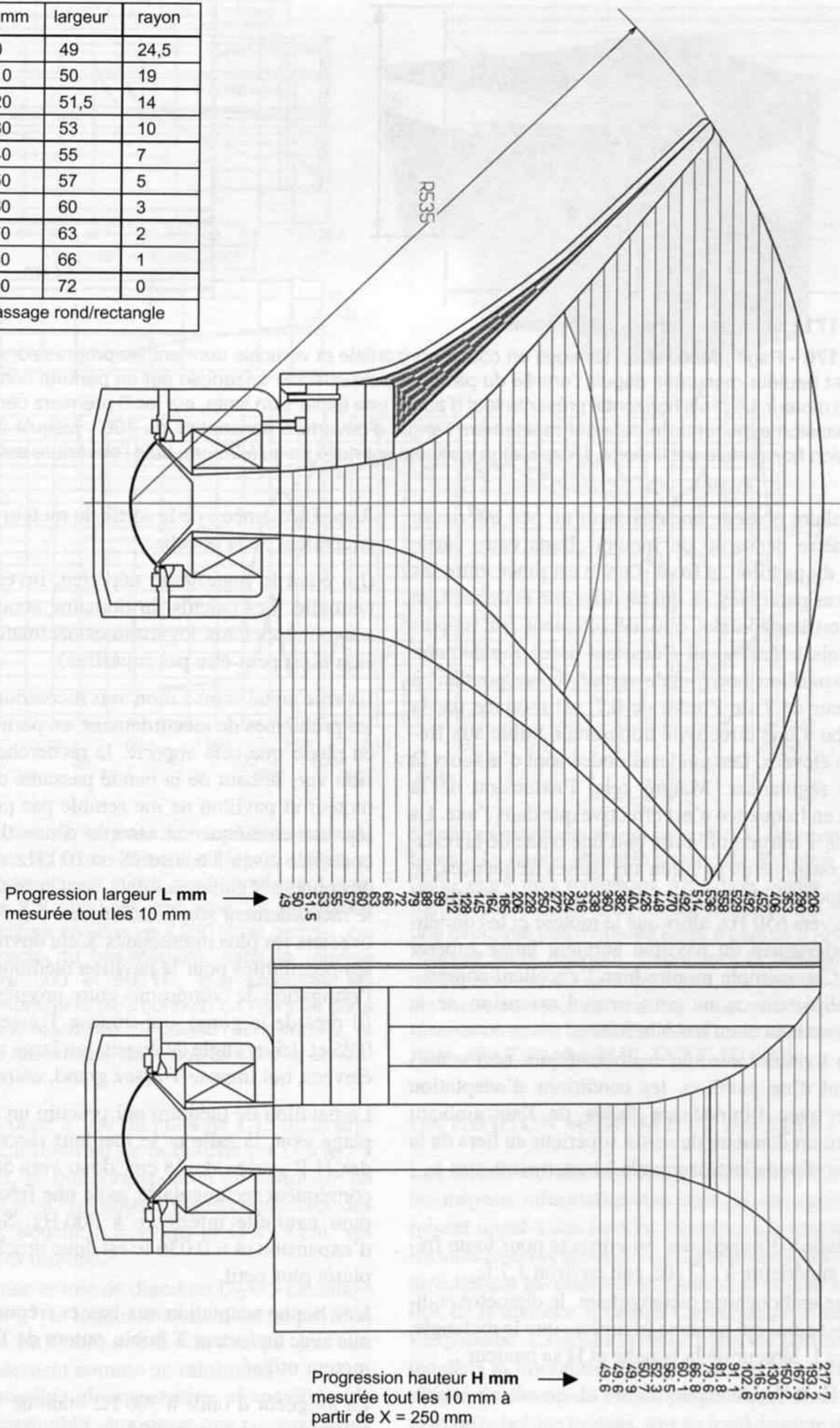


Figure 170 - Vues en coupe donnant les dimensions du pavillon médium pour moteur 2".

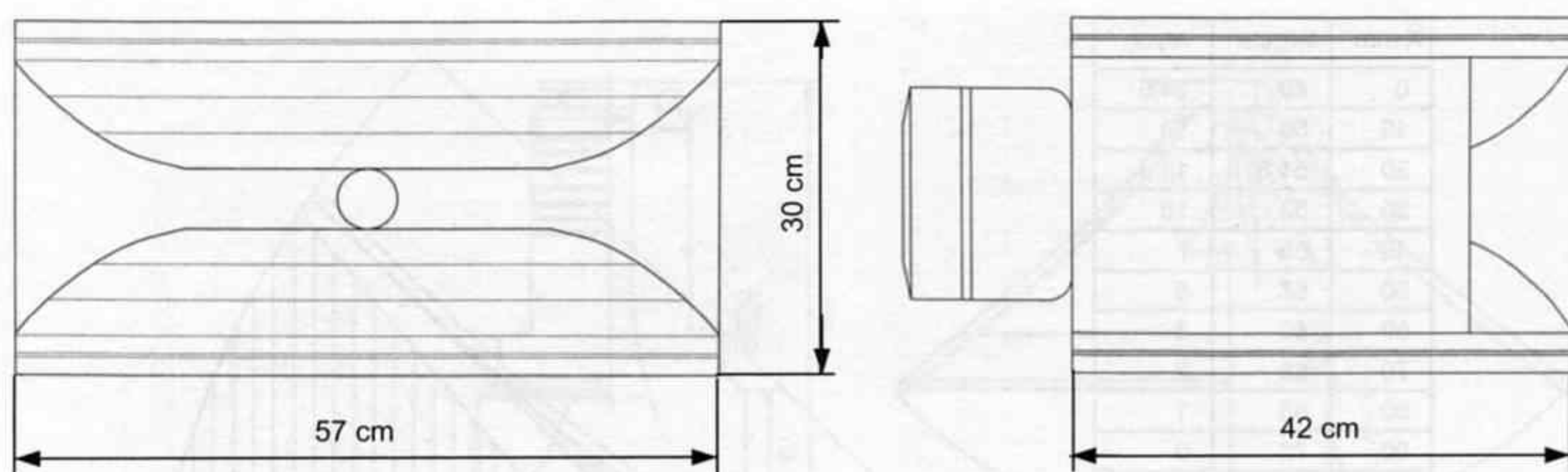


Figure 171 - Vues extérieures et dimensions.

Figure 170 - Page précédente : les vues en coupe horizontale et verticale donnent les progressions des cotes de largeur et hauteur mesurées depuis l'entrée du pavillon. L'expansion horizontale est en parfaite continuité avec la sortie du moteur. Le profil horizontal présente tout d'abord une expansion lente, sur les 8 premiers centimètres, puis une expansion exponentielle donnant rapidement l'angle d'ouverture horizontale de 100° , jusqu'à 25 cm, ensuite l'expansion horizontale est linéaire. L'expansion verticale est nulle jusqu'à 25 cm, puis l'ouverture est assez rapide.

rectangulaire possède une épaisseur un peu inférieure au diamètre de sortie du moteur. Dans cette partie "plane" du pavillon le front d'onde est pincé entre les deux faces parallèles, ce qui favorise son étalement, sa dispersion horizontale, sans décollement par rapport aux parois latérales qui s'écartent assez rapidement. Cette expansion horizontale rapide, correspondant à une valeur de T de l'ordre de 0,7, est motivée par la recherche d'une directivité horizontale faible aux fréquences élevées. Les guides d'ondes sont d'ailleurs là pour la régulariser. Malgré cela, l'extension de la réponse en fréquence n'est effective que dans l'axe. La valeur de T introduit d'autre part une chute de la résistance acoustique du pavillon aux basses fréquences, ce qui a conduit à choisir une fréquence de raccordement du filtre vers 650 Hz, alors que le moteur et les dimensions extérieures du pavillon auraient laissé espérer mieux. Cet exemple montre bien l'excellent compromis réalisé, car on ne peut avoir l'extension de la réponse en haut et en bas à la fois.

Pour en terminer avec les mathématiques nécessaires au calcul d'un pavillon, les conditions d'adaptation correcte avec l'impédance faible de l'air ambiant imposent un diamètre de sortie supérieur au tiers de la longueur d'onde la plus grande à transmettre, soit :

$$D > \lambda_c / 3$$

L'adaptation d'impédance est correcte pour toute fréquence supérieure à $\sqrt{3} \cdot f_c$ soit environ 1,7 f_c .

Pour une embouchure rectangulaire, le diamètre équivalent est celui qui a même périmètre que le rectangle, soit avec L largeur de la bouche et H sa hauteur :

$$D = 2 \cdot (L + H) / \pi$$

La longueur minimale du pavillon est alors :

$$L = (2 / m) \cdot \ln(D / D_0) \text{ qui donne } L \text{ en m.}$$

Avec D_0 diamètre de la sortie du moteur et D diamètre équivalent de la bouche.

(\ln étant le logarithme népérien, inverse de l'exponentielle. Les calculs du domaine acoustique faisant souvent appel aux logarithmes décimaux, cette précision n'est peut-être pas superflue).

La voie aiguë étant à mon avis incontournable, malgré les problèmes de raccordement, en particulier de mise en phase que cela apporte, la recherche d'une extension vers le haut de la bande passante d'un ensemble moteur et pavillon ne me semble pas prioritaire. Une réponse en fréquence assortie d'une directivité bien contrôlée jusqu'à environ 8 ou 10 kHz, avec une pente de coupure régulière au-delà, sont suffisantes pour que le raccordement soit possible vers 5 à 7 kHz, avec les tweeters les plus intéressants. Cela ouvre de nombreuses possibilités pour le pavillon médium, en éliminant l'obligation de compromis entre progressivité du profil près de la gorge, qui impose T assez faible, entre 0,25 et 0,5, et angle de dispersion large aux fréquences élevées, qui impose T assez grand, entre 0,7 et 1.

Le pavillon de médium qui procure un excellent couplage avec la salle et le meilleur raccordement avec des H-P graves de 38 cm, donc vers 500 Hz, est par conséquent rectangulaire, avec une fréquence de coupure naturelle inférieure à 300 Hz. Son coefficient d'expansion $m = 0,036 f_c$ est donc proche de $m = 9$ ou plutôt plus petit.

Une bonne adaptation aux basses fréquences est obtenue avec un facteur T faible, autour de $T = 0,5$ selon le moteur utilisé.

La longueur d'onde à 300 Hz étant de 1,15 m, le diamètre équivalent minimal de la bouche est $D = \lambda_c / 3$ soit **$D = 38 \text{ cm}$** , ce qui correspond à un périmètre de

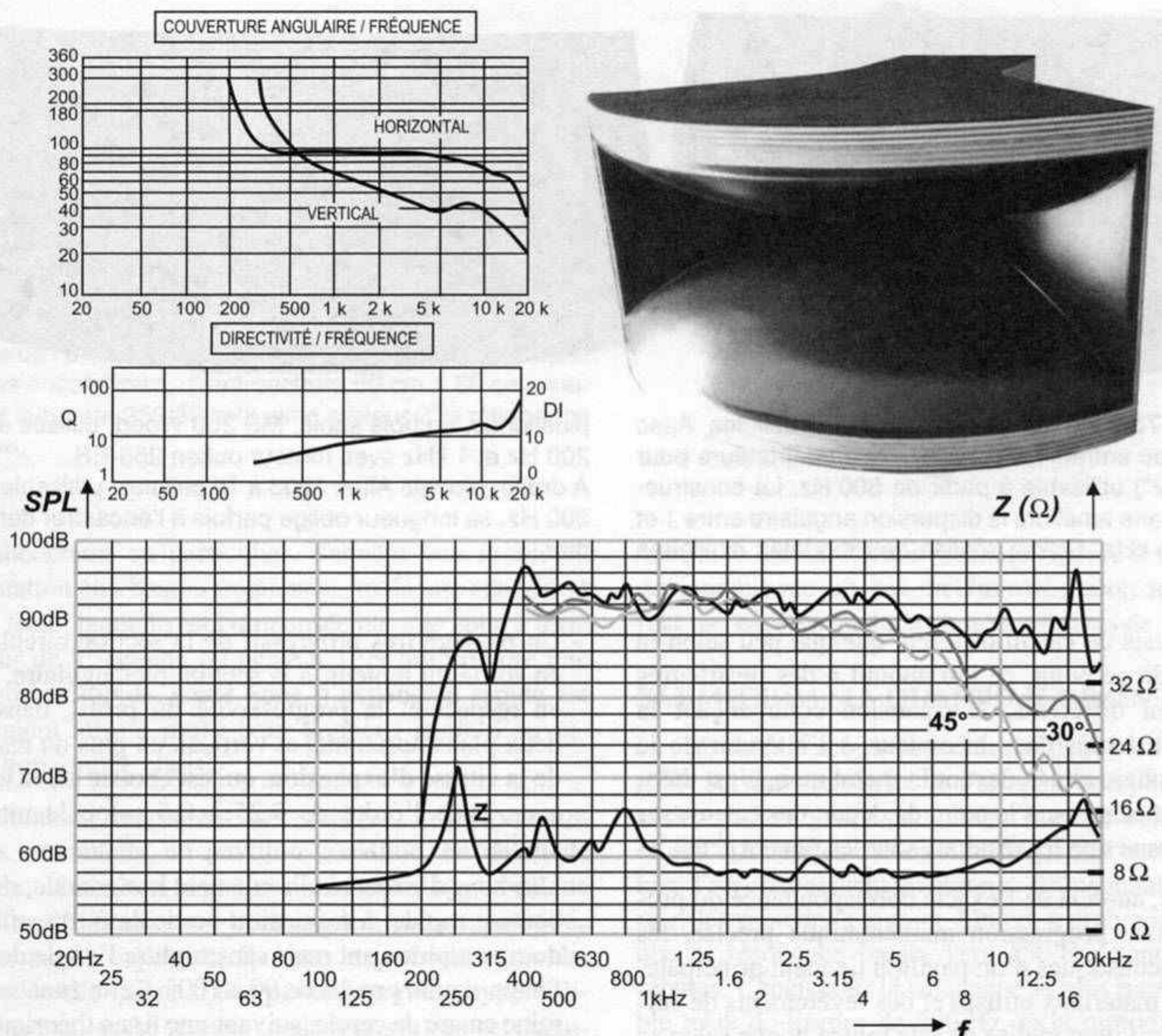


Figure 172 - Caractéristiques de directivité estimées par des mesures en proximité sous différents angles, et réponse en fréquence en milieu semi-réverbérant avec moteur Beyma 2" Cp850-Nd, non filtré. La résonance principale du moteur se situe vers 260 Hz et permet une restitution correcte du bas-médium, sans la retenue habituelle entre 500 et 800 Hz, que procurent les moteurs de sonorisation plus connus. La réponse dans l'axe montre une réactance du pavillon vers 400 Hz, et une résonance mécanique du moteur à 17 kHz. La dis-

torsion se manifeste en dessous de 500 Hz environ à fort niveau. La bande utilisable s'étend de 500 Hz à 10 kHz, l'aigu étant trop métallique avec une pointe de résonance. Les courbes à 30° et 45° hors de l'axe montrent une directivité peu marquée jusqu'à plus de 5 kHz et une coupure sans accident. Cependant la directivité augmente très vite au delà de 8 kHz. Ce pavillon donnera les meilleurs résultats avec les moteurs à fréquence de résonance assez basse équipés d'une membrane métallique, JBL 2" 2440 à 2446, TAD 2" TD 4001.

La longueur d'onde à 300 Hz étant de 1,15 m, le diamètre équivalent minimal de la bouche est $D = \lambda_c / 3$ soit **D = 38 cm**, ce qui correspond à un périmètre de $P = 1,20$ m qui peut être obtenu par exemple avec des dimensions de bouche $L = 45$ cm et $H = 15$ cm, ses valeurs étant des minima.

En supposant une entrée de diamètre $D_0 = 5$ cm adaptée à un moteur 2", la longueur totale d'un tel pavillon est $L = (2 / 10) \ln (38/5)$ soit **L = 0,4 m** qui doit être considérée également comme un minimum.

Il est donc possible de construire un pavillon de dimensions raisonnables autorisant une coupure assez basse.

UN PAVILLON MÉDIUM EN... MÉDIUM ?

Les calculs nécessaires sont grandement facilités par les moyens informatiques actuels, et des applications faisant appel à des feuilles Excel sont disponibles sur les sites Internet spécialisés (HornResp). Elles donnent directement les dimensions hauteur et largeur en fonction de la distance X depuis l'apex, point de départ de l'expansion. La position de ce point est parfois discutée dans la littérature, qui le situe soit au niveau de la plaque de champ du circuit magnétique, donc dans le plan de la bobine mobile, soit au fond du cône de sortie du moteur, sur la pièce de phase, soit sur la membrane.

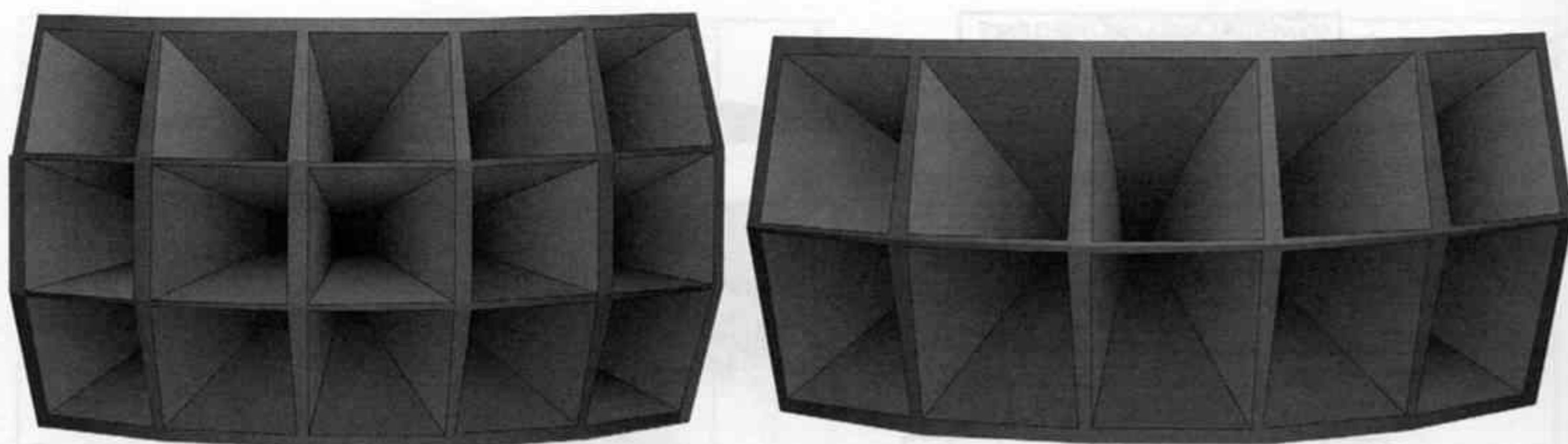


Figure 173.a - À gauche, pavillon 15 cellules Altec 1505, avec entrée 1,4" (il existe des adaptateurs pour moteurs 2") utilisable à partir de 500 Hz. La construction cellulaire améliore la dispersion angulaire entre 1 et plus de 5 kHz. Onken réalisa des modèles similaires

plus longs, en bois sablé, MS 200 Wood, utilisés entre 200 Hz et 1 kHz avec moteur onken 255-ES.

À droite, modèle Altec 1003 à 10 cellules, utilisable dès 300 Hz. sa longueur oblige parfois à l'encastrer dans le mur.

Les résultats de calcul diffèrent quelque peu selon la position de ce point, ce qui aboutit à des profils très légèrement différents. L'expansion commençant la plupart du temps dans le moteur, à l'intérieur de la pièce de phase située devant la membrane, c'est théoriquement en prenant le point de départ des calculs sur la membrane que les résultats sont les plus exacts.

Toutefois, au-delà de l'exakte correspondance du profil avec une progression mathématique précise, les qualités acoustiques d'un pavillon tiennent principalement des matériaux utilisés et des revêtements de surface. Un pavillon réalisé en tôle mince donne selon sa forme, son profil, des sonorités typées de cloche, de casserole ou de lessiveuse, à cause des résonances des parois, excitées par le passage des ondes de pression. Les pavillons épais et massifs construits en pierre ou en bois éventuellement sablé, sont beaucoup plus inertes et les sonorités obtenues, si elles restent dépendantes de la forme d'expansion, sont beaucoup plus neutres.

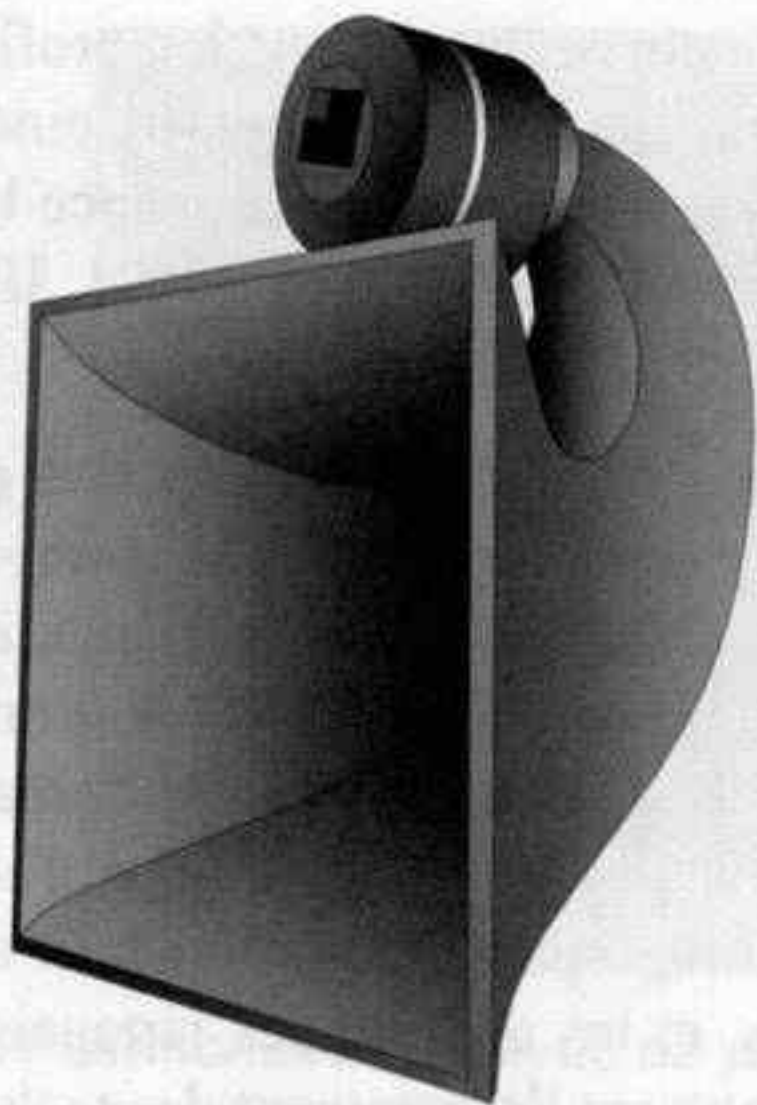
En bas de la bande, c'est principalement l'adaptation d'impédance entre le moteur à chambre de compression et la charge que représente le pavillon, qui conditionne les résultats. Cette adaptation correcte est liée au choix des paramètres d'expansion m et T et aux dimensions générales du pavillon. Ici encore, la miniaturisation ne donne rien de bon, la longueur d'onde ne pouvant être réduite.

En haut de la bande, c'est la directivité qui intervient sur les qualités sonores, d'autant plus si la salle n'est pas ou mal traitée acoustiquement. Cette directivité est également liée aux choix de départ des coefficients m et T . Après de multiples essais, modifications et comparaisons, les résultats les plus intéressants me semblent obtenus avec des pavillons présentant :

- Un passage très progressif de la section circulaire, en sortie du moteur, à la section rectangulaire, ceci en respectant la progressivité du profil, dans les deux plans horizontal et vertical, en plus du respect de la vitesse d'expansion, qui est choisie assez lente, avec T de l'ordre de 0,25 à 0,5 selon le moteur choisi.
- Une zone d'expansion seulement horizontale, relativement rapide, à expansion verticale nulle, afin de donner rapidement mais sans rupture l'angle de diffusion voulu, proche de 90 à 100°. Cette zone se termine en arc de cercle, suivant une ligne théorique de front d'onde sphérique. Dans cette zone, le rapport largeur/hauteur croît progressivement. Une expansion quasi-exponentielle avec T proche de 1 permet d'atteindre rapidement l'angle choisi, de 90 à 100°.
- Une zone d'expansion verticale relativement rapide, débouchant sur une sortie en arc de cercle, toujours suivant des fronts d'onde sphériques. Dans cette zone, le rapport largeur/hauteur décroît progressivement. Une expansion rapide près de la bouche est donnée par une faible valeur de T , de 0,3 à 0,5.

Ces différentes zones peuvent suivre des lois d'expansion légèrement différentes, le coefficient m devant être à peu près constant, mais le coefficient T pouvant varier dans d'assez fortes proportions. En effet, un pavillon bien adapté en bas de sa bande, avec une valeur de T assez faible, présente une expansion lente se traduisant par une grande longueur et une directivité prononcée. Au contraire T élevé procure une expansion rapide mais au prix d'une chute de niveau aux basses fréquences. La difficulté est grande de raccorder des sections de pavillon d'expansion différentes sans rupture de profil, cependant on peut dans ce cas bénéficier des avantages apportés par une faible valeur de T dans certaines zones, près de la gorge et de

Figure 173.b - Pour diminuer l'encombrement, il est possible de replier le pavillon, en s'inspirant des modèles Western-Electric du début du siècle. Au Japon, Sato réalisa plusieurs versions d'embouchure 1 m × 1 m, à la limite de l'utilisation domestique. À droite, modèle replié moins encombrant, d'embouchure 50 cm × 50 cm, couvrant la bande 250/800 Hz avec moteur 2" à résonance basse.



l'embouchure en particulier, donnant une meilleure adaptation aux basses fréquences, mais une expansion plus lente, laquelle est compensée par une zone à forte valeur de T, proche ou égale à 1, et qui procure une expansion rapide. Cette zone d'expansion rapide est utilement mise à profit pour donner l'angle d'ouverture horizontale choisi.

Au final en respectant ces quelques principes non figés, on obtient un pavillon constitué, en allant de l'embouchure vers la gorge, d'une partie hyperbolique avec angle d'ouverture horizontale constant, précédée d'une partie exponentielle sans expansion verticale, précédée elle-même d'une partie à nouveau hyperbolique passant de la section ronde à la section rectangulaire.

L'aboutissement de ces essais est le pavillon décrit figures 170 et 171. Sa construction est aisée, dessus et dessous étant réalisés à partir de 3 plaques de médium de 30 mm collées, puis découpées au profil horizontal, et limées au profil vertical avec contrôle par gabarit. Les flancs sont en médium de 30 mm, et la gorge est obtenue par collage de 3 plaques de médium de 22 percées puis collées à l'ensemble. Deux flancs en contreplaqué cintrables sont ajoutés, puis un sandwich de 2 multiplis de 15 mm avec liège de 3 mm est ajusté sur le dessous. Les espaces entre parois latérales et flancs sont remplis de sable fin et sec bien tassé, puis le dessus est réalisé comme le dessous. Une plaque de médium de 22 mm sert de couplage avec le moteur. Le profil est finement poncé et vérifié à l'aide d'un gabarit de carton dur découpé à 0,25 mm près. Le passage de la section circulaire Ø 49 mm à la section rectangulaire doit être très régulier et progressif, s'étendant sur une longueur de 100 mm environ. Optimisé pour moteur JBL 2" il s'adapte à d'autres moteurs de dimensions très proches, Fostex D502 Alnico, Beyma Cp 850 Nd. Le poids total atteint 30 kg environ et la

neutralité est excellente. L'image sonore est stable et profonde, avec un bas-médium très aéré, mais il ne faut pas espérer quelque chose au-dessus de 10 kHz.

BAS-MÉDIUM : LA QUATRIÈME DIMENSION ?

Les résultats d'écoute procurés par des pavillons construits suivant ces règles de l'art sont exceptionnels de réalisme. Les qualités du moteur sont prépondérantes, et des différences de sonorité flagrantes sont perçues lors d'un changement de moteur. D'une manière générale, les moteurs à aimant Alnico, membrane métallique et résonance basse, vers 250 Hz, sont les plus réputés. Cependant, la fréquence la plus basse utilisable reste de l'ordre de 500 Hz, et la reproduction du bas-médium est confiée à la voie grave, ce qui est loin de donner toute satisfaction. Un pas de plus est fait vers le réalisme avec les pavillons de bas-médium chargés de la bande limitée entre 150 à 300 Hz vers le bas et 600 à 1 200 Hz vers le haut. Cette zone est en effet à cheval entre les capacités de travail des haut-parleurs grave et des pavillons médium, les premiers ayant un peu de mal à reproduire avec rapidité, ouverture et légèreté les fréquences supérieures à 300 Hz, et les seconds étant un peu à la peine avec des fréquences inférieures à 800 Hz.

Le passage à un système à 4 voies est une avancée décisive, irréversible. Cette quatrième voie libère totalement la restitution, mais ne peut être envisagée que si les trois voies existantes sont mises en œuvre de manière harmonieuse. Il n'existe pratiquement aucun système 4 voies clef-en-main, et la réalisation de la voie de bas médium constitue en quelque sorte l'aboutissement de la démarche pour tout amateur. Les pavillons cellulaires figure 173 sont des modèles professionnels Altec de grande taille, étudiés pour s'adapter aux moteurs 2". Les dimensions imposées par les grandes longueurs d'onde reproduites rendent obligatoire la construction d'un pavillon replié, la plupart des

réalisations d'amateur se basant sur les profils développés par Western-Electric aux débuts du cinéma parlant, et utilisant des moteurs 2" à résonance basse les plus réputés : Onken 255ES, TAD TD4001, JBL, ALE ou Goto.

Le passage à la quatrième voie ne peut être envisagé qu'à partir d'un système à pavillons en multi-amplification active. La mise au point et le calage temporel, ou mise en phase, d'un système trois voies en filtrage passif pose déjà de gros problèmes et demande des compromis parfois très délicats. L'ajout d'une quatrième voie en filtrage passif compliquerait affreusement les réglages, et les audiophiles japonais qui s'y sont essayés, bien avant l'avènement des technologies numériques, faisaient usage soit de filtres passifs du premier ordre, éliminant toute difficulté de mise en phase, soit de filtres actifs à tubes réalisés sur mesure, et parfois configurables par insertion des composants requis, résistances ou capacités, dans des supports implantés sur le circuit. Fréquences de coupure, pentes, niveaux relatifs des différentes voies étant ainsi réglables facilement.

La plupart des amateurs qui sont allés jusque là ont auparavant passé de longues années à écouter, à modifier, à mettre au point, un système à pavillons à trois voies, jusqu'à en sentir les limites, jusqu'à les cerner avec précision. D'abord en filtrage passif, leur système a évolué vers la bi-amplification passive, avec un amplificateur plus adapté au registre grave, et un autre mieux associé au médium-aigu. Puis le filtrage actif, parfois numérique, a permis le passage à la tri-amplification, et a facilité la mise en phase acoustique, le terme de calage temporel étant plus exact.

C'est à partir d'un degré de réalisme déjà très élevé, très largement supérieur à ce qu'il est possible d'obtenir à partir de matériel traditionnel même réputé "haut de gamme", que le besoin d'une quatrième voie apparaît, ou plutôt s'impose, comme une évidence. Les progrès successifs ont petit à petit révélé un monde sonore dont la perception n'est pas homogène, un espace dont la transparence est inégale, des matières sonores dont l'épaisseur du grain est inconstante, un dessin rythmique dont la finesse du trait musical est variable.

Ces manques sont systématiquement localisés dans le secteur bas-médium, et sont clairement imputables au raccordement entre H-P graves d'une part, qui à cause de leur nécessaire grand diamètre, sont malheureusement incapables de monter avec légèreté au-delà de 250 à 400 Hz selon les modèles, et pavillon médium d'autre part, qui ne peuvent descendre aisément en dessous de 800 Hz, voire 1 kHz pour certains, à cause d'une résonance principale de l'équipage mobile

située trop haut ou d'une géométrie de pavillon favorisant une faible directivité aux fréquences élevées, et défavorisant par conséquent l'adaptation en bas de la bande.

La bande de fréquence située approximativement entre 300 et 800 Hz, et qui contient la majeure partie des informations musicales, la plus grande quantité d'énergie, est aussi la plus difficile à reproduire avec légèreté et fermeté. Le moindre traînage, la plus petite résonance, un léger manque de rapidité, ont inmanquablement des conséquences sur la reproduction de ce registre.

C'est donc le choix d'un raccordement vers 500 Hz qui doit être remis en cause. Ce choix s'est imposé par les limitations technologiques des voies grave et médium, limitations qui sont incontournables. Seul l'ajout d'une quatrième voie permet de couper le grave en dessous de 300 Hz environ, et de couper le médium au-dessus de 800 Hz environ. Cependant les voies de bas-médium sont très rares à respecter les impératifs fixés par la recherche du réalisme. Les haut-parleurs à rayonnement direct capables de relayer des graves de 38 cm avec le même rendement, tout en montant avec légèreté jusqu'à 800 Hz sont très peu nombreux, et les quelques modèles professionnels, de diamètre 20 à 25 cm, et de rendement proche de 100 dB/1 W à 1 m, procurent une famille de timbre, une ouverture sonore réduite, un léger manque de rapidité, qui ne s'accordent pas facilement avec les qualités d'un moteur à compression. Le raccordement est audible, et les défauts précédents qui s'épalaient sur une plage de fréquence assez large du bas-médium, se fondant ainsi dans la masse, sont remplacés par un défaut plus ponctuel, situé à une fréquence où il est encore plus facilement perçu.

Pour cette voie de bas-médium, la masse de l'équipage mobile devrait rester inférieure à une dizaine de grammes, et le rendement supérieur à 98 dB/1 W à 1 m. Un tel rendement impose soit un diamètre important, de l'ordre de 20 cm, pour lequel une si faible masse est difficilement réalisable, soit une fréquence de résonance assez haute, de l'ordre de 250 Hz qui empêche une fréquence de coupure assez basse. Quelques large-bandes réputés, Supravox ou PHY-HP, réussissent le tour de force de réunir une masse mobile de 6 ou 7 g et une sensibilité de 98 à 100 dB. C'est pourquoi malgré des tentatives parfois assez réussies, les voies de bas-médium à rayonnement direct sont relativement rares, la plupart des audiophiles restant fidèles aux pavillons, qui imposent à ces fréquences des dimensions, un poids et un prix de revient qui constituent autant d'obstacles.

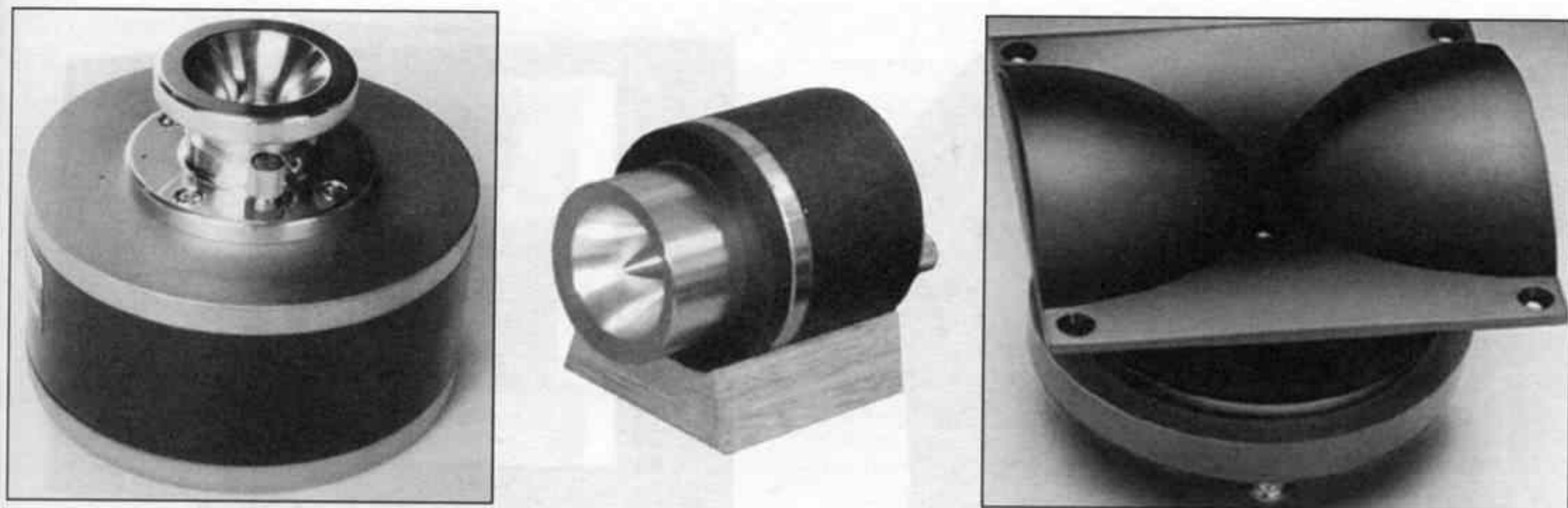


Figure 174 - À gauche, aimant Alnico de 150 mm et 15 kg, et plaques de champ en Permendur, procurant un champ de 2 T à ce tweeter Goto, diaphragme annulaire très mince, moins de $1/100^{\text{e}}$ de mm, et de faible diamètre, en métaux légers ou titane. Ce sont les points communs des modèles Onken OS5000, Goto et quelques très rares concurrents. Au milieu, le très célèbre Fostex T925, à bobine de diamètre 20 mm, utilisable entre 7 et... 40 kHz. Indémorable, incontournable.

Sa famille est nombreuse, avec de petits frères nettement plus accessibles, FT50 ou FT90 en supertweeters ($f_c > 8$ kHz) mais aussi de plus grands, T945 ou T950 en diamètre 40 mm utilisable entre 4 et 16 kHz (Impact garanti) et des cousins à diffraction T825 ou 845, avec une fente élargissant la directivité. La famille JBL utilise les mêmes principes, avec le 2402 à ogive, le 2405 à fente ou le modèle 2404H à droite, équipé d'un pavillon biradial $100^{\circ} \times 100^{\circ}$.

(documentations des constructeurs)

L'INSOUTENABLE LÉGÈRETÉ DE L'AIGU

En ce qui concerne les voies aiguës, les considérations établies jusqu'ici se retrouvent, avec la nécessité d'un rendement élevé, d'une membrane légère, d'un amortissement mécanique assez faible, et d'un amortissement électrique très élevé, donc d'un champ magnétique intense, et d'une excursion la plus faible possible imposant l'usage d'un pavillon. Autant pour les voies médium on peut hésiter à faire usage de pavillons car des alternatives sont possibles, autant pour les fréquences supérieures à 6 kHz, je ne vois que très peu de tweeters capables de rivaliser avec les modèles à pavillon métallique. Une unanimité s'est établie depuis plus de 25 ans autour des tweeters Fostex, à membranes et pavillons en aluminium, et dont les seuls concurrents se comptent sur les doigts de la main et se nomment JBL, Onken, Kato. En particulier le modèle Fostex T925 constitue une référence incontournable. Les seuls problèmes posés par ces transducteurs concernent leur filtrage, qui est abordé dans le sous-chapitre suivant, et... leur prix.

La seule alternative connue semble bien être le tweeter à ruban, qui finalement sous une forme différente apporte une solution du même genre. En effet, le ruban métallique très léger est mû par un champ magnétique très intense, et en cela le tweeter à ruban s'apparente au tweeter à diaphragme annulaire. L'adaptation de la surface vibrante à la faible impédance de l'air, qui est réalisée par la chambre de compression associée au pavillon dans le tweeter à compression, est réalisée par

un transformateur adaptateur d'impédance monté en amont du haut-parleur, dans le cas du ruban. C'est finalement la position de l'adaptateur d'impédance qui diffère, et donc sa technologie : adaptateur acoustique situé en aval ou adaptateur électrique situé en amont.

On peut bien sûr discuter des qualités et défauts de chacun des modèles les plus réputés, mais il me semble plus exact de dire que c'est la mise en œuvre qui fait la sonorité du tweeter :

- Le montage et le bafflage ou le support, qui en transmettant des vibrations parasites perturbent le fonctionnement extrêmement délicat de ce transducteur : les excursions maximales de sa membrane sont de l'ordre du $1/1\,000^{\text{e}}$ de mm dans la dernière octave !
- Le câblage qui apporte indéniablement une couleur au registre aigu, trop adoucie, floue, ronde avec les câbles trop capacitifs ou avec effet de mémoire, trop brillante, scintillante avec certains câbles argentés.
- Le filtrage qui en pratique est souvent loin de donner les fréquences de coupure, les pentes et les variations de phase prévues par le calcul, fut-il informatisé. Une mise au point du filtre in-situ est indispensable et aboutit à une suppression de certaines colorations imputées au tweeter. La fréquence de coupure des tweeters à compression est très souvent choisie trop basse, ce qui se traduit par des distorsions passagères donnant un son projeté et dur dans la bande de 5 à 8 kHz. L'ajustage très précis de leur niveau est nécessaire, ainsi que leur mise en phase rigoureuse.

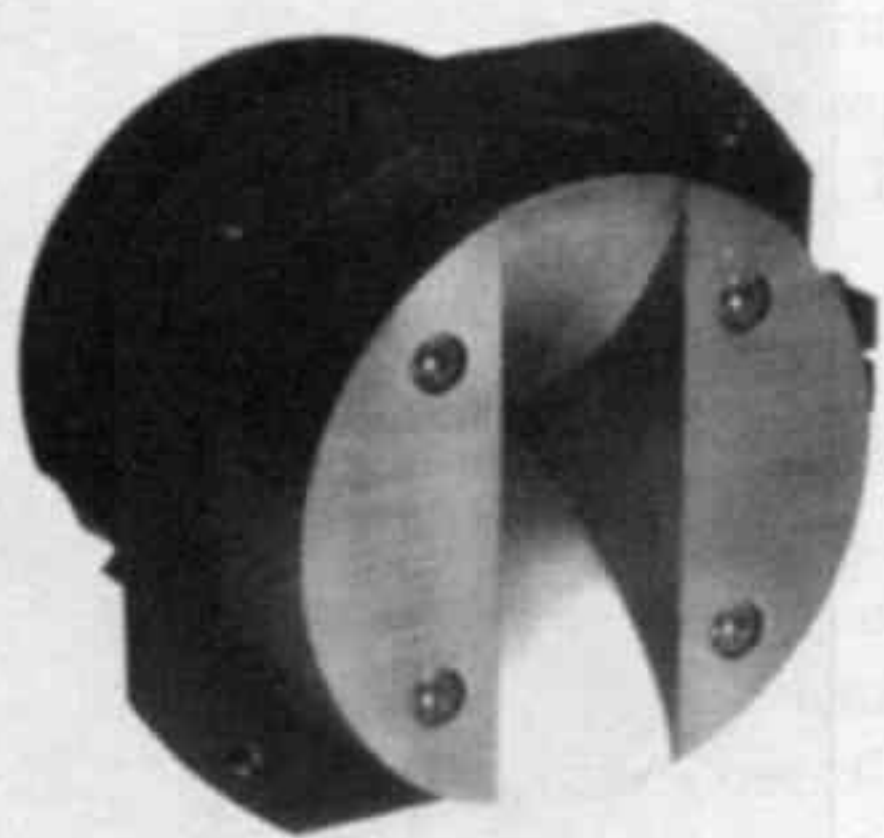
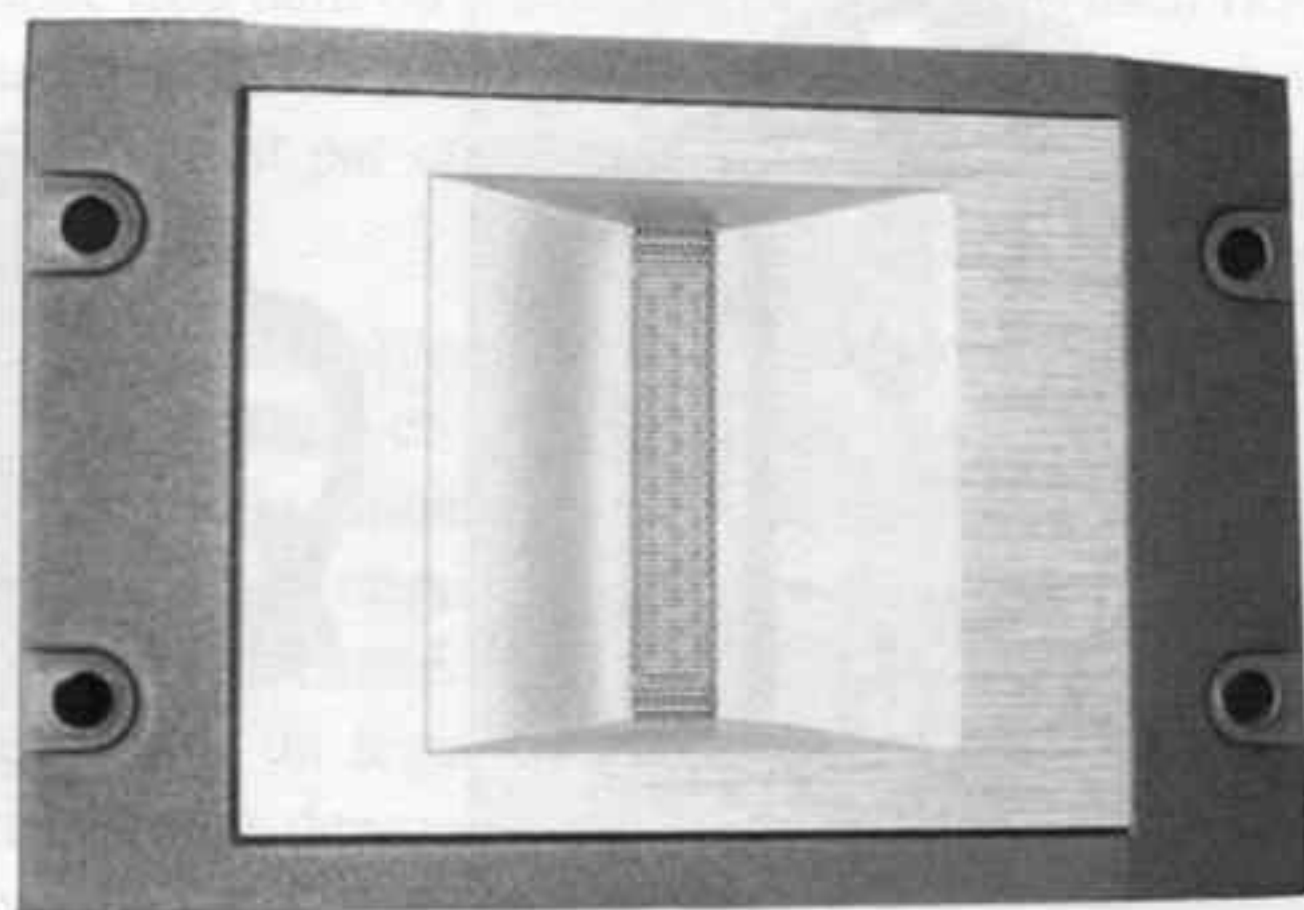


Figure 175 - Le tweeter TAD ET-703 ci-dessus à gauche est une véritable chambre de compression, avec pièce de phase à fentes concentriques et pavillon usiné en aluminium massif. Son diaphragme en béryllium pèse 0,07 g et l'aimant au cobalt produit une induction de 2 T. Sensibilité de 107 dB, 45 kHz de bande passante. Autre technologie à droite avec son cousin TAD-PT-R9, successeur du fameux PT-R7. Sensibilité de



105 dB et bande utile démarrante vers 3 kHz, autorisant ainsi une coupure autour de 4 à 5 kHz seulement. La faible impédance du ruban nécessite un transformateur adaptateur, intégré dans le boîtier. Ce sont les difficultés de réalisation de ce transformateur qui limitent la diffusion de cette technologie, la seule à concurrencer sur son propre terrain celle des compressions à diaphragme annulaire. *(documentations du constructeur)*

L'importance de la voie aiguë est décisive quant au rendu de la matière sonore. Le grain propre au matériau est en partie rendu par de très faibles signaux de fréquence élevée et d'amplitude faible, dont les relations de phase particulières rendent compte précisément de "ce qui vibre". Un tweeter trop amorti, ou trop lent c'est-à-dire ayant un temps d'établissement trop long, a tendance à gommer ces signaux, à rendre le grain trop lisse. Les bruits de frottement tels celui d'un archet, rendu souvent non perceptible lors de la reproduction, ou le glissement des doigts sur les cordes d'une guitare, transformé en sifflement, sont très révélateurs de ce respect du grain. Cependant, la dynamique des signaux aigus est déterminante également dans le rendu du mouvement, en particulier sur les sons de pincement ou de percussion, et encore plus si l'instrument est métallique, triangle, cymbales etc. L'impact présente une crête de niveau incroyablement élevée et brève, pouvant dépasser 110 dB pendant moins d'une milliseconde sur un coup de cymbale, ou l'attaque d'une note de clavecin, instrument pourtant discret s'il en est ! Très peu de tweeters sont capables de retranscrire cet impact, la puissance électrique pouvant être transformée étant limitée à moins d'une dizaine de Watt dans le meilleur des cas. C'est donc un rendement de l'ordre de 105 dB/1 W à 1 m qui est requis pour ce transducteur. Les plus réputés affichent jusqu'à 118 dB/1 W à 1 m ce qui représente un rendement de presque 50 %, limite théorique. Quelques modèles incontournables apparaissent figures 174 à 177, et au-delà du son typique de chacun d'eux, tous se situent à mille lieues au-dessus des dômes, qu'ils soient de tissu,

de titane, de quoi que ce soit... Propreté extrême, aération fantastique, légèreté et impact, pureté de cristal, sont les qualificatifs qui témoignent de l'étonnement des personnes écoutant pour la première fois un tweeter de ce type. Revenir à un dôme ensuite est... triste.

UN PAVILLON, SINON RIEN ?

L'amateur au budget ou à l'espace limité peut choisir une voie médium à rayonnement direct, de diamètre 17 cm environ. Un diamètre différent pose des problèmes de raccordement soit avec la voie aiguë, soit avec la voie grave aussi très peu de liberté est autorisée autour de ce choix. La sensibilité doit être aussi proche que possible de celle de la voie grave, même si la multi-amplification autorise un réglage des niveaux relatifs. Une valeur inférieure à 95 dB/1 W à 1 m ne permet pas d'accéder à un réalisme quelconque, la dynamique des attaques étant alors trop tassée. Les haut-parleurs présentant les qualités requises sont rares, le modèle Audax PR170Z0 avec une sensibilité de 100 dB/1 W à 1 m me semblant bien adapté, ainsi que d'autres modèles Supravox, Fertin, PHY-HP ou PHL.

Le large bande si apprécié par les puristes offre des avantages énormes, à commencer par l'absence de filtrage, donc de rotation de phase, et par conséquent une cohérence temporelle irréprochable, procurant une aération de l'espace qu'aucun système multivoie non-cohérent ne peut espérer approcher. Cependant, en dessous de 100 Hz, le meilleur large-bande du monde ne fait pas de miracle, et sa membrane de diamètre



Figure 176 - Associé au 38 cm Davis 40RCA15 et au Supravox T215 en bas-médium, le tweeter à ruban Raven R3 avec ses 30 kg d'aimants offre une sensibilité de 100 dB et une possibilité de coupure aussi basse que 500 Hz ! L'avantage d'une membrane légère dès le registre bas-médium est évident, mais pour un tweeter à près de 2 000 Euros pièce, j'avoue hésiter... D'autant que ses petits frères R1, R2 et R2.5 sont excellents eux aussi. *(documentation H-P Systèmes)*

limité, sa bobine pas très longue pour cause de légèreté, l'empêche de rivaliser avec le premier 38 cm venu. Au-dessus de 5 kHz, c'est la directivité qui s'en mêle, et l'éventuel double cône perturbe les lobes, créant des irrégularités de réponse.

Entre 100 Hz et 5 kHz un bon large-bande est imbattable en naturel, en aération, à tel point qu'il sert de référence pour affiner les réglages de gros systèmes multi-amplifiés. Aussi une voie de médium réalisée autour d'un excellent large-bande constitue sans doute une alternative très intéressante aux pavillons. En l'épaulant en dessous de 100 ou 150 Hz par un caisson de grave de rendement identique, équipé d'un 31 ou d'un 38 cm, et au-dessus de 5 ou 6 kHz par un tweeter à compression genre Fostex, ou à ruban. Pour conserver l'absence de filtrage si bénéfique, la charge doit apporter une coupure basse naturelle en pente douce, aussi un baffle plan pas trop grand, de l'ordre de 1,50 m, est-

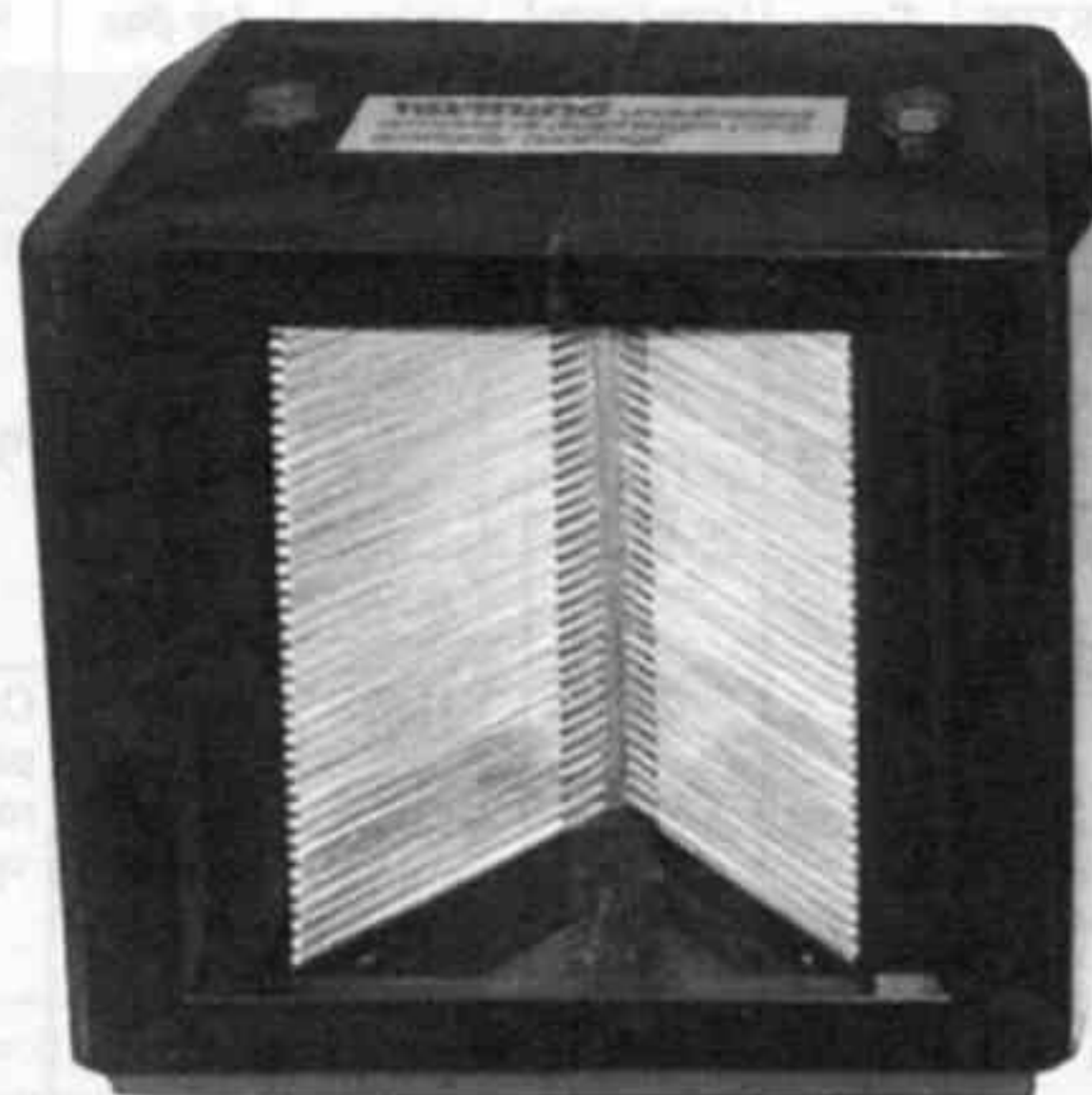


Figure 177 - La célèbre enceinte ESS (Electrostatic Sound System) AMT-1, révélée en 1973, était équipée du transducteur développé par le Dr Heil et baptisé Air Motion Transformer. Son successeur, modèle AMT-V2 apparu en 2000 reprend le même principe d'un ruban plissé en accordéon, et dont les plis se resserrent sous l'effet de la modulation, chassant l'air à grande vitesse. Le ruban est réalisé en polyéthylène, parcouru par un ruban mince en aluminium constituant le conducteur. Son impédance de 3,4 Ω environ permet son branchement sans transformateur. La sensibilité est de l'ordre de 98 dB, et la bande utile de 800 Hz à plus de 30 kHz. Cependant les flottements du ruban, non amortis autour de 1 kHz environ, rendent préférable à mon avis une coupure vers 1,5 à 2 kHz. Les pièces polaires en lamelles font office de lentilles de diffusion, procurant une très faible directivité au-dessus de 5 kHz. Des réalisations d'amateur font usage de 2, ou 4 AMT empilés avec coupure à 500 Hz.

il préférable. Aucune résonance de boîte ne risque d'apparaître ! Un filtrage au premier ordre par une self série peut s'avérer nécessaire pour obtenir un raccord correct avec le tweeter.

Les modèles pouvant convenir sont par exemple le Supravox 165LB, ou le très fameux Supravox 215-RTF, soit en bicône à utiliser seul, soit avec ogive centrale dans sa version 215-2000 de sensibilité 100 dB, dont l'atténuation naturelle très douce au-dessus de 6 kHz environ autorise un raccord aisé avec un Fostex FT50H, entre autres. PHY-HP propose également un large-bande, modèle H21LB15, de diamètre 21 cm à aimant Alnico.

Au final, c'est la voie grave qui demande le plus de réflexion, de remises en cause, de dépassement des limites implicitement posées. La voie médium demande des choix dictés par la directivité, impose parfois des calculs complexes sur la base d'un

REGISTRE	Freq.	Large-bande	minima	1er pas	Pav. 1"	Pav. 2"	2-graves	4 voies	5 voies	6 voies
Extrême-grave	16 Hz							Avec correction active		Ø 55 / 76 cm
Grave	63 Hz	Ø 25 cm ou 31 cm			Ø 31 cm	Ø 38 cm	2 Ø 31 cm ou 2 Ø 38 cm	2 x Ø 38 cm	2 x Ø 38 cm	2 x Ø 38 cm
Bas-médium	250 Hz	200	600	1,2 k	630	500	400	250	200	150
	630 Hz	Ø 17 cm ou 21 cm						Comp. 2" pav. 10 cellules	Comp. 2" pav. replié 50 x 50 cm	Comp. 2" pav. replié 1 m x 1 m
Médium	1,5 kHz	6 k	Ø 17 cm	Comp. 1" pavillon biradial court	Comp. 1" pavillon radial long	Comp. 2" pavillon radial long	Comp. 2" pavillon radial long	800	700	600
Haut-médium	4 kHz		3,5/4 k	Comp. Ø 2 cm ou ruban	6 k			Comp. 1" pavillon court	Comp. 2" pavillon radial long 2 k	Comp. 2" pavillon radial long 2 k
Aigu	10 kHz		Comp. Ø 2 cm ou ruban	7 k	Comp. Ø 2 cm	6 k	5 k	6 k	Comp. 1" pavillon court	Comp. 1" pavillon court
Extrême-aigu				Comp. Ø 2 cm	Comp. Ø 2 cm	Comp. Ø 2 cm	Comp. Ø 4 cm ou ruban	Comp. Ø 2 cm	7 k	7 k
Sensibilité		95	95	97	97	98	102	103	103	105
Limites		Directivité entre 3 et 6 kHz	Manque d'assise Directivité vers 3 kHz	Réglage niveaux relatifs	Réglage niveaux relatifs	Réglage niveaux relatifs	Bas-médium en retrait	Manque extrême-grave	Manque extrême-grave	La salle...

Figure 178.

compromis délicat, et la voie aiguë demande des sacrifices budgétaires. Les associations de voies capables de procurer un réalisme satisfaisant entrent à peu près toutes dans le tableau récapitulatif figure 178, qui ne constitue qu'un guide.

8.5 Séparation des fréquences

UNE THÉORIE PLUS RÉALISTE voir annexe 5, p. 355

Quelques rappels des définitions de base et du vocabulaire, que le lecteur bien informé peut survoler, me semblent constituer une bonne entrée en matière. On appelle filtre tout court, ou pour être plus complet filtre séparateur de fréquences, les circuits chargés d'aiguiller les bandes de fréquences vers chacun des haut-parleurs, que ces circuits soient actifs ou passifs, analogiques ou numériques (voir l'ouvrage de V. Dickason : EAHP).

Un filtre est caractérisé par sa fonction de transfert H, qui indique le rapport entre la tension en sortie Vs et la tension en entrée Ve : $H = V_s / V_e$

Le fait que ce sont des tensions qui sont considérées ne rend pas compte de la puissance transmise à travers le filtre, laquelle dépend du courant traversant le filtre, donc de l'impédance de charge en sortie du filtre,

impédance très variable avec la fréquence car constituée d'un haut-parleur très réactif surtout s'il est monté dans une enceinte résonante.

Selon la forme de la fonction de transfert, le filtre est qualifié de passe-bas, de passe-haut, ou de passe-bande (il existe d'autres types de filtre, non utilisés dans les enceintes acoustiques). Un ensemble de deux cellules passe-bas et passe-haut parfaitement complémentaires porte le qualificatif de passe-tout lorsque la somme vectorielle des deux signaux de sortie présente un niveau de tension constant, indépendant de la fréquence.

Les filtres passe-bas sont utilisés avec les haut-parleurs de grave, ainsi que pour la coupure haute du haut-parleur médium.

Les filtres passe-haut sont utilisés avec les haut-parleurs d'aigu ainsi que pour la coupure basse des haut-parleurs médium.

Les filtres passe-bande sont généralement obtenus par mise en série d'un passe-bas et d'un passe-haut, dans un ordre ou l'autre.

Les caractéristiques essentielles d'un filtre sont :

- Sa fréquence de coupure, généralement indiquée pour une atténuation de 3 dB du niveau de sortie.
- Sa pente d'atténuation, en réalité pente asymptotique vers laquelle la pente réelle tend pour les fréquences extrêmes. La pente réelle est souvent très

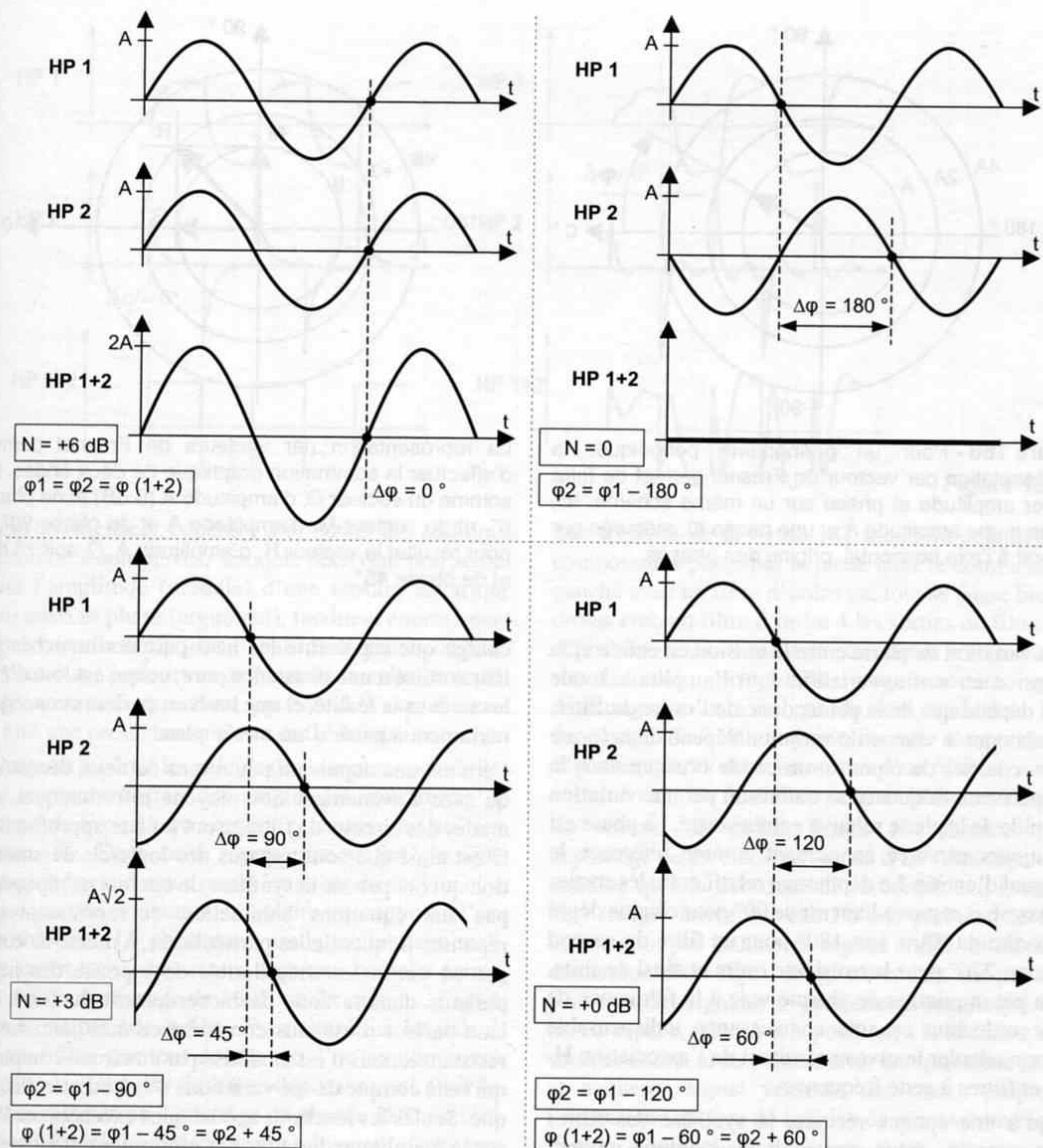


Figure 179 - Les courbes ci-dessus montrent comment les relations de phase interviennent dans "l'addition" de deux ondes. Ce sont les niveaux instantanés de pression acoustique qui s'ajoutent, et non les niveaux efficaces ou les niveaux de crête. Quand les maxima des deux ondes ne sont pas atteints au même instant, le niveau crête du résultat n'est pas égal à la somme des

deux niveaux crêtes. C'est ainsi que deux ondes déphasées de 90° donnent une résultante dont l'amplitude maxi est de $\sqrt{2}$ fois l'amplitude de l'une d'elles, soit un niveau de +3 dB. Si le déphasage passe à 120° , le niveau résultant est égal au niveau de chaque onde, et si le déphasage atteint 180° , le niveau résultant est... nul !

progressive et donc inférieure à la pente théorique aux fréquences proches de la coupure. La pente est de 6 dB par octave pour chaque degré d'ordre du filtre, soit 12 dB par octave pour un filtre du second ordre, 18 dB/oct pour le troisième ordre et ainsi de suite.

- Son coefficient de surtension, qui précise la forme de la réponse avant la coupure, forme pouvant présenter une bosse, correspondant à une résonance du circuit du filtre.

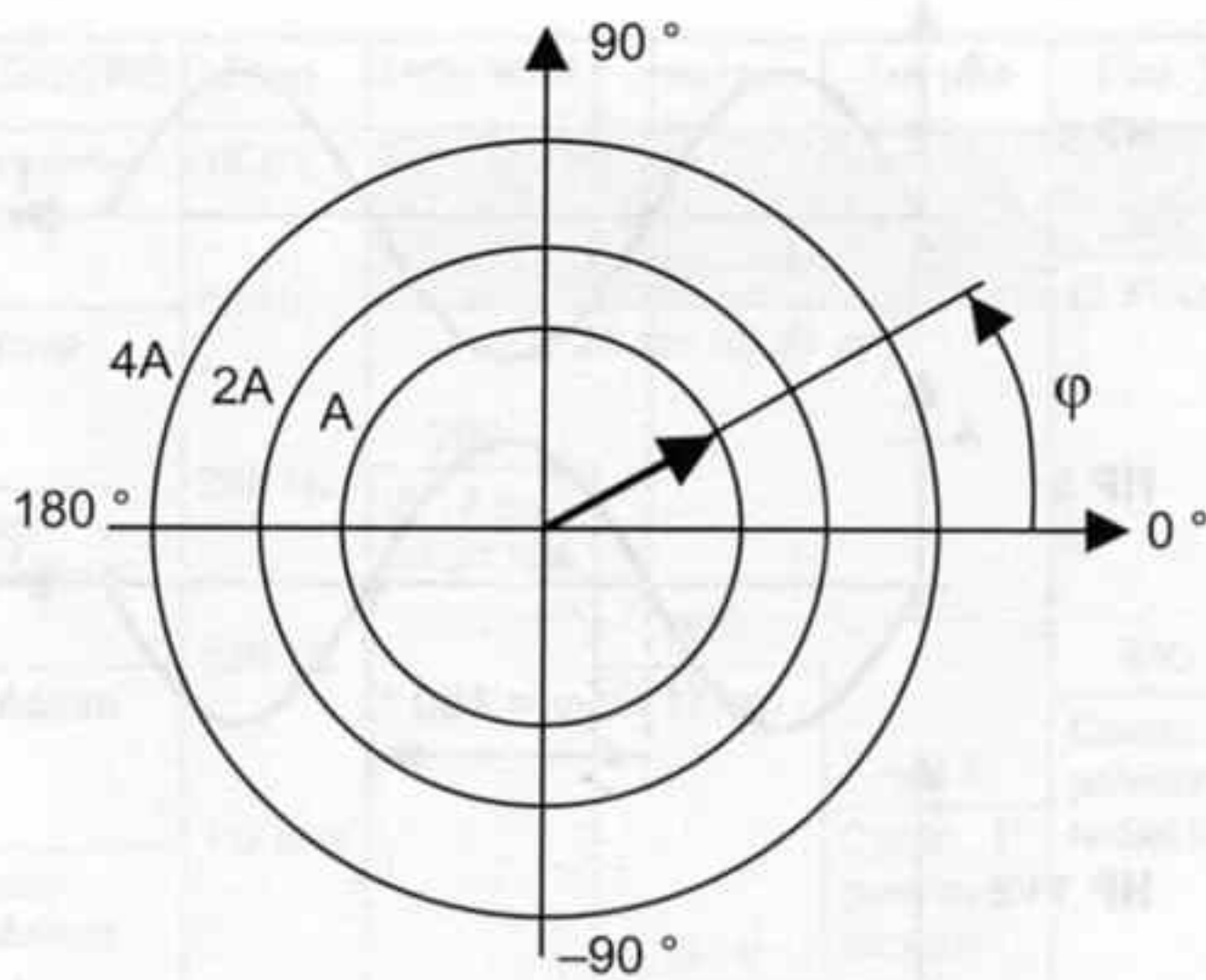
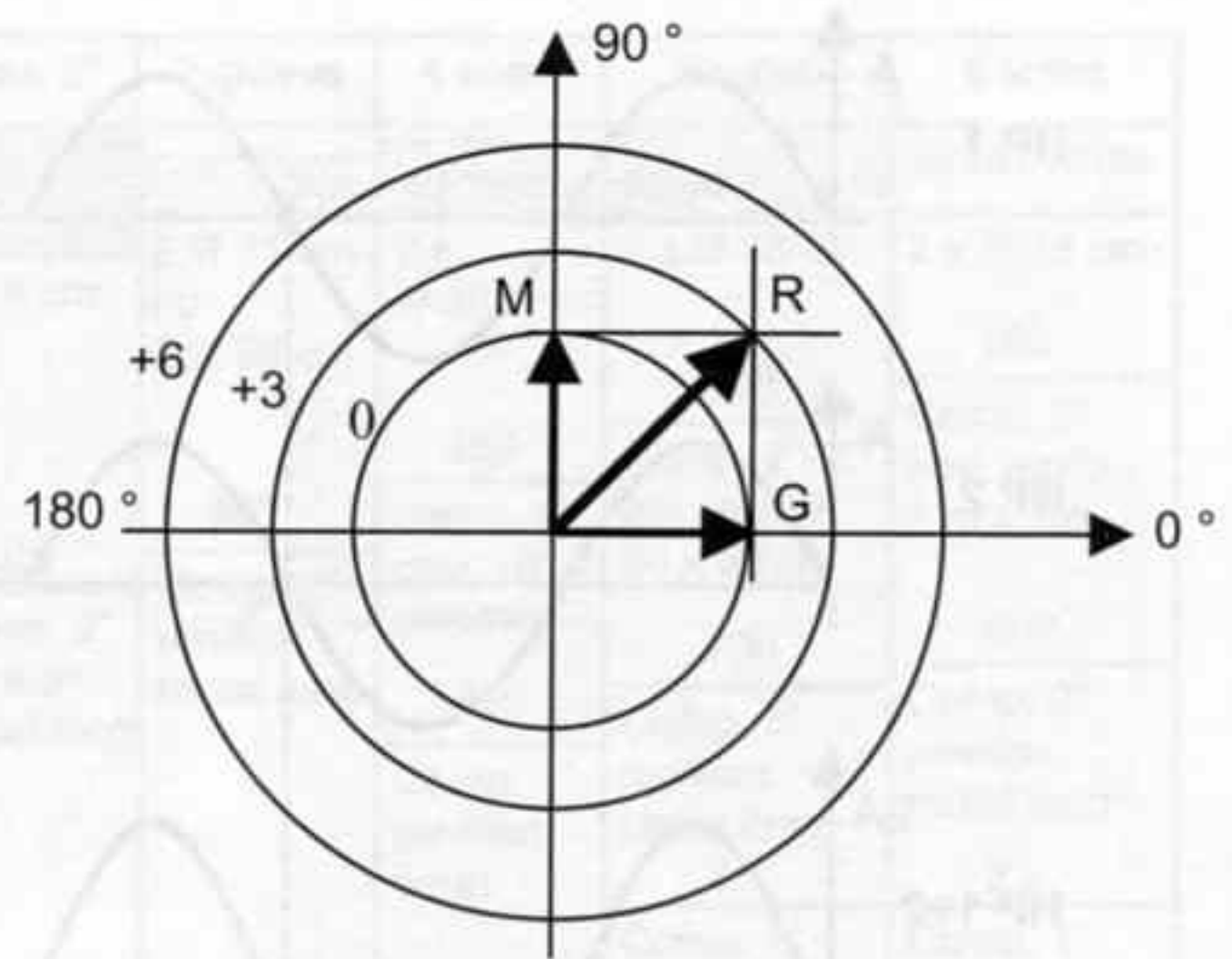


Figure 180 - Pour un phénomène périodique, la représentation par vecteur de Fresnel permet de faire figurer amplitude et phase sur un même schéma. Ici, l'onde a une amplitude A et une phase φ , mesurée par rapport à l'axe horizontal, origine des phases.



La représentation par vecteurs de Fresnel permet d'effectuer la sommation graphique de deux ondes. La somme du vecteur G , d'amplitude A (0 dB) et de phase 0° , et du vecteur M , d'amplitude A et de phase 90° , a pour résultat le vecteur R , d'amplitude $A\sqrt{2}$ soit +3 dB, et de phase 45° .

- Sa variation de phase entre la tension en entrée et la tension en sortie, variation dont l'amplitude totale ne dépend que de la pente, donc de l'ordre du filtre, mais dont la vitesse de variation dépend de la forme des courbes de réponse, un coude brusque dans la réponse en fréquence se traduisant par une variation rapide de la phase relative entrée/sortie. La phase est toujours mesurée en prenant comme référence le signal d'entrée. Le déphasage relatif entre les sorties passe-bas et passe-haut est de 90° pour chaque degré d'ordre du filtre, soit 180° pour un filtre du second ordre, 270° pour le troisième ordre et ainsi de suite. La phase relative de chaque voie à la fréquence de raccordement est une connaissance indispensable pour calculer le niveau résultant de l'association H-P et filtres à cette fréquence.

Jusqu'à une époque récente, la synthèse des filtres séparateurs de fréquence avait pour unique objectif l'obtention d'une courbe de réponse en fréquence parfaitement droite, mesurée dans l'axe en chambre sourde. Seules des considérations fréquentielles étaient prises en compte, et la phase n'intervenait que comme grandeur conditionnant l'addition des niveaux des deux haut-parleurs autour de la fréquence de raccordement du filtre. Un filtre était considéré comme correct si l'addition vectorielle, donc tenant compte de la phase relative des deux sorties, des niveaux de sortie électriques donnait un niveau constant. Autrement dit, le calcul des filtres se résumait à l'emploi d'équations particulières, de Butterworth, Bessel, Chebychev, ou Linkwitz-Riley parmi d'autres, établies de manière à respecter ces conditions. Ces équations permettent de calculer des filtres idéalisés, en supposant que la

charge que représente les haut-parleurs branchés sur leur sortie est une résistance pure, ce qui est loin d'être le cas dans la réalité, et que les haut-parleurs concernés rayonnent à partir d'un même plan.

Ce n'est que depuis un peu moins de deux décennies, qu'avec l'avènement des moyens informatiques, les études des circuits de filtrage ont pu être approfondies. C'est ainsi que sont apparus des logiciels de simulation qui ont permis la synthèse de circuits ne répondant pas aux équations habituelles, et fournissant des réponses fréquentielles particulières, à même de corriger en partie les irrégularités de réponse des haut-parleurs dans la zone de raccordement du filtre. Le haut-parleur n'est plus considéré comme une simple résistance, mais il est modélisé par un circuit complexe qui rend compte de ses variations d'impédance électrique. Seules les réactions acoustiques exercées par l'air sur la membrane, induites par effet microphonique ou par des retours d'onde dans la salle ne sont pas prises en compte par le modèle. Ensuite, ces logiciels en prenant en compte les coupures acoustiques naturelles des haut-parleurs, ont permis la synthèse de filtres électro-acoustiques de pentes élevées et régulières, avec très peu de composants. Ces circuits sont abondamment utilisés dans les enceintes deux voies, où le haut-parleur de grave doit monter à plus de 2 ou 3 kHz selon le tweeter choisi, lequel doit descendre aussi bas que sa résonance le permet. Calculer manuellement des filtres pour des fréquences auxquelles les haut-parleurs ne donnent pas une réponse plate est pratiquement impossible, seuls des essais itératifs fastidieux permettant de trouver un résultat acceptable, sans aucune assurance que ce résultat soit optimal.

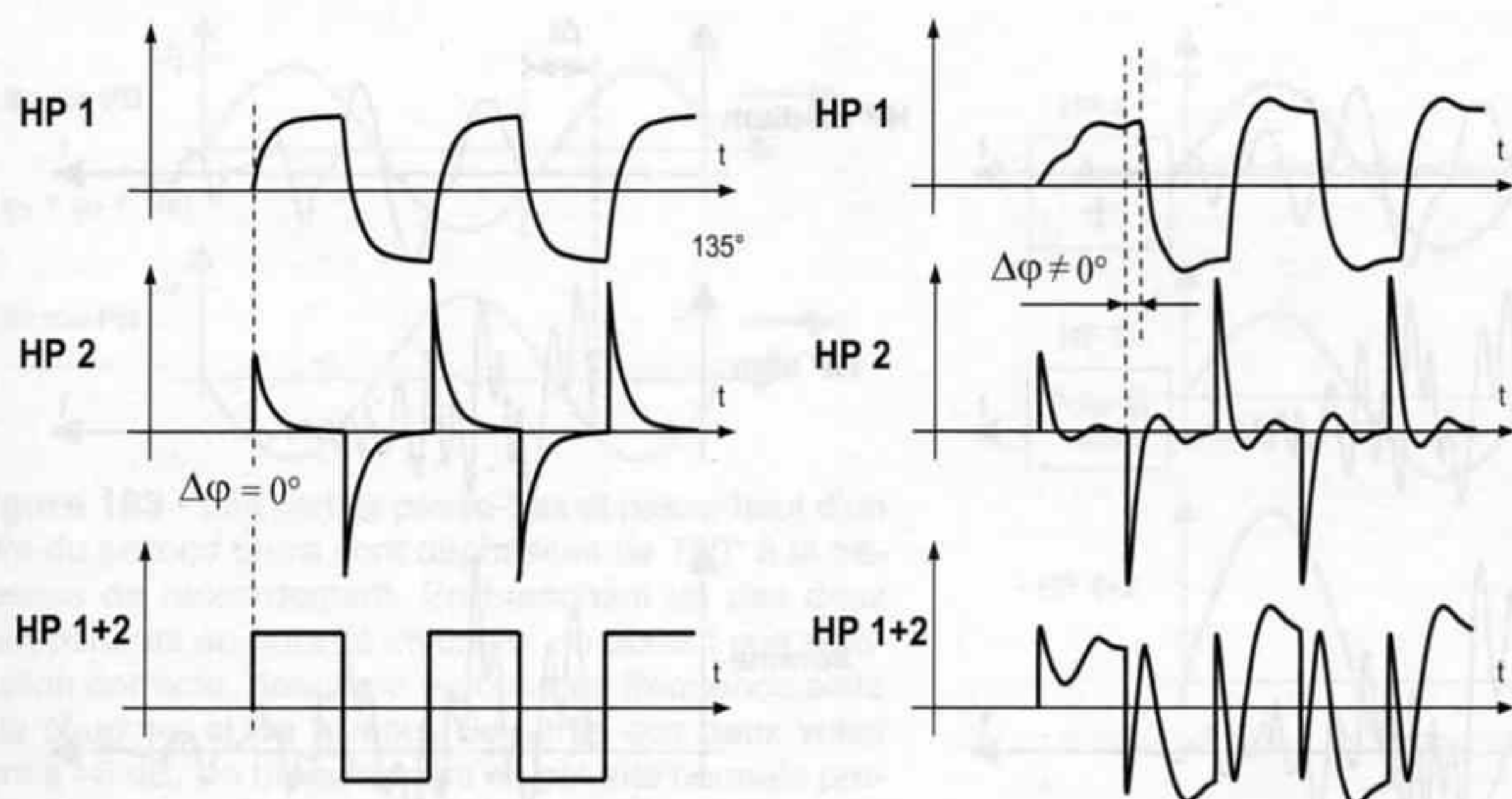


Figure 181.

Enfin ces logiciels, capables d'effectuer des additions de nombres complexes, lesquels décrivent non seulement l'amplitude (module) d'une tension électrique mais aussi sa phase (argument), facilitent énormément la prévision de la réponse globale du système constitué de deux haut-parleurs et de leurs deux cellules de filtrage, aussi bien dans l'axe que hors de l'axe, assurant de plus une présentation claire des résultats et courbes. C'est pour faciliter les calculs des sommes vectorielles que la représentation des amplitudes sous forme de vecteur de Fresnel, ou vecteurs tournants, est utilisée, figure 180. Dans cette représentation fort pratique, l'amplitude est donnée par la longueur du vecteur et sa phase par son orientation angulaire par rapport à l'axe des abscisses. Le phénomène ondulatoire étant cyclique, une rotation du vecteur d'un tour complet correspond à un déphasage de 360° , ou 2π radians, c'est-à-dire d'une période entière. Pour simplifier les calculs on considère que tout déphasage d'un nombre entier de périodes est équivalent à un déphasage nul. Pour les mêmes raisons, un déphasage de plus de 180° est indiqué par l'angle complémentaire, plus petit. Cette pratique appelée saut de phase fait qu'un déphasage de 270° devient équivalent sur le schéma à un déphasage de -90° .

Sur des signaux continus stables, de fréquence et d'amplitude fixes, un déphasage de 2π ne produit effectivement aucun changement. Cependant, d'un point de vue temporel, un déphasage de 2π correspond à un retard du signal d'une période. Sur des signaux transitoires, ou des fronts montants, un décalage temporel d'une période entière pour un ou plusieurs des formants aboutit à une forme d'onde très perturbée. De la même manière, un déphasage de 270° dans le sens positif, correspondant à une avance du point de vue temporel, devient un retard de -90° , ce qui est fort différent pour des signaux transitoires.

Les schémas de la figure 181 montrent comment les composantes passe-bas et passe haut se combinent. A gauche avec un filtre d'ordre un, tout se passe bien. A droite avec un filtre d'ordre 4 les sorties du filtre sont déphasées de 2π . Il suffit de considérer le retard induit sur la voie grave, HP1, pour constater qu'un déphasage de 2π n'est pas du tout équivalent à un déphasage de 0, d'un point de vue temporel : un déphasage de 2π entre les sorties d'un filtre séparateur entraîne une très forte distorsion de la forme d'onde.

Le schéma de droite, figure 181 montre qu'un déphasage de 2π entre les sorties d'un filtre séparateur entraîne qu'à la fréquence de raccordement, la moitié de l'énergie arrive en retard d'une période. Ce n'est absolument pas audible en régime stable, ni même au démarrage d'un signal long, s'étendant sur plusieurs périodes. Ces signaux ne contiennent aucune information d'espace, relative à la position, à la distance, de la source sonore, ni au volume d'air compris entre source et auditeur, lequel véhicule des ondes propres à l'acoustique du lieu de la prise de son. Aucune information d'impact, en position, force, vitesse, n'est contenue dans les signaux habituels de mesure.

Si au contraire les tests sont effectués sur des impulsions brèves, suivies d'une extinction porteuse d'informations sur la taille, la matière, les mouvements, alors les différences entre "départ en phase exacte" et départ "en phase à 2π près" sont flagrantes. La perception des impacts de coups de cymbales ou de triangle est très révélatrice à ce sujet. Si le respect de la phase entre médium et tweeter est complet, l'attaque est très nette et brève, avec un impact très "piqué" et l'aération, les sensations de matière, de présence d'un grand disque de métal, qui sonne grave (et oui !) avec des harmoniques métalliques extrêmement nombreuses, viennent immédiatement après l'attaque, dans un espace tout à fait transparent.

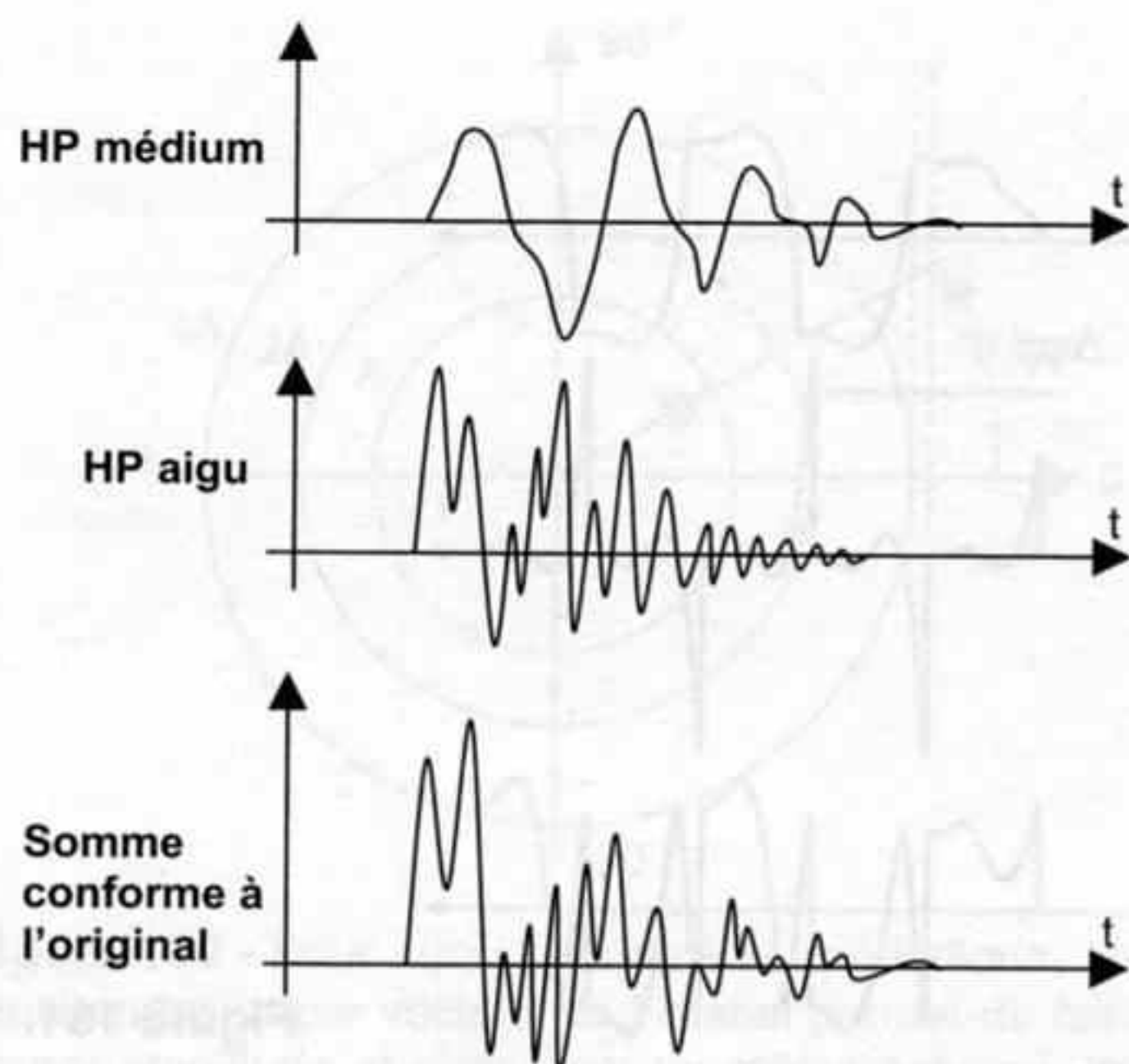


Figure 182a - Forme d'onde reconstituée par des H-P calés sur l'axe temporel. Les déphasages du filtre sont compensés.

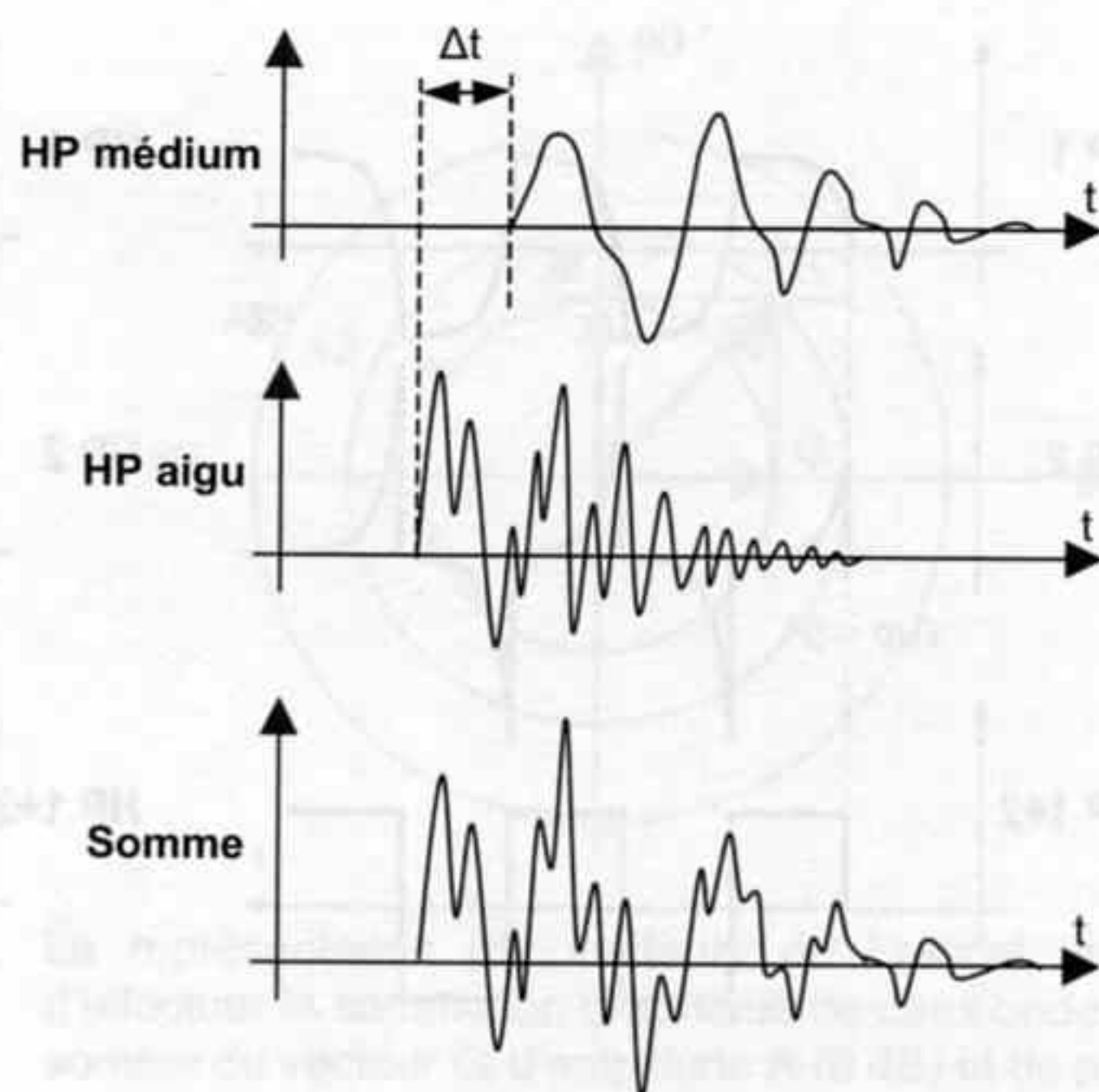


Figure 182b - Forme d'onde reconstituée par des H-P non calés sur l'axe temporel, conséquence des déphasages du filtre.

Lorsque le respect de la phase est réalisé à 2π près, l'attaque est moins nette, l'impact est légèrement flou, et surtout les informations qui suivent l'attaque sont moins aérées, comme si un rideau, un voile était tendu entre la cymbale, qui semble plus petite et plus mince, et l'auditeur, rendant l'espace moins transparent.

Une partie de l'énergie de l'attaque, très intense, est rendue en retard par le haut-parleur déphasé de 2π , et arrive donc à un instant où des informations capitales sont transmises. Les perturbations même faibles, induites sur ces signaux prépondérants ont un effet destructeur vis à vis du réalisme sonore.

J'ai déjà mentionné cet étalement de l'énergie sur l'axe du temps, provoqué par les réverbérations excessives dans la salle. L'effet dont il est question ici est exactement le même, la crête de l'attaque est rabotée et l'énergie manquante est étalée sur un laps de temps plus long. Bien sûr, ce point très délicat est sujet de polémiques, et le scientifique de bonne foi, équipé d'un laboratoire de mesure ultra-sophistiqué et informatisé, n'a pas encore mis en évidence un phénomène identifiable, mesurable, programmable. Il en conclut que la phase n'a pas d'incidence et qu'il n'y a rien à entendre de plus dans le respect total de la phase.

Aucun signal de test ne peut mettre ce problème en évidence, parce qu'aucun signal de test ne contient d'information susceptible d'être perdue ou perturbée par ces déphasages. Alors s'il faut en croire ses oreilles, un test sur signaux musicaux permet d'éclaircir rapidement ce point. À condition que la dimension temporelle ne soit pas perturbée par l'acoustique

réverbérante de la salle d'écoute, à condition que la transparence du système, liée à l'absence de bruits perturbateurs de toutes sortes, soit suffisante, à condition que la dynamique des transducteurs puisse rendre compte de l'impact réel d'une cymbale, 105 à 110 dB crête à 1 m, à condition que l'amortissement électrique des haut-parleurs, d'aigu en particulier, soit énorme, afin d'éliminer tout traînage, à condition que l'amortissement mécanique des membranes soit juste suffisant pour amortir toute résonance, à condition qu'aucune vibration parasite de parois ou résonance de cavité ne viennent occuper l'espace sonore, alors, alors seulement la mise en phase exacte est exactement perceptible.

Il est absolument inutile de peaufiner la mise en phase d'un boomer de 17 cm associé à son tweeter à dôme tissu, dans une pièce non traitée... C'est tout à fait possible mais il y a bien d'autres priorités !

Les sorties passe-bas de tous les filtres d'ordre 2 ou plus présentent un retard par rapport aux sorties passe-haut. Si les haut-parleurs rayonnent à partir d'un même plan, l'onde reconstituée par la somme acoustique des deux émissions est déformée, figure 182, surtout lors de l'attaque. L'énergie a été étalée sur l'axe temporel.

Les filtres d'ordre deux présentant un déphasage de 180° entre leurs sorties à la fréquence de raccordement, une pratique simpliste consiste à brancher l'un des deux haut-parleurs en polarité inversée, ce qui produit une inversion de phase de 180° de l'onde sonore émise par rapport au signal électrique appliqué à la bobine. La figure 183 montre, dans cette configura-

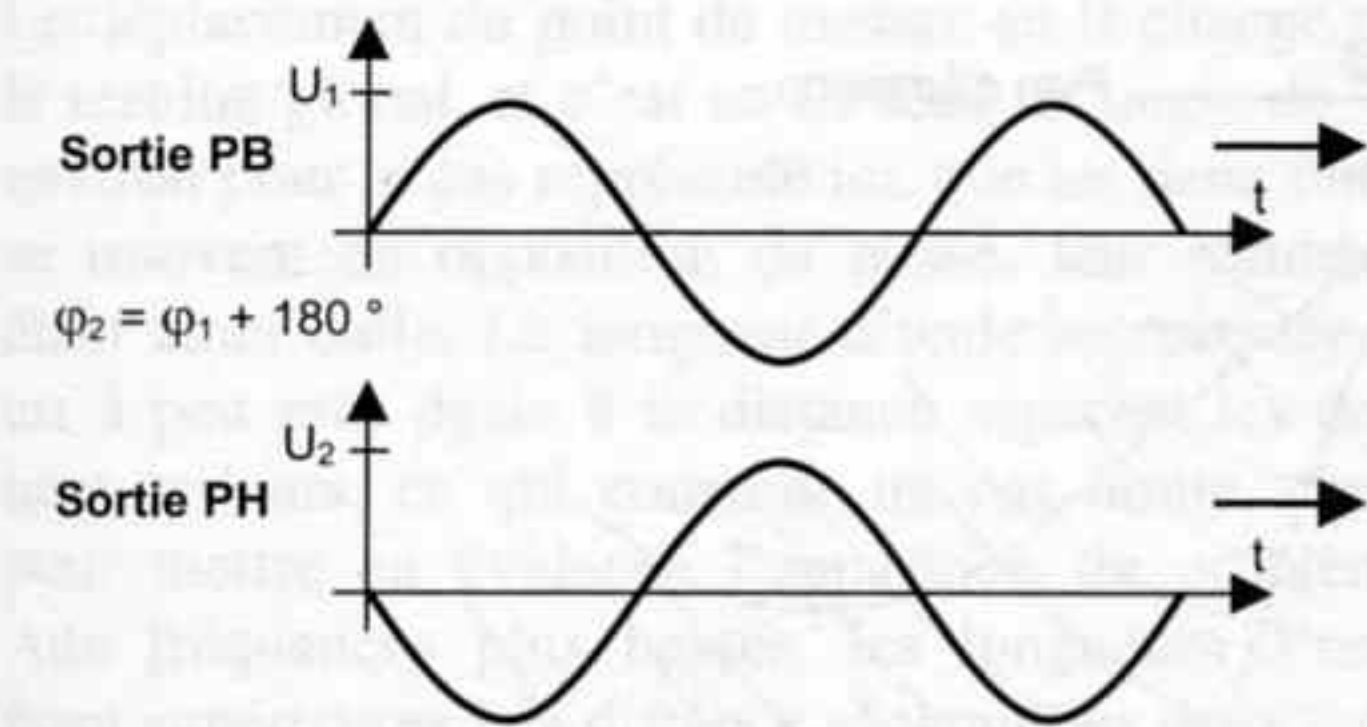


Figure 183 - Les sorties passe-bas et passe-haut d'un filtre du second ordre sont déphasées de 180° à la fréquence de raccordement. En branchant un des deux haut-parleurs en polarité inversée, on obtient une sommation correcte, donc une réponse en fréquence plate à la coupure, si les niveaux de sortie des deux voies sont à -6 dB. Un branchement en polarité normale produirait une annulation exacte à cette fréquence, donc un trou étroit dans la réponse en fréquence.

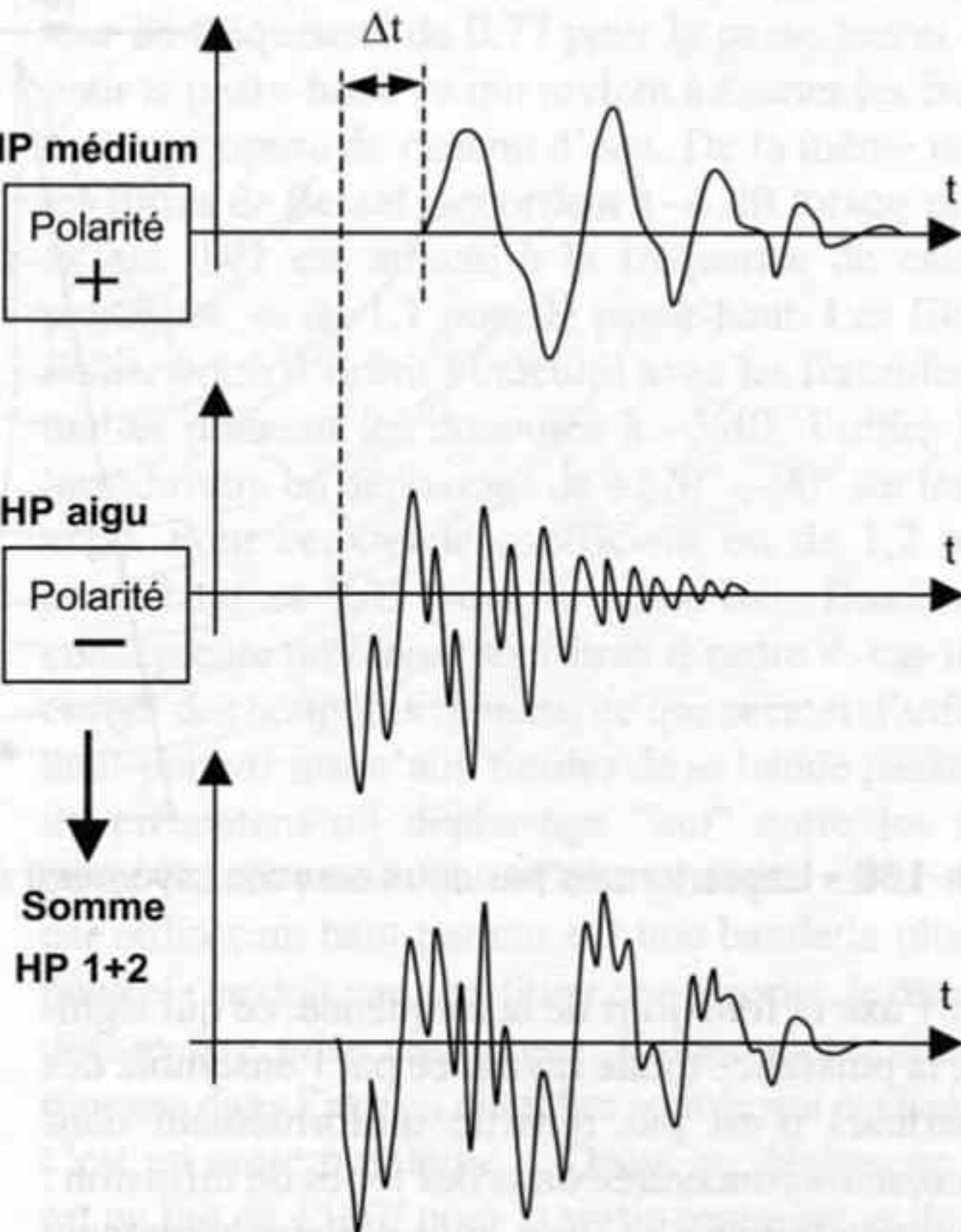
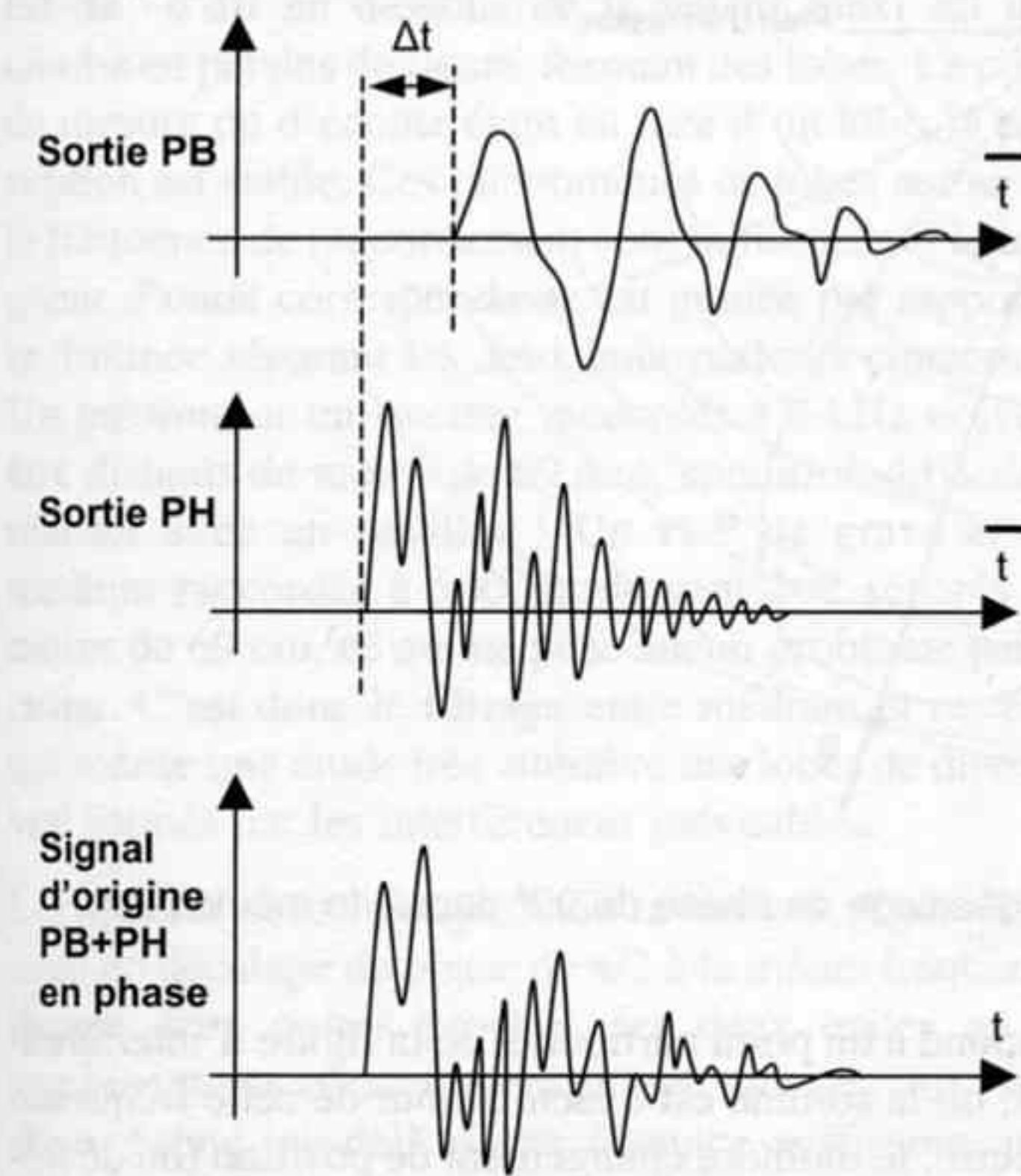
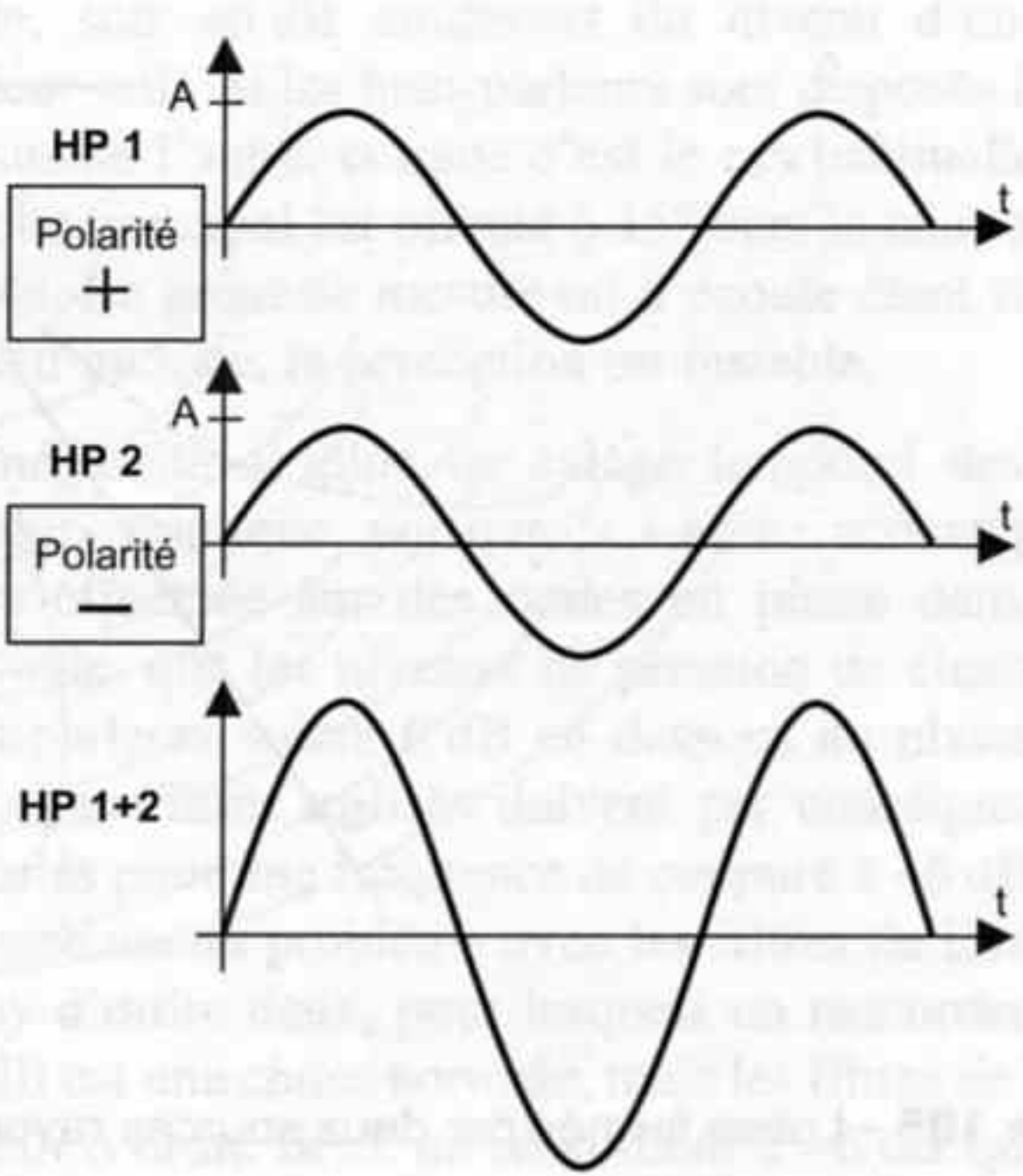


Figure 184 - Ci-dessus, voici comment un filtre du second ordre, avec polarité inversée d'un des haut-parleurs, réalise la sommation acoustique des deux ondes sonores. J'ai du mal à voir un rapport avec le signal original. On a beau me dire qu'on reconnaît quand même l'instrument, cela ne me satisfait pas : je

ne prétends pas reconnaître un instrument que je ne connais pas personnellement... je me contente de percevoir sa présence, sa taille, son énergie, et l'espace qui l'entoure. C'est parfois possible avec le signal de gauche. Avec celui de droite je ne me questionne pas...

tion, ce qui se passe lors de la sommation de deux signaux stables, et la figure 184 ce qui arrive lors de la sommation de deux signaux transitoires. Ce cas représente de manière éloquent la volonté de satisfaire des concepts mathématiques, théoriques, sans tenir compte de la réalité du fonctionnement, de la situation réelle et des impératifs qui y sont liés.

LES OREILLES EN FACE DES LOBES

Si l'obtention d'une courbe de réponse plate dans l'axe de l'ensemble haut-parleurs plus filtres est une condition nécessaire au bon fonctionnement, ce n'est en aucun cas une condition suffisante. La courbe de réponse peut en effet présenter des bosses ou des creux

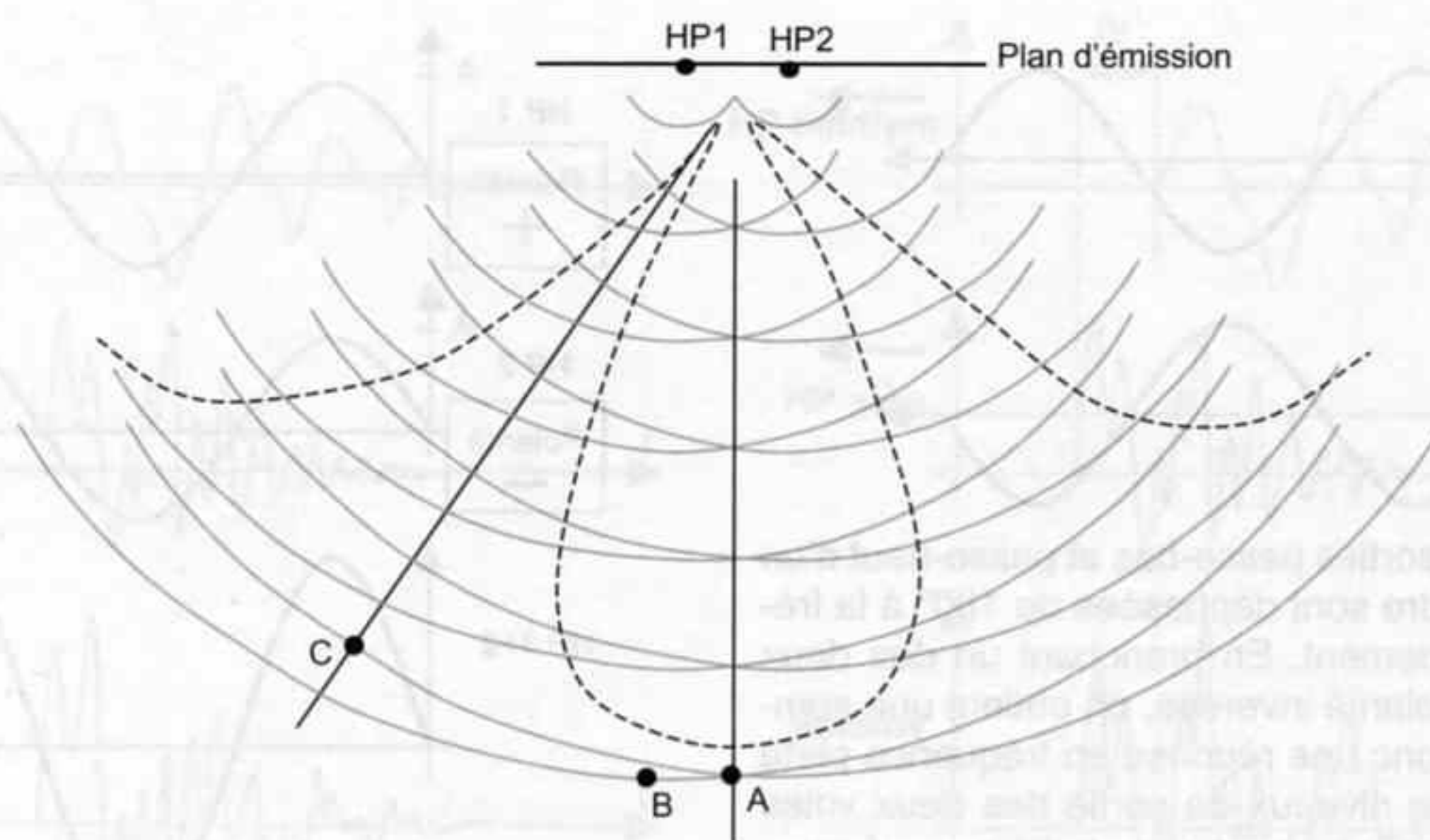


Figure 185 - Lobes formés par deux sources rayonnant en phase depuis le même plan.

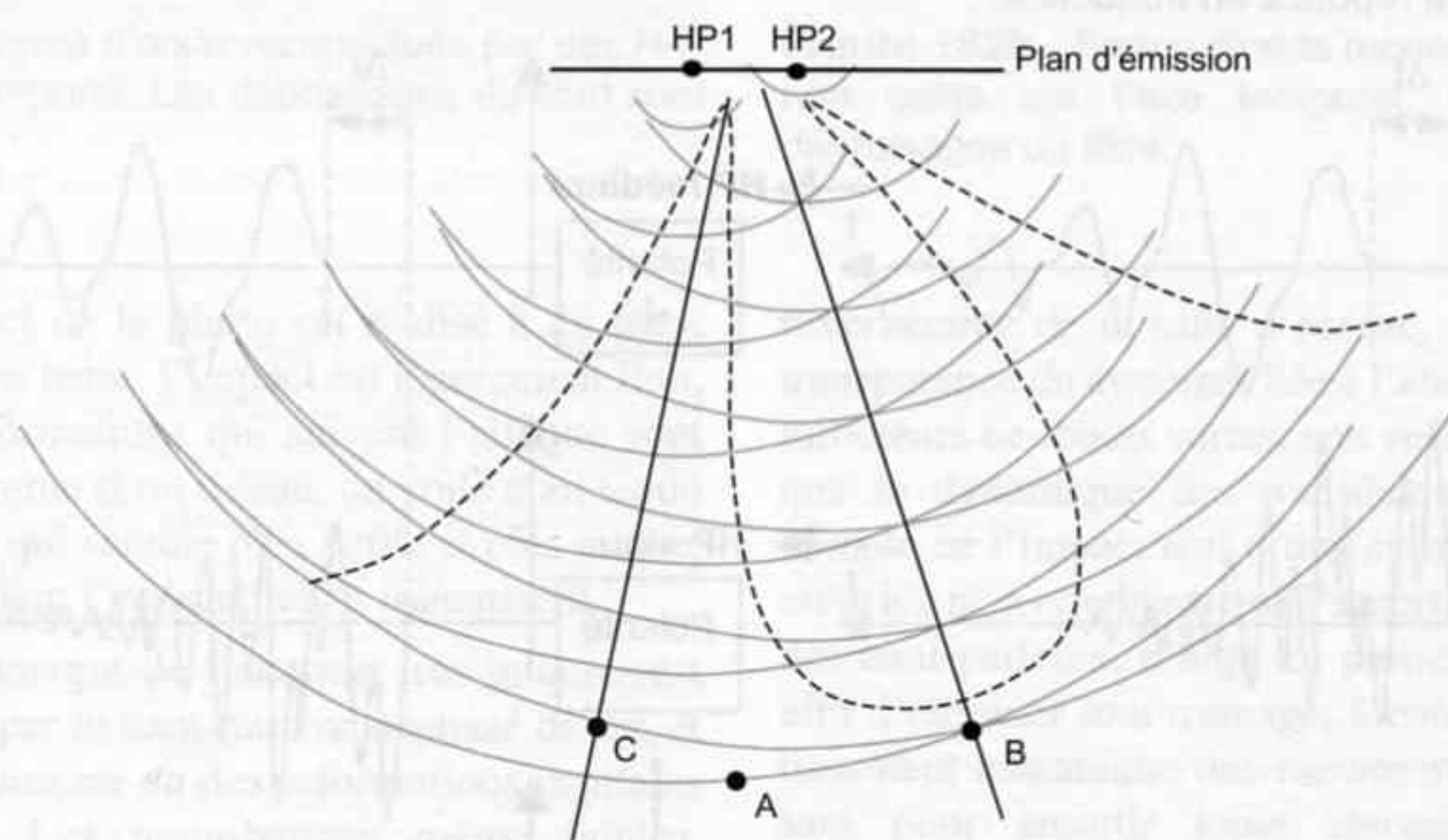


Figure 186 - Lobes formés par deux sources rayonnant avec décalage de phase de 90° depuis le même plan.

hors de l'axe et fonctions de la fréquence, ce qui signifie que la puissance totale rayonnée par l'ensemble des haut-parleurs n'est pas répartie uniformément dans l'espace, mais concentrée dans des lobes de diffusion. Cela tient au fait que les deux haut-parleurs rayonnent depuis deux points de l'espace distants l'un de l'autre, ce qui produit obligatoirement des interférences entre les deux ondes émises, de la même manière que deux séries de ronds à la surface de l'eau forment des dessins en relief lorsque les ronds proviennent de deux endroits distincts. Ces figures d'interférences créent des zones de renforcement de la pression sonore et des zones d'annulation de cette pression. Lorsqu'un filtre fournit une réponse plate dans l'axe, cela peut être soit parce que les deux ondes émises se combinent correctement ensemble, auquel cas le fait de déplacer le point de mesure (ou d'écoute) hors de l'axe ne provoque pas de changement brusque dans le niveau résultant de l'addition des deux ondes, soit parce que ce point cor-

respond à un point particulier de la figure d'interférences, où la somme est exacte autour de cette fréquence précise, le moindre changement de position (ou de fréquence) se traduisant par une variation importante du niveau sonore global résultant de l'addition des deux ondes.

Lorsque deux haut-parleurs montés sur un même plan, repérés HP1 et HP2 figure 185, rayonnent en phase à la même fréquence depuis deux points proches, les deux ondes se combinent correctement et leur somme dans l'axe en A donne, au-delà d'une distance suffisante, une pression double de celle que donnerait un seul haut-parleur, le niveau résultant est alors de +6 dB par rapport au niveau de sortie d'un seul haut-parleur. Par conséquent, les filtres qui produisent entre leurs sorties passe-bas et passe-haut des déphasages nuls ou multiples de 2π ont une réponse dans l'axe plate si les niveaux de sortie de chacune des voies sont à -6 dB du niveau somme requis à la fréquence de raccordement.

Le déplacement du point de mesure en B change peu le résultat global, et c'est en C, sous un angle de 30° environ pour le cas représenté ici, que les deux ondes se trouvent en opposition de phase, leur résultante étant alors nulle. La longueur d'onde représentée ici est à peu près égale à la distance séparant les deux haut-parleurs, ce qui constitue un cas limite, choisi pour mettre en évidence l'apparition du problème. Aux fréquences plus basses, les longueurs d'onde étant supérieures à la distance séparant les deux sources, les phénomènes d'annulation apparaissent sous des angles nettement plus importants. La ligne droite passant par A joint des points où la sommation est en phase, avec résultante maximale, alors que la ligne passant par C est le lieu des points de sommation hors phase à résultante nulle. Entre ces deux lignes, le niveau sonore décroît progressivement en allant du point A vers le point C, le lieu des points où le niveau est de -6 dB en dessous de la valeur maxi est une courbe en pétales de fleurs, formant des lobes. Le point de mesure ou d'écoute étant en face d'un lobe, la perception est stable. Ces phénomènes de lobes autour de la fréquence de raccordement sont minimisés si la longueur d'onde correspondante est grande par rapport à la distance séparant les deux haut-parleurs concernés. Un médium et un tweeter raccordés à 5 kHz doivent être distants de moins de 69 mm, condition difficile à réaliser avec un pavillon ! Un H-P de grave et un médium raccordés à 500 Hz doivent être séparés de moins de 69 cm, ce qui ne pose aucun problème particulier. C'est donc le filtrage entre médium et tweeter qui mérite une étude très attentive des lobes de directivité formés par les interférences inévitables.

Lorsque les deux haut-parleurs rayonnent, figure 186, avec un décalage de phase de $\pi/2$ à la même fréquence depuis deux points proches, les deux ondes ne se combinent pas correctement et leur somme dans l'axe en A donne, au-delà d'une distance suffisante, une pression $\sqrt{2}$ fois celle que donnerait un seul haut-parleur, le niveau résultant est alors de $+3$ dB par rapport au niveau de sortie d'un seul haut-parleur. Par conséquent, tous les filtres d'ordre impair qui produisent entre leurs sorties passe-bas et passe-haut des déphasages de $+90^\circ$ ou -90° (ou 270°), donnent une sommation plate dans l'axe si les niveaux de sortie de chacune des voies sont à -3 dB à la fréquence de raccordement. Le déplacement du point de mesure en B change beaucoup le résultat global, qui passe à $+3$ dB par rapport au niveau mesuré en A, et en C sous un angle de 15° environ les deux ondes se trouvent en opposition de phase, leur résultante étant alors nulle. Un déplacement même faible du point de mesure ou d'écoute change donc énormément le niveau perçu. À $+15^\circ$ ou -15° hors de l'axe, la sommation est soit

nulle, soit $+6$ dB au-dessus du niveau d'un haut-parleur seul. Si les haut-parleurs sont disposés l'un au dessus de l'autre, comme c'est le cas habituellement, le lobe principal est orienté à 15° vers le haut ou vers le bas. Le point de mesure ou d'écoute étant situé au bord d'un lobe, la perception est instable.

La nécessité absolue de calage temporel des haut-parleurs implique, puisque la somme acoustique est alors effectuée sur des ondes en phase dans l'axe d'écoute, que les niveaux de pression de chacun des haut-parleurs soient 6 dB en dessous du niveau normal. Les filtres utilisés doivent par conséquent être calculés pour une fréquence de coupure à -6 dB. Ceci ne pose aucun problème avec les filtres de Linkwitz-Riley d'ordre deux, pour lesquels un raccordement à -6 dB est une chose normale, mais les filtres de Butterworth d'ordre deux ne raccordent à -6 dB que s'ils sont calculés en introduisant un coefficient multiplicateur de fréquence, de 0,77 pour le passe-bas et de 1,3 pour le passe-haut, ce qui revient à écarter les fréquences de coupure de chacun d'eux. De la même manière les filtres de Bessel raccordent à -6 dB lorsqu'un coefficient 0,91 est affecté à la fréquence de calcul du passe-bas, et de 1,1 pour le passe-haut. Les filtres de Butterworth d'ordre 3 calculés avec les formules habituelles donnent les coupures à -3 dB, l'ordre impair introduisant un déphasage de $+270^\circ$ (-90° sur les schémas). Pour ceux-ci le coefficient est de 1,2 pour le passe-haut et 0,83 pour le passe-bas. Beaucoup de concepteurs préfèrent les filtres d'ordre 4, car ils procurent des coupures rapides, ce qui permet d'utiliser le haut-parleur jusqu'aux limites de sa bande passante, et ils présentent un déphasage "nul" entre les sorties passe-bas et passe-haut. Cette pratique est critiquable, car utiliser un haut-parleur sur une bande la plus large possible ne doit pas constituer une priorité, la directivité devant être prise en compte. Évidemment, si c'est la réponse dans l'axe en chambre sourde qui est l'objectif, c'est un autre problème... Quant au déphasage nul, il est en fait de $+180^\circ$ pour la sortie passe-bas et de -180° pour la sortie passe-haut, ce qui met les deux signaux à 360° l'un de l'autre, donc déphasés d'une période complète.

- "Mais c'est pareil !" s'écriera l'électronicien ou électro-acousticien de formation...

Que celui qui y croit encore veuille bien revoir les figures 182 à 184. Du seul point de vue de la représentation vectorielle de la phase et de la sommation mathématique de sinusoides stables, c'est pareil. Le réalisme sonore ne s'occupe pas de la représentation de la phase, il nécessite la phase. Le réalisme sonore ne s'occupe pas de la sommation des sinusoides, il nécessite la sommation exacte de tous signaux.

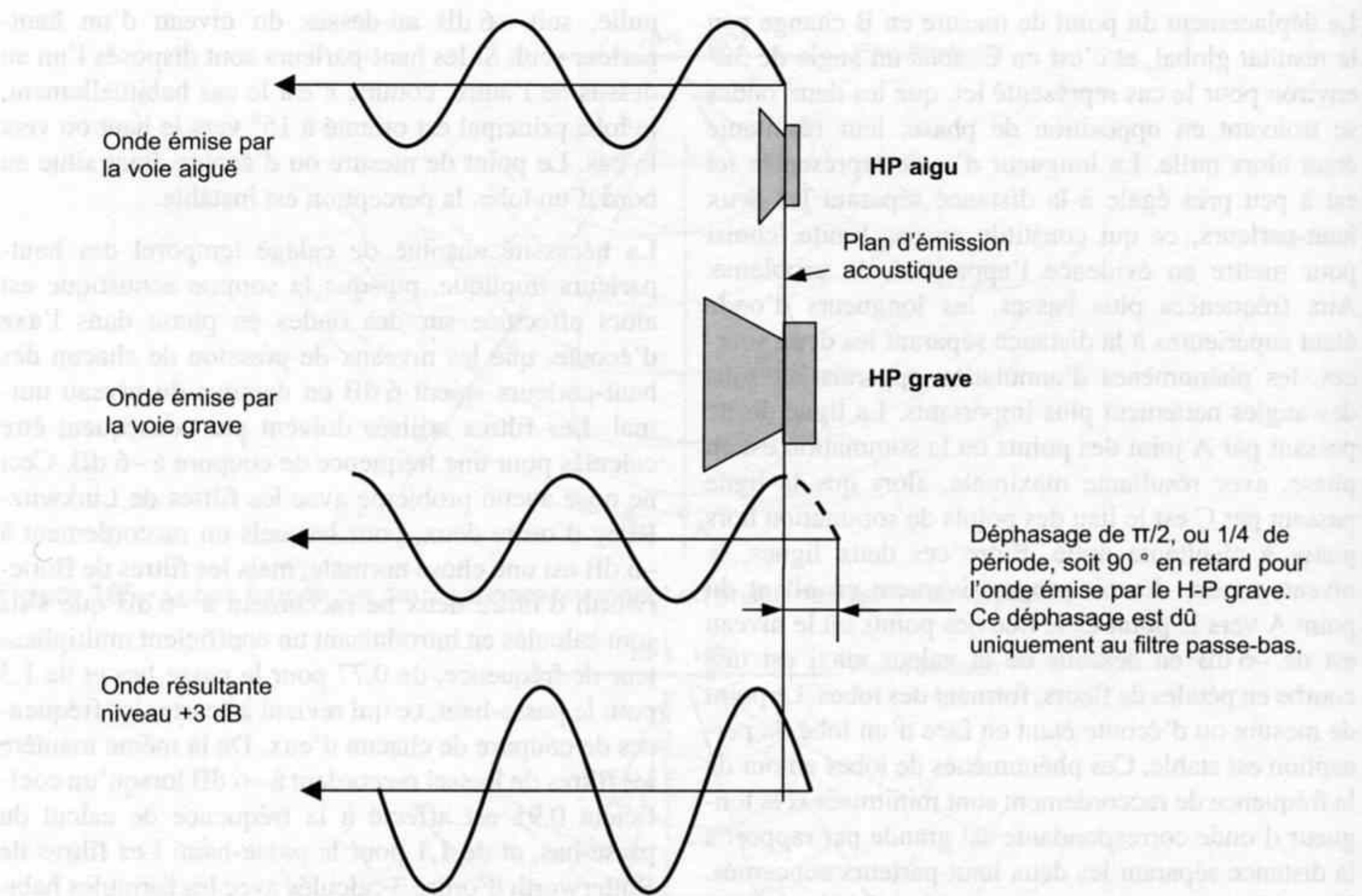


Figure 187 - Lorsque les haut-parleurs rayonnent depuis le même plan, le déphasage est dû au filtre séparateur.

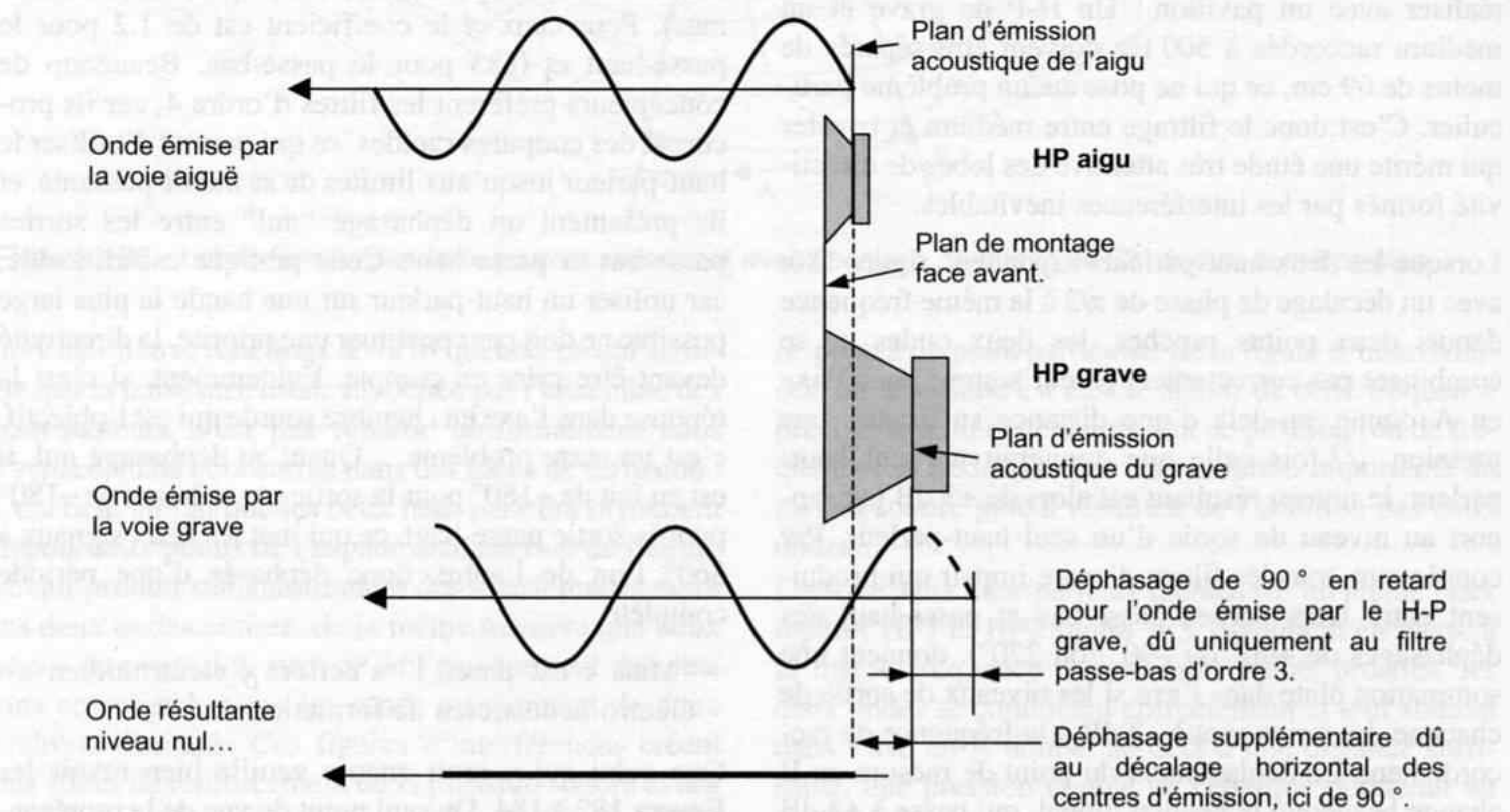


Figure 188 - Le montage des deux H-P sur la même face avant entraîne un décalage du plan d'émission du H-P grave vers l'arrière, ajoutant un déphasage à celui induit par le filtre. La somme de ces deux déphasages peut atteindre dans certains cas 180°, d'où un creux marqué dans la réponse en fréquence autour du rac-

cordement. Avec une coupure à 3,4 kHz, il suffit d'un recul de 25 mm du plan d'émission du grave. Les logiciels de calcul de filtre les plus évolués tiennent compte de la position horizontale des H-P afin d'obtenir une sommation exacte autour de la fréquence de raccordement.

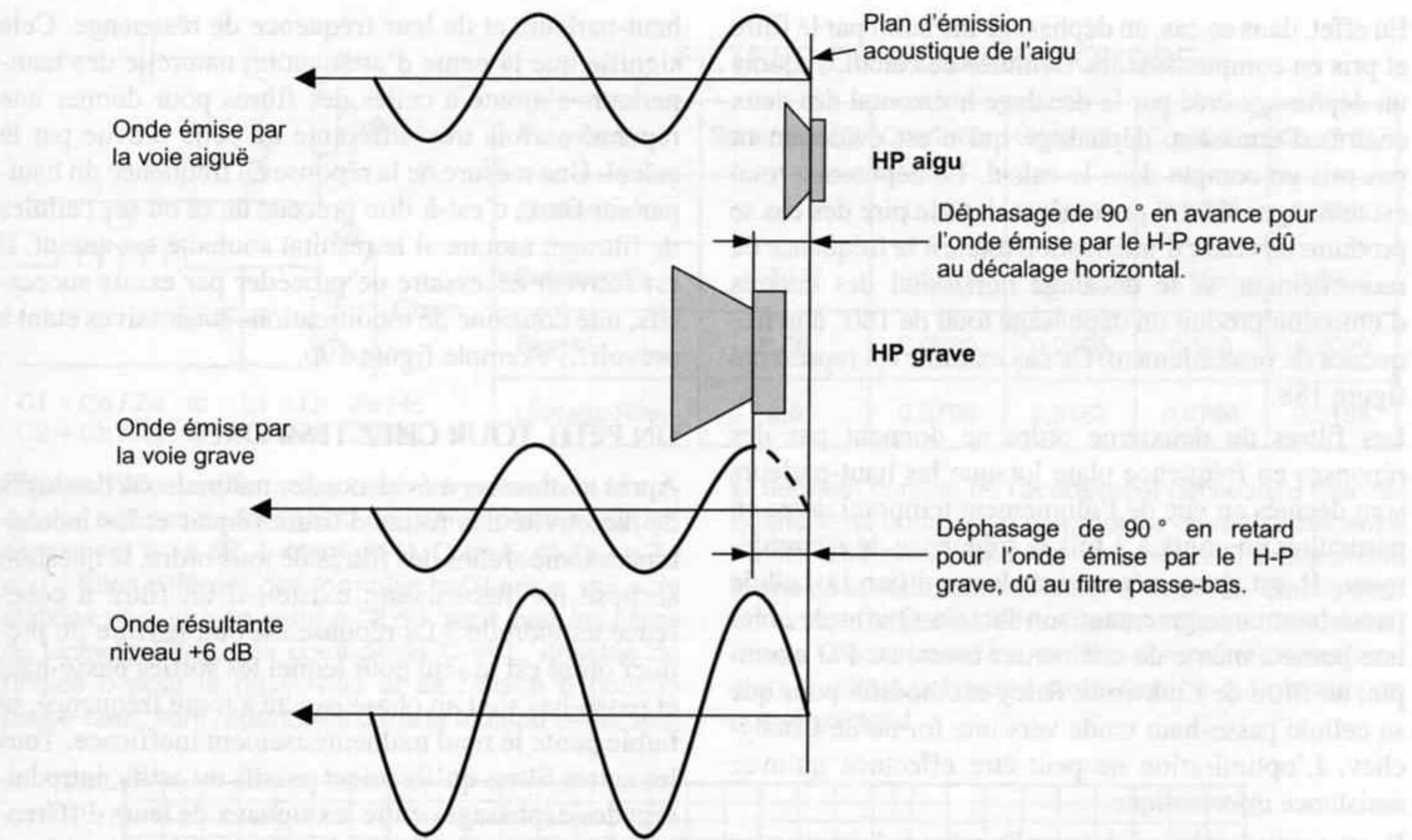


Figure 189 - Le montage du H-P grave en position avancée produit un déphasage avance pour ce H-P. Le déphasage introduit par le filtre est alors compensé et les émissions des deux voies sont donc en phase, la sommation donnant alors une résultante de niveau

+6 dB par rapport à celui de chacun des H-P. Si le filtre d'ordre 3 a été calculé de manière traditionnelle, c'est-à-dire avec atténuation de 3 dB à la fréquence de coupure, pour chacune des voies, la réponse globale présentera une bosse de +3 dB à cette fréquence.

FORMULES SANS CIBLE...

Les formules mathématiques que l'on rencontre habituellement dans la littérature permettent le calcul des composants pour des cellules de filtrage complémentaires. Ces formules ont été établies en supposant que les deux haut-parleurs concernés rayonnent à partir d'un même plan. Cela signifie que leurs centres d'émission, appelés centres de phase acoustique, sont situés dans un même plan vertical, donc à égale distance horizontale du point de mesure ou d'écoute.

On peut considérer que ces centres de phase sont situés dans le plan de la plaque de champ avant du circuit magnétique, là où prend naissance le mouvement vibratoire, c'est-à-dire à peu de chose près dans le plan moyen de la bobine mobile. Cela n'est évidemment plus vrai aux très basses fréquences, lorsque la coupure basse du Haut-Parleur intervient, mais la fréquence de raccordement du filtre n'est jamais située dans cette zone de fréquences ! De même, le centre d'émission tend à "reculer" physiquement aux fréquences élevées, lorsque la coupure haute intervient, mais généralement le filtrage intervient à une fréquence nettement inférieure pour de simples raisons de directivité.

Dans la bande de fréquence utile, transmise correctement sans atténuation ni directivité, la position du centre de phase peut être considérée dans le plan médian de la plaque de champ avant, à mi-épaisseur.

Par exemple avec un filtre du 3^{ème} ordre (déphasage entre les sorties de 270°), avec branchement des H-P en polarités opposées (déphasage de -180°) le déphasage résultant entre les sorties passe-haut et passe-bas est de 90° (Le même déphasage est obtenu avec un filtre du premier ordre avec branchement en polarité normale), la figure 187 montre comment les deux ondes issues des deux H-P se combinent acoustiquement pour donner une onde résultante de niveau +3 dB, si et seulement si les H-P rayonnent à partir du même plan.

Le fait de monter deux haut-parleurs de tailles différentes, par exemple un médium à cône et un tweeter à dôme, sur une même face avant d'enceinte acoustique, ne situe pas les centres acoustiques d'émission sur un même plan, comme le montrent les figures 188 et 189. L'utilisation des formules de calcul habituelles aboutira dans ce cas à des filtres dont la sommation acoustique ne présentera pas une réponse en fréquence linéaire.

En effet, dans ce cas, au déphasage introduit par le filtre et pris en compte dans les formules de calcul, s'ajoute un déphasage créé par le décalage horizontal des deux centres d'émission, déphasage qui n'est évidemment pas pris en compte dans le calcul. Le déphasage total est donc ignoré, et il peut même dans le pire des cas se produire un creux d'atténuation totale à la fréquence de raccordement, si le décalage horizontal des centres d'émission produit un déphasage total de 180° à la fréquence de raccordement. Ce cas extrême est représenté figure 188.

Les filtres du deuxième ordre ne donnent pas des réponses en fréquence plate lorsque les haut-parleurs sont décalés en vue de l'alignement temporel, avec en particulier un creux à 2 fois la fréquence de raccordement. Il est donc nécessaire de modifier la cellule passe-haut en augmentant son facteur Q afin de créer une bosse à même de compenser ce creux. Par exemple, un filtre de Linkwitz-Riley est modifié pour que sa cellule passe-haut tende vers une forme de Chebyshev. L'optimisation ne peut être effectuée qu'avec assistance informatique.

Il est souvent plus aisé pour l'amateur de mettre en œuvre des filtres d'ordre 3 ou 4 moins sensibles au décalage.

Les descriptions fig. 190 à 195 des différents filtres séparateurs les plus courants sont utiles ici surtout pour donner une idée précise, comparative, de la manière dont l'amplitude et la phase évoluent pour chacune des sorties, ce qui permet de connaître le déphasage entre passe-bas et passe-haut. Les formules de calcul servent de base de départ, afin de donner des valeurs réalistes aux différents composants. Ces valeurs sont ensuite optimisées soit par tâtonnements successifs, ce qui peut prendre de longs mois (!), soit à l'aide d'un logiciel spécifique qui prend en compte la position spatiale des haut-parleurs, donc le décalage éventuel vers l'arrière de certains d'entre eux.

Si l'amateur à la recherche de réalisme sonore peut aisément calculer un filtre à deux voies pour raccorder médium et tweeter, avec des pentes d'ordre 3 ou 4 et un décalage horizontal de quelques dizaines de millimètres, il est en revanche pratiquement impossible de faire de même avec un filtre à 3 voies. Dans ce type de filtre, la cellule passe-bande, chargée de distribuer la bande médium, est réalisée par assemblage d'un passe-bas et d'un passe-haut. Ces deux cellules interfèrent l'une avec l'autre et ne peuvent être calculées séparément, surtout en ce qui concerne la phase.

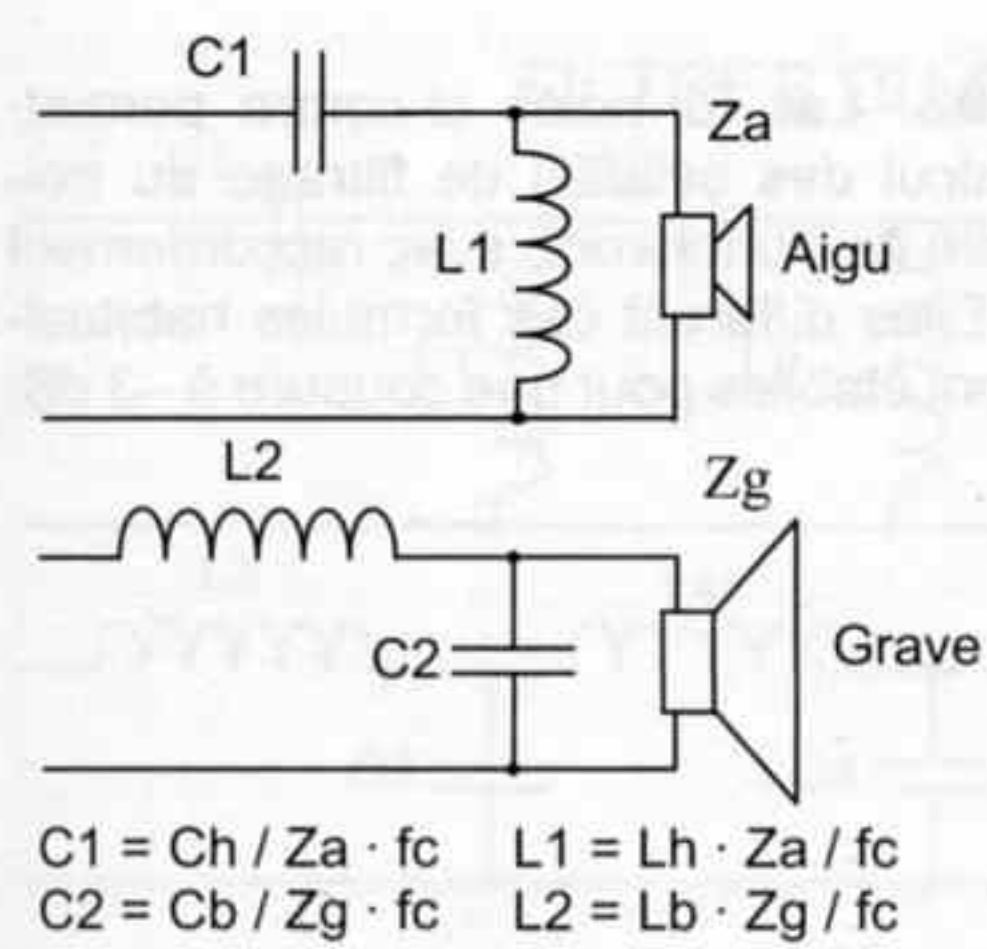
D'autre part, à moins de mettre en œuvre un système à 5 ou 6 voies, dans lequel chaque haut-parleur ne restitue qu'une bande étroite de fréquences, il est très rare que les fréquences de raccordement des filtres soient situées à plus d'une octave des coupures naturelles des

haut-parleurs et de leur fréquence de résonance. Cela signifie que la pente d'atténuation naturelle des haut-parleurs s'ajoute à celles des filtres pour donner une réponse parfois très différente de celle prévue par le calcul. Une mesure de la réponse en fréquence du haut-parleur filtré, c'est-à-dire précédé de sa ou ses cellules de filtrage, montre si le résultat souhaité est atteint. Il est souvent nécessaire de procéder par essais successifs, une douzaine de modifications successives étant à prévoir... exemple figure 196.

UN PETIT TOUR CHEZ TEMPOREL

Après avoir mis en évidence les inclinaisons des lobes de directivité des filtres d'ordre impair et les incohérences temporelles des filtres de tous ordres, la question se pose inévitablement : existe-t-il un filtre à cohérence temporelle ? La réponse est oui, le filtre du premier ordre est le seul pour lequel les sorties passe-haut et passe-bas sont en phase exacte à toute fréquence, sa faible pente le rend malheureusement inefficace. Tous les autres filtres qu'ils soient passifs ou actifs, introduisent des déphasages entre les signaux de leurs différentes sorties. Seul un filtrage dans le domaine numérique, donc si possible en amont des convertisseurs numérique-analogique, permet d'éviter ces déphasages. En analogique il existe deux moyens de corriger les incohérences temporelles des filtres. Le premier fait appel au filtrage actif, dans lequel il est possible d'insérer des cellules de retard, calculées de manière à recaler correctement les haut-parleurs qui rayonnent en avance, en les alignant temporellement sur le haut-parleur qui rayonne le plus tardivement. Le second consiste à positionner les deux haut-parleurs à des distances différentes de l'auditeur, en reculant celui qui émet en avance, d'une valeur correspondant à la distance parcourue par l'onde sonore pendant le délai Δt séparant les émissions des deux transducteurs.

Le premier moyen, avec filtre actif, ne s'adresse évidemment qu'aux systèmes multi-amplifiés, pour lesquels il apporte une souplesse de réglage extraordinaire lorsque le filtre n'est pas figé mais paramétrable. La mise au point de ces systèmes, surtout s'ils utilisent des pavillons, demande de longues heures d'essai, de mesure, de calculs des nouvelles valeurs des composants des filtres, puis de nouveaux essais, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'une solution satisfaisante soit trouvée, sans aucune assurance que cette solution soit optimale. L'audiophile finit par passer plus de temps à mettre au point son système qu'à écouter de la musique... Au contraire un filtre actif paramétrable possédant des réglages de délai sur chacune de ses sorties demande une seule séance de réglage, qui peut prendre seulement quelques minutes. Les systèmes de sonorisation professionnels utilisent ces filtres actifs, dont



FILTRES DU DEUXIÈME ORDRE

Polynôme	Surtension Q	Coeff. Ch	Coeff. Lh	Coeff. Cb	Coeff. Lb
Chebyshev	1	0,106	0,106	0,2388	0,2388
Butterworth	0,7071	0,0866	0,1732	0,1461	0,2923
Bessel	0,58	0,0829	0,2505	0,100	0,3029
Linkwitz-Riley	0,5	0,0796	0,3183	0,0796	0,3183

Figure 190 - Les formules ci-contre permettent le calcul des cellules de filtrage du deuxième ordre avec raccordement à -6 dB, L étant en H, C en F, et Za ou Zg en Ω. Elles diffèrent des formules habituelles, qui sont établies pour une coupure à -3 dB, sauf avec les filtres de Linkwitz-Riley. Les coefficients C et L, affectés de l'indice b pour le passe-bas et de l'indice h pour le passe-haut, sont répertoriés dans le tableau ci-dessus,

et tiennent compte de l'écartement nécessaire des fréquences de coupure, pour produire un raccordement à -6 dB. Les coefficients de surtension Q indiquent la forme de la courbe de réponse, ci-dessous, établie pour un raccordement à 1 kHz. Toutes valeurs intermédiaires de Q sont possibles, le filtre obtenu ne correspond alors à aucun polynôme particulier, ce qui n'a aucune conséquence !

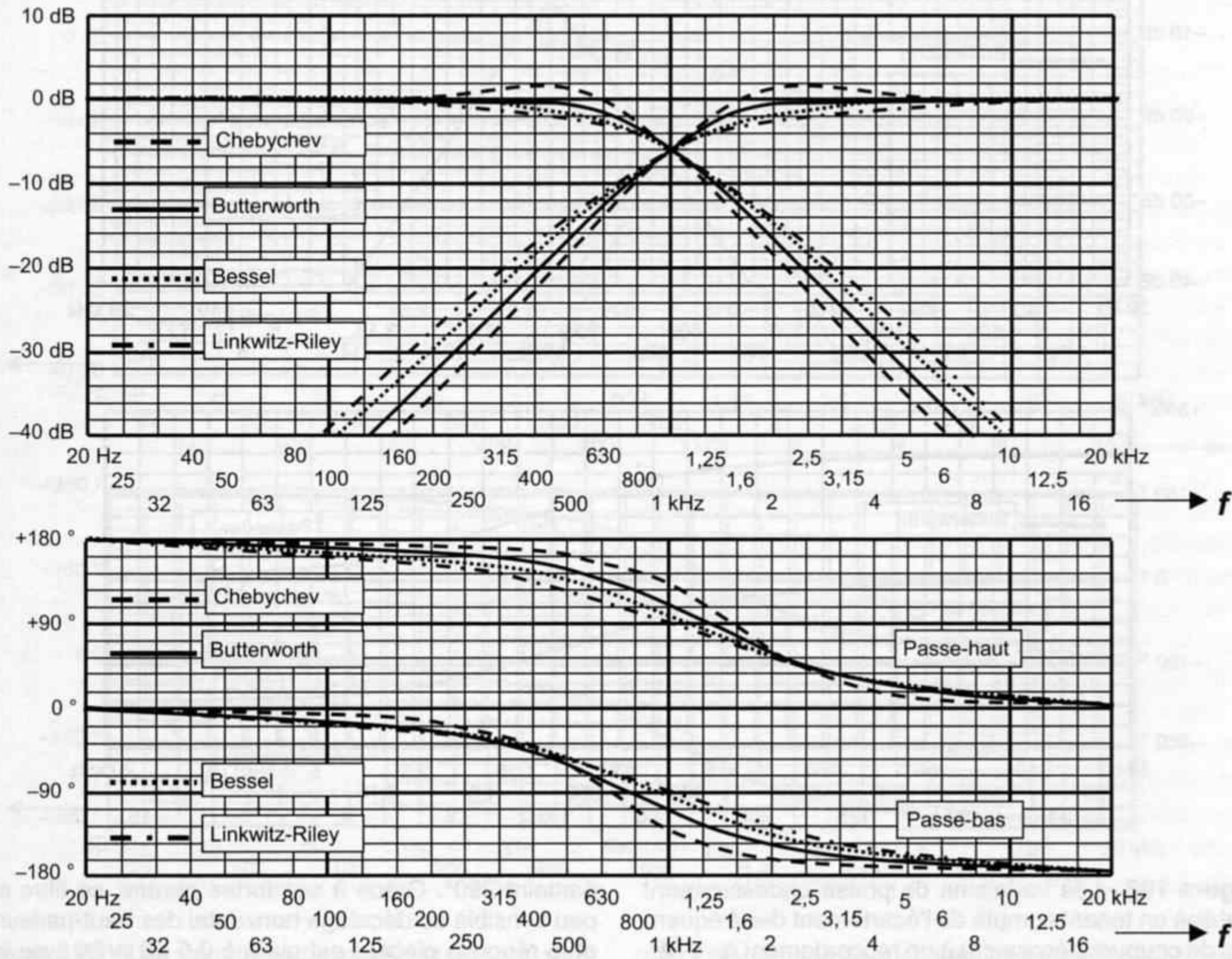


Figure 191 - Les variations de phase ci-dessus sont établies en tenant compte de l'écartement des fréquences de coupure nécessaire à un raccordement à -6 dB. Le filtre de Linkwitz-Riley produit bien un déphasage de 180° entre ses sorties passe-bas et passe-haut, mais il

augmente un peu avec un Bessel, vers 195°, passe à 220° environ avec un Butterworth, et 270° avec un Chebyshev, dont la variation de phase n'est pas proportionnelle à la fréquence mais plus rapide près de la coupure.

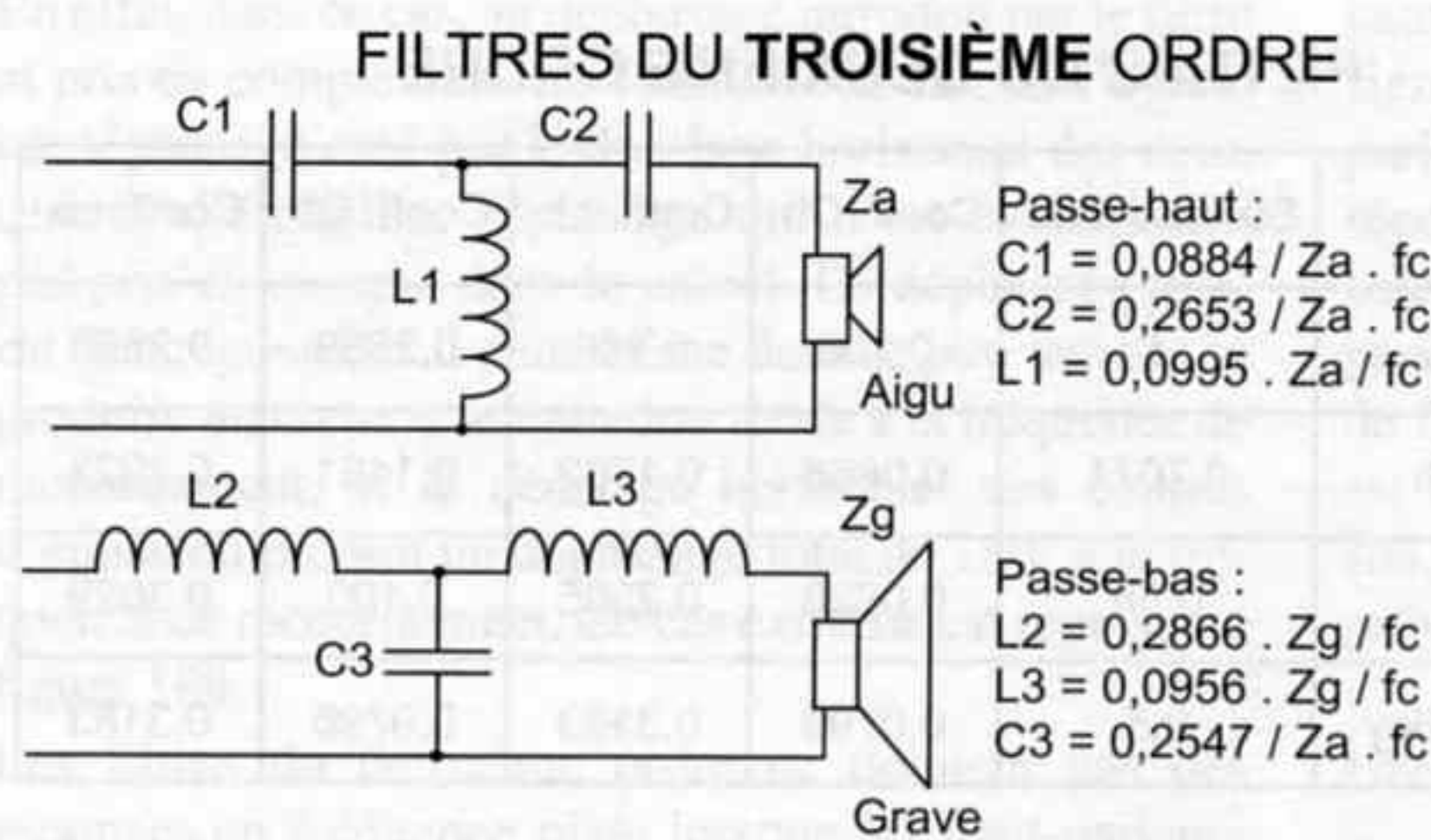


Figure 192 - Les formules ci-contre permettent le calcul des cellules de filtrage du troisième ordre de Butterworth avec raccordement à -6 dB. Elles diffèrent des formules habituelles, qui sont établies pour une coupure à -3 dB.

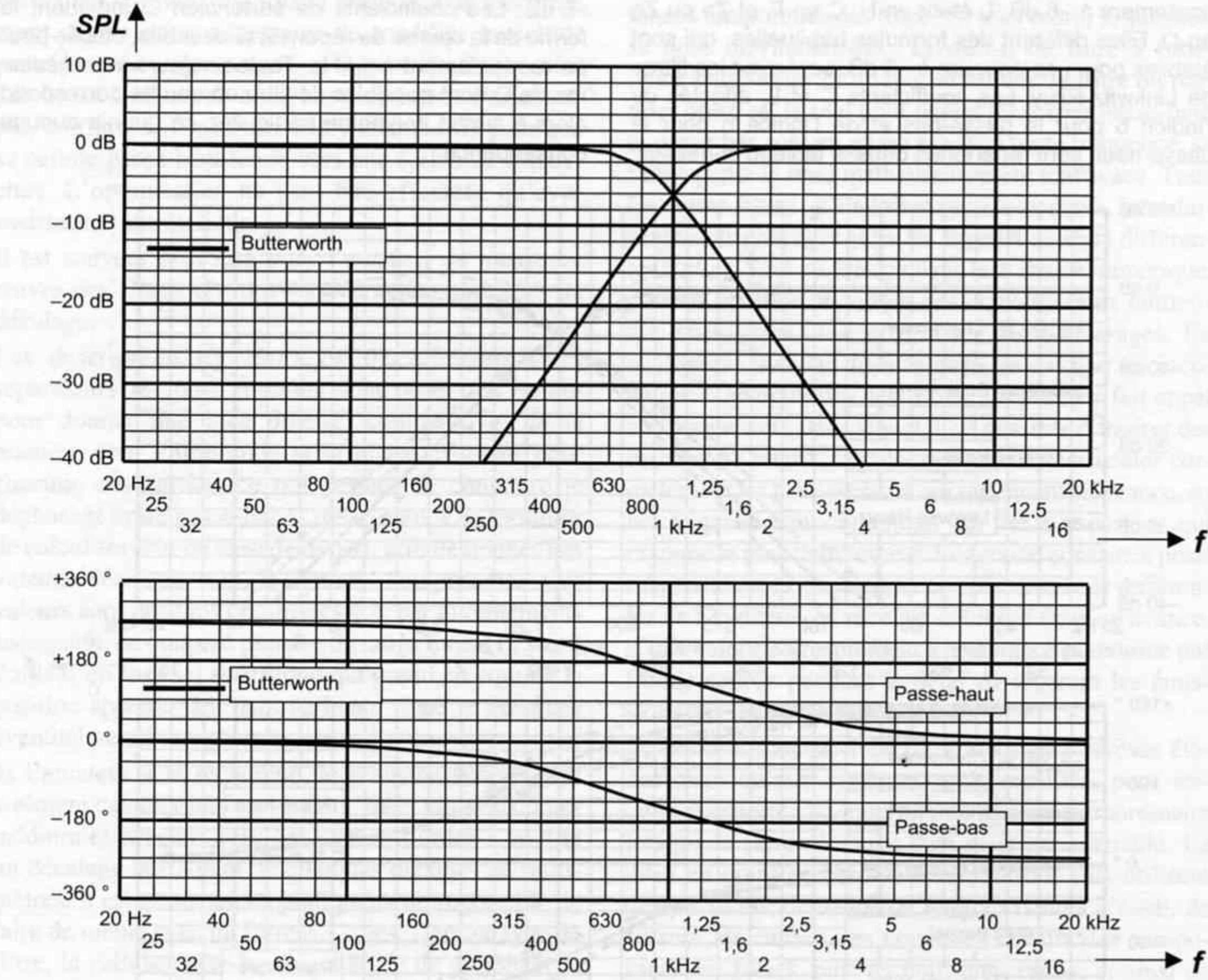


Figure 193 - Les variations de phase ci-dessus sont établies en tenant compte de l'écartement des fréquences de coupure nécessaire à un raccordement à -6 dB. À la fréquence de raccordement, le déphasage des deux sorties est un peu supérieur à la valeur théorique, il atteint 290°. Grâce à ses fortes pentes, ce filtre est peu sensible au décalage horizontal des haut-parleurs, et la réponse globale est plate à 0,5 dB près avec les haut-parleurs branchés en polarité normale.

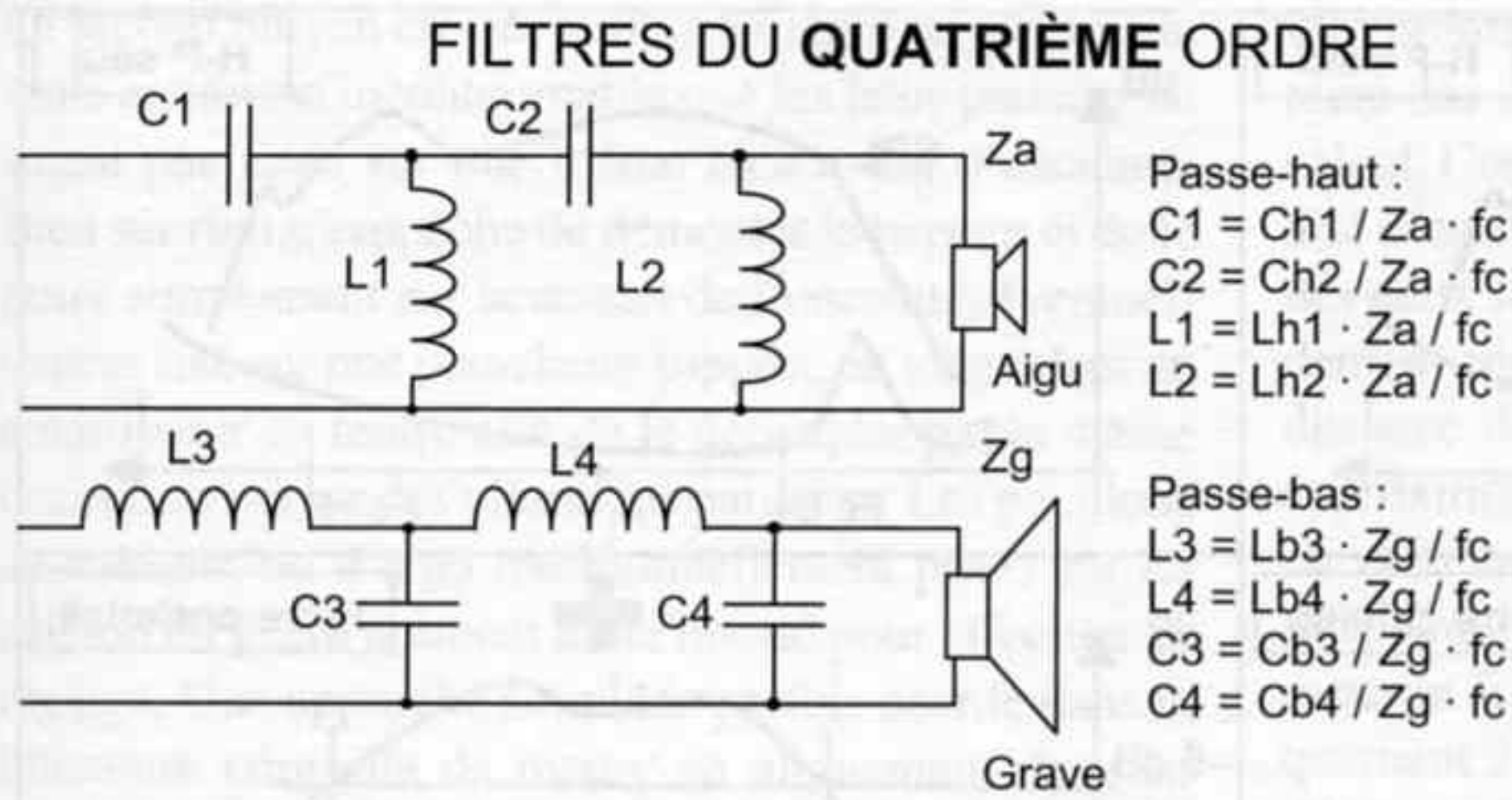


Figure 194 - Les formules ci-contre permettent le calcul des cellules de filtrage du quatrième ordre avec raccordement à -6 dB. Elles diffèrent des formules habituelles, qui sont établies pour une coupure à -3 dB, sauf pour le filtre de Linkwitz-Riley. Le filtre de Bessel d'ordre 4 demande un rapprochement des fréquences de coupure pour obtenir une réponse plate.

Polynôme	Q	Coeff. Ch ₁	Ch ₂	Lh ₁	Lh ₂	Cb ₃	Cb ₄	Lb ₃	Lb ₄
Butterworth	0,7071	0,0920	0,1300	0,0893	0,3681	0,2835	0,0688	0,2754	0,1947
Bessel	0,58	0,0780	0,0799	0,0958	0,5537	0,2105	0,0454	0,3228	0,1318
Linkwitz-Riley	0,5	0,0844	0,1688	0,1000	0,4501	0,2533	0,0563	0,3000	0,1500

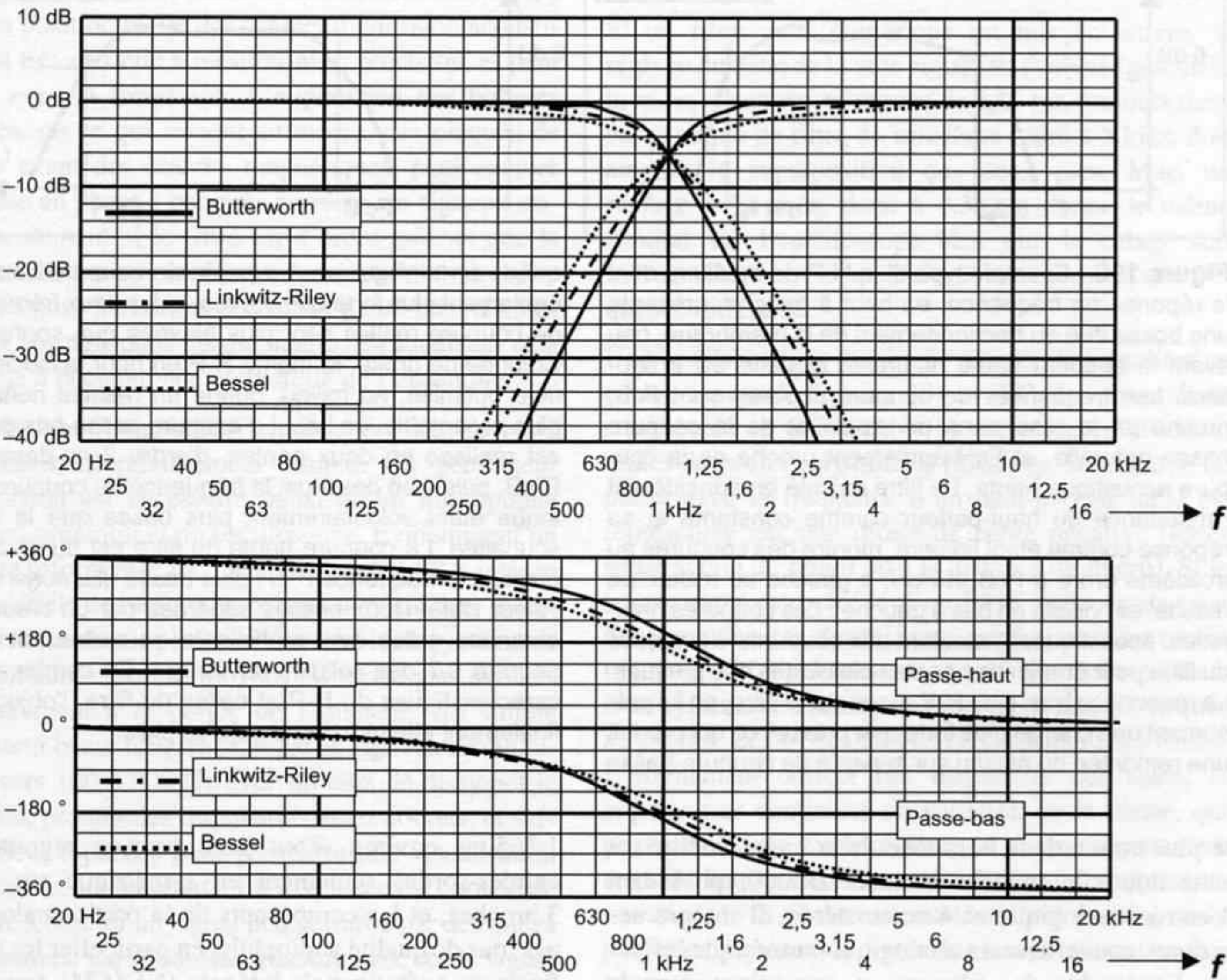


Figure 195 - Les variations de phase ci-dessus sont établies en tenant compte de l'écartement ou du rapprochement des fréquences de coupure nécessaire à un raccordement à -6 dB. À la fréquence de raccordement, le déphasage des deux sorties est de l'ordre de 360°. Une mise en phase à 2π près est possible en ali-

gnant les centres acoustiques, avec les haut-parleurs en polarité normale. Ce filtre est préférable pour une enceinte colonne dont tous les haut-parleurs sont montés sur une même face avant, ceci malgré le nombre important de composants nécessaires.

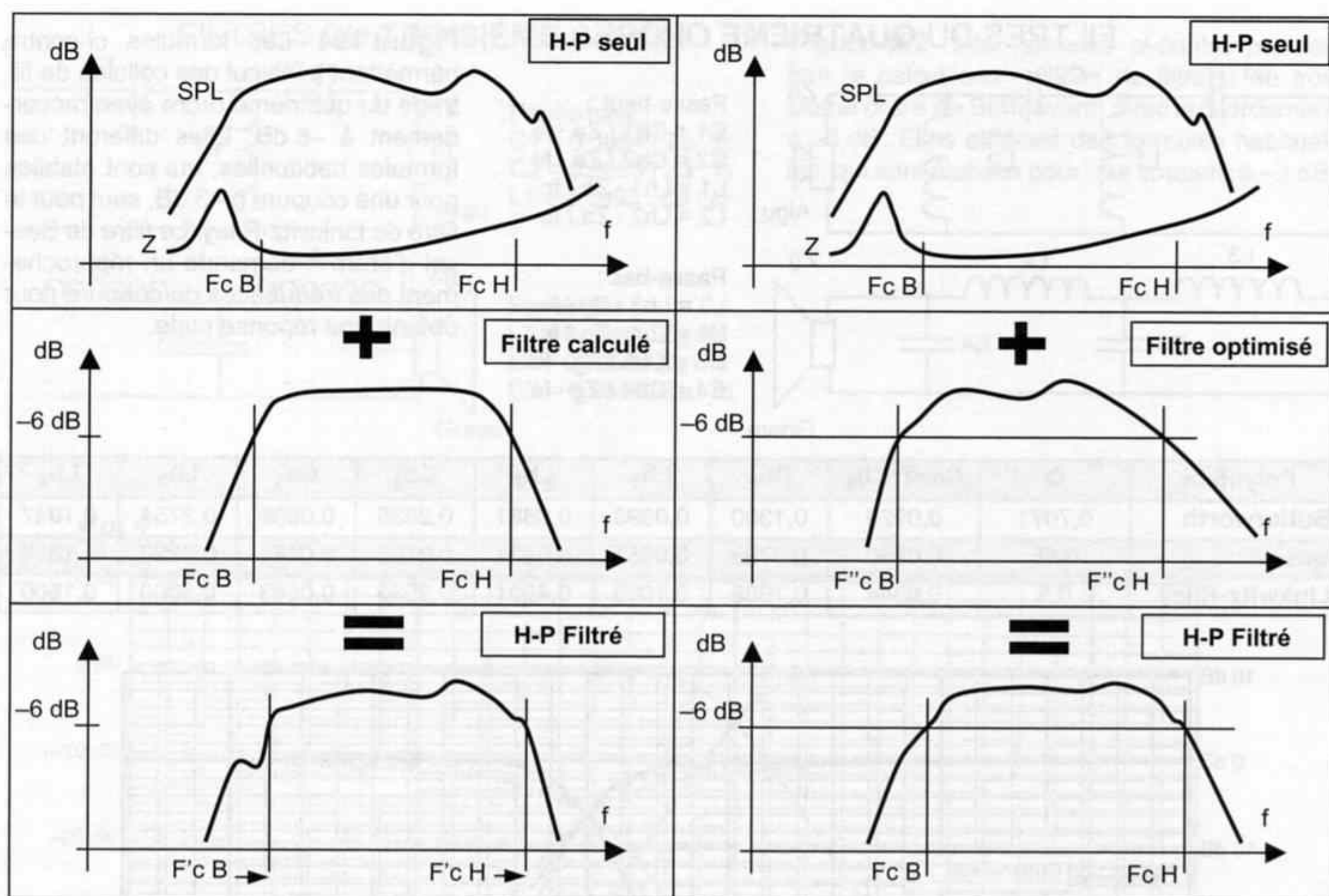


Figure 196 - Exemple type d'un H-P de médium, dont la réponse en fréquence, en haut à gauche, présente une bosse due au fractionnement de la membrane, peu avant la coupure haute naturelle, laquelle est irrégulière. Les fréquences de coupure choisies sont F_{cB} , proche de la résonance principale et de la coupure basse naturelle, et F_{cH} également proche de la coupure acoustique haute. Le filtre calculé en considérant l'impédance du haut-parleur comme constante et sa réponse comme étant linéaire, montre des coupures au troisième ordre à F_{cB} et F_{cH} , à gauche au milieu. Le résultat est visible en bas à gauche : Les coupures naturelles, acoustiques, s'ajoutent aux coupures électriques du filtre pour donner des pentes plus fortes que prévues. La résonance basse du H-P réagit sur le filtre, en lui présentant une charge plus forte que prévue, ce qui produit une remontée du niveau sur la pente de coupure basse

qui devient irrégulière. La pente de coupure haute est également plus forte que prévue, et les deux fréquences de coupure réelles sont plus élevées que souhaitées. Colonne de droite, le même H-P en haut, associé à un filtre optimisé, au milieu, donne un résultat nettement plus acceptable, en bas. La coupure passe-bas du filtre est réalisée en deux pentes, d'ordre 2 au-dessus de F''_{cB} , puis 4 en dessous, la fréquence de coupure électrique étant volontairement plus basse que la valeur souhaitée. La coupure haute du filtre est du deuxième ordre, à la fréquence F''_{cH} plus basse elle aussi que la valeur cible. Deux bosses séparées par un creux sont obtenues grâce aux coefficients de surtension supérieurs à 0,7 des cellules de filtrage. En combinant les caractéristiques du H-P et celles du filtre, l'objectif est finalement atteint à peu de chose près.

le plus connu dans le monde de la haute-fidélité est sans doute le modèle Yamaha D2040, possédant 1 entrée analogique et 4 voies stéréo. Il intègre ses propres convertisseurs analogique-numérique, effectue l'ensemble des filtrages et corrections dans le domaine numérique, et possède autant de convertisseurs numérique-analogique qu'il a de sorties, soit 8 au total. Les fréquences de coupure et pentes sont réglables pour chaque voie, ainsi que les délais, avec un retard ajustable par bonds de 0,021 ms entre 0 et

1 365 ms environ. Tout juste peut-on regretter les entrées-sorties seulement en symétrique sur prises 3 broches, et les composants de la partie analogique, pas tous de qualité audiophile, en particulier les amplificateurs opérationnels intégrés (NE5534) anciens et peu transparents à l'écoute, qui gagneraient à être remplacés par de plus récents et performants (OPA 627, AD825). D'autres marques, telle BSS, proposent également des filtres paramétrables, le seul obstacle semble bien être le prix.

Le second moyen est très simple à mettre en œuvre à la seule condition incontournable que les haut-parleurs ne soient pas fixés sur une même face avant d'enceinte. Bien sûr rien n'empêche de démonter le tweeter et de le poser simplement sur le dessus de l'enceinte, éventuellement fixé sur une planchette support, en intercalant un amortisseur en feutre afin de le découpler par la même occasion vis à vis des vibrations parasites. Les pavillons de médium ou d'aigu traditionnellement posés sur un caisson de grave donnent toute liberté pour effectuer ce réglage. Une approche simpliste parfois décrite dans la littérature conseille de mettre en alignement dans un même plan vertical les centres acoustiques des différents haut-parleurs. Cette pratique est inexacte, à moins que seuls des filtres de premier ordre ne soient utilisés. Avec les filtres d'ordre supérieur, un déphasage supplémentaire est introduit, et la voie supérieure branchée en sortie du filtre passe-haut doit être retardée. De plus, la position réelle des centres d'émission acoustique est très difficile à mesurer avec précision, et peut varier avec la fréquence. L'alignement des bobines mobiles, ou ce qui revient au même, des plaques de champ avant des circuits magnétiques, peut amener une mise en phase à peu près correcte sur signaux stables, seulement si le filtre est d'ordre pair, et que la polarité de branchement est "correcte", c'est-à-dire inversée pour les sorties des filtres passe-haut d'ordre deux et normale pour l'ordre quatre. En aucun cas cela n'amène à la cohérence temporelle de l'ensemble.

La procédure d'alignement temporel des haut-parleurs est finalement relativement simple. Un générateur d'impulsion est nécessaire, ainsi qu'un microphone avec son préampli et un oscilloscope. Évidemment un système informatisé tel que CLIO ou MLSSA intègre ces matériels de mesure, et permet de visualiser directement la courbe de phase de l'ensemble du système de reproduction, mais ces moyens informatiques évolués sont rarement à la portée de l'amateur. Un simple générateur basse fréquence, réglé en signaux rectangulaires vers 100 à 200 Hz avec un taux de dissymétrie maximal, produit des impulsions assez courtes, et suffisamment espacées pour permettre une visualisation aisée des fronts montants. La fréquence est choisie de manière à obtenir un signal peu perturbé par des ondes stationnaires. Un sonomètre linéaire avec sortie signal fait très bien l'affaire pour capter l'onde résultante, et un oscilloscope banal convient, avec deux voies tout de même, afin de visualiser la forme du signal d'origine, pris en sortie d'amplificateur, et nécessaire à la synchronisation de la trace. Les résultats obtenus avec une enceinte deux voies apparaissent dans les figures 197 à 200.

Une première approximation de la position relative correcte des voies médium et aiguë peut être obtenue par calcul. Connaissant les pentes du filtre séparateur, il est aisé d'en déduire l'ordre de grandeur du déphasage $\Delta\phi$ des deux sorties. D'autre part, à la fréquence de raccordement correspond une longueur d'onde $\lambda = C / f_c$. La distance dont la voie supérieure doit être reculée est approximativement $d = \lambda \cdot \Delta\phi / 360$. Le déphasage pris en compte est le déphasage réel, c'est-à-dire recalé pour annuler le saut de phase éventuel. Par exemple avec un filtre d'ordre trois, ce déphasage vaut théoriquement 270° . Si la fréquence de raccordement est de 5 kHz, soit une longueur d'onde $\lambda = 68,8$ mm, alors $d = 51,6$ mm est le recul théorique du plan d'émission du tweeter par rapport au plan d'émission du médium. En partant de cette position, les deux haut-parleurs étant branchés en polarité normale, il est aisé de trouver le bon calage temporel avec la procédure ci-dessus.

Si un filtre actif numérique est mis en œuvre, le réglage du délai de la voie aiguë fait évoluer également la trace, et une valeur proche de 0,15 ms, toujours dans cet exemple de filtre du troisième ordre à 5 kHz, doit amener la superposition des deux pics. Mais un réglage à 2π près, donc à 0,35 ms donne le même résultat sur l'oscilloscope bien que le calage soit inexact. Cette erreur apparaît sur une mesure à une fréquence différente.

Une représentation graphique permet de visualiser ce calage temporel, figures 201 et 202. La phase étant représentée en ordonnée et la fréquence en abscisse, toutes deux en **coordonnées linéaires**, la variation de phase avec la fréquence d'un haut-parleur idéal est représentée par une droite de pente négative (après soustraction du retard dû à la distance du micro). Si le haut-parleur est précédé d'un filtre, cette droite peut dans certains cas devenir une courbe, plus ou moins régulière. L'alignement incorrect des haut-parleurs d'un système se traduit par des sauts de phase brusques au passage des fréquences de raccordement des filtres. L'alignement correct fait disparaître ces sauts, et apporte une continuité de variation de la phase, qui peut cependant évoluer plus ou moins rapidement selon le haut-parleur concerné. Lorsque la vitesse de variation de la phase est constante tout au long de la plage de fréquence, la dimension temporelle est parfaitement respectée.

Ce calage temporel est souvent appelé à tort mise en phase des haut-parleurs. Ce terme n'est pas assez précis car une mise en phase à 180° près avec inversion de polarité, ou encore une mise en phase à 2π près, ne réalisent la même continuité de variation de phase qu'en apparence. Le terme exact est calage temporel.

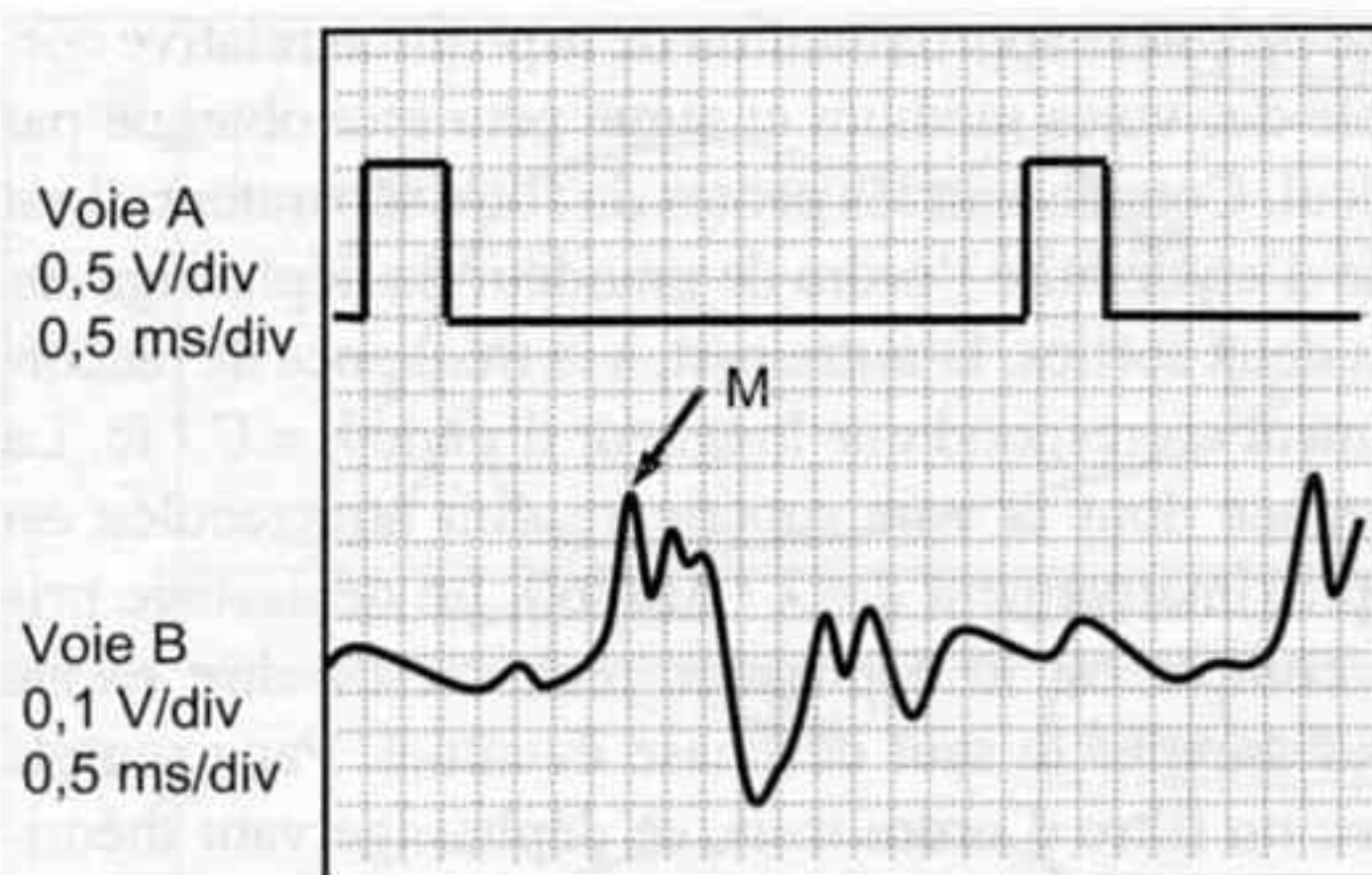


Figure 197 - Pour commencer, seul le haut-parleur grave-médium est branché. La voie A de l'oscilloscope, en haut, montre le signal en sortie de l'ampli, rectangles de 1 ms séparés par 8 ms. La voie B en bas montre le signal capté par le micro, retardé de 3,5 ms environ par rapport au signal électrique. Il est tout à fait normal que la réponse paraisse tourmentée. Le haut-parleur est manifestement branché en polarité normale, le front montant M est aisément repérable. La distance du micro étant de 1 m, le retard devrait être de 3 ms environ si le filtre passe-bas n'ajoutait pas un retard supplémentaire.



Figure 198 - Le tweeter a été ajouté et un nouveau pic apparaît en A. Sa polarité est dans le sens normal mais son retard de 3 ms seulement. Le tweeter est donc en avance de 0,5 ms sur le médium. Le front descendant de la réponse du tweeter se superpose au front montant du médium en M. Ce décalage de 0,5 ms correspond à un déphasage d'une période entière soit 2π , à la fréquence de raccordement du filtre d'ordre 4, de 2 kHz. En déplaçant le tweeter vers l'arrière, on voit avancer sa trace vers la droite. Lorsqu'elle se superpose à celle du médium, le calage temporel est correct à la fréquence du signal. Il peut ne pas l'être à d'autres fréquences...

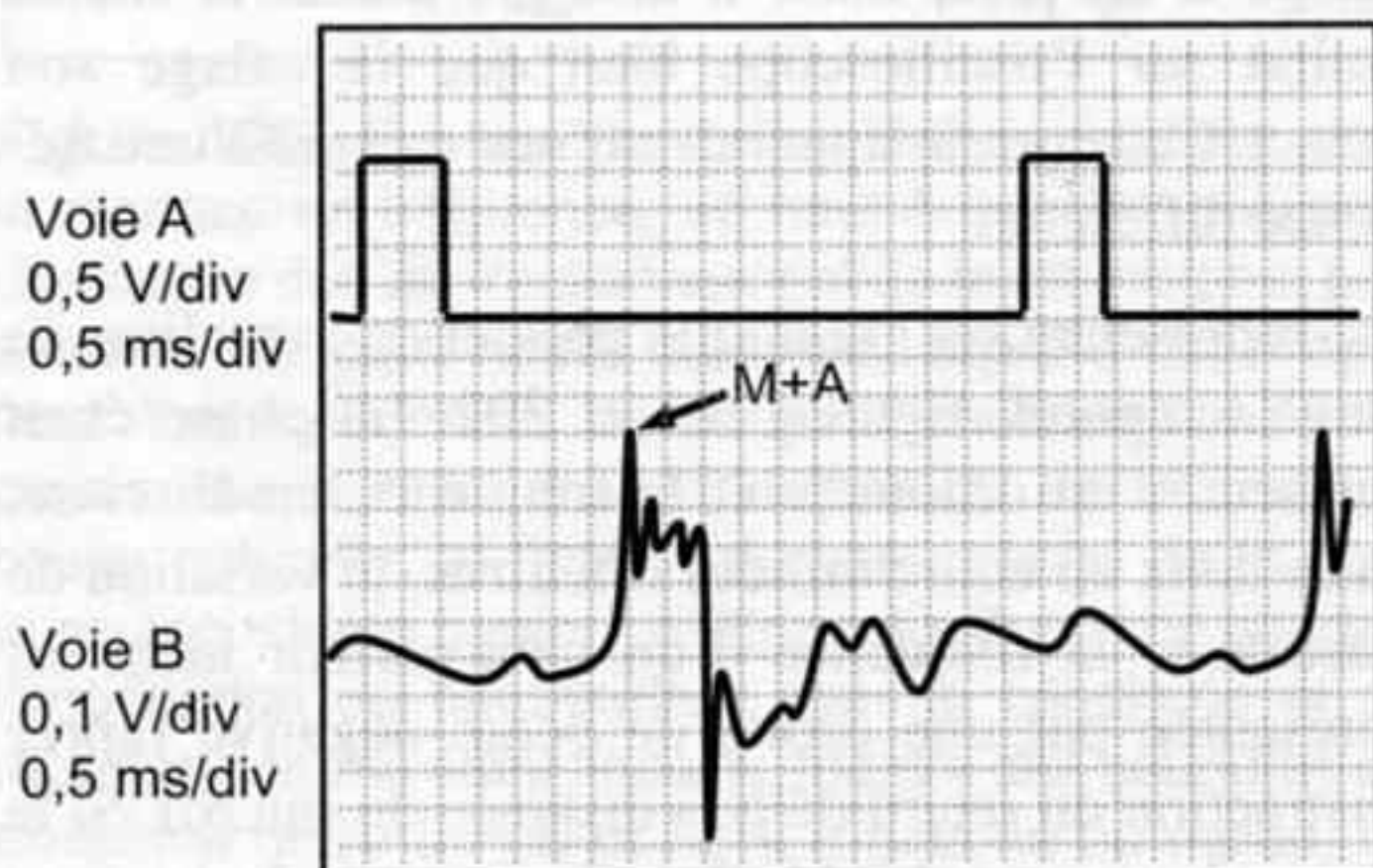


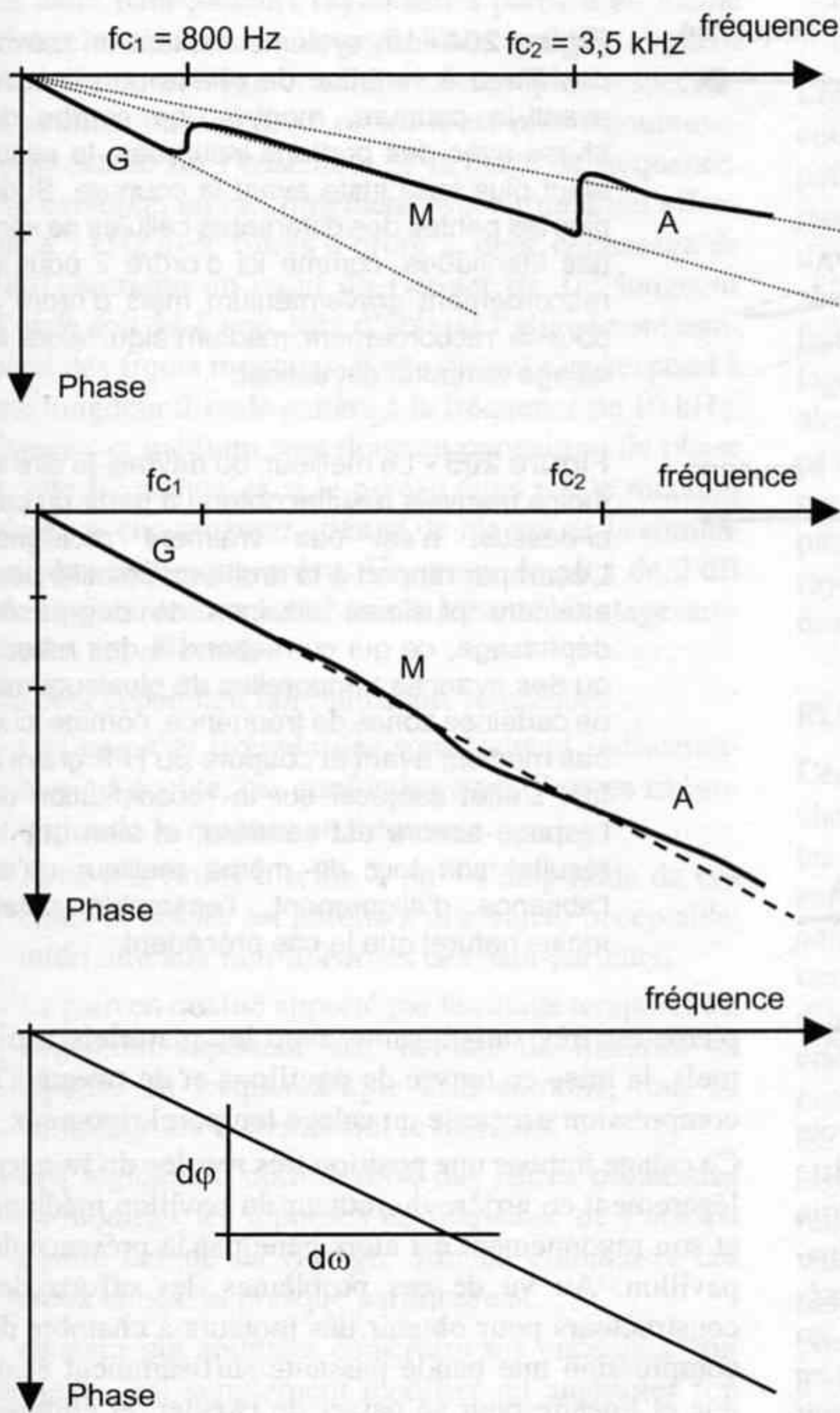
Figure 199 - Lorsque les pics de réponse du médium et du tweeter sont exactement superposés, le pic unique obtenu présente une amplitude plus importante, un front montant plus raide. Il existe une infinité de positions du tweeter donnant le même résultat, toutes ces positions étant distantes entre elles d'une longueur d'onde de la fréquence de raccordement. La seule position correcte pour l'alignement temporel est évidemment celle trouvée en reculant le tweeter lentement, en partant de la position où les centres acoustiques, c'est-à-dire les bobines mobiles, sont alignés.



Figure 200 - En faisant varier la fréquence du signal rectangulaire, on constate que les pics de réponse des haut-parleurs médium et aigu restent en correspondance temporelle. C'est le cas si les variations de phase de ces deux voies se produisent à la même vitesse par rapport à la fréquence. Si l'une des voies présente une variation de phase plus rapide, les pics se décalent petit à petit lorsque la fréquence augmente. Les filtres symétriques et complémentaires produisent des variations de phase de même amplitude et de même vitesse sur les sorties passe-bas et passe-haut, et par conséquent le calage temporel obtenu est correct à toute fréquence.

Si toutes les cellules de filtrage sont du même ordre et présentent toutes une variation de phase régulière, sans coude, alors il est possible d'aligner temporellement le système de manière à obtenir une courbe résultante

quasiment droite. La "vitesse" à laquelle la phase varie en fonction de la fréquence est alors constante sur toute l'étendue de la plage de fréquence (figure 203). Cette "vitesse" est appelée temps de propagation de



groupe, ou group-delay et n'est autre que la dérivée, c'est-à-dire la pente, de la courbe de phase. Cette pente est $Gd = d\phi / d\omega$. Les filtres d'ordre 2 de Bessel et d'ordre 2 et 4 de Linkwitz-Riley ont un temps de propagation de groupe à peu près constant, devenant nul seulement aux fréquences les plus élevées, et permettent un alignement temporel précis. Ce "temps de propagation de groupe" n'est pas égal au retard temporel, et devrait être exprimé en degré par Hz dans les unités habituelles. Avec l'angle en radians et la fréquence en radians par seconde, cette vitesse de variation de phase s'exprime en secondes, ce qui peut prêter à confusion. L'utilisation de filtres dont la variation de phase n'est pas régulière, c'est-à-dire présentant une "vitesse" de variation de phase non constante, aboutit à un alignement temporel ne donnant pas une droite, donc ne correspondant pas à un simple retard temporel. Les filtres d'ordre 2, 3 et 4 de Butterworth et surtout d'ordre 2 de

Figure 201 - Un système trois voies habituel, avec les haut-parleurs montés sur une même face avant, présente des sauts de phase aux fréquences de raccordement du filtre. Ici, dans l'exemple choisi, le H-P grave est filtré au deuxième ordre. Le H-P médium, bien que branché en polarité inversée, ne rayonne pas à partir du même plan, et présente donc un décalage de phase en avance. Le même problème se retrouve au raccordement médium/aigu à la fréquence fc_2 .

Figure 202 - Le même système après calage temporel. Le H-P médium a été reculé de manière à placer sa bobine mobile à environ 21,5 cm en arrière de celle du H-P grave, soit une demi-longueur d'onde de la fréquence fc_1 . Il est maintenant branché en polarité normale. Le H-P aigu a été positionné avec sa bobine à 35 mm environ en arrière de celle du médium. Le calage a été effectué à l'oscilloscope, sur signaux rectangulaires. Tous les filtres étant d'ordre deux, la variation de phase se produit avec une pente à peu près constante, la courbe étant presque une droite (pointillés).

Figure 203 - Si la courbe de variation de la phase en fonction de la fréquence est une droite, sa pente est constante. Cela correspond à un retard temporel pur. Autrement dit, l'onde sonore est simplement retardée d'une même valeur pour toutes ses composantes fréquentielles, ce retard étant dû soit aux filtres passe-bas, soit aux décalages vers l'arrière, des haut-parleurs reliés aux filtres passe-haut. Un effet identique est obtenu grâce aux délais imposés au niveaux des réglages du filtre actif numérique.

Chebyshev ont une variation du temps de propagation de groupe montrant un coude, une remontée brutale avant la fréquence de coupure, ce qui signifie que la phase varie plus rapidement dans cette zone. La variation de phase avec la fréquence n'est donc pas une droite, et il devient difficile voire impossible d'obtenir une continuité satisfaisante de la variation de phase du système. L'alignement temporel est plutôt médiocre avec ce type de filtre, figures 204 et 205.

Le calage temporel grave/médium, surtout si la fréquence de coupure est basse et l'ordre du filtre élevé, entraîne des décalages vers l'arrière très importants des voies supérieures. Par exemple, un filtre de Butterworth d'ordre 3 à $fc = 500 \text{ Hz}$ produit entre ses sorties un déphasage de plus de 270° à cette fréquence, soit $3/4$ de période, celle-ci étant de 2 ms. La longueur d'onde à 500 Hz est de 68,8 cm.

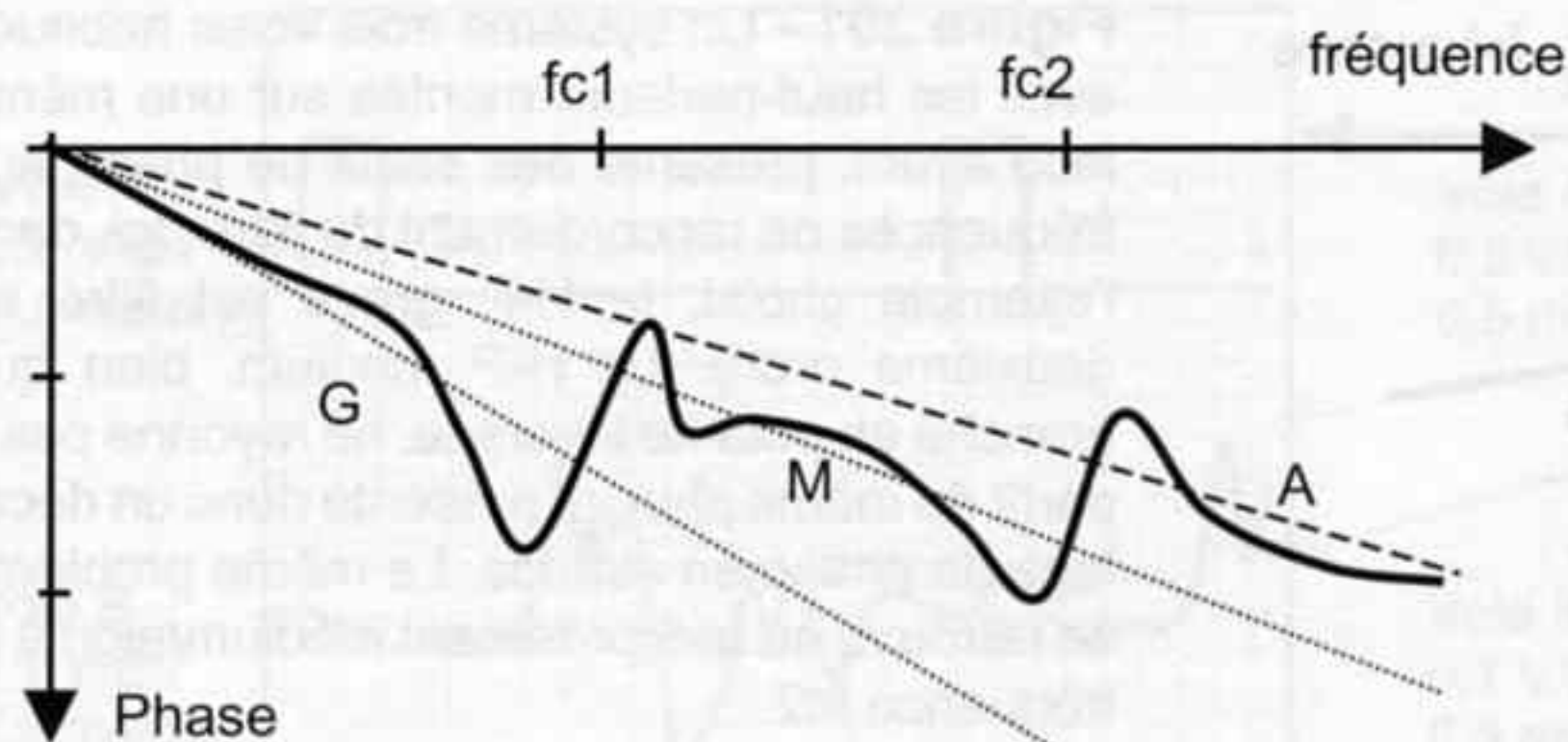


Figure 204 - Un système mettant en œuvre des filtres à variation de phase non linéaire avant la coupure, montre une courbe de phase avec des portions incurvées, la pente étant plus forte juste avant la coupure. Si de plus les pentes des différentes cellules ne sont pas identiques, comme ici d'ordre 2 pour le raccordement grave/médium mais d'ordre 3 pour le raccordement médium/aigu, alors le calage temporel est délicat.

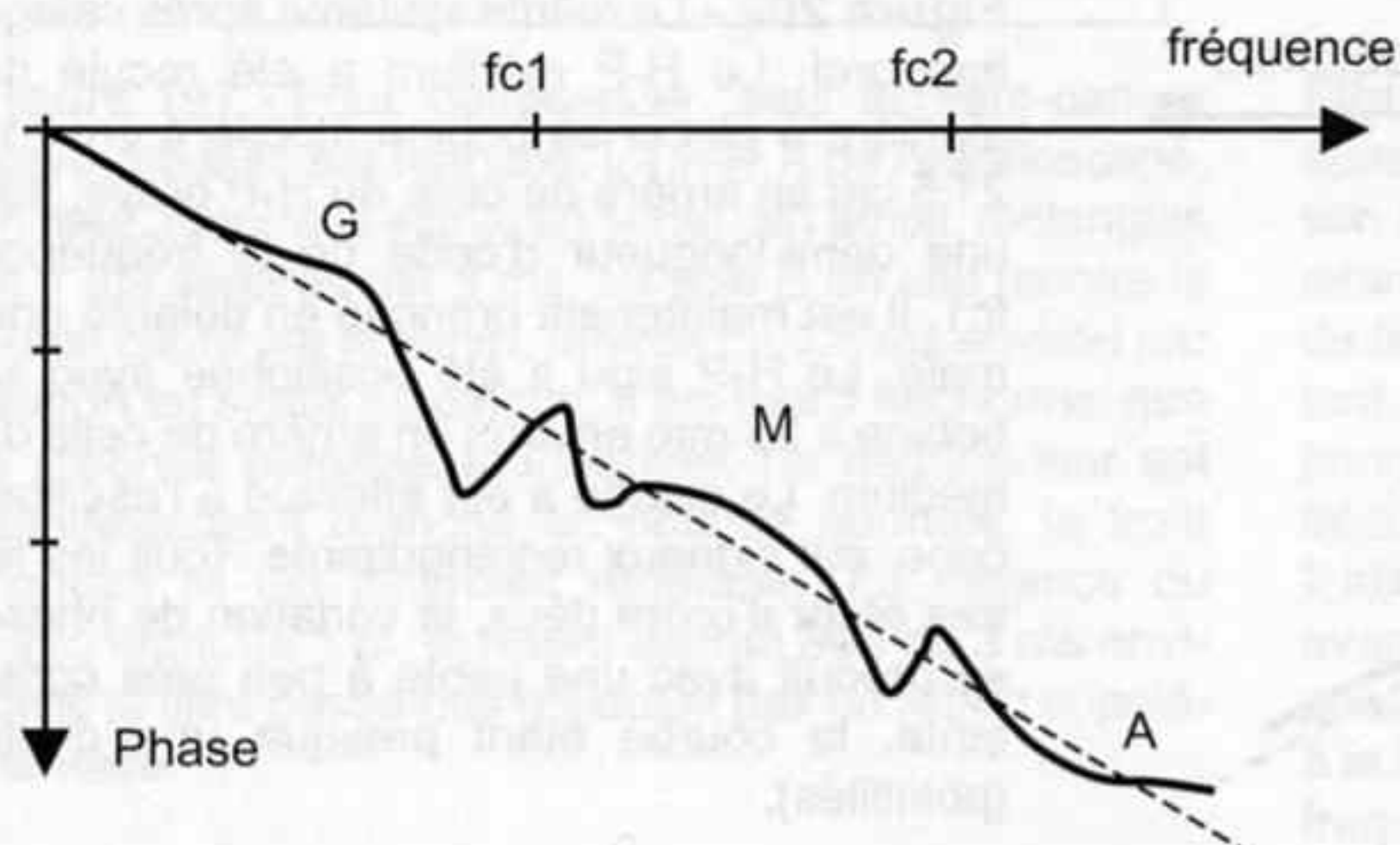


Figure 205 - Le meilleur, ou devrais-je dire le moins mauvais résultat obtenu à partir du cas ci-dessus, n'est pas vraiment rectiligne. L'écart par rapport à la droite en pointillé peut atteindre plusieurs dizaines de degrés de déphasage, ce qui correspond à des retards ou des avances temporelles de plusieurs ms, de certaines zones de fréquence, comme ici le bas médium avant la coupure du H-P grave à $fc1$. L'effet subjectif sur la reconstitution de l'espace sonore est sensible, et bien que le résultat soit tout de même meilleur qu'en l'absence d'alignement, l'ensemble paraît moins naturel que le cas précédent.

Le recul nécessaire pour la voie médium est donc de :
 $d = \lambda \cdot \Delta\phi / 360 = 51,6 \text{ cm} !$

Un tel décalage ne peut être envisagé que si la voie médium est équipée d'un pavillon, car il est irréaliste de positionner un H-P à rayonnement direct aussi loin en arrière du caisson grave, dans une ébénisterie séparée. C'est pourquoi dans ce cas les constructeurs préfèrent réaliser un calage en phase "au plus près" en inversant la polarité de branchement du médium et en le reculant éventuellement de seulement 17,2 cm soit 1/4 de période, autrement dit un déphasage de -90° . Les enceintes colonnes à face avant plane font usage de filtres du second ordre avec inversion de polarité de la voie médium, et aucun décalage des haut-parleurs, ce qui aboutit à une mise en phase (à peu près) correcte mais pas à la cohérence temporelle. Seul le tweeter bénéficie parfois de ce calage, car les longueurs d'onde des fréquences mises en jeu sont beaucoup plus faibles. Un filtre d'ordre 2 à la fréquence $fc = 5 \text{ kHz}$ demande seulement 34,5 mm environ de décalage.

Les arguments avancés généralement sont que ce calage temporel ne s'entend pas, et qu'une mise en phase correcte, pour que la somme soit plate autour de la fréquence de raccordement, est suffisante. Les logiciels d'optimisation de filtre sont d'ailleurs très souvent employés pour mettre au point les systèmes de haut-parleurs alignés verticalement sur une même face avant, les décalages pris en compte dans ce cas ayant pour but de simplifier l'ébénisterie. Si cette mise en

phase est très satisfaisante avec les matériels habituels, la mise en œuvre de pavillons et de tweeters à compression nécessite un calage temporel rigoureux. Ce calage impose une position très reculée du tweeter, légèrement en arrière du moteur du pavillon médium, et son rayonnement est alors gêné par la présence du pavillon. Au vu de ces problèmes, les efforts des constructeurs pour obtenir des moteurs à chambre de compression une bande passante suffisamment étendue et linéaire pour se passer de tweeter, et éliminer ainsi les cellules de filtre et les décalages qui en découlent, prennent un sens nouveau. Là encore, l'usage d'un délai sur filtre actif numérique évite ce recul du tweeter, et permet par conséquent de le positionner en avant, là où son rayonnement est libre, sans diffraction.

AMPLITUDE OU PHASE ? LES DEUX SI POSSIBLE !

Les pavillons posés sur les caissons de grave étant maintenant calés "en phase", une petite vérification de la réponse en fréquence, afin de vérifier l'absence de trou étroit qui indiquerait un branchement en polarité incorrecte d'un des haut-parleurs, montre curieusement des irrégularités toutes nouvelles. C'est tout simplement la conséquence du décalage horizontal, vers l'arrière, des voies supérieures. Les cellules de filtrage ont en effet été calculées pour obtenir une réponse plate autour de la fréquence de raccordement lorsque

les deux haut-parleurs rayonnent à partir d'un même plan, c'est-à-dire avec leurs bobines mobiles alignées verticalement. Cette condition n'étant plus respectée, la sommation des deux ondes n'est plus rigoureusement exacte sur l'ensemble de la plage de fréquence. Par exemple, un raccordement tweeter/médium effectué à 5 kHz avec filtres d'ordre 2, donc déphasage de 180° , entraîne un recul du tweeter de $1/2$ longueur d'onde soit 34,4 mm, afin d'obtenir l'alignement temporel des fronts montants. Cette distance correspond à une longueur d'onde entière à la fréquence de 10 kHz. Tweeter et médium sont donc en opposition de phase à cette fréquence, et si le niveau émis par le médium n'est pas encore assez atténué, le niveau de la somme est plus faible que prévu. Un creux de plus de 2 dB n'est pas rare, autour de 2 fois f_c lorsque le calage temporel a été effectué.

On peut cependant faire plusieurs remarques :

- Ces creux et irrégularités sont souvent indiscernables à l'écoute, car confondus avec d'autres irrégularités de la réponse en fréquence.
- Avec des filtres d'ordre 3 ou 4 l'amplitude de ces creux et bosses est réduite à une valeur acceptable, inférieure aux non-linéarités des haut-parleurs.
- Le gain en qualité apporté par le calage temporel est largement supérieur aux défauts de linéarité de réponse en fréquence que cela entraîne, tout au moins sur les systèmes qui le méritent.
- Les logiciels d'optimisation des filtres permettent de modifier les réponses en fréquence de l'une ou l'autre cellule de filtrage, afin de compenser ces creux et bosses presque parfaitement.

L'amateur qui souhaite construire ses enceintes "sur mesures", ou simplement modifier ou améliorer son matériel, ne peut se lancer dans le calcul des filtres que s'il dispose d'un de ces logiciels d'optimisation. Un simple utilitaire de calcul ne suffit pas, car la position spatiale des haut-parleurs doit être prise en compte, ainsi que leurs courbes de réponse naturelles. XOPT, CALSOD, Filter Designer ou LEAP parmi bien d'autres permettent ce type d'optimisation, qu'il est toujours possible de sous-traiter à un spécialiste.

Un compromis doit être établi entre linéarité de la réponse en fréquence et linéarité de la variation de la phase. L'utilisation de filtres d'ordre élevé, 4 en général, permet un calage temporel sans introduire d'irrégularité dans la réponse en fréquence, mais pose plusieurs problèmes :

- Valeur importante, souvent irréaliste, du décalage horizontal de la voie médium.
- L'ordre 4 ainsi que l'ordre 3 imposent deux selfs en série avec le haut-parleur grave, ce qui est néfaste à son amortissement correct.

- Nombre important de composants, d'où calculs plus longs et coût supérieur.

Les filtres d'ordre 3 ou 4 sont donc mieux adaptés à la coupure médium/aigu, où les composants sont plus petits et les résistances des selfs moins gênantes. Le raccordement grave-médium se satisfait de filtres d'ordre 2. Bien sûr cela ne constitue pas une règle absolue, car il est possible de réaliser des selfs à très faible résistance série, et la valeur importante du décalage convient très bien à un pavillon médium. Mais alors, au lieu d'optimiser laborieusement le filtrage passif, qui restera figé, peut-être vaut-il mieux envisager un filtrage actif paramétrable ? Un système à pavillon le mérite, et le tweeter positionné en avant rayonne alors librement sans obstacles, sans diffraction, son retard étant réglé par le délai du filtre.

RÉPONSE EN PUISSANCE

Certains filtres baptisés CPC, Constant Power Circuits chez les anglos-saxons, ont la particularité de présenter une impédance constante en entrée, en plus d'une somme des sorties plate autour de la coupure. Cette caractéristique est de bien peu d'intérêt, les amplificateurs bien construits étant très peu sensibles à la valeur d'impédance de la charge branchée en sortie, leur gain étant fixé de manière pratiquement indépendante du courant débité, jusqu'à une certaine limite. Les filtres de Linkwitz-Riley d'ordre pair présentent tous une bosse d'impédance d'entrée autour de la fréquence de raccordement, l'impédance pouvant prendre alors une valeur plus de deux fois supérieure à la valeur nominale. Les autres filtres, dès l'instant qu'ils sont calculés pour raccorder à -6 dB, montrent eux-aussi une bosse d'impédance. Cela n'a jamais constitué un quelconque problème, même avec des amplificateurs à lampes sans contre-réaction, dont l'impédance de sortie est pourtant élevée, et qui devraient alors montrer une variation du gain, et par conséquent du niveau de sortie, dans cette bande de fréquence.

Si l'amplificateur à lampes est bien conçu, à partir de lampes à faible résistance interne, cet effet est relativement limité, et parfois même bénéfique (voir figures 294-295). Un faible taux de contre-réaction élimine complètement cet effet de variation du gain si cela s'avère nécessaire.

Les amplificateurs à transistors, avec leur impédance de sortie extrêmement basse et leur gain fixé par pont de résistances, sont absolument exempt de cet effet, mais ne donnent pas pour autant des résultats supérieurs avec ce type de filtre.

Ces amplificateurs utilisant une contre-réaction de tension seront détaillés au chapitre suivant (9). Pour l'instant, sans entrer dans la théorie des circuits bouclés,

notons simplement que l'impédance de sortie d'un amplificateur contre-réactionné présente une valeur très basse, sur une bande de fréquence relativement large. Cette valeur est souvent nettement plus faible que la résistance des cordons de liaison des enceintes !

L'amplificateur se comporte alors comme une source de tension, et sa tension de sortie est fixée par principe à une valeur égale à la tension du signal en entrée, multipliée par une constante A appelée "amplification en boucle fermée".

Cette tension de sortie est absolument insensible au courant demandé par la charge reliée à la sortie. En cas de court-circuit franc, le courant débité ne serait théoriquement pas limité. En pratique cependant, les transistors de sortie, les résistances d'émetteurs de ces transistors, et l'impédance interne non nulle de l'alimentation, vont limiter ce courant. Il risque tout de même d'atteindre des valeurs de plusieurs dizaines d'ampères, qui seraient fatales aux transistors de sortie si le constructeur n'avait pas prévu un circuit de protection.

Parfois simples fusibles disposés sur les deux branches de l'alimentation, plus souvent circuit électronique capteur de courant servant à déclencher un relais, isolant ainsi la charge (l'enceinte) du circuit de sortie dès lors que le courant demandé dépasse le seuil de déclenchement de la protection.

Dans la plupart des cas, une impédance de charge aussi basse que $3\ \Omega$ ne provoque pas de déclenchement intempestif des circuits de protection, et ce n'est qu'en dessous de $2\ \Omega$ que ces derniers interviennent.

Par conséquent, la connaissance de la valeur nominale de l'impédance de l'enceinte n'est en pratique d'aucune utilité ou presque avec ce type d'amplificateurs.

L'impédance mesurée sur l'enceinte présente obligatoirement des variations avec la fréquence (voir courbe figure 106) ce qui fait que la charge ne sera égale à cette valeur nominale que pour quelques fréquences particulières. Partout ailleurs, pour toute autre fréquence, l'impédance de charge sera différente.

Il est utile de rappeler que certains appareils fonctionnant en classe A jusqu'à quelques W, puis en classe AB au-delà, verront cette puissance délivrée en pure classe A diminuer, si l'impédance de charge est plus faible que prévu. Dans ce cas précis, des sorties adaptées à différentes impédances (4 ou $8\ \Omega$ en général) peuvent s'avérer utiles.

Prenons en exemple un ampli donné pour $10\ \text{W}$ en pure classe A sur $Z = 8\ \Omega$ et $50\ \text{W}$ maxi en classe AB, toujours sur $8\ \Omega$. La puissance délivrée en classe A

correspond à un courant dans la charge I_c égal à deux fois le courant de repos I_o dans l'étage de sortie. La puissance de $10\ \text{W}$ correspond à un courant :

$$I_c = \sqrt{P/Z} = \sqrt{10/8} = 1,118\ \text{A}$$

Le courant de repos I_o est donc $I_o = I_c / 2 = 0,559\ \text{A}$

Sur charge de $4\ \Omega$, la puissance disponible en pure classe A est alors de $P = Z \cdot I^2 = 4 \times 1,118^2 = 5\ \text{W}$ seulement, et $2,5\ \text{W}$ sur $2\ \Omega$...

En revanche, la puissance maxi en classe AB à l'écrêtage, limitée par la tension d'alimentation de l'étage de puissance, de $30\ \text{V}$ environ, s'établit à $100\ \text{W}$ sur $4\ \Omega$ et $200\ \text{W}$ sur $2\ \Omega$!

En ce qui concerne les amplificateurs à tubes avec transformateurs de sortie, le problème est tout différent car le transformateur présente au primaire, pour les tubes de puissance, une charge Z_p qui n'est que le reflet de l'impédance de l'enceinte Z_L , multipliée par le rapport n des enroulements au carré :

$$Z_p = n^2 \cdot Z_L$$

Le raccordement d'une impédance très différente produit alors une charge inadaptée sur ces tubes de puissance, qui seront amenés à débiter un courant trop élevé en cas de charge trop basse. Cela se traduira par un gain anormalement bas, et par une distorsion importante, due en partie à l'alimentation, trop sollicitée, et en partie aux tubes eux-mêmes, qui montrent lors des fortes modulations de courant une variation de leur coefficient d'amplification (tassement des courbes I_p/U_p pour les faibles courants).

Au contraire le branchement d'une impédance de charge trop forte fait travailler l'étage de sortie "à vide" c'est-à-dire sans modulation de courant, produisant un manque total d'amortissement. Le transformateur de sortie non chargé présente alors des non-linéarités de sa réponse en fréquence, avec la plupart du temps une résonance aux fréquences élevées. Le son obtenu est souvent scintillant, trop brillant, parfois même plein de duretés et très métallique.

La connaissance de la valeur nominale de l'impédance n'est cependant pas suffisante, car elle ne renseigne pas sur l'allure de la courbe d'impédance avec la fréquence. D'une manière générale, ce sont les impédances capacitives, qui diminuent lorsque la fréquence augmente, qui posent problème. Une telle impédance demande en effet à l'amplificateur de débiter du courant **avant** que sa tension de sortie ne s'établisse, le courant étant en avance de phase sur la tension.

La réponse correcte à un échelon de tension (front montant d'un signal carré) sur une telle charge demanderait donc à l'ampli de débiter un courant quasi-infini pendant cette phase transitoire, ce dont il est incapable.

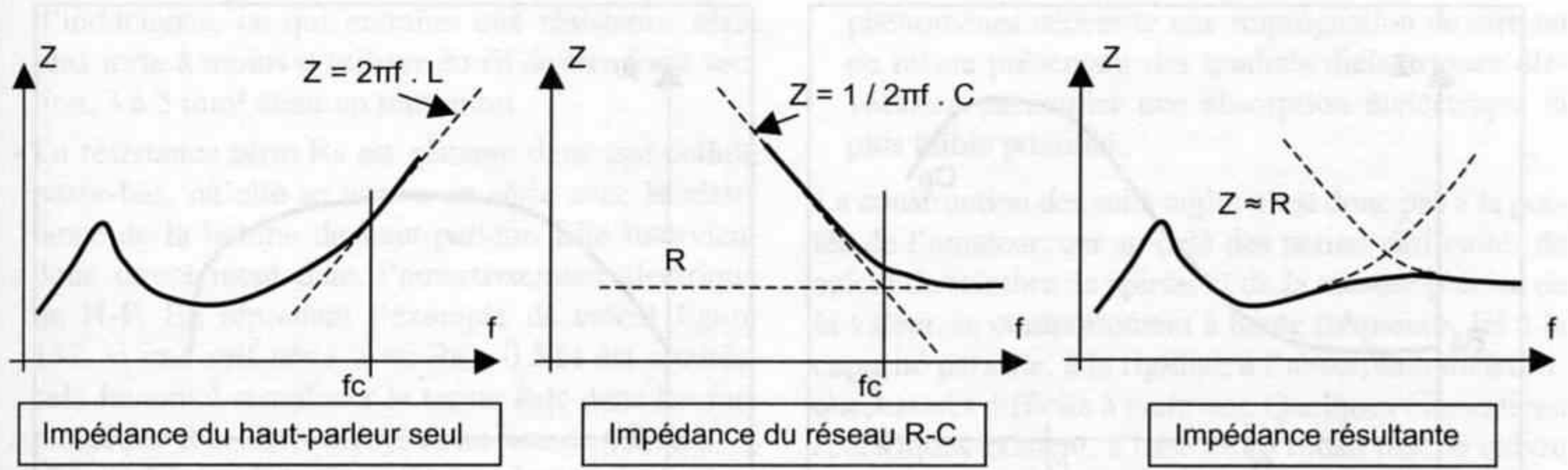


Figure 206 - Linéarisation d'impédance par réseau R-C série, en parallèle avec la bobine du haut-parleur.

On comprend alors que c'est aux fréquences élevées et sur des impulsions fortes (signaux très pointus) que la charge capacitive sera difficile à piloter. L'aptitude des circuits d'alimentation à débiter des courants transitoires très élevés est un excellent indicateur de la qualité de l'amplificateur face à ce type de charge. C'est ce qui explique que très peu d'amplis sont capables de fonctionner correctement avec les panneaux électrostatiques, ces enceintes étant des... condensateurs !

De la même manière les fameux tweeters piezo-électriques, équivalents à des condensateurs de plusieurs nF, sont de véritables tueurs d'étage de sortie, surtout si plusieurs d'entre eux sont montés en parallèle, comme on le voit sur certaines enceintes de sonorisation de foire.

L'enceinte ne devrait pas présenter de charge capacitive aux fréquences élevées, dans les secteurs médium et aigu. Une impédance légèrement montante, donc inductive, est grandement préférable. La bobine des haut-parleurs étant par nature inductive, on peut penser que cet effet suffit à garantir une impédance montante avec la fréquence. Ce n'est malheureusement pas toujours le cas : par exemple l'association d'un haut-parleur médium de 8 Ω avec un tweeter de 4 Ω produit un escalier descendant dans la courbe d'impédance, autour de la fréquence de raccordement. L'impédance est donc capacitive dans cette zone.

Il est plus judicieux d'associer des haut-parleurs d'impédance croissante, grave de 4 Ω obtenu avec deux haut-parleurs de 8 Ω en parallèle, médium de 6 Ω, puis tweeter de 8 Ω.

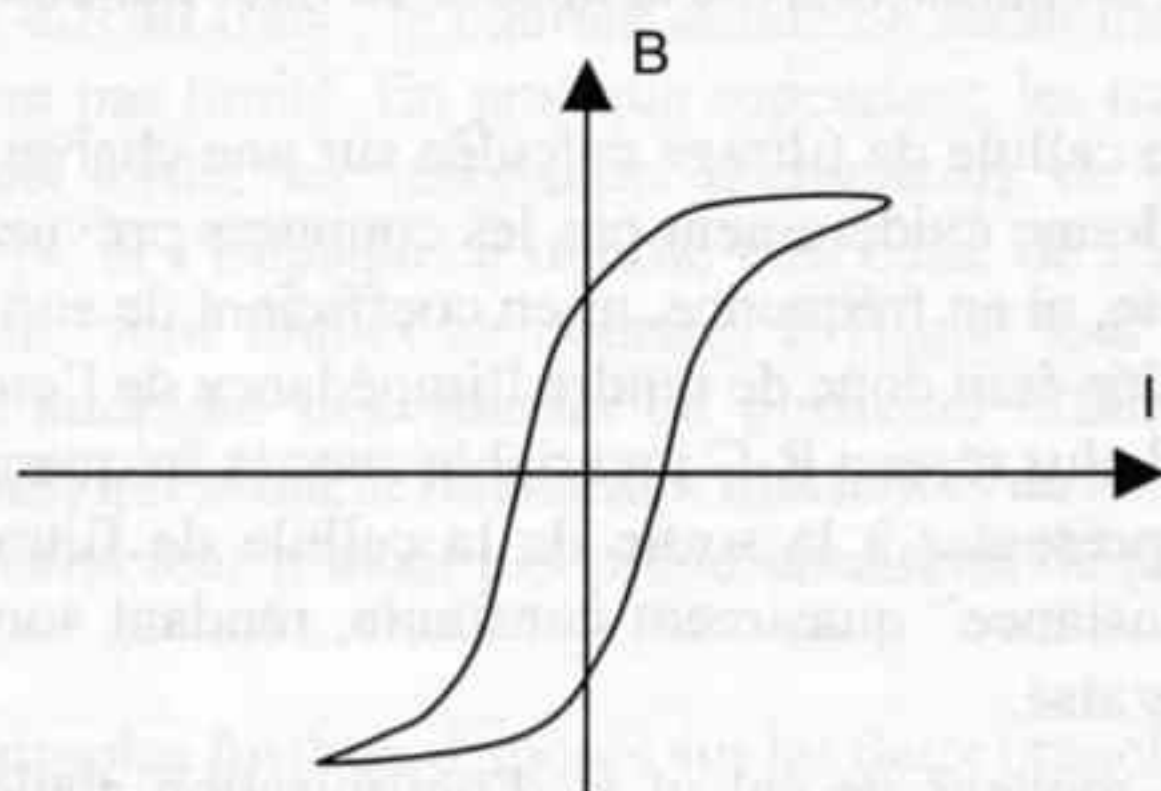
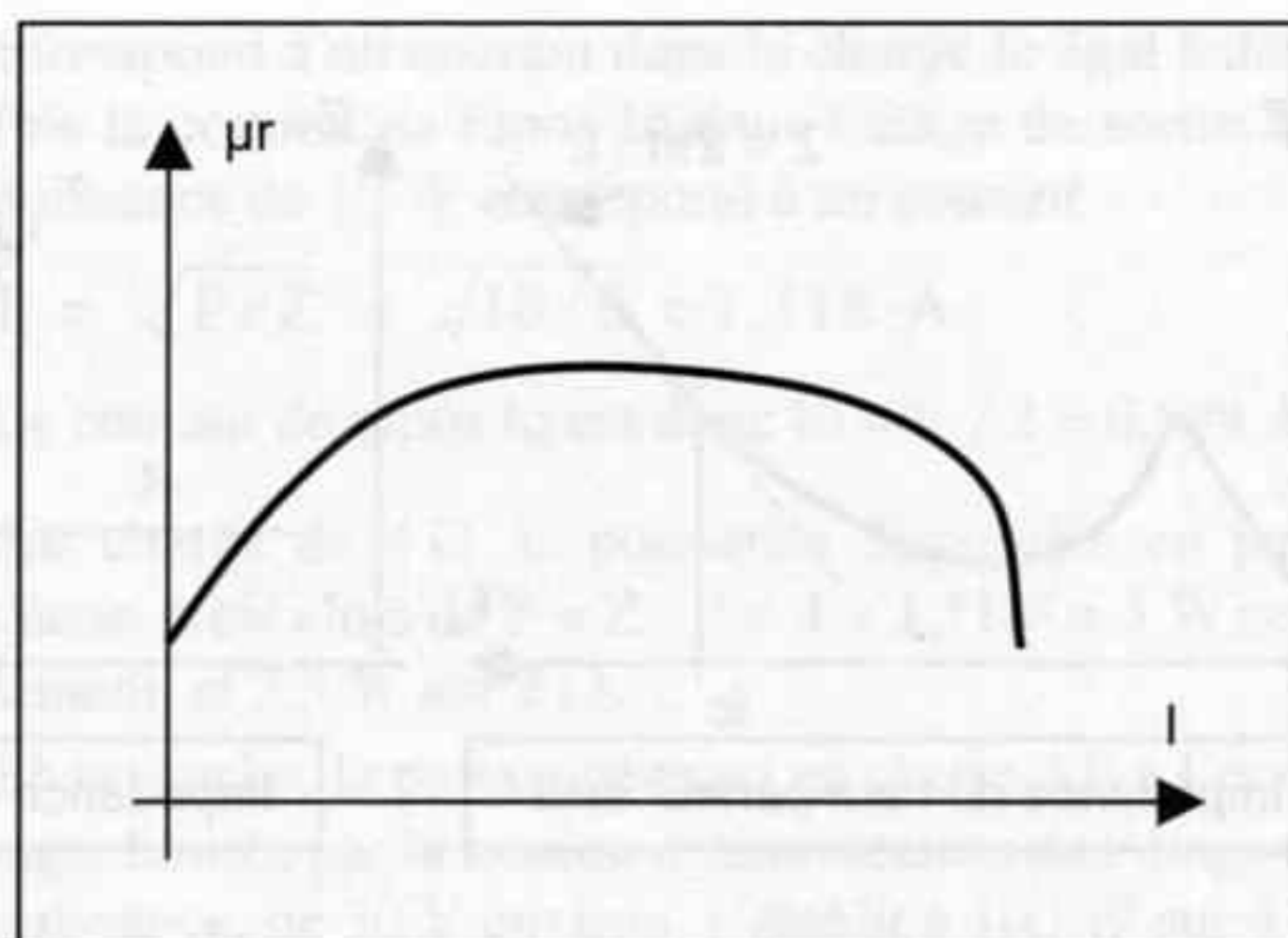
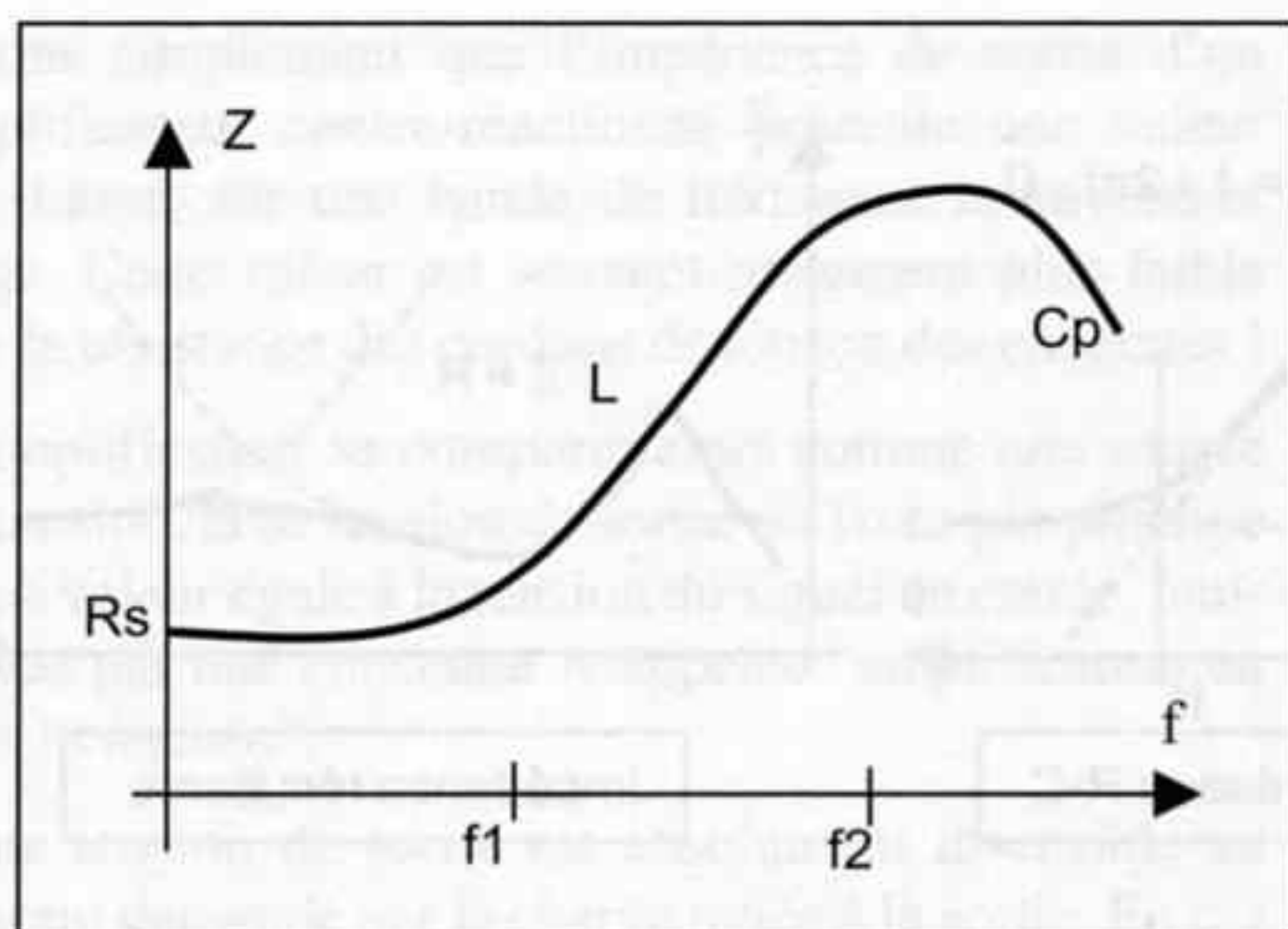
Pour en terminer avec ce sujet de l'impédance des cellules de filtrage, une pratique ancienne, à mon avis obsolète, consistait à installer en parallèle avec le haut-parleur aigu ou médium un réseau R-C série, figure 206, appelé Zobel du nom de son inventeur. En effet, la bobine du haut-parleur étant par construction inductive, son impédance augmente avec la fréquence,

et la cellule de filtrage calculée sur une charge de 8 Ω ne donne évidemment pas les coupures prévues, ni en pente, ni en fréquence, ni en coefficient de surtension. L'idée était donc de rendre l'impédance de l'ensemble H-P plus réseau R-C invariable avec la fréquence, afin de présenter à la sortie de la cellule de filtrage une "résistance" quasiment constante, rendant son calcul plus aisé.

Les moyens de calcul et d'optimisation actuels permettent l'obtention des résultats souhaités sans faire usage de ce réseau, devenu inutile, sauf peut-être pour raccorder un H-P grave de grand diamètre, très inductif, avec un tweeter à la fréquence de 3,5 kHz, ce qui constituerait un très mauvais choix.

D'autre part, si la cellule de filtrage donne avec ce réseau les résultats souhaités, l'impédance du haut-parleur n'a pas changé pour autant, et l'inductance de sa bobine fait que le courant qu'il absorbe diminue avec la fréquence, de la même manière avec ou sans réseau R-C. Simplet, à ces fréquences, le réseau absorbe à la sortie du filtre un courant plus important que le H-P. Ce réseau permet seulement de masquer un mauvais filtre, non optimisé, ou un haut-parleur utilisé sur une plage de fréquence trop large. Une perte de transparence, d'aération et de dynamique est constatée lorsque ce réseau est employé, et les filtres réalisés avec un nombre minimal de composants donnent systématiquement des résultats supérieurs. Ce nombre minimal s'entend "sur le schéma", car en pratique certains composants sont réalisés par mise en parallèle de plusieurs unités de petite valeur et de technologies différentes, pour des raisons de disponibilités, de précision d'ajustage, et aussi de qualité subjective de l'association.

Si nécessaire, un filtre sans Zobel peut être recalculé assez facilement en connaissant les pentes et fréquences de coupure du filtre d'origine, ainsi que l'impédance exacte du haut-parleur à la fréquence de raccordement. Très souvent, un seul composant est



changé : par exemple la self série du filtre passe-bas du médium est diminuée de la valeur de l'inductance du H-P, et le filtre modifié fonctionne mieux la plupart du temps.

DES COMPOSANTS PAS SI PASSIFS

Trois types de composants sont mis en œuvre dans la réalisation des filtres passifs : selfs, condensateurs et résistances. Chacun d'eux, bien que passif d'un point de vue physique, c'est-à-dire sans apport extérieur d'énergie autre que le signal lui-même, agit sur la restitution, principalement à cause d'effets parasites.

Les selfs, bobinages à auto-induction, présentent une impédance augmentant avec la fréquence, théoriquement de manière linéaire. En réalité, aux très basses fréquences, la résistance en continu du fil constituant le bobinage devient plus importante que la réaction inductive. Aux fréquences élevées, c'est la capacité parasite existant entre spires jointives qui diminue l'impédance. Si le noyau est magnétique, sa perméabilité varie avec le courant traversant le bobinage, et il se produit de plus une hystérésis, une dissymétrie de la perméabilité, selon que le courant augmente ou diminue, figure 207.

La courbe d'impédance est donc loin d'une droite idéale, et les variations d'impédance avec la fréquence et le niveau du signal atteignent facilement 20 à 25 %, ce qui fausse notablement les résultats des filtres passifs construits avec de tels composants. La mauvaise

Figure 207 - Les effets parasites des selfs sont nombreux, et leurs conséquences non négligeables. En haut à gauche, courbe d'impédance d'une self avec sa résistance série R_s et sa capacité entre spires C_p .

Ci-dessus, la perméabilité du noyau, donc l'inductance L , est plus faible pour les faibles courants, donc autour du passage par zéro du signal. Les crêtes de courant font également chuter l'inductance, jusqu'à la saturation.

À gauche, l'hystérésis produit des variations d'induction dissymétriques par rapport aux variations du courant.

qualité des selfs même les plus sophistiquées, les conséquences fâcheuses sur le fonctionnement du système, leur coût élevé et les difficultés de fabrication, ainsi que leur encombrement, sont autant de critères en faveur d'un filtrage actif, au moins pour le raccordement grave-médium.

Les perturbations induites par ces effets parasites sont nombreuses :

- Le noyau magnétique, même surdimensionné et réalisé en matériau à forte perméabilité, présente une perméabilité plus faible lorsque le courant est nul. L'inductance est donc plus faible autour du zéro du signal, et la fréquence de coupure du filtre, qui augmente quand L diminue, est modulée par les variations du signal. En particulier sur les crêtes du signal, la forte valeur de L , en abaissant la fréquence de coupure, ampute la partie haute de la bande de fréquence.

D'autre part, l'hystérésis fait que l'inductance est plus forte lorsque le courant diminue et plus faible lorsqu'il augmente, ce qui produit une dissymétrie des fronts montants et descendants du signal. La self à noyau magnétique est à proscrire dans un système prétendant respecter le réalisme sonore. Les variations du courant sont telles, dans un rapport 1 000 (ou 60 dB), que le meilleur noyau ne peut être considéré comme linéaire. Les selfs sans noyau, dites selfs à air, demandent un nombre de spires beaucoup plus grand pour une même valeur

d'inductance, ce qui entraîne une résistance série plus forte à moins d'utiliser du fil de très forte section, 3 à 5 mm² étant un minimum.

- La résistance série R_s est gênante dans une cellule passe-bas, où elle se trouve en série avec la résistance de la bobine du haut-parleur. Elle intervient donc directement dans l'amortissement électrique du H-P. En reprenant l'exemple de calcul figure 137, si une self série avec $R_s = 0,5 \Omega$ est ajoutée, cela revient à remplacer le terme R_{dc} dans les formules par $R_{dc} + R_s$, soit 5,3 Ω au lieu de 4,8 Ω .

Les valeurs des paramètres deviennent alors $Q_{ms} = 9,865$ (+14 % environ) $Q_{es} = 0,2685$ et $Q_{ts} = 0,2614$ (+26 %). L'efficacité du H-P diminue, le terme Q_{es} intervenant au dénominateur dans l'expression de la sensibilité du H-P. De plus cette résistance série de la self forme avec l'impédance de la bobine un pont diviseur qui atténue le signal. Dans l'exemple du caisson Fidel, le rendement chute de 1 dB à cause de l'augmentation de Q_{es} , et encore de 1,33 dB par atténuation résistive.

Le coefficient d'alignement passe à $n = 11$ si le même volume d'enceinte est conservé, avec par conséquent une belle résonance de tonneau. C'est une résistance série inférieure à 0,2 Ω qui est nécessaire dans cet exemple. La fréquence de coupure de 500 Hz et l'impédance de 3 Ω entraînent une valeur de self de l'ordre de 2 mH pour une cellule du deuxième ordre de Linkwitz-Riley. Une self de cette valeur, pour présenter une résistance aussi faible, doit être bobinée en fil de section supérieure à 5 mm² environ, ce qui impose l'emploi de fil émaillé de diamètre 3 mm, ou de ruban plat AWG 10.

- La capacité parasite annule l'effet selfique aux fréquences élevées, ce qui fausse les résultats obtenus avec les filtres des voies aiguës. Les selfs utilisées dans ces filtres doivent être mesurées à la plus haute fréquence de la bande passante du filtre, ce qui amène à les surdimensionner, une self donnée pour 0,22 mH n'en faisant souvent plus que 0,18 à 10 kHz. Cette capacité parasite, comme toute capacité, présente une absorption diélectrique qui produit un effet de mémoire sur le signal. Cet effet très perturbateur est annulé par l'emploi d'isolants sans effet mémoire (papier ciré).
- La rigidité mécanique du bobinage intervient également, les forces électro-magnétiques et électro-statiques exercées sur les spires étant génératrices de vibrations, qui elles-même modulent les caractéristiques de la self. Les vibrations issues de l'enceinte et propagées par voie solide jusqu'aux spires ont le même effet, qui se traduit par une modulation de la fréquence de coupure du filtre en fonction de la forme du signal. Un amortissement correct de ces

phénomènes nécessite une imprégnation de cire ou de résine présentant des qualités diélectriques élevées, en particulier une absorption diélectrique la plus faible possible.

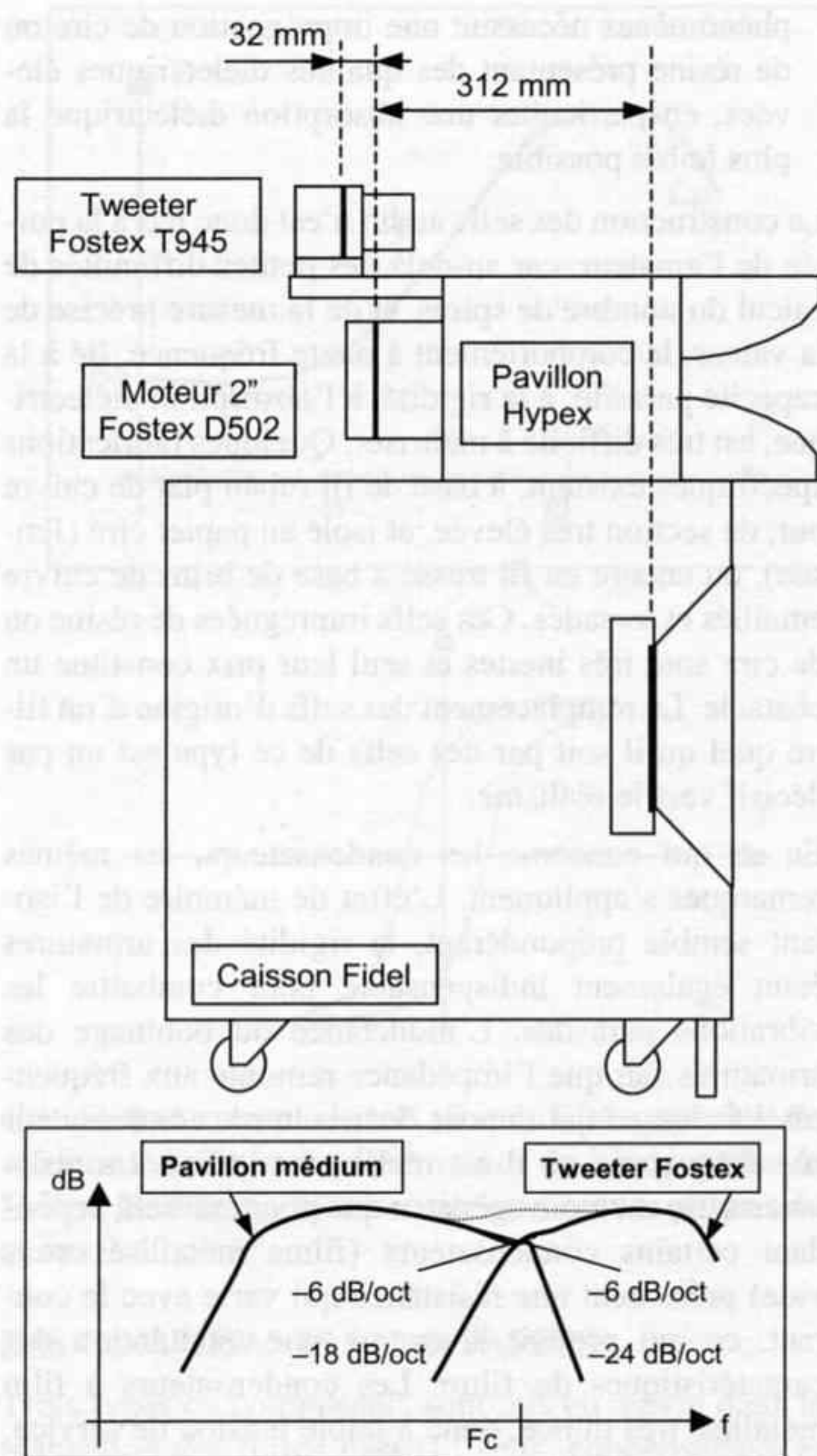
La construction des selfs audio n'est donc pas à la portée de l'amateur, car au-delà des petites difficultés de calcul du nombre de spires, et de la mesure précise de la valeur, le comportement à haute fréquence, lié à la capacité parasite, à la rigidité, à l'absorption diélectrique, est très difficile à maîtriser. Quelques fabrications spécifiques existent, à base de fil ruban plat de cuivre pur, de section très élevée, et isolé au papier ciré (Jensen), ou encore en fil tressé à base de brins de cuivre émaillés et torsadés. Ces selfs imprégnées de résine ou de cire sont très inertes et seul leur prix constitue un obstacle. Le remplacement des selfs d'origine d'un filtre quel qu'il soit par des selfs de ce type est un pas décisif vers le réalisme.

En ce qui concerne les condensateurs, les mêmes remarques s'appliquent. L'effet de mémoire de l'isolant semble prépondérant, la rigidité des armatures étant également indispensable pour combattre les vibrations parasites. L'inductance du bobinage des armatures fait que l'impédance remonte aux fréquences élevées, ce qui impose de mesurer le condensateur aux fréquences où il est réellement utilisé. La résistance série est moins gênante que pour une self, cependant certains condensateurs (films métallisés sous vide) présentent une résistance qui varie avec le courant, ce qui produit là encore une modulation des caractéristiques du filtre. Les condensateurs à film métallisé très mince, donc à faible tension de service, inférieure à 250 V, sont sujets à ce phénomène, et ne supportent pas de forts courants. Les modèles chimiques, même bipolaires ou prétendus spéciaux pour H-P, n'ont strictement rien à faire dans un filtre d'enceinte, surtout qu'il existe maintenant des condensateurs à film de fortes valeurs (SCR polypropylène métallisé jusqu'à 330 μF).

Deux technologies donnent d'excellents résultats, avec isolement soit par polypropylène soit par papier huilé. Les condensateurs à film de polypropylène, avec armatures en cuivre, ou en étain (Audyn-cap, Mundorf, SCR) constituent le haut de gamme pour ce type.

Les modèles plus économiques à film métallisé aluminium, de marque SCR entre autres, sont reconnus pour leur rapport qualité/prix imbattable. Les modèles ERO ou Arcotronic très courants sont également très intéressants quoique moins cotés auprès des amateurs.

Les polypropylènes à bain d'huile, utilisés en filtrage secteur ou démarrage moteur (Bosch KO-MP), sont particulièrement insensibles aux vibrations parasites, ce qui les rend intéressants en filtrage d'enceintes.



La tension de service de ces condensateurs devrait être choisie de 400 V ou plus, les versions basse tension étant subjectivement moins neutres, moins dynamiques, et apportant une brillance et une dureté désagréables.

Certains fabricants proposent des modèles avec diélectrique Téflon, et armatures étain, aluminium ou cuivre, procurant une luminosité et une transparence appréciable du registre aigu. Le prix élevé, lié aux difficultés de mise en œuvre du Téflon autant qu'à l'étroitesse du créneau de marché, fait que ces composants restent peu diffusés.

Les condensateurs au papier huilé procurent une sonorité inimitable, faite de douceur et de précision, de dynamique et de souplesse. Les anciens modèles encore disponibles, de marque Philips avec sorties sur perles de verre, ou encore de marque LCC ou Sic-safco avec bornes stéatites, sont très musicaux. Les meilleurs résultats et de loin sont obtenus avec les modèles à armatures de cuivre pur, isolés au papier imprégné.

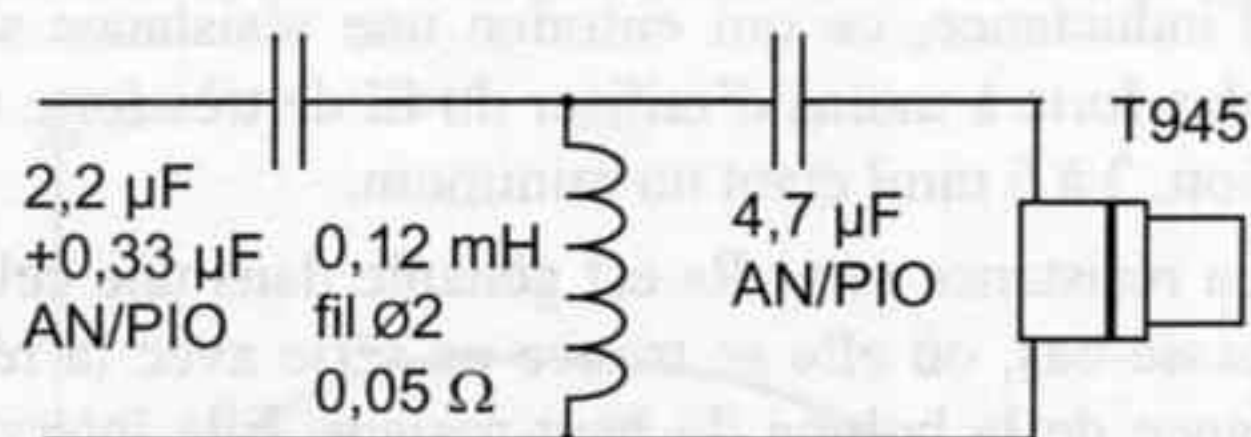


Figure 208 - Mise en application du calage temporel des haut-parleurs, avec le système à pavillon de la photo Figure 155 - page 183. La coupure naturelle du moteur 2" associé au pavillon est très rapide au-dessus de 8 kHz, d'ordre 4 acoustique. Une simple self série de 0,22 mH amène une pente du premier ordre entre 3 et 7 kHz environ. Le tweeter annulaire Ø 40 résonnant vers 3,5 kHz est filtré énergiquement au troisième ordre en-dessous de 6 kHz environ. Le raccordement à -6 dB se produit à 6,6 kHz, fréquence à laquelle la phase de la voie médium, variant au premier ordre, atteint -60°. La phase de la voie aiguë à cette fréquence est de +162°. Le déphasage total entre les deux émissions est donc de 222°, soit un retard de 93 µs de l'onde issue du médium. Le tweeter est par conséquent reculé de 32 mm vers l'arrière, le réglage précis étant réalisé à l'oscilloscope. Le filtre de troisième ordre, dont le schéma est donné ci-dessus, présente une surtension modérée vers f_c , ce qui lui donne une forme à double pente, d'ordre 1 juste au dessus de f_c , et d'ordre 3 en dessous, cela afin d'obtenir une réponse globale à peu près plate. Il ne correspond à aucun polynôme connu, et sa mise au point a été faite par essais successifs, avec l'aide d'un logiciel de simulation. Les qualités musicales des composants utilisés, condensateurs Audio-Note Paper-In-Oil et selfs Jensen ruban 3 mm² papier ciré, sont sans doute plus importantes que leurs valeurs exactes...

Audio-Note ou Jensen en produisent, qui surpassent tous les autres. Là encore, un pas décisif est franchi lorsque ces condensateurs remplacent d'autres modèles même très réputés. Je n'ai encore jamais vu de retour en arrière !

Les modèles à armatures en feuille d'argent pur vont encore plus loin en terme de naturel de la restitution, pour un prix tout à fait invouable !

Une pratique connue de nombreux audiophiles consiste à associer différentes technologies de condensateurs afin d'atténuer leur personnalité sonore. La mise en parallèle d'un modèle polycarbonate MKC et d'un modèle polyester MKT apporte presque les mêmes qualités qu'un MKP courant, pour une dépense nettement inférieure. De même, deux petits MKP de 4,7 µF donneront de meilleurs résultats dans l'aigu qu'un seul de 10 µF.

Les excellents modèles n'ont par contre absolument pas besoin d'être découplés !

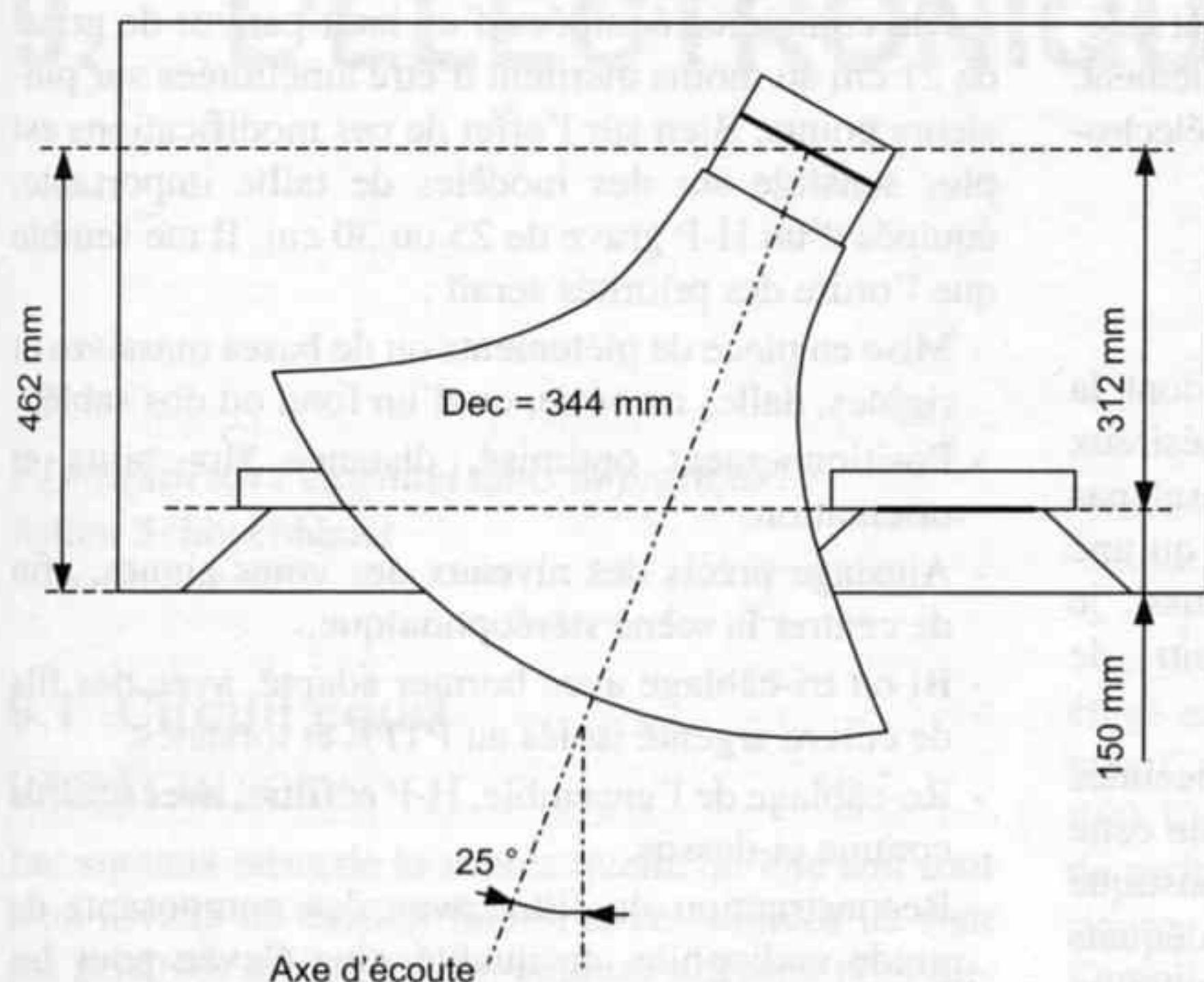


Figure 209 - La coupure grave-médium est réalisée par filtrage actif analogique, au deuxième ordre. Le raccordement à -6 dB vers 500 Hz introduit un déphasage de 180° entre les sorties passe-bas et passe-haut, soit un retard de $1/2$ période. Le centre acoustique du moteur médium est par conséquent reculé de $1/2$ longueur d'onde, soit 344 mm, en arrière du plan d'émission des H-P grave, sur l'axe d'écoute. Ce dernier est incliné de 25° vers l'intérieur, le recul du médium est alors de 312 mm. Le plan d'émission des graves étant à 150 mm en retrait de la face avant, la position du moteur médium est en recul de 462 mm environ. Le pavillon est orienté à 30° vers l'intérieur de la zone d'écoute afin que les "faisceaux sonores" droit et gauche se croisent devant l'auditeur, l'image stéréophonique étant alors inchangée si celui-ci se déplace à droite ou à gauche. Ce point est détaillé plus loin.

Les résistances ne devraient pas être utilisées dans les filtres séparateurs, car en série avec les H-P elles ne peuvent que ruiner leur amortissement. Si une atténuation du niveau d'un H-P est requise, c'est que le choix de l'association des H-P n'est pas optimal... Un réglage de niveau par self à prises ou autotransformateur est mille fois plus efficace qu'un pont diviseur ou un potentiomètre à impédance constante. S'il y a vraiment une grosse différence de niveaux, seul un filtre actif peut solutionner le problème correctement.

À la rigueur, avec amplificateurs à lampes sans contre-réaction, un réglage de niveau est possible en branchant une résistance en **parallèle** sur l'entrée du filtre, ce qui a pour effet de diminuer l'impédance de charge vue en sortie de l'ampli, et donc de diminuer son gain, tout en augmentant l'amortissement.

Le niveau des voies aiguës droite et gauche peut ainsi être ajusté très finement, en écoutant ces voies seules (c'est très déroutant au début !) pour vérifier et corriger le centrage correct de la scène stéréo.

L'implantation des composants est importante également, en particulier les différentes selfs demandent à être éloignées, et leurs axes perpendiculaires afin de minimiser les couplages parasites. La position relative idéale peut être recherchée en faisant circuler un fort courant basse fréquence dans la plus grosse self, et en mesurant la tension parasite induite sur l'autre self. Cette position optimale est souvent dans un plan contenant l'axe de la self perturbatrice.

Le câblage des filtres et des haut-parleurs mérite d'être réalisé en fils torsadés isolés PTFE, sur plaquette de contreplaqué mince (3 à 5 mm), les composants étant collés à l'aide de colle thermofusible ou maintenus par colliers rilsans. Un bornier vissant permet un démon-

tage aisé, aux fins de modification et mises au point, ainsi que les essais de différentes polarités de branchement des haut-parleurs.

Finalement, l'amateur gagne souvent plus à reconstruire son filtre qu'à en calculer un nouveau. En conservant les valeurs des composants mais en les remplaçant par de plus transparents, en les disposant de manière optimale, en séparant les masses des cellules de filtrage afin de bi ou tri-câbler, en recâblant l'ensemble et en installant le filtre à l'abri des vibrations et des champs magnétiques, hors de l'enceinte, les améliorations obtenues sont dans tous les cas évidentes, ceci même sur du matériel haut de gamme. Le budget nécessaire est souvent très élevé et la mise en œuvre d'un filtrage actif doit être sérieusement envisagée, car parfois plus performante et plus avantageuse, offrant de plus une souplesse d'emploi incomparable.

Un compromis tout à fait équilibré consiste à filtrer en actif la coupure grave-médium, ce qui évite les grosses selfs, et en passif la coupure médium-aigu, ce qui évite les bruits et les manques de transparences des circuits électroniques aux fréquences élevées.

EXEMPLE DE FILTRAGE À COHÉRENCE TEMPORELLE

L'exemple des figures 208 et 209 montre bien que l'assistance informatique présente l'avantage, en plus du gain de temps, d'aboutir à des solutions demandant un très petit nombre de composants. Ce point est important pour le constructeur, qui peut ainsi diminuer les coûts, mais aussi pour l'audiophile qui préfère les circuits simples pour leur transparence, leur dynamique et leur aération supérieure. Le cas étudié est finalement

assez simple, les haut-parleurs étant physiquement indépendants, et le filtrage passif sur deux voies seulement. Les schémas complets sont donnés au chapitre électronique, figures 308 et 309.

PRÉPARER LE TERRAIN

Face à une paire d'enceinte du commerce, dont la période de garantie est expirée, l'amateur désireux d'aller un peu plus loin en terme de réalisme ne sait pas exactement par quel bout commencer, et n'a qu'une vague idée du résultat qu'il peut espérer. Aussi, je crois nécessaire de remettre en situation ce chapitre, de le replacer dans la démarche globale.

Entreprendre l'optimisation d'une paire d'enceintes n'a de sens réel que si les étapes précédentes de cette démarche ont été effectuées. Le traitement acoustique de la pièce, la mise en œuvre de supports adéquats visant à isoler des vibrations parasites, la mise en œuvre de filtres secteurs et le traitement des boucles de masse, l'installation de câbles et cordons, de transformateurs de liaison, tous ces points sont autant de démasquages des signaux, qui doivent être établis au préalable. Les modifications possibles au niveau des enceintes, même si elles sont audibles sans ces préalables, ne donnent un résultat cohérent, harmonieux et réaliste, que lorsqu'elles arrivent à leur place dans la démarche. En effet, ces modifications, et encore plus la construction d'enceintes respectant les principes mécaniques énoncés dans ce chapitre, ont pour effet d'augmenter considérablement la dynamique vers les forts niveaux, et vers les basses fréquences. Les crêtes sont alors restituées correctement, et par conséquent le niveau moyen d'écoute est globalement diminué, car il n'est plus indispensable d'écouter à très fort niveau pour retrouver l'impact, l'attaque. Les faibles signaux sont alors noyés dans la masse des bruits perturbants, dans le brouhaha de la réverbération, dans les halos des couplages parasites. Dans cette configuration, à part le gain des niveaux de crête, qui améliore la sensation de présence, rapproche la scène stéréophonique vers l'avant, rien d'autre n'a été retrouvé ! L'espace sonore est encore rempli de rumeurs diverses, la constance de taille, de position, de matière, des instruments n'est pas obtenue. La profondeur de la perspective est floue, même fluctuante.

La déception arrive parfois, lors de la mise en œuvre d'enceintes de taille respectable, capable d'exciter les résonances basses de la salle, et dont les crêtes, réfléchies sur des murs lisses et nus, vrillent les tympans.

Si au contraire l'espace a été préparé pour recevoir des transducteurs dignes de ce nom, leur mise en œuvre amène à la découverte immédiate d'une profondeur d'écoute beaucoup plus grande. La plupart des encein-

tes du commerce équipées d'un haut-parleur de grave de 21 cm au moins méritent d'être améliorées sur plusieurs points. Bien sûr l'effet de ces modifications est plus sensible sur des modèles de taille importante, équipés d'un H-P grave de 25 ou 30 cm. Il me semble que l'ordre des priorités serait :

- Mise en place de piétements ou de bases massives et rigides, dalles ou autre, ou d'un fond ou dos sablé.
- Positionnement optimisé, distance aux murs et orientation.
- Ajustage précis des niveaux des voies aiguës, afin de centrer la scène stéréophonique.
- Bi ou tri-câblage avec bornier adapté, avec des fils de cuivre argenté isolés au PTFE et torsadés.
- Re-câblage de l'ensemble, H-P et filtre, avec des fils comme ci-dessus.
- Reconstruction du filtre avec des composants de grade audiophile, de qualité plus élevée pour les voies médium et surtout aiguë. Optimisation des filtres pour une balance droite/gauche correcte. Élimination des condensateurs électrolytiques, remplacés par des modèles polypropylène, et des selfs à noyaux métalliques remplacées par des selfs à air.
- Élimination des résistances en série ou des atténuateurs, et remplacement par self à prises ou autotransformateur.
- Tweeter débafflé et installé sur le dessus de l'enceinte, avec calage temporel suivi éventuellement d'une optimisation de la cellule passe-haut du filtre
- Amortissement amélioré des parois par produit bitumineux, si nécessaire.
- Rigidification de certaines parois à l'aide de tasseaux collés et vissés, si nécessaire.

Et pour aller plus loin, mais là il s'agit déjà de conception sur mesure :

- Reconstruction de l'ébénisterie avec prise en compte des décalages nécessaires au calage temporel.
- Synthèse d'un nouveau filtre optimisé, ou passage au filtrage actif.
- Tweeters à compression (appairés), avec nouveaux filtres et ajustage précis du niveau.

La réalisation de chacune des étapes peut entraîner la remise en cause des résultats des étapes précédentes, en particulier le positionnement et les réglages des niveaux de chaque voie, qu'il est nécessaire de réajuster avec une grande précision après chaque modification d'un élément.

L'amateur qui a parcouru tout ce chemin arrive à un point où l'évolution n'est possible qu'en entrant dans le monde des pavillons, qu'il est indispensable d'associer à des H-P grave à très haut rendement.

9. L'ÉLECTRONIQUE

« Le détail est l'essentiel dans la pratique. »

Arthur Schopenhauer

9.1 Circuit court

L'APPÂT DU GAIN

Les signaux issus de la source quelle qu'elle soit sont d'un niveau de tension faible, et ces sources ne sont pas capables de délivrer un courant suffisant pour alimenter un haut-parleur. Ces points évidents justifient non seulement qu'une amplification de tension soit nécessaire, mais aussi une amplification de courant.

Cette dernière ne prend place généralement qu'en fin de circuit, juste avant la liaison avec les enceintes, et l'amplification qui précède est seulement une amplification de tension, répartie sur plusieurs étages. À l'époque du disque microsillon, le niveau de sortie des cellules de lecture se situait entre 0,1 à 0,4 mV pour les modèles à bobines mobiles, et 1 à 10 mV environ pour celles à aimants mobiles, avec une forte majorité entre 2 et 5 mV.

À l'autre extrémité de la chaîne, c'est une tension maximale de l'ordre de 20 V efficace qui est nécessaire pour alimenter les haut-parleurs. L'amplification totale du système doit par conséquent se situer vers 10 000, c'est-à-dire environ 80 dB, et plus de 300 000 ou 110 dB sur l'entrée bobine mobile si elle existe, figure 210 page suivante.

Un tel gain est obligatoirement réparti en plusieurs étages, présentant un surcroît de gain si une contre-réaction doit être appliquée. Un grand nombre d'étages de gain était normal à cette époque pas si lointaine.

À l'heure actuelle, le gain nécessaire est nettement plus réduit, et un préampli sans gain, c'est-à-dire avec un étage ligne adaptateur d'impédance, indispensable, est préférable. Le gain de l'ampli peut être de seulement 30 dB et 3 étages sont suffisants pour l'assurer, même si une contre-réaction est utilisée, figure 211.

La première amplification de tension est généralement obtenue directement au niveau du convertisseur courant/tension I/U qui suit le convertisseur numérique/analogique, ou y est intégré, dans le lecteur CD. Un unique étage de sortie assurant le filtrage passe-bas PB est suffisant. Le préampli ne comporte qu'un seul

étage adaptateur d'impédance (parfois aucun s'il est passif, ce qui apporte plusieurs inconvénients subjectifs). Cet unique étage doit être pensé comme un ampli de petite puissance car il est relié à une charge extérieure, le câble et l'entrée de l'ampli. Le gain de l'ampli est donné principalement par son deuxième étage, et la contre-réaction reste modérée. Ces dispositions permettent de réaliser un système ne comprenant que 5 étages au maximum, et même moins si préampli et ampli sont intégrés dans le même appareil.

L'utilisation d'amplificateurs opérationnels intégrés comptant chacun 3 ou 4 étages, avec une contre-réaction très élevée, permet de simplifier le schéma seulement en apparence, car le nombre réel d'étages est alors très élevé et les qualités musicales s'en ressentent.

Quelles orientations suivre pour obtenir d'un amplificateur une sonorité harmonieuse ?

L'AIR QUI S'IMPOSE

C'est la charge sur laquelle il travaille qui définit les contraintes fondamentales de la conception de l'amplificateur. Comme je l'ai déjà expliqué au chapitre 7, figures 106 et 107, le haut-parleur est un système réversible, qui se comporte en microphone. Cet effet est décrit par la loi de Lenz, qui exprime le fait que la bobine mobile en se déplaçant dans le champ magnétique, produit une force contre-électromotrice, c'est-à-dire une tension électrique qui s'oppose au passage du courant ayant généré le mouvement. Cette tension est proportionnelle à la vitesse de variation du flux, qui n'est autre que la vitesse de déplacement de la bobine, car le champ magnétique est fixe, immobile. Un courant microphonique apparaît dans la bobine du haut-parleur, courant qui s'ajoute vectoriellement au courant du signal envoyé par l'ampli. Le déphasage entre ces deux courants est constamment variable, et une analyse est possible à partir d'un modèle électro-mécanique considérant le haut-parleur comme un quadripôle. Ce modèle, figure 212, a été proposé par Beranek.

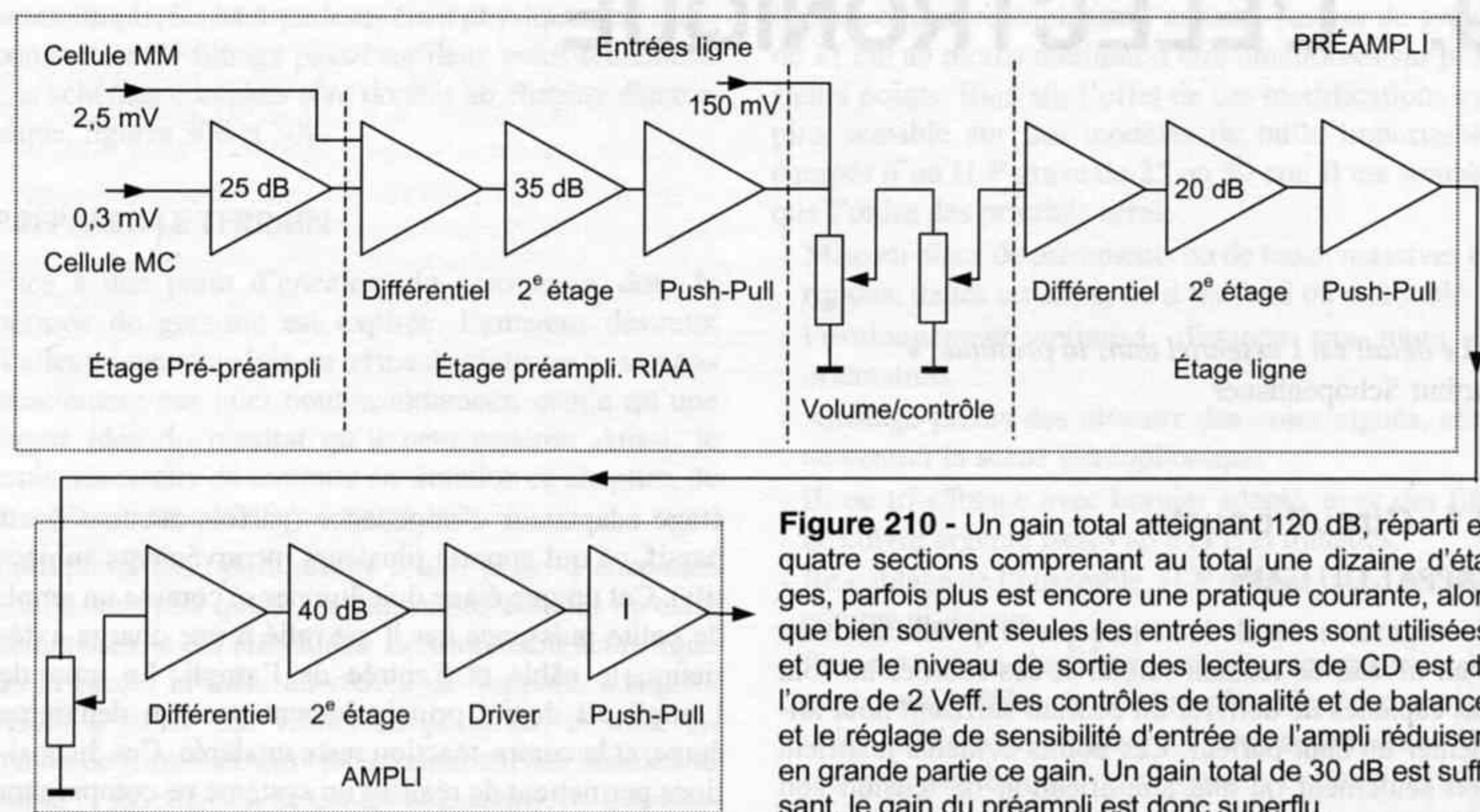


Figure 210 - Un gain total atteignant 120 dB, réparti en quatre sections comprenant au total une dizaine d'étages, parfois plus est encore une pratique courante, alors que bien souvent seules les entrées lignes sont utilisées, et que le niveau de sortie des lecteurs de CD est de l'ordre de 2 Veff. Les contrôles de tonalité et de balance, et le réglage de sensibilité d'entrée de l'ampli réduisent en grande partie ce gain. Un gain total de 30 dB est suffisant, le gain du préampli est donc superflu.

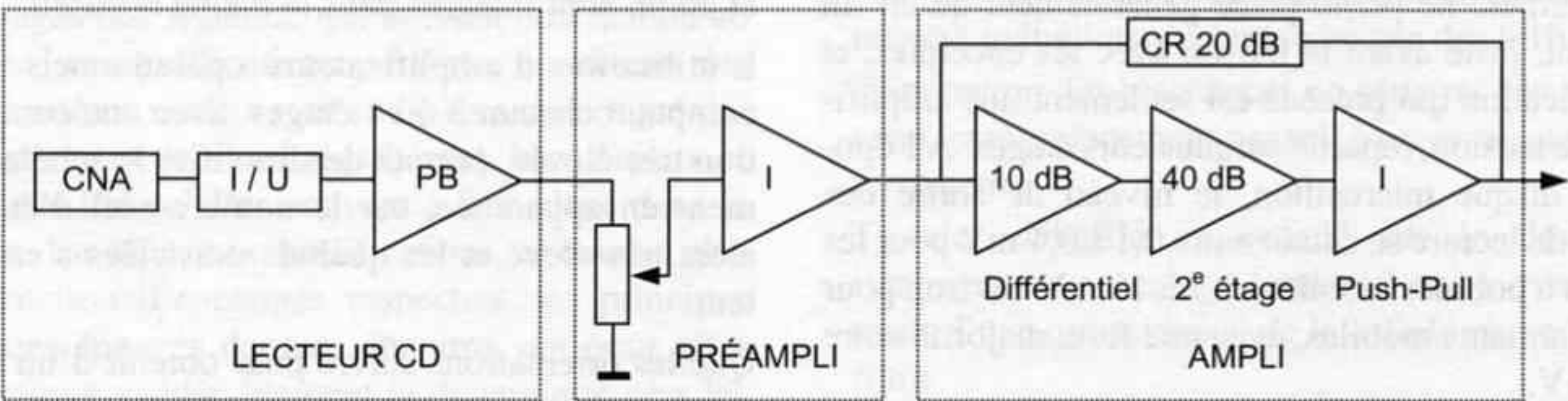


Figure 211 - Chaîne d'amplification minimaliste.

Il est d'usage de représenter ces diverses impédances sous la forme d'une matrice, dans laquelle les indices 1 se rapportent au côté électrique et les indices 2 au côté mécanique. La transformation d'un courant envoyé du côté 1 en une pression acoustique récupérée du côté 2, se verra attribuer l'indice 12, signifiant une transformation de 1 vers 2. La matrice d'impédance du quadripôle s'écrit :

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{21} \\ Z_{12} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{dc} + 2\pi f \cdot L_e & B \cdot L \\ -B \cdot L & Z_a + Z_s \end{bmatrix}$$

La présentation de l'impédance sous cette forme permet d'écrire aisément la relation liant la tension de sortie Vs de l'amplificateur, au courant absorbé par le haut-parleur Is :

$$V_s = (R_{dc} + 2\pi f \cdot L_e) \cdot I_s + [(B \cdot L)^2 / (Z_a + Z_s)] \cdot I_s$$

L'impédance du haut-parleur ramenée du côté électrique apparaît alors constituée de deux termes, l'un purement électrique, résistif et inductif, variable par

conséquent avec la fréquence, l'autre motionnel, dû au mouvement de la bobine mobile dans le champ magnétique, variable avec l'amplitude du signal. La force contre-électromotrice Vm s'écrit :

$$V_m = [I_s \cdot (B \cdot L)^2 / (Z_a + Z_s)]$$

La conséquence directe de cet effet microphonique est que l'impédance électrique aux bornes du haut-parleur varie avec la vitesse de déplacement de la membrane, c'est-à-dire avec le produit de l'amplitude d'excursion par la fréquence. Une impédance qui est proportionnelle à la vitesse d'un mouvement correspond à un amortissement visqueux. Cet amortissement est dû aux pertes par frottement dans les matériaux des suspensions, ainsi qu'à la viscosité de l'air. Pour la plupart des H-P, les pertes dans les suspensions sont prépondérantes. Seuls les H-P à très haut rendement, en particulier ceux à compression avec suspension métallique, les métaux procurant de très faibles pertes par frottements internes, présentent un amortissement visqueux dû principalement à l'air.

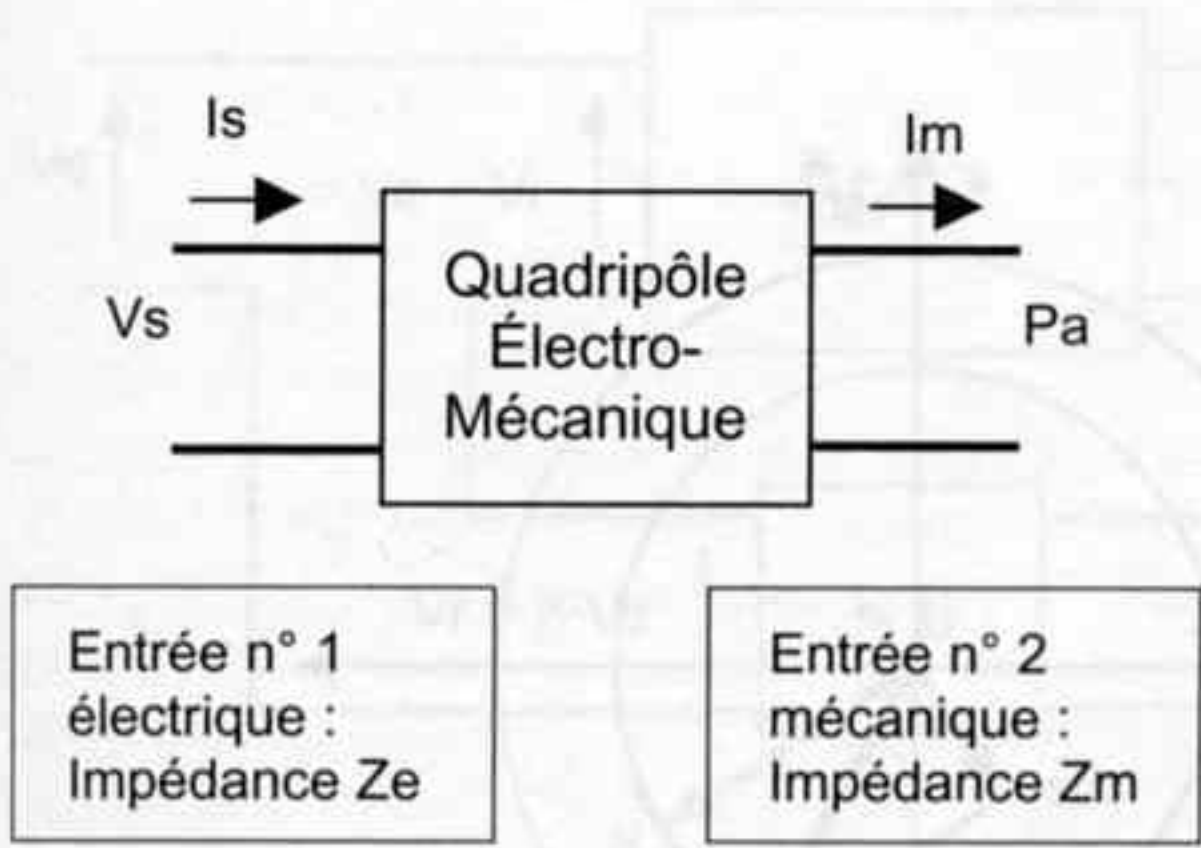


Figure 212 - Le quadripôle qui modélise le haut-parleur présente du côté électrique, repéré 1, une impédance d'entrée constituée de deux termes, l'un purement électrique lié à la résistance R_{dc} de la bobine et à son inductance L_e , l'autre électromécanique, dû à la transformation du courant en force, et lié au produit $B.L$. Du côté mécanique, l'impédance d'entrée est également constituée de deux termes, l'un purement mécanique Z_m , lié à la charge acoustique Z_a de l'air sur la membrane et aux "résistances" des suspensions Z_s , l'autre dû à la transformation de la force (exercée par la pression acoustique sur la membrane) en courant, et liée au produit $B.L$, le même circuit magnétique assurant la conversion électrique/mécanique dans les deux sens.

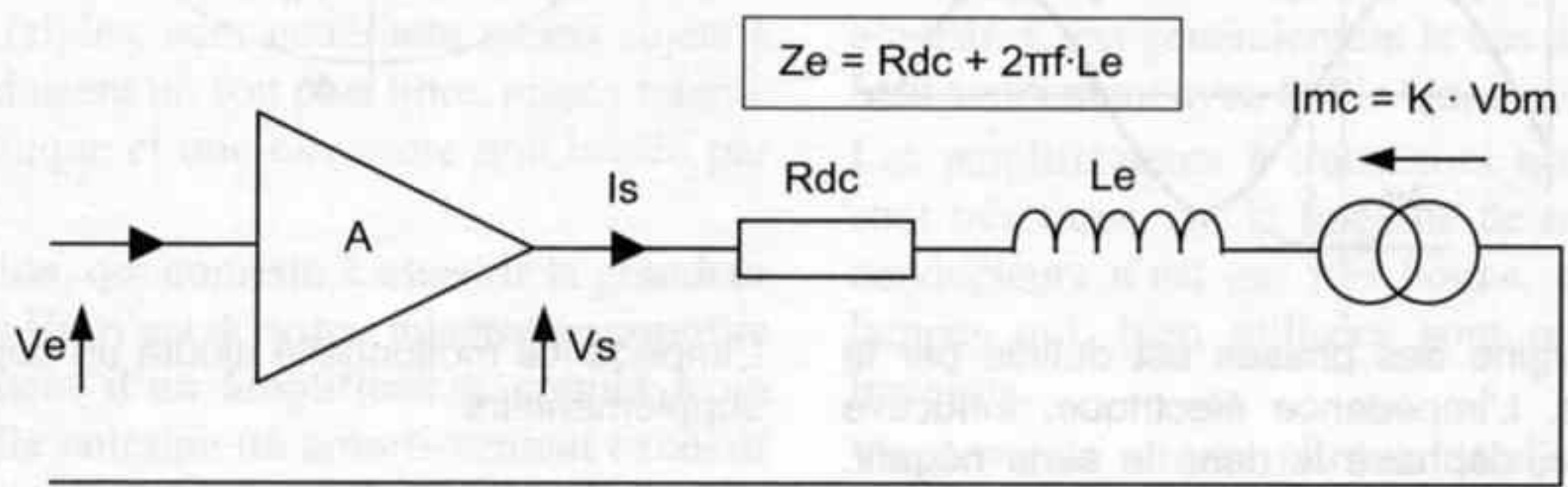


Figure 213 - Les mouvements de la bobine mobile dans l'entrefer peuvent être modélisés par un générateur de courant I_{mc} asservi à la vitesse de déplacement

Les courbes d'impédance apparaissant dans les fiches techniques, et mesurées avec un niveau de signal constant, ne peuvent rendre compte de ce phénomène. Plusieurs mesures à des niveaux croissants sont nécessaires, et font apparaître que l'impédance augmente avec l'amplitude du signal, de manière sensible pour les H-P de petit diamètre, pour lesquels l'amplitude et la vitesse de déplacement augmentent beaucoup avec le niveau du signal. Les H-P de grand diamètre, aux excursions beaucoup plus faibles, ou à pavillon, pour lesquels la membrane travaille à haute impédance donc forte pression et faible vitesse, présentent des variations d'impédance nettement plus faibles lorsque le niveau du signal augmente.

On peut donc considérer que le terme $1/Q_m$, amortissement mécanique du haut-parleur est dépendant du niveau du signal.

Du point de vue de l'amplificateur chargé de fournir le courant I_s , cet effet microphonique a des conséquences importantes, qui me semblent mal documentées dans la littérature. Ces conséquences sont mises en évidence de manière simplifiée figure 213.

Le courant I_{mc} dû à l'effet microphonique, est proportionnel à la vitesse de déplacement de la bobine V_{bm} . Il est modélisé par un générateur de courant en série avec l'impédance électrique du haut-parleur. En supposant un déplacement sinusoïdal du cône, de la forme :

V_{bm} . Ce générateur est en série avec l'impédance électrique de la bobine, résistive et inductive.

$$x = A \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$$

La vitesse de la bobine mobile V_{bm} s'obtient par dérivation : $V_{bm} = dx / dt = 2\pi f \cdot A \cdot \cos(2\pi f \cdot t)$

De même l'accélération de la bobine est : $\Gamma = dV / dt = -(2\pi f)^2 \cdot A \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$

Cette accélération est le quotient de la force sur la masse mobile : $\Gamma = F / M_m$

Et la force est en opposition de phase avec le courant de sortie : $F = -B \cdot L \cdot I_s$

(Le sens de bobinage est établi de manière à diriger cette force vers l'avant pour un courant de sortie I_s de sens conventionnel positif).

L'accélération de la bobine mobile est donc en opposition de phase avec le courant de sortie de l'amplificateur.

Cette approche simplifiée fait apparaître deux points importants :

- La vitesse de la bobine est déphasée de $-\pi/2$, comme toute fonction cosinus, par rapport au courant de sortie I_s . (Ce courant est lui-même déphasé par rapport à la tension de sortie car l'impédance électrique du haut-parleur n'est pas purement résistive).

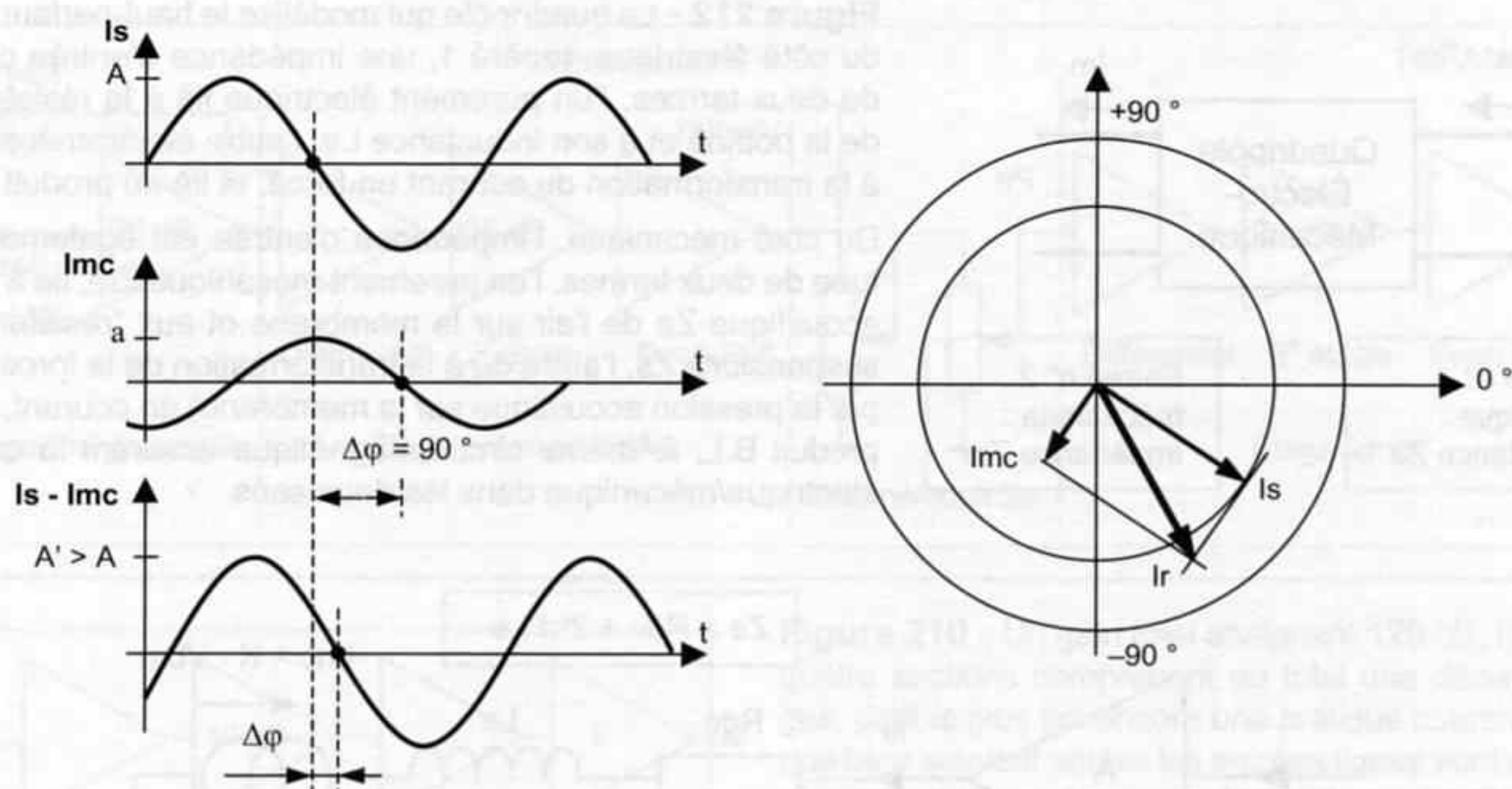


Figure 214 - L'origine des phases est définie par la tension de sortie. L'impédance électrique, inductive dans cet exemple, déphase I_s dans le sens négatif.

L'impédance motionnelle ajoute un déphasage négatif supplémentaire.

- La vitesse de la bobine est proportionnelle d'une part à l'amplitude A du déplacement, variant en $1/f^2$ à pression acoustique constante, et d'autre part à la fréquence f . Cette vitesse est donc inversement proportionnelle à la fréquence, à pression constante. Les grands déplacements aux fréquences basses à niveau élevé, ainsi que les crêtes de fortes amplitudes des attaques (bruit de transition riche en basses fréquences) produiront donc des signaux microphoniques importants.

Le courant microphonique, dû à la vitesse, est par conséquent déphasé de $-\pi/2$ par rapport au courant de sortie de l'amplificateur, et de sens opposé (loi de Lenz) figure 214.

Les figures montrent la sommation vectorielle des courants I_s et I_{mc} . L'amplitude du courant résultant I_r est augmentée, et sa phase est retardée. Ce déphasage s'ajoute à celui imposé par la réactance, capacitive ou inductive, de l'impédance de l'enceinte.

La tension de sortie de l'amplificateur peut d'autre part s'écrire : $V_s = Z_{hp} \cdot I_r = Z_{hp} \cdot (I_s + I_{mc})$

qui fait apparaître que le courant microphonique se superpose au courant débité par l'amplificateur.

Si la tension de sortie V_s de l'amplificateur est asservie à la tension d'entrée V_e par un réseau de contre-réaction (détaillé plus loin) alors : $V_s = A_{bf} \cdot V_e$ avec $A_{bf} = \text{constante}$, qui est l'amplification en boucle fermée du circuit de l'amplificateur.

V_s est donc fixée, imposée par le signal d'entrée, ce qui implique que le courant I_s est d'autant plus faible que le courant I_{mc} est important, la somme I_r étant maintenue obligatoirement constante.

Ce résultat est plus important qu'il n'y paraît, car il implique que l'effet microphonique diminue le courant débité par l'amplificateur, de manière proportionnelle à la vitesse de déplacement de la bobine, donc inversement proportionnelle à la fréquence, et à l'amplitude du déplacement de la membrane.

Avec un amplificateur contre-réactionné, la membrane du haut-parleur se trouve auto-freinée par son propre déplacement. On peut donc considérer que l'amplificateur amorti énormément les fréquences basses et les transitoires, aux niveaux crêtes élevés donc produisant de fortes elongations. Des courants microphoniques atteignant 50 % du courant de sortie sont parfois mesurés, sur de petits haut-parleurs, dont les déplacements du cône ont des vitesses très élevées (revoir le schéma figure 107). Cela correspond à une diminution de 6 dB du niveau de sortie, aux fréquences les plus basses reproduites, et sur les attaques.

Les amplificateurs contre-réactionnés n'ont jamais eu la faveur des audiophiles, qui leur ont très souvent reproché un son retenu, amorti, peu dynamique, comme freiné, avec un équilibre tonal montant. L'effet microphonique, avec son action sur la sortie de l'amplificateur, semble responsable de ce comportement, non mesurable en petits signaux, ni sur charge résistive, mais parfaitement audible.

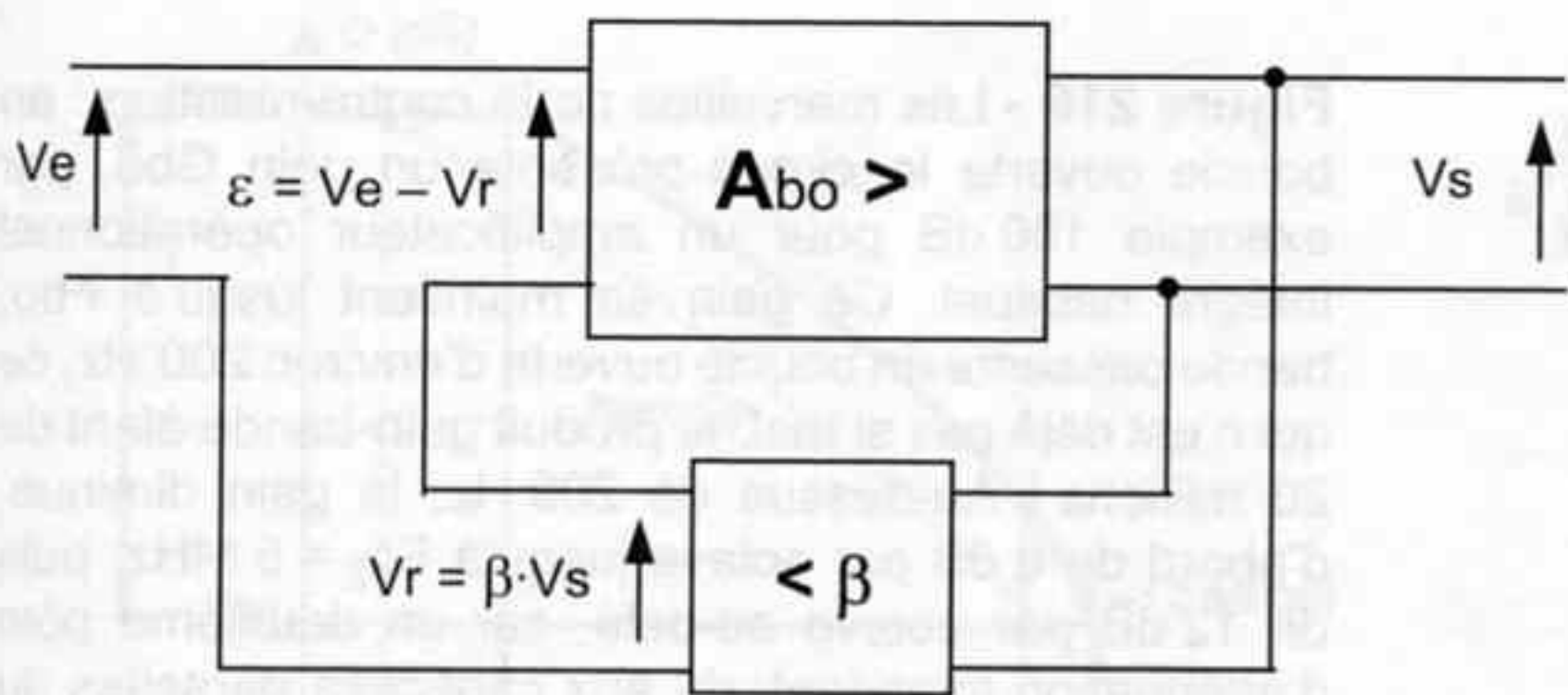


Figure 215 - Schéma de principe de la contre-réaction série-parallèle (ou tension-tension) généralement utilisée dans les amplificateurs haute-fidélité.

Encore une fois les haut-parleurs de très grand diamètre ou à pavillon, avec des vitesses de déplacements beaucoup plus faibles, sont nettement moins sujets à cet effet, et produisent un son plus libre, moins retenu, avec une dynamique et une ouverture non bridée par l'amplificateur.

La contre-réaction, qui consiste à asservir la grandeur tension de sortie Vs, n'est donc pas adaptée au contrôle du fonctionnement d'un amplificateur couplé à un haut-parleur. Elle entraîne un amortissement excessif et diminuant avec la fréquence, du haut-parleur. Elle est indispensable à l'établissement d'un gain constant, invariable avec la fréquence, le niveau du signal, la température, le vieillissement des composants, la tension du réseau etc. mais ne devrait en aucun cas englober l'étage de sortie, dont la tension de sortie doit être laissée libre de prendre la valeur qui résulte des courants circulant dans l'impédance motionnelle du haut-parleur. C'est le courant de sortie Is qui gagnerait à être asservi, mais le courant microphonique y étant constamment superposé, cela me semble difficilement réalisable.

DES AMPLIFICATEURS EN BOUCLE OUVERTE ?

La contre-réaction a tout à fait sa place dans les étages de gain, de correction, d'adaptation d'impédance, et ce n'est que lorsque la charge est réactive, comme un haut-parleur et dans une moindre mesure un câble de liaison signal, qui lui aussi produit des courants parasites, par effet de mémoire, que cette contre-réaction ne doit pas être employée dans l'étage final. Les amplificateurs faisant usage d'une contre-réaction globale à fort taux sont tous construits à base de transistors. Les amplificateurs à lampes, anciens comme modernes, ne peuvent supporter un taux élevé, à cause de leur transformateur de sortie qui produit une coupure haute au second ordre, ce qui rendrait l'ensemble bouclé instable si le taux de réaction était trop élevé. Ce phénomène est détaillé plus loin.

Certains amplificateurs à lampes se passent complètement de contre-réaction et procurent de ce fait une grande liberté de déplacement des membranes. Ils doivent par conséquent être associés à des haut-parleurs

présentant une réponse transitoire très propre, sans oscillation parasite que l'amplificateur ne saurait amortir. C'est généralement le cas des haut-parleurs à haut-rendement avec faible Qe, et des pavillons.

Les amplificateurs à transistors sans contre-réaction sont très rares, car la linéarité de transfert des semi-conducteurs n'est pas très bonne, contrairement aux lampes qui, bien utilisées sont pour certaines très linéaires.

Voyons cela un peu plus en détails, en commençant par les notations usuelles :

- L'amplification en boucle ouverte, sans contre-réaction est : **Abo**
- Le gain correspondant est : **Gbo en dB**
- L'amplification en boucle fermée, avec contre-réaction est : **Abf**
- Le gain correspondant est : **Gbf en dB**
- L'impédance de sortie en boucle ouverte : **Zo**
- L'impédance de sortie en boucle fermée : **Zbf**
- Le taux de contre-réaction : **B**
(ou **β** gain de la boucle en dB)

Le schéma simplifié d'un amplificateur contre-réactionné apparaît en figure 215.

Le signal présenté en entrée du circuit de gain est la différence entre le signal entrant Ve, considéré comme consigne, et une fraction Vr du signal de sortie Vs, fraction de rapport β.

L'amplification en boucle fermée s'écrit alors :
Abf = Abo / (1 + B · Abo)

La contre-réaction de type série-parallèle, appelée encore tension/tension, a donc pour effet de diminuer le gain total de l'amplificateur. L'avantage est que toute perturbation de la tension de sortie Vs, ayant pour effet de rendre Vs différente du produit (Abf·Ve) se retrouve dans le signal Vr issu du réseau de contre-réaction, et dans le signal d'erreur E qui produit une "réaction" de l'amplificateur A pour ramener sa sortie à la valeur correcte de Vs. L'amplification Abf est ainsi rendue constante et indépendante des conditions

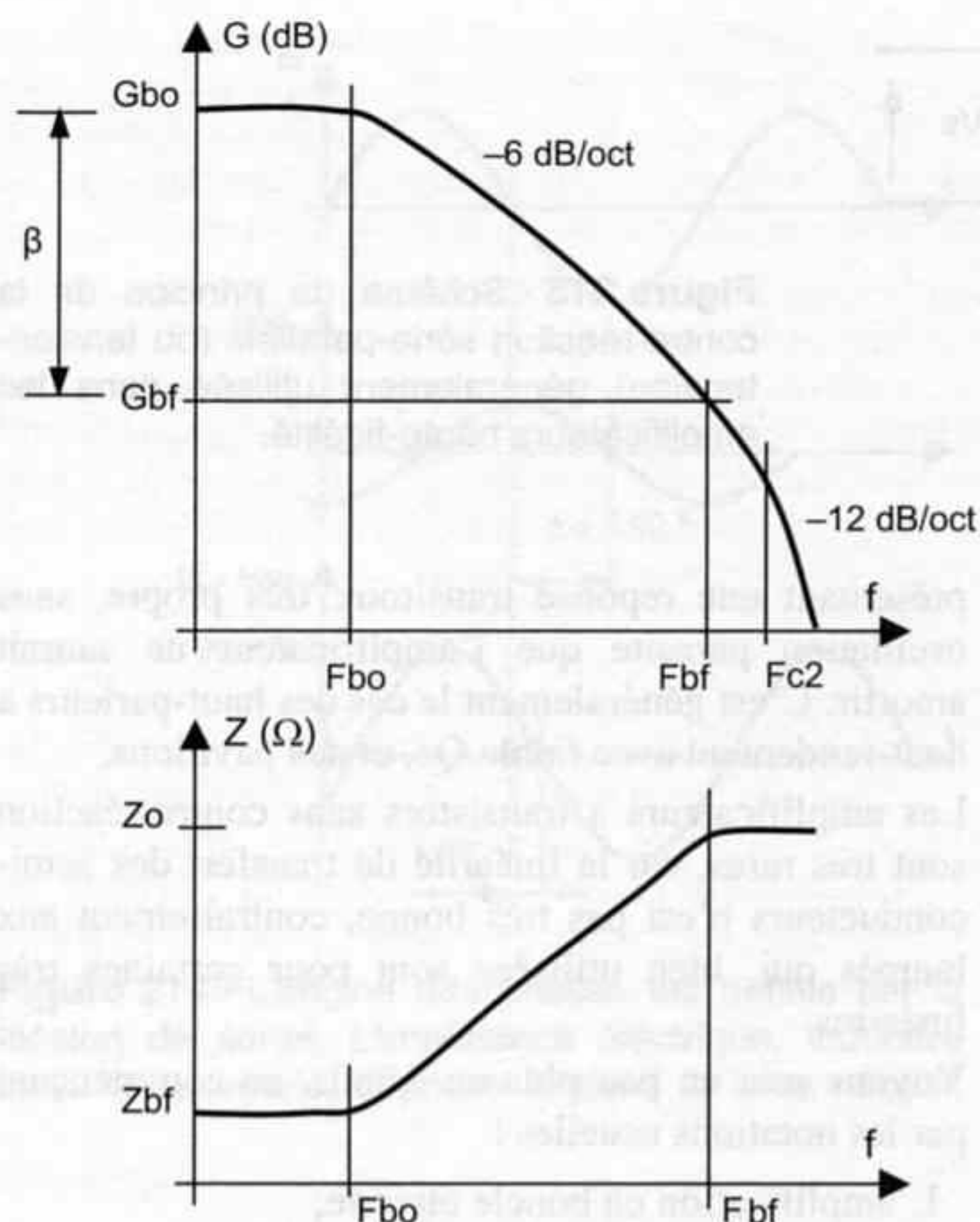


Figure 216 - Les merveilles de la contre-réaction : en boucle ouverte le circuit présente un gain G_{bo} , par exemple 100 dB pour un amplificateur opérationnel intégré habituel. Ce gain se maintient jusqu'à F_{bo} , bande passante en boucle ouverte d'environ 200 Hz, ce qui n'est déjà pas si mal, le produit gain-bande étant de 20 millions ! Au-dessus de 200 Hz, le gain diminue, d'abord de 6 dB par octave jusqu'à $F_{c2} = 5$ MHz, puis de 12 dB par octave au-delà, car un deuxième pôle d'atténuation intervient, dû aux capacités parasites du circuit. En appliquant un taux de contre-réaction $\beta = 80$ dB soit un rapport de 10 000, le gain en boucle fermée devient $G_{bf} = 20$ dB mais la bande passante F_{bf} est maintenant égale à 2 MHz, pour cet exemple. Le produit gain-bande a été conservé. Quant à l'impédance de sortie, elle a été divisée par β et vaut maintenant $Z_{bo}/10\,000$ soit quelques m Ω jusqu'à la fréquence F_{bo} , après quoi le taux de contre-réaction diminuant pour atteindre 0 dB à la fréquence F_{bf} , l'impédance de sortie augmente et atteint Z_{bo} , plus de 100 Ω , à cette fréquence. Les distorsions harmoniques en sortie, aux fréquences inférieures à F_{bo} ont été divisées également par 10 000. Voilà pour les avantages, mais il y a des inconvénients...

de fonctionnement, ceci d'autant plus que A_{bo} et β sont grands. C'est ce qui a motivé à une époque pas si lointaine la recherche de gains énormes en boucle ouverte, parfois supérieurs à 120 dB, correspondant à des valeurs de A_{bo} de plus de 10^6 , associés à des taux de contre-réaction de plus de 80 voire 100 dB pour certains circuits intégrés. Malheureusement, ces valeurs de gain ne se maintiennent pas lorsque la fréquence augmente.

Un autre avantage de l'application de la contre-réaction est la diminution de l'impédance de sortie, qui devient $Z_{bf} = Z_{bo} / \beta$.

Tant que le circuit est sollicité à basses fréquences ou en continu, la contre-réaction fait des merveilles. C'est pourquoi un régulateur de tension continue en est bourré, sans que cela pose le moindre problème avec un circuit alimenté consommant un courant constant...

Si le circuit fonctionne à des fréquences supérieures à sa bande passante en boucle ouverte, les choses se passent un peu moins bien, comme le montrent les schémas figure 216.

Remarquons au passage que l'atténuation du gain avec la fréquence correspond à un filtrage du premier ordre, dont la fréquence d'intervention est placée très bas, vers 200 Hz dans l'exemple précédent, afin d'obtenir une pente régulière jusqu'aux plus hautes fréquences utiles. Dans l'exemple ci-dessus, à la fréquence F_{bf} , la pente d'atténuation du signal de sortie est encore de -6 dB par octave, ce qui implique que le signal de sor-

tie est déphasé de 90° au maximum par rapport au signal d'entrée. Si un taux de contre-réaction supérieur, par exemple 100 dB, est établi, le gain en boucle fermée devient nul, donc l'amplification est de 1, mais la fréquence de coupure est alors supérieure à f_{c2} , sur une pente d'atténuation du deuxième ordre.

Le déphasage sortie/entrée atteint alors 180° , ce qui signifie que le signal V_r renvoyé par le réseau de contre-réaction est en opposition de phase avec le signal d'entrée, donc égal mais de signe opposé. La soustraction $\mathcal{E} = V_e - V_r$ donnant le signal d'erreur devient alors une addition, \mathcal{E} prenant une valeur positive de plus en plus grande, et qui se trouve amplifiée en sortie, avec effet cumulatif. L'amplificateur rebouclé est devenu un magnifique oscillateur, calé sur la fréquence où le déphasage vaut exactement 180° , laquelle dépend des capacités parasites du circuit et du câblage. Si la charge reliée à la sortie présente une impédance capacitive, cela produit une coupure F_{bf} du deuxième ordre, donc un déphasage supplémentaire qui peut amener à l'instabilité un circuit pourtant stable en apparence, figure 217.

La fréquence F_{c2} doit être suffisamment élevée pour que la pente du premier ordre soit assez étendue. Les schémas figure 218 montrent ces détails, auxquels nous reviendrons souvent chaque fois qu'il sera question de contre-réaction, aussi bien dans les circuits de préamplification que dans ceux d'alimentation.

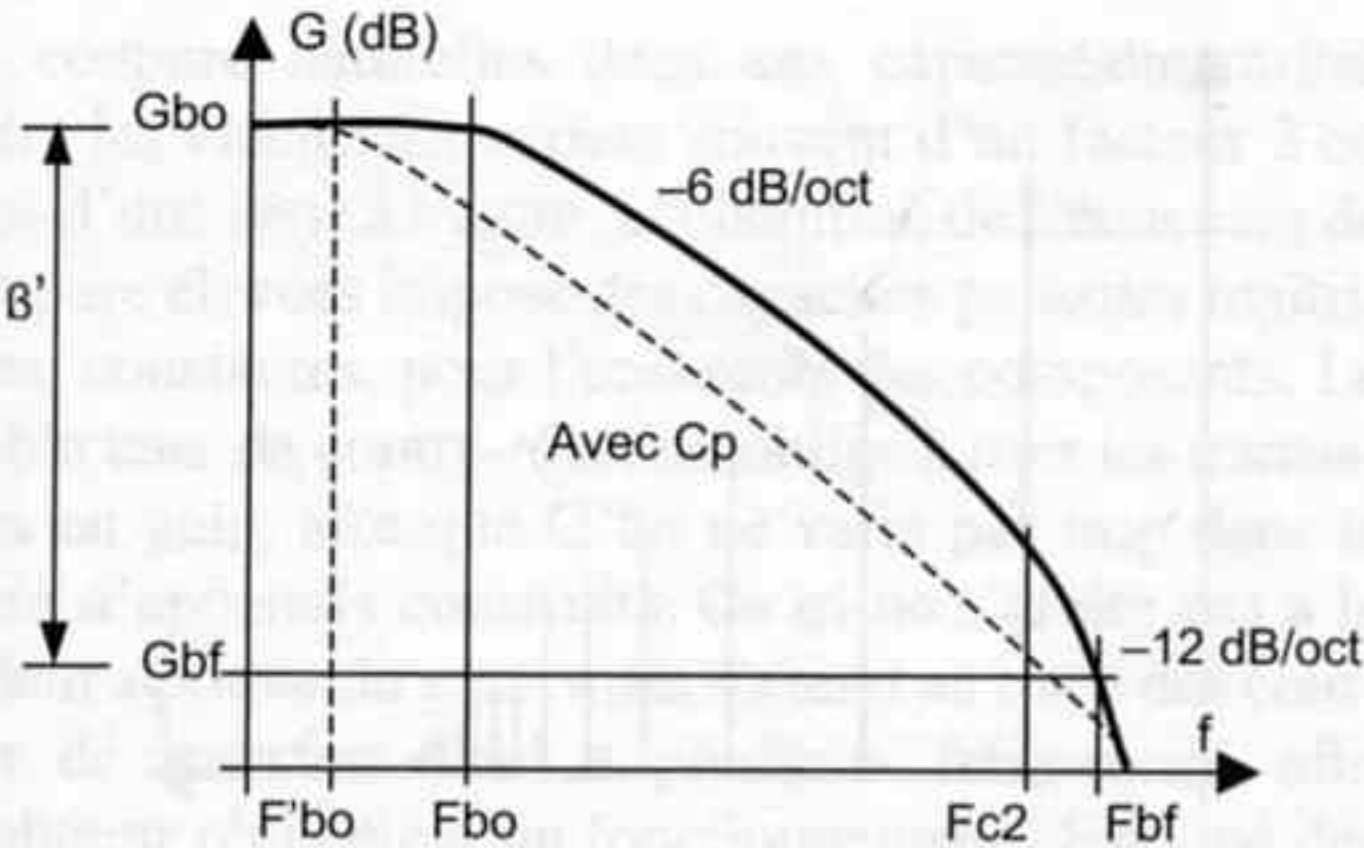


Figure 217 - L'application d'un taux de contre-réaction β' trop grand rend le circuit instable, la fréquence de coupure F_{bf} en boucle fermée étant alors supérieure à F_{c2} . Il est alors nécessaire de diminuer F_{bo} , car augmenter F_{c2} est impossible, étant liée aux imperfections des composants. Une atténuation à plus basse fréquence F'_{bo} demande seulement une capacité de compensation C_p de faible valeur dans le circuit. Le gain G_{bf} entraîne alors une coupure au premier ordre F_{bf} un peu plus basse qu'auparavant. De nombreux amplis intégrés n'acceptent pas un gain $G_{bf} = 0$ (soit $A_{bf} = 1$).

Cette nécessité d'une pente de coupure démarrant très tôt a pour conséquence un taux de contre-réaction β diminuant régulièrement avec la fréquence, pour atteindre 0 dB à la fréquence F_{bf} . En plus de l'augmentation d'impédance de sortie montrée figure 216, cette réduction de β avec la fréquence a des conséquences sur la sonorité obtenue. Les bruits et distorsions prenant naissance dans les étages du circuit amplificateur sont en effet réduits eux aussi d'un facteur β . C'est particulièrement intéressant au niveau de l'étage de sortie, pour lequel la charge reliée à la sortie peut demander des courants importants. Les semi-conducteurs utilisés ne présentant pas en général une fonction de transfert linéaire, une distorsion harmonique importante est générée dans cet étage.

Par contre les bruits et distorsions dus au premier étage, chargé d'établir la différence $\varepsilon = V_e - V_r$, ne sont pas réduits dans les mêmes proportions. Cet étage appelé différentiel possède en effet deux entrées, l'une recevant le signal d'entrée V_e , et qui n'est pas incluse dans la boucle de contre-réaction, et l'autre recevant le signal V_r issu du réseau de contre-réaction, et qui est intégrée dans la boucle.

Si une distorsion prend naissance dans cet étage, elle n'est pas réduite par le gain de boucle β . C'est pourquoi le premier étage ne doit pas présenter de gain, car alors il amplifie ses propres distorsions superposées au signal ε . Même très faibles, ces distorsions ne sont pas négligeables devant ε , qui en fonctionnement normal tend constamment vers zéro. La parfaite symétrie de l'étage différentiel d'entrée est par conséquent une condition essentielle du fonctionnement d'un amplifi-

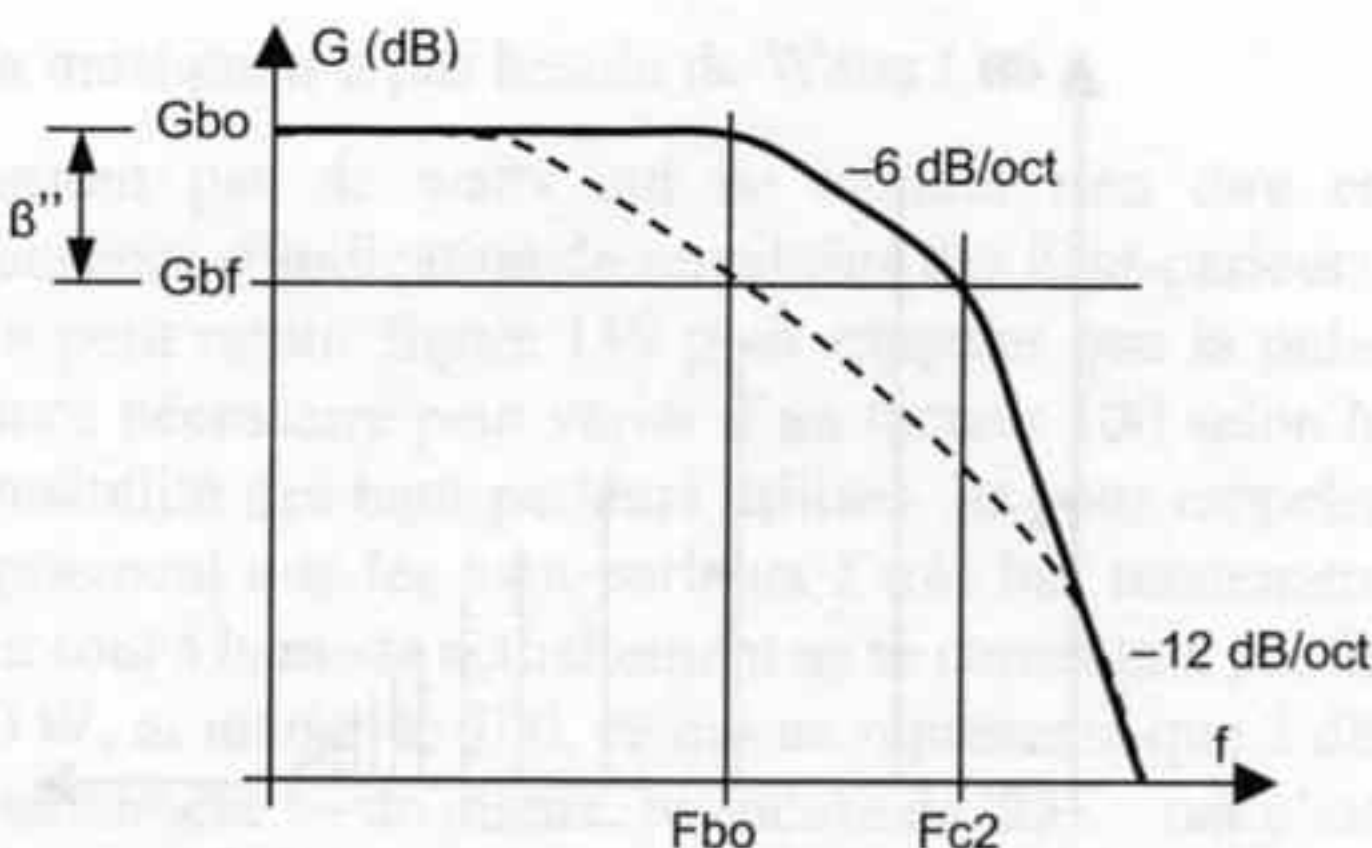


Figure 218 - En augmentant la fréquence F_{bo} de coupure en boucle ouverte, ce qui est très facile, sans augmenter la seconde coupure F_{c2} déjà très haut placée, on réduit la zone d'atténuation à -6 dB par octave, et le gain minimal G_{bf} sans instabilité devient trop grand, le taux de contre-réaction maximal étant alors β'' assez petit. Le circuit devient inutilisable, car seuls de grands gains sont permis, sans réduction de distorsion ni d'impédance. C'est pour cela que les circuits intégrés sont conçus avec F_{bo} très basse et F_{c2} la plus haute possible.

cateur transistorisé. Cette symétrie exacte suppose l'identité rigoureuse des transistors utilisés sur chacune des deux entrées, ainsi que l'égalité des courants y circulant et des tensions à leurs bornes, leur variation égale en température, l'égalité de leur charge respective à toute fréquence, ce qui implique des composants appairés et des capacités parasites du circuit équilibrées. Cela exclut tout réglage de dérive continue par décalage des points de fonctionnement de l'étage d'entrée, comme cela est malheureusement fait sur une majorité d'appareil du commerce. L'importance énorme du premier étage, qui conditionne entièrement le fonctionnement de l'ensemble, a été depuis longtemps démontrée, et des réalisations exceptionnelles, comme les circuits établis dès le milieu des années 70 par Kanéda, et les très nombreux amplis qui en sont dérivés depuis, font usage d'un premier étage différentiel à gain très faible voire unitaire, construit avec une paire de transistors à effet de champ rigoureusement choisis et appairés.

Le premier étage a pour fonction d'établir la différence entre signal d'entrée et fraction exacte du signal de sortie, et non de l'amplifier, car la boucle de contre-réaction n'englobe pas entièrement ce premier étage.

En supposant une distorsion du circuit en boucle ouverte présentant un dégradé régulier, l'application d'une contre-réaction élevée produit un dégradé nettement moins naturel, ce que montre la figure 219.

C'est donc à partir d'un circuit présentant en boucle ouverte un gain peu élevé, une fréquence de coupure naturelle supérieure à la bande audio de 20 kHz, et en

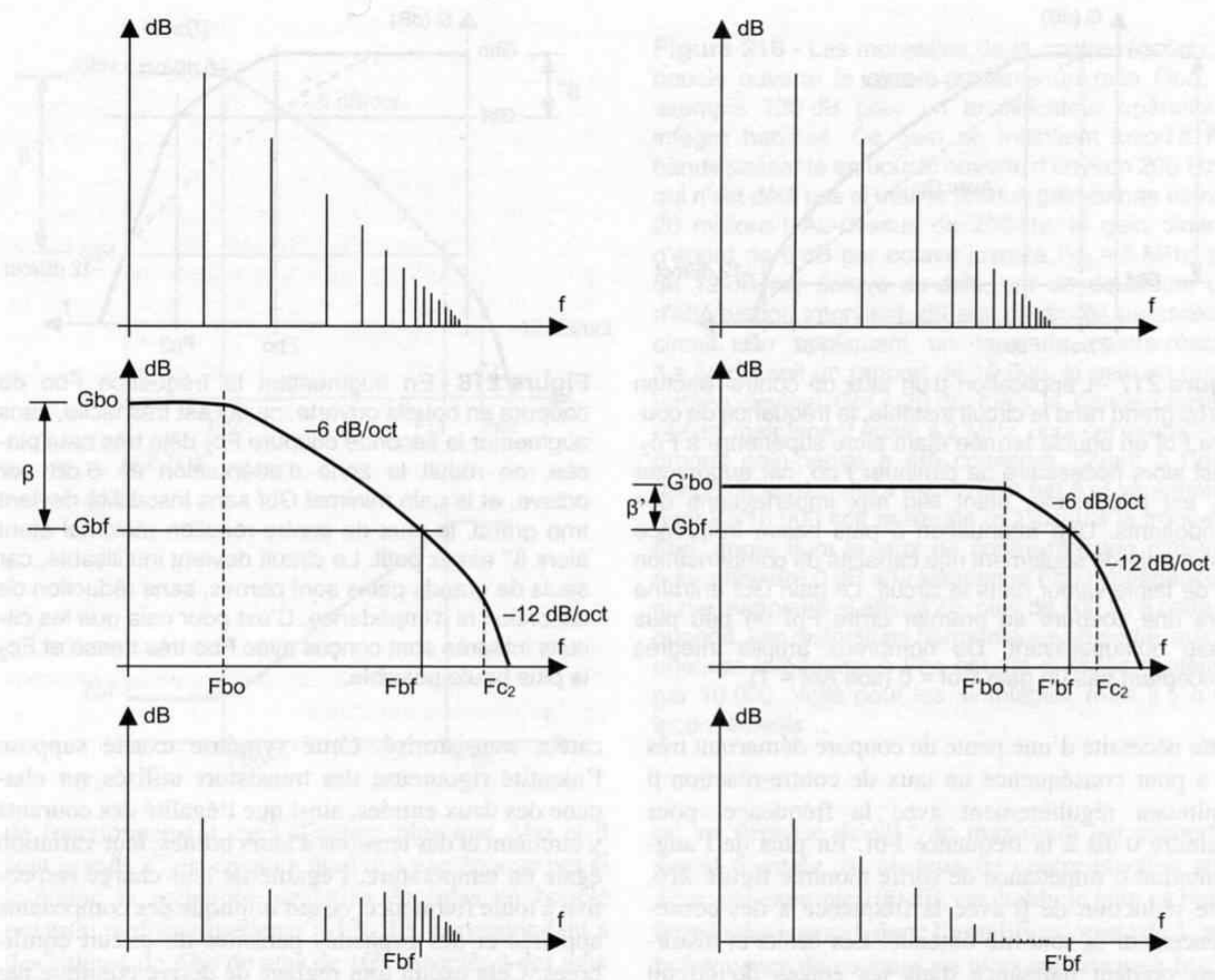


Figure 219 - La colonne de gauche ci-dessus fait apparaître que le dégradé harmonique du signal, relativement régulier (en haut) en sortie du circuit en boucle ouverte, devient très particulier (en bas) lorsqu'une contre-réaction de taux β élevé est appliquée, avec prépondérance des rangs élevés, surtout au-dessus de F_{bf} , car la contre-réaction β n'est efficace qu'en dessous de F_{bo} , assez basse, et devient totalement inopérante à partir de F_{bf} . L'effet subjectif obtenu est une dureté du grain de la matière sonore, une projection des sons à travers l'espace sonore, rendu trop lumineux, scintillant, comme une image trop éclairée, surexposée. C'est le son typique de pratiquement tous les circuits intégrés, qui est heureusement compensé par la mollesse du son issu des petits haut-parleurs et des tweeters en tissu souple...

La colonne de droite montre qu'en sacrifiant le gain en boucle ouverte G'_{bo} , beaucoup plus faible, la fréquence de coupure en boucle ouverte F'_{bo} peut être rendue nettement plus grande, avec le même type de composants. Quelques précautions de réalisation permettent également d'augmenter légèrement F_{c2} mais ce n'est pas indispensable. Le même gain en boucle fermée que précédemment G_{bf} produit alors une coupure F'_{bf} supérieure à F_{bf} du cas précédent. Le taux de contre-réaction β' plus faible, est maintenu constant sur toute la plage de fréquence utile, F'_{bo} étant choisie supérieure à la plus haute fréquence contenue dans le spectre du signal d'entrée. Le dégradé harmonique obtenu est régulier, et bien que le taux de distorsion mesuré soit peu flatteur, la sonorité obtenue est naturelle, harmonieuse et douce.

lui appliquant un taux de contre-réaction modéré, qu'il devient possible de rendre la sonorité des circuits à transistors harmonieuse. Il existe d'autres conditions, mais celles-ci sont prioritaires, et un amplificateur conçu en les ignorant, même construit avec des composants de la plus haute qualité, équipé d'alimentations surdimensionnées, ne donnera que le trop fameux "son transistor".

La réalisation d'amplificateur de prix abordable et respectant ces impératifs est difficile, car les transistors, qui sont fabriqués en très grandes séries, parfois dans plusieurs unités de production, présentent des dispersions gigantesques de leurs caractéristiques. Le gain en courant qui conditionne l'amplification en boucle ouverte G_{bo} peut varier d'un facteur 10 voire 20 entre deux transistors de même référence, et les fréquences

de coupure naturelles dues aux capacités parasites entre les électrodes varient souvent d'un facteur 2 ou plus d'une série à l'autre. L'obtention de fréquences de coupure élevées impose des capacités parasites maîtrisées, constantes, pour l'ensemble des composants. Le faible taux de contre-réaction oblige à trier les transistors en gain, afin que G_{bo} ne varie pas trop dans la série d'appareils construits. Ce tri ne s'arrête pas à la valeur statique du gain, mais s'étend au tracé des courbes de transfert, ceci à plusieurs fréquences, afin d'obtenir réellement un fonctionnement identique des composants mis en jeu. L'étage d'entrée, par son rôle de différentiel, mais aussi l'étage de sortie, de structure symétrique, posent de gros problème de tri. Cela implique des taux de rebuts énormes, dépassant parfois 80 %, et un temps important passé à effectuer ce tri. Les audiophiles qui ont construit des amplificateurs à base des fameux transistors 2N3055 en ont encore plein leurs tiroirs, en ayant acheté 100 pour en trouver 4 à peu près identiques...

La plupart des évolutions et améliorations des circuits d'amplificateurs effectuées par les grands constructeurs visent principalement à rendre le fonctionnement du circuit indépendant des dispersions des composants, et à supprimer les opérations de tri, d'appairage, de réglage et de contrôle des caractéristiques. La complexité de certains circuits, fruits de cette évolution, n'a d'égale que leur très faible prix de revient, rendu possible par l'utilisation de composants standards, et leur inaptitude à montrer des qualités musicales. Sur ces circuits fort répandus, le changement d'un ou plusieurs composants par des modèles plus "musicaux" ne s'entend absolument pas, le schéma ayant été établi justement pour masquer les différences de composants ! Les modifications des circuits d'alimentation n'apporte généralement aucune amélioration sonore, procurant au contraire une mise en évidence plus nette des limitations du circuit. Beaucoup de temps, d'énergie, sont perdus en plus des dépenses élevées, par des amateurs qui essayent de tirer le meilleur d'amplificateurs portant en eux-mêmes leurs propres limites.

Revenir à un schéma très simple, comptant moins d'une dizaine de transistors par canal, sans artifice, sans compensation, et en respectant l'orientation définie ci-dessus demande un peu de remise en question...

DES AMPLIFICATEURS EN CLASSE A ?

L'inventeur de la classe B cherchait à obtenir une puissance très élevée avec un échauffement minimal et un poids limité, à des fins de sonorisation de très grandes salles. Depuis l'idée de vendre des watts est devenue à la mode, et on achète une "chaîne Hi-Fi" de 2×50 W comme un pack de conserves de 3×800 g...

La musique n'a pas besoin de Watts !

Surtout pas de watts qui ne veulent rien dire en l'absence d'indication de sensibilité des haut-parleurs. Un petit retour figure 119 pour rappeler que la puissance nécessaire peut varier d'un facteur 100 selon la sensibilité des haut-parleurs utilisés. Et pour rappeler également que les haut-parleurs à très bas rendement qui sont à la mode actuellement ne se contentent pas de 50 W, ni même de 100, ce qui ne représente que 3 dB – seulement ! – de mieux, ni encore de 200... car c'est plus de 500 W en crête qu'il serait nécessaire de leur administrer pour les guérir de leur rendement lamentable. Remède de cheval auquel bien peu survivraient ! La plupart se contentant de fumer, les moins mauvais de chauffer, et les quelques rares élus de produire une musique enfin libérée, quoique manquant d'assise et d'un peu de rapidité, de transparence, de légèreté, pour cause d'élongation démesurée des membranes.

La puissance efficace telle qu'elle est définie par les principes physiques n'est pas d'une grande importance ici, car elle reste très limitée, souvent inférieure à 1 W. Les formes d'ondes du signal sonore montrent en revanche des facteurs de crêtes très élevés, qui impliquent des puissances de crêtes importantes, pendant des temps très brefs. La notion de puissance instantanée est plus utile lorsqu'il s'agit de signaux musicaux, mais sa définition et encore plus sa mesure, posent problème. Tension et courant de sortie de l'amplificateur ne sont pas en phase, car l'impédance de l'enceinte présente des réactions capacitives ou inductives selon la fréquence (revoir la courbe figure 106) le déphasage courant/tension pouvant atteindre aisément 45° pour des enceintes courantes, et jusqu'à 60° pour les modèles les plus difficile à alimenter.

Ce sont donc plutôt les valeurs de tension maximale avant écrêtage et de courant maximal transitoire, qui révèlent les aptitudes d'un amplificateur. La première tient à la tension d'alimentation de l'étage final, et la seconde à la qualité des condensateurs utilisés pour cette alimentation. De petits amplificateurs donnés pour 15 ou 20 W maxi sont capables en crêtes de délivrer des pointes de 4 A sur une charge de 4Ω , ce qui suppose une tension de sortie tout à fait réaliste de 16 V sans écrêtage. La puissance crête est dans ce cas de 64 W !

L'indication de la puissance nominale n'est absolument **d'aucune utilité** dans la recherche du réalisme...

Seule la voie grave, dont le rendement est souvent plus faible que les voies médium-aigu à pavillon, même avec des H-P de 38 cm, qui dépassent rarement 100 dB/1 W, mérite que l'on s'intéresse aux possibilités de l'amplificateur avant écrêtage. Ce n'est que

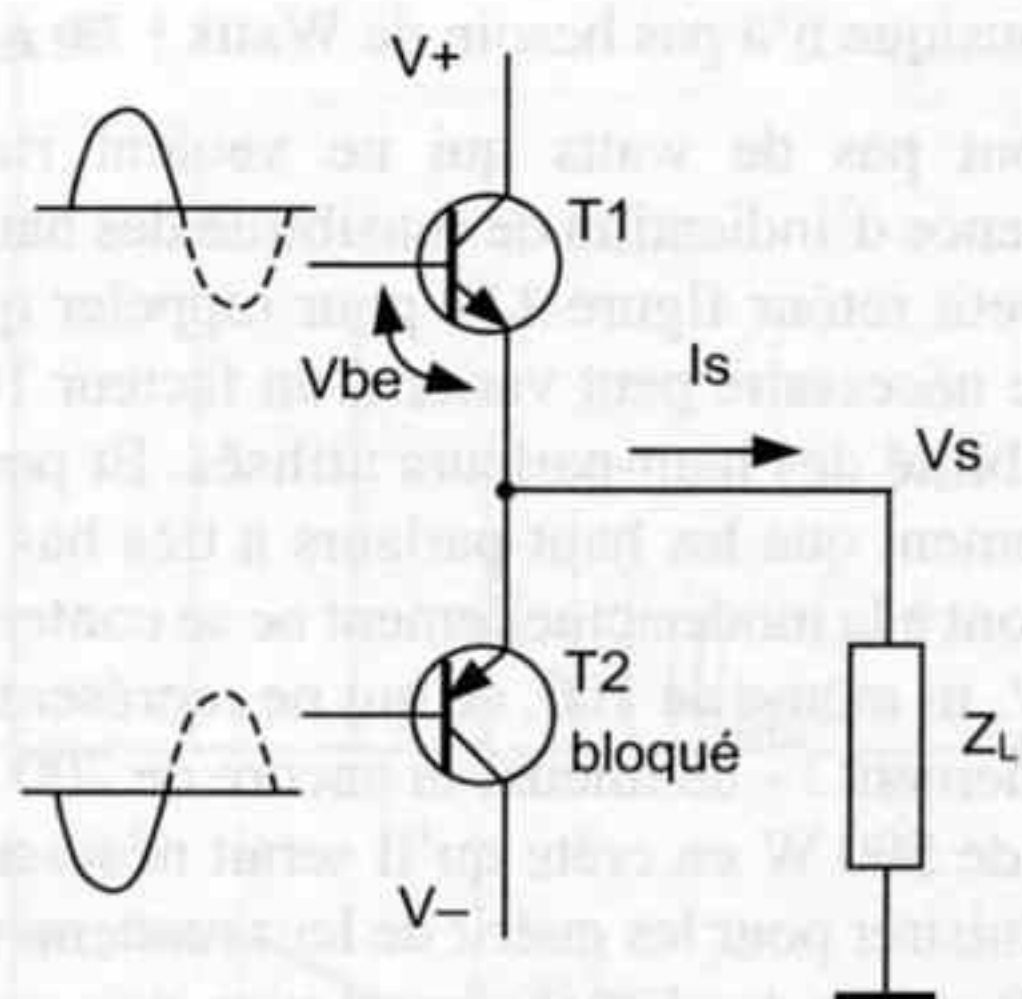
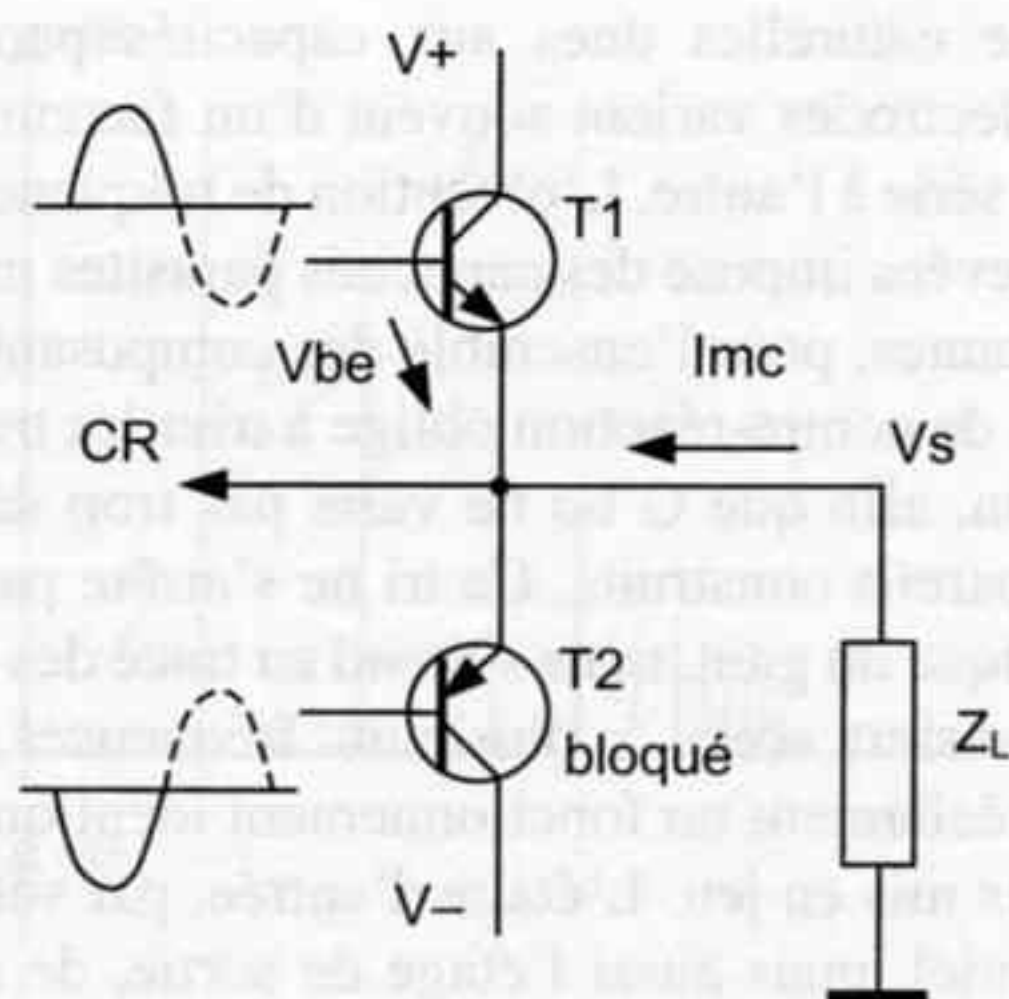


Figure 220 - L'étage de sortie push-pull habituel en classe B ou AB fonctionne sur les crêtes positives avec le transistor T2 bloqué, le transistor T1 étant source du courant I_s débité sur la charge Z_L (Le fonctionnement est identique mais inversé, avec T2 pour les signaux négatifs). T1 est piloté par une tension sur sa base, et son impédance de sortie, sur l'émetteur dans ce cas, est très basse. Elle est approximativement égale à l'impédance du circuit driver divisée par le gain en courant de T1, qui peut atteindre 10 000 pour les transistors de puissance en montage Darlington, ce qui amène des impédances de sortie de quelques milliohms seulement. Dans ce cas, si la tension aux bornes

lorsqu'une correction active de l'extrême-grave est utilisée que des puissances de l'ordre de la centaine de W sont requises.

La recherche de puissances élevées n'étant d'aucun secours, d'aucune utilité dans la recherche du réalisme, l'utilisation des classes d'amplification B ou AB, permettant de tirer plus de puissance des mêmes composants, ne se justifie absolument pas. Cependant ces classes d'amplification ont l'avantage d'un échauffement modéré, donc de radiateurs plus petits, et permettent un dimensionnement plus "serré" des composants du circuit d'alimentation, transformateur en particulier. Le prix et le poids d'un amplificateur en classe A sont supérieurs, son échauffement est à surveiller, et sa puissance maximale limitée le rend difficile à vendre aujourd'hui.

Pourtant, les qualités sonores reconnues à la classe A sont incontestables, liées principalement au fait que l'étage de sortie travaille de manière parfaitement linéaire et symétrique, sans qu'il n'y ait commutation des transistors de puissance. Les classes B ou AB au contraire imposent que les transistors de sortie passent de l'état bloqué à l'état passant et inversement, à tour de rôle, à chaque période du signal. Les délais de commutation de ces transistors, les pics transitoires dus au déblocage, les variations brutales de consommation sur les lignes d'alimentation, sont tenus pour



de Z_L n'atteint pas la valeur imposée V_s , alors T1 présente une tension V_{be} plus grande que prévu, et débite par conséquent un courant limité seulement par sa résistance d'émetteur (non représentée ici) et par l'impédance de l'alimentation. Par contre, face au courant microphonique délivré par le haut-parleur, et qui produit une remontée de V_s donc une diminution de V_{be} pour T1, ce dernier devient moins conducteur. L'impédance de sortie de l'amplificateur en tant que puits de courant est donc notablement plus élevée qu'en source de courant. L'aptitude du circuit à piloter une charge fortement réactive, telle qu'un haut-parleur, n'est donc pas idéale.

responsables d'une dégradation de la transparence. Bien que quelques amplificateurs en classe AB procurent d'excellents résultats, la sensation d'espace n'est pas aussi entière, la matière sonore est moins présente, le trait musical un peu moins fin, que pour la majorité des appareils fonctionnant en classe A.

C'est probablement en examinant l'impédance de sortie, et ses variations avec la fréquence et le niveau du signal, aussi bien en boucle fermée qu'en boucle ouverte, figure 220, que l'on peut constater de grosses différences entre les circuits en classe A et les autres.

On peut considérer que l'impédance de sortie, et par suite l'amortissement du haut-parleur, est constamment modulée au rythme des réactions microphoniques du haut-parleur. La boucle de contre-réaction diminue cet effet, sans l'annuler, particulièrement aux fréquences élevées où le taux de contre-réaction β diminue.

De plus aux fréquences élevées, les temps de déblocage des transistors T1 et T2 ne sont jamais rigoureusement égaux, ce qui entraîne des dissymétries de fonctionnement de l'étage de sortie. Les capacités parasites différentes de T1 et T2 entraînent également des dissymétries de fonctionnement de l'étage driver, avec en particulier des fréquences de coupure naturelles F_{bo} différentes sur les deux branches du push-pull.

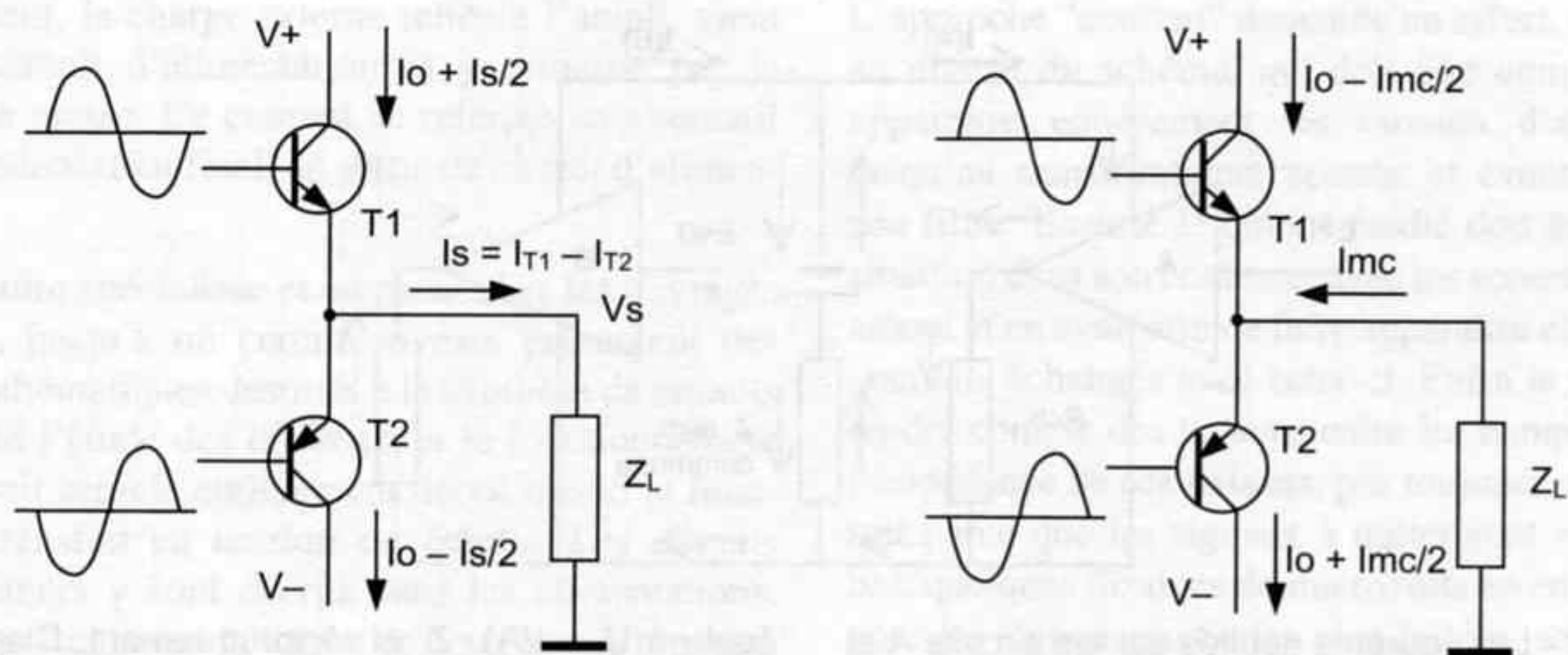


Figure 221 - L'étage de sortie push-pull en pure classe A présente la même impédance de sortie quel que soit le sens du courant et les réactions de la charge. L'amortissement du haut-parleur est invariable, ne dépendant pas du niveau du signal. La classe AB qui cherche à cumuler les avantages de la classe A pour les petits signaux, et de la classe B pour les crêtes, présente souvent une impédance de sortie qui varie brutalement au passage de classe A en classe B, lorsque l'un des deux transistors se bloque. Ce passage inter-

vient pour des tensions de sortie de quelques volts, donc pratiquement à chaque crête de signal, c'est-à-dire sur chaque attaque de note. Ce n'est qu'aux niveaux d'écoute très modérés, donc non-réalistes, que l'amplificateur fonctionne réellement en classe A. Un fonctionnement en classe AB convenable doit s'étendre jusqu'à au moins 10 ou 12 V de tension de sortie, soit environ 12 à 20 W, environ la moitié de la puissance maxi. C'est très proche de la pure classe A.

La puissance dissipée en chaleur au repos étant faible, les forts signaux qui s'accompagnent d'une dissipation élevée font varier la température des jonctions semi-conductrices, modulant leurs caractéristiques, V_{be} en particulier mais aussi le gain et les courants de fuite. Le retour à l'équilibre thermique s'établit avec une constante de temps de l'ordre de la fraction de seconde, correspondant aux basses fréquences du spectre audio.

Cette distorsion d'origine thermique est mise en évidence à l'aide de signaux présentant des variations brusques de niveau, mais elle passe inaperçue avec les mesures classiques.

L'utilisation de transistors FET en lieu et place des traditionnels transistors bipolaires ne résout ni les problèmes liés à la contre-réaction, ni ceux liés à la symétrie de fonctionnement, et en partie seulement ceux liés à la distorsion thermique. Les capacités parasites très élevées et différentes selon la polarité (canal N ou P) des transistors FET de puissance sont sources de grandes difficultés dans la mise au point de l'étage driver, car bien qu'un FET présente une grande impédance d'entrée et ne nécessite pas de courant de polarisation de base comme un bipolaire, le circuit d'attaque doit délivrer de forts courants haute fréquence afin de charger et décharger rapidement la capacité d'entrée, entre la grille de commande et les autres électrodes.

Les non-linéarités de l'impédance de sortie ne sont pas non plus réduites par l'utilisation de FET ou de MosFET, d'IGBT ou de quelque technologie que ce soit.

En revanche, en pure classe A, figure 221, aucun des deux transistors T1 et T2 ne se trouve bloqué à aucun moment, T2 servant de puits de courant et T1 de source pour les signaux positifs, et inversement pour les signaux négatifs. L'impédance de sortie dans ce cas est constante, symétrique, pratiquement indépendante de l'intensité du courant débité et des réactions de la charge. Si de plus le taux de contre-réaction β est constant sur la plage de fréquence, le fonctionnement s'approche de l'idéal. D'autre part, la dissipation thermique au niveau des jonctions est à peu près constante, étant principalement due au courant de repos I_o parcourant constamment les transistors de sortie. Les distorsions thermiques sont pratiquement absentes.

Ce ne sont pas les choix technologiques qui ouvrent le chemin vers l'objectif, vers le réalisme de la restitution. Ces choix devraient être l'aboutissement d'une démarche, guidée par une philosophie de conception ayant défini un objectif précis, et par conséquent une direction, une orientation de la conception, dès le départ.

Lorsque ces choix deviennent points de départ, les limites sont fixées à l'avance et il est illusoire d'espérer les franchir, voire prétentieux de supposer qu'on a pu les dépasser...

Le choix d'un taux de contre-réaction faible, appliqué à un circuit au gain réduit mais à la bande passante étendue au-delà de la limite audio en boucle ouverte,

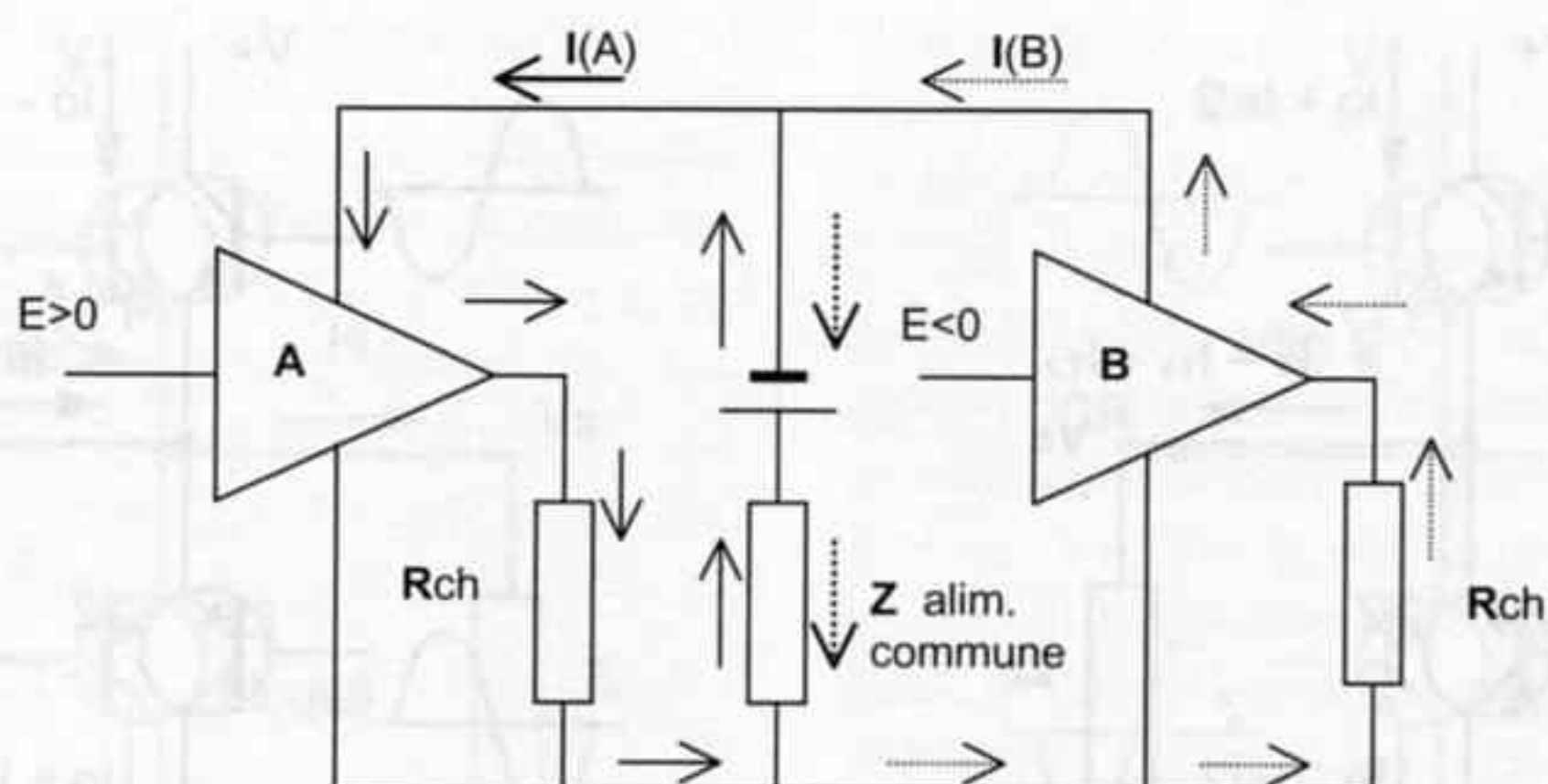


Figure 222 - Les courants débités par les circuits A et B dans leurs charges respectives R_{ch} traversent tous deux l'impédance commune Z –parfois une simple piste de masse !– du circuit d'alimentation. Il apparaît dans la boucle parcourue par $I(B)$ alternatif une tension de bruit

égale à $U_n = I(A) \cdot Z$, et réciproquement. Diaphonie et accrochages Haute Fréquence... Les condensateurs de découplage d'alimentation constituent très souvent des impédances communes... s'ils sont communs !

et présentant de plus une distorsion naturelle au dégradé régulier me semble un point de passage obligé pour dépasser les limites des réalisations courantes.

Le choix de la pure classe A au niveau de l'étage de sortie est une réelle nécessité par rapport à la charge complexe que représente l'enceinte acoustique, et pour limiter efficacement les distorsions d'origine thermique.

Les plus belles réalisations à semi-conducteurs respectent ces principes, qu'elles fassent usage de transistors bipolaires, de FET ou des plus récents IGBT, transistors bipolaires à grille d'entrée isolée.

Composants rigoureusement triés, schéma simple en ce qui concerne le chemin du signal, avec un premier étage différentiel à gain réduit, dissipation élevée au repos, d'où un poids et un encombrement élevés, de par la taille des radiateurs, autant de points communs aux rares amplificateurs se hissant au-dessus de la mêlée. Ces particularités entraînent un coût de réalisation limitant malheureusement la diffusion.

Un autre point commun aux amplificateurs sérieux est le gigantisme de leurs alimentations. Le pluriel n'est pas de trop ici, car une alimentation sérieuse est d'abord multiple.

9.2 Chaîne alimentaire

UNE ALIMENTATION SAINE

Lorsqu'un électronicien de formation examine un amplificateur audiophile, il hausse les sourcils, parfois les épaules, et préfère douter des compétences de l'amateur qui a construit cette monstruosité, plutôt que de remettre les siennes en cause. Pourtant la première qualité d'un esprit scientifique est de douter de ses convictions, la deuxième étant à mon sens d'accepter les choses telles qu'elles sont.

Force est de constater qu'à chaque fois qu'un circuit électronique est rendu plus complexe dans le but d'éliminer certains inconvénients, le résultat sonore global est moins harmonieux, le progrès sur un point précis s'accompagnant de nouveaux défauts parfois nombreux. Au contraire chaque fois que le circuit est simplifié, le naturel y gagne, et si les chiffres mesurés sont moins élogieux, la transparence de l'espace sonore et la sensation de présence de la matière sonore sont améliorées.

De même chaque fois qu'un circuit d'alimentation est dédoublé, séparé pour les canaux droit et gauche, ou pour les étages d'entrée et de sortie, chaque fois qu'une modification est apportée, visant à augmenter les possibilités de courant transitoire, ou à diminuer le bruit dynamique d'un circuit d'alimentation, les améliorations obtenues sont nettes, indiscutables, bien que parfois difficilement justifiables.

“- De tous les composants d'un ampli de puissance, le plus sollicité est sans aucun doute le condensateur de filtrage de l'alimentation.”

Cette affirmation lue il y a bien longtemps dans une revue spécialisée, sous la plume d'un concepteur renommé, ne s'est jamais démentie depuis.

Dans l'approche globale du système figure 5 et 6 j'ai fait apparaître que la matière d'œuvre sortante de l'amplificateur est une énergie, et que cette dernière est issue du circuit d'alimentation. On parle souvent du signal audio qui entre dans l'ampli, et qui en ressort... C'est tout simplement faux, le signal audio qui entre dans un amplificateur n'en ressort jamais, ou plutôt si, mais par la borne de masse de la prise d'entrée, et nulle part ailleurs.

Ce signal est une grandeur modulante, qui agit sur un débit d'énergie, laquelle est la grandeur modulée qui se retrouve en sortie. Le courant audio qui traverse le

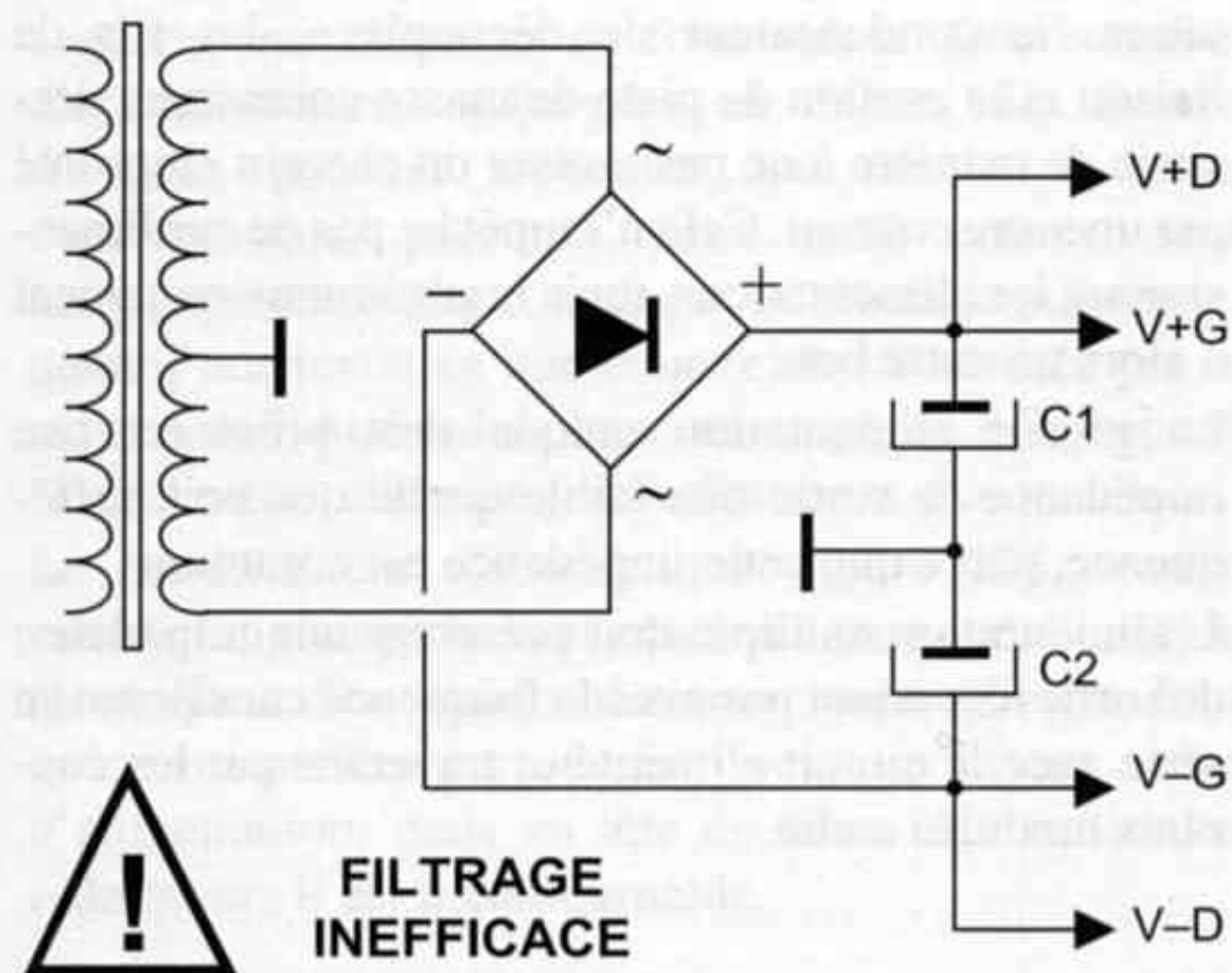
haut-parleur, la charge externe reliée à l'ampli, vient de son circuit d'alimentation et y retourne par la liaison de masse. Ce courant se referme en alternatif par le condensateur final, de sortie du circuit d'alimentation.

La littérature spécialisée et en particulier les ouvrages scolaires, jusqu'à un certain niveau, présentent des outils mathématiques destinés à la synthèse de circuits à partir de l'étude des tensions, et le fonctionnement d'un circuit semble entièrement décrit quand la fonction de transfert en tension est établie. Les circuits amplificateurs y sont décrits sans les alimentations, qui apparaissent sous la forme de deux lignes repérées + et - et le tour est joué.

Bien sûr, la connaissance du gain en boucle ouverte puis fermée, de la bande passante, de la stabilité du circuit bouclé avec l'évolution des déphasages, du bruit, de la sensibilité aux dérives ou dispersions des composants, est indispensable, nécessaire mais pas suffisante à la définition complète d'un circuit amplificateur, car alors de nombreux problèmes, liés à l'étage de sortie, et à son impédance dont nous avons déjà parlé, sont occultés.

Si par contre on s'intéresse aux courants et aux chemins qu'ils empruntent, aux boucles nécessairement fermées dans lesquelles ils circulent, aux impédances qu'ils rencontrent et partagent parfois sur ces chemins, une multitude de petits problèmes ponctuels apparaissent, pratiquement à chaque composant situé sur le trajet du courant.

C'est ainsi que l'on constate que les circuits d'alimentation sont en série avec l'étage de sortie de l'amplificateur, et que par conséquent l'impédance en boucle ouverte de l'ampli dépend entièrement de l'impédance des circuits d'alimentation, variable avec la fréquence et le courant débité.



L'approche "courant" demande un effort, tout d'abord au niveau du schéma, qui doit être complet et faire apparaître entièrement les circuits d'alimentation, jusqu'au transformateur secteur et éventuellement à son filtre. Ensuite le circuit étudié doit être remis en situation dans son contexte, avec les appareils situés en amont et en aval, afin de faire apparaître clairement les courants échangés avec ceux-ci. Enfin le schéma doit rendre compte des liaisons entre les composants et de l'impédance de ces liaisons, pas toujours négligeables, soit parce que les signaux à traiter sont extrêmement bas, quelques dizaines de microvolts en entrée d'ampli pour les signaux audio les plus faibles, soit parce que les courants qui y circulent sont particulièrement intenses, plusieurs ampères en crête (plusieurs dizaines ?) sont normaux dans une enceinte acoustique, et dans les transistors de sortie de l'ampli qui y est relié.

Les impédances des câbles, des pistes et des pattes des composants n'étant jamais nulles, si deux courants de fréquence f_1 et f_2 , suivant des chemins différents viennent à partager une impédance, appelée alors impédance commune, figure 222, il y aura intermodulation de ces deux courants, c'est-à-dire modulation réciproque de l'un par l'autre. Des formants supplémentaires non harmoniques de fréquence $n.f_1 \pm m.f_2$ (avec n et m entiers) sont alors ajoutés aux spectres des signaux. Une simple piste de masse mal dessinée dans laquelle circule dans un sens le courant du signal d'entrée, et dans le sens opposé le courant issu du réseau de contre-réaction, suffit à assurer l'instabilité du circuit rebouclé.

Une règle d'or dès qu'il s'agit de traiter des petits signaux à très grande dynamique : **pas d'impédance commune**. Chaque courant circule dans sa propre boucle indépendante, avec sa propre piste de masse. L'étude de la configuration des masses est indissociable de celle des alimentations.

Figure 223 - Circuit classique d'alimentation d'un amplificateur : Les condensateurs chimiques C1 et C2 sont partagés par les courants des canaux droits et gauche, d'où une diaphonie audible aux fréquences où l'impédance de ces condensateurs n'est pas assez faible, c'est-à-dire en dessous de 100 Hz et au-dessus de 10 kHz en général. Mais le plus grave est qu'ils partagent également les courants modulés audio avec les courants pulsés à 100 Hz issus des redresseurs. Ces courants sont très pointus (voir figure 60, page 95) et produisent aux bornes des condensateurs, dont la résistance-série n'est pas nulle, une tension de bruit importante, sous forme d'un crépitement. Le montage push-pull de l'étage de sortie est censé éliminer ce bruit, qui n'est malheureusement pas symétrique. L'éliminer en sortie, c'est accepter qu'il fasse des dégâts par intermodulation jusque-là...

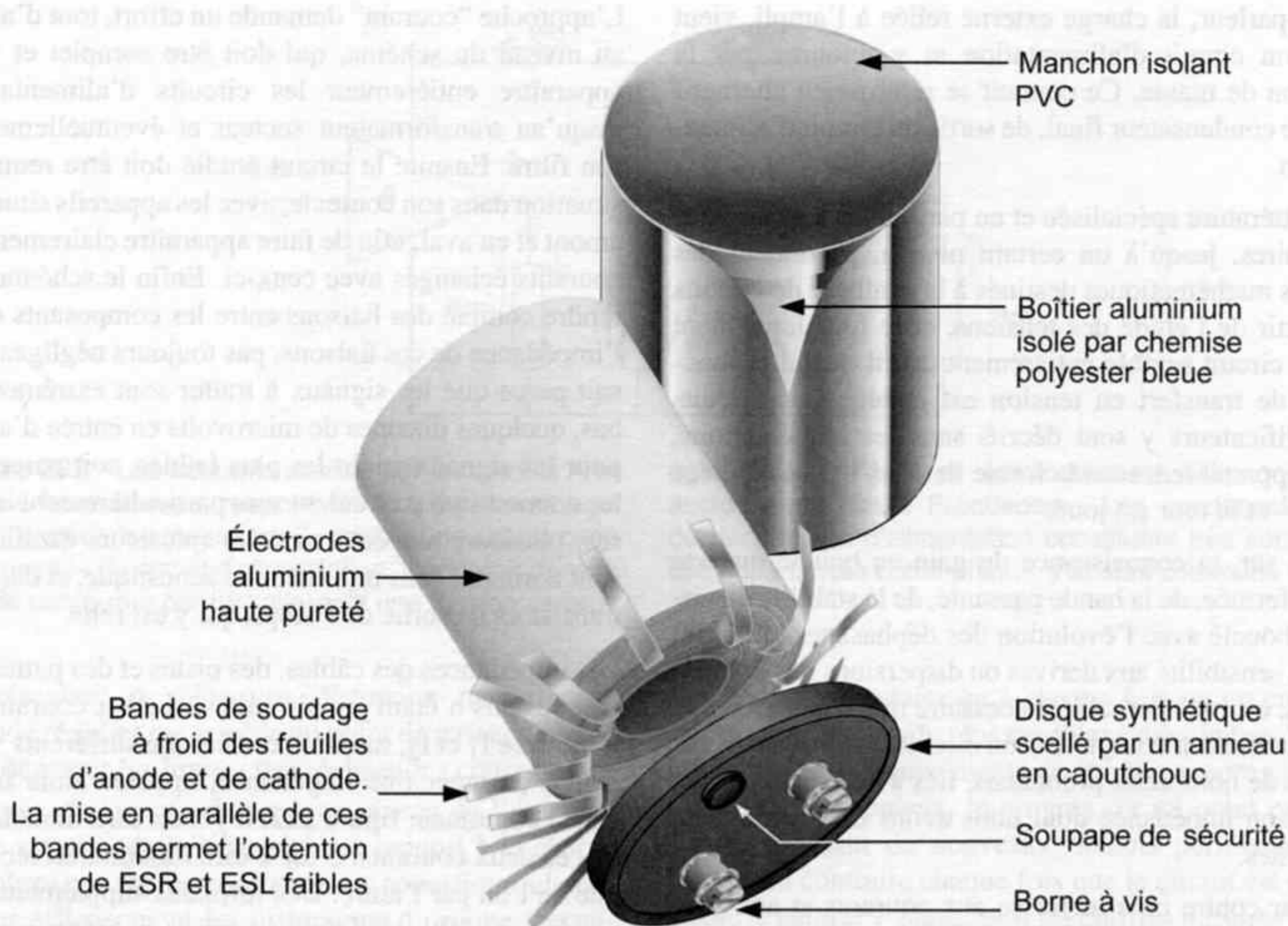


Figure 224a - La capacité d'un condensateur n'a une importance que s'il est utilisé pour créer une constante de temps, dans un filtre, un oscillateur etc. lorsqu'il s'agit d'un circuit de puissance, c'est le courant maxi que le composant supporte à la charge, et sa résistance équivalente série ESR qui importent. Là aussi la miniaturisation n'est pas possible, l'épaisseur des armatures, le nombre et la qualité des connexions, la dissipation de la chaleur dégagée par le passage du courant, font que la taille est un gage de qualité. Le modèle ci-dessus, Philips C114 de 47 000 $\mu\text{F}/63\text{ V}$

La pratique consistant à installer une alimentation unique mais très largement surdimensionnée, si elle permet un fonctionnement sans aucun doute plus efficace qu'avec une petite alimentation, ne va pas jusqu'au bout des possibilités réelles du circuit. La grosse alimentation réduit le plus possible l'impédance commune, qui ne peut cependant être inférieure à celle des câbles la reliant au circuit, et elle reste néanmoins partagée par divers courants.

La séparation des alimentations, au contraire n'essaye pas de réduire à néant l'impédance commune, mais la rend tout simplement... non-commune. Chaque étage d'alimentation n'alimente qu'un seul étage d'amplification, c'est-à-dire parfois un seul composant actif !

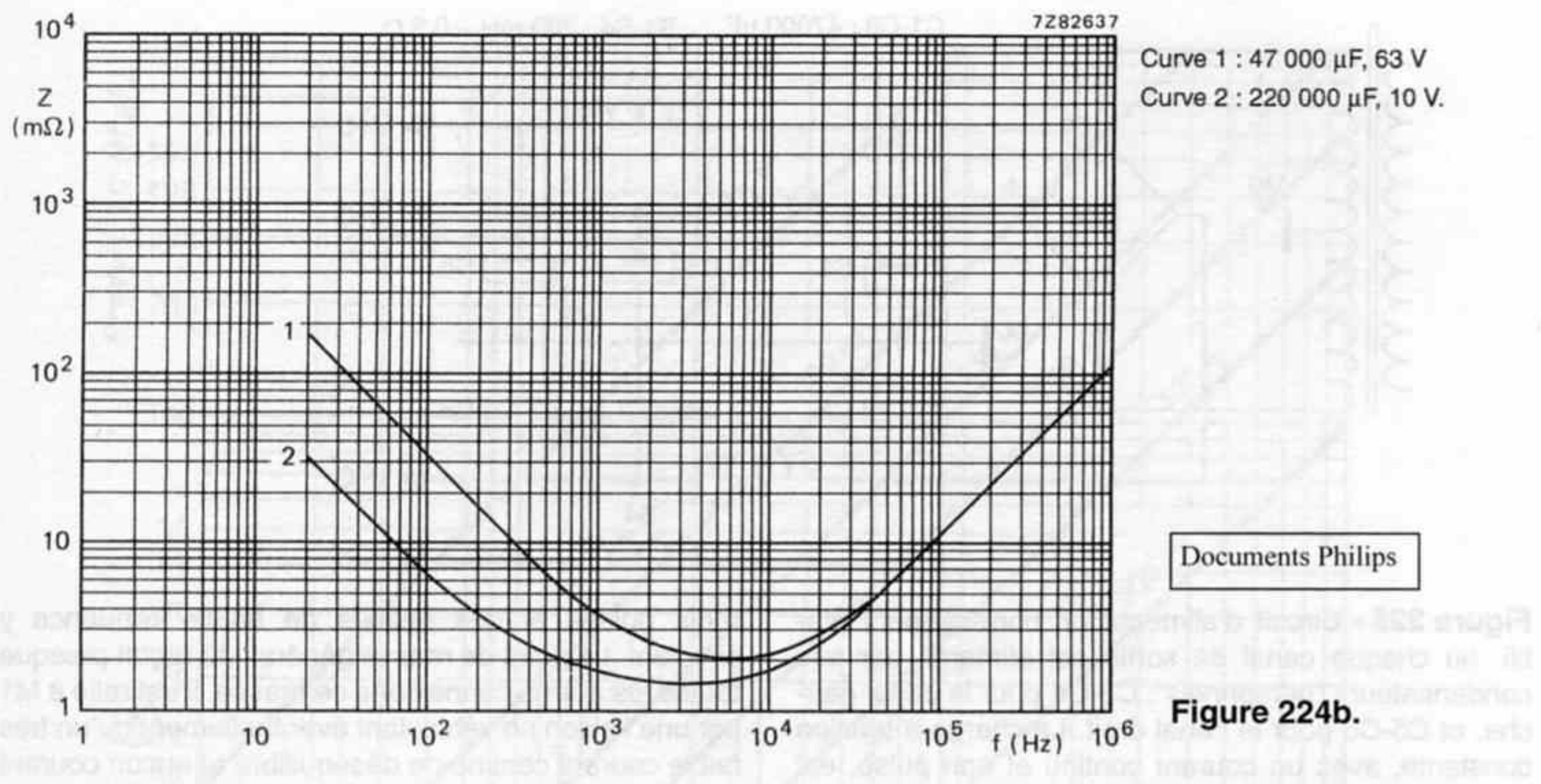
mesure $\varnothing 75 \times 105\text{ mm}$. Il supporte 50 A à 20 kHz et son impédance est inférieure à 3 m Ω .

Spécialement étudié pour les régimes impulsionnels sévères, son prix est 10 à 20 fois celui d'un modèle habituel. Sa courbe d'impédance (figure 224b) montre un creux typique centré vers 10 kHz. En dessous l'impédance suit une droite de pente négative, et remonte aux basses fréquences jusqu'à 0,2 Ω à 20 Hz. Elle remonte également vers 0,1 Ω à 1 MHz. Un modèle plus petit, de 1 000 μF montrerait une impédance 50 fois plus forte, atteignant 10 Ω et plus aux basses fréquences.

Un seul et unique courant traverse le circuit d'alimentation, le condensateur de découplage, les fils de liaison et la portion de piste de masse concernée, dessinée de manière à ne pas croiser un chemin emprunté par un autre courant. Cela n'empêche pas de surdimensionner les alimentations, mais le surdimensionnement a alors un autre but :

La grosse alimentation unique doit présenter une impédance de sortie très faible quelle que soit la fréquence, parce que cette impédance est commune.

L'alimentation multiple doit présenter une impédance de sortie ne variant pas avec la fréquence car elle est en série avec le circuit alimenté et traversée par les courants modulés audio.



Autrement dit, avant de se questionner sur l'opportunité d'une régulation, si bonne soit-elle, ou sur la technologie des condensateurs de découplage, encore une fois il convient de remettre la hiérarchie dans le bon ordre. La première question me paraît être : "Grosse alimentation unique ou alimentations multiples ?".

Une très forte majorité d'appareils du commerce n'utilisent qu'une seule alimentation symétrique, figure 223, reliée directement aux étages de puissance des deux canaux, et par circuit de filtrage R-C, parfois régulateurs intégrés, aux étages d'amplification de tension et d'entrée. Le surdimensionnement n'est pas de mise, et une remise en cause est très difficile, car il ne suffit pas de changer deux condensateurs pour que tout s'arrange.

DES CAPACITÉS INEXPLOITÉES

À part l'accumulateur au plomb, on n'a encore rien trouvé de mieux pour stocker l'énergie électrique que le condensateur chimique de forte valeur. Des batteries d'accumulateurs, rechargées en dehors des heures d'écoute, peuvent alimenter des circuits à basse consommation, préampli, filtre actif, convertisseur numérique-analogique, mais pas un ampli de puissance, quoiqu'une tentative intéressante ait été réalisée par la maison de l'Audiophile avec un ampli de 8 W baptisé "Le monstre" alimenté par des batteries d'automobile.

Le condensateur électrolytique, figure 224, restera encore longtemps le seul réservoir pratique d'énergie électrique. Ses caractéristiques particulières font qu'on lui préfère parfois des circuits actifs en sortie d'alimentation, mais en tête de filtre à la sortie des redresseurs il est incontournable.

La figure 224 résume bien à elle seule toutes les limites du condensateur, qui même de très haute qualité, présente néanmoins une impédance variable avec la fréquence. Cela est particulièrement gênant aux basses fréquences où l'impédance de l'enceinte est capacitive, descendante avec la fréquence, car le courant absorbé atteint alors des valeurs très élevées parfois supérieures à 10 A, en avance de phase sur la tension. En effet une charge capacitive se comporte comme un court-circuit face à une variation rapide de tension. La tension à ses bornes, qui est la tension de sortie de l'ampli, ne monte que lentement, au rythme du courant de charge, et le réseau de contre-réaction, avec V_s inférieur à la valeur requise, impose à l'étage de sortie un débit de courant limité seulement par l'impédance du condensateur d'alimentation et des fils de câblage.

Les condensateurs habituels avec des impédances de l'ordre de 1 à 10 Ω en dessous de 100 Hz ne peuvent fournir que des courants de crêtes très insuffisants, limités à moins de 5 A en général, ce qui ne permet absolument pas de piloter correctement l'enceinte aux fréquences concernées. Le courant à ces fréquences est insuffisant et de plus retardé, et avec lui le mouvement de la bobine mobile. Peut-être s'agit-il d'une astuce pour se mettre à l'abri des effets microphoniques du haut-parleur ?

L'impédance irréductible du condensateur est gênante également aux fréquences du courant redressé, de 100 Hz et ses harmoniques nombreux en hautes fréquences générées par le déblocage des diodes de redressement à chaque alternance. Le seul et unique moyen d'éviter l'intermodulation du courant pulsé des

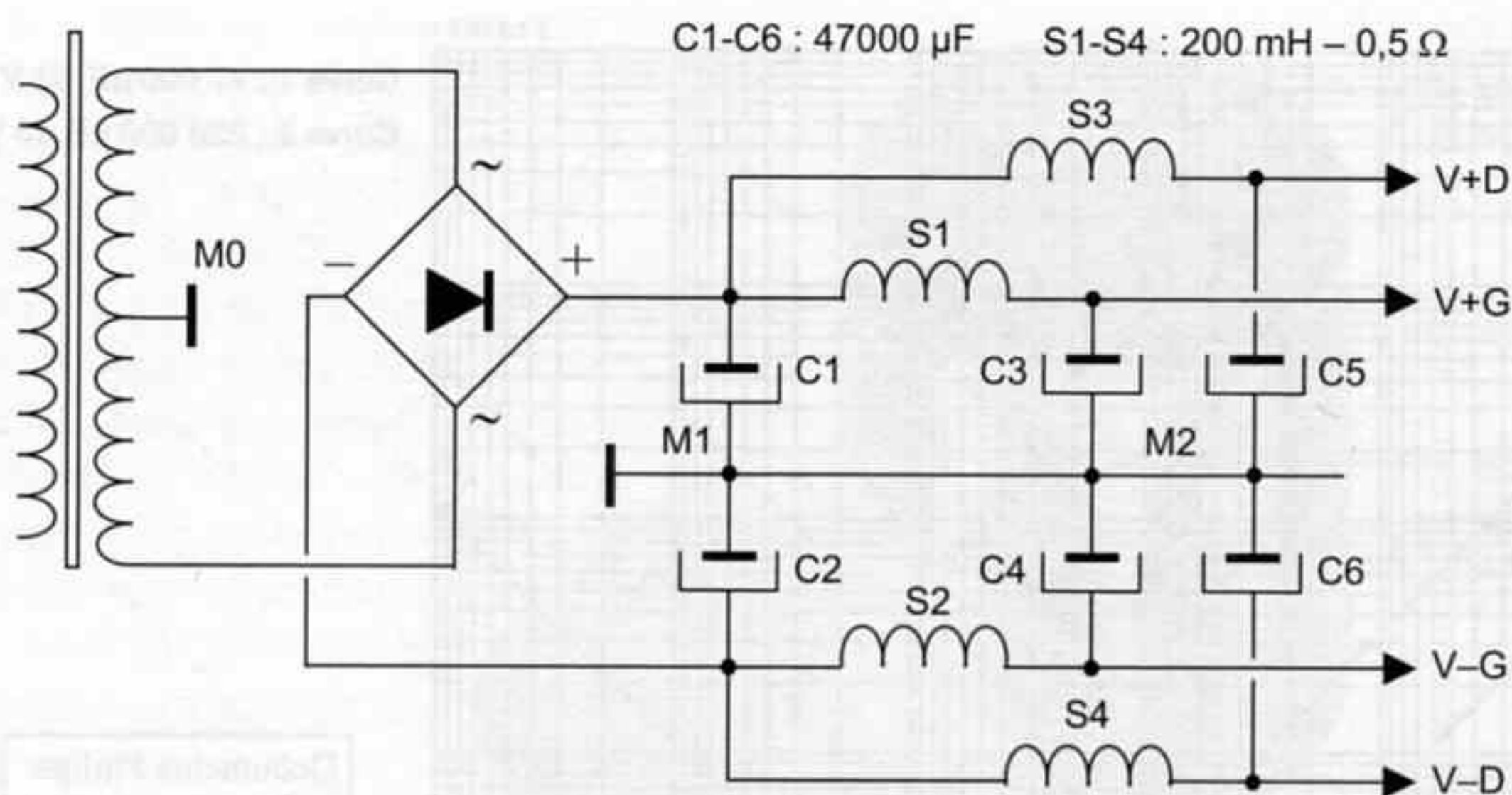


Figure 225 - Circuit d'alimentation correctement établi, où chaque canal de sortie est alimenté par ses condensateurs "personnels", C3-C4 pour le canal gauche, et C5-C6 pour le canal droit. La charge à tension constante, avec un courant continu et non pulsé, est assurée par les selfs S1 à S4. Les courants pulsés circulent seulement dans le secondaire du transformateur, dans les redresseurs et dans les condensateurs de tête. Le point commun M1 de C1 et C2 est relié directement au point milieu du secondaire M0, car des cou-

rants pulsés et des résidus de haute fréquence y circulent. Le point de masse général M2 reçoit presque toutes les autres connexions de masse, il est relié à M1 par une liaison ne véhiculant éventuellement qu'un très faible courant continu de déséquilibre et aucun courant modulé audio. Les condensateurs situés après la self seront choisis de valeur supérieure ou égale à ceux de tête, afin d'assurer une réponse apériodique, sans oscillation, à une brusque variation du courant débité.

redresseurs avec le courant modulé audio est de séparer le condensateur de lissage (et non filtrage) de tête de "filtre" et celui de découplage d'où est tiré le courant de sortie. Confondre ces deux fonctions en un seul composant est une hérésie, un non-sens.

La séparation en deux condensateurs fait doubler l'encombrement, le poids et le prix, et nécessite de plus un élément de transfert, capable d'assurer la charge constante du condensateur de sortie à partir de la charge pulsée de celui de tête. Une simple résistance suffit, mais entraîne une chute de tension qui, en plus de l'échauffement supplémentaire, fait perdre quelque peu sur la tension de sortie maxi avant écrêtage. Une self est beaucoup mieux, assurant une réjection des fréquences élevées issues des redresseurs sans entraîner de chute de tension notable. Un régulateur semble possible, bien que cette solution d'une alimentation régulée de puissance soit très rarement mise en œuvre. La cause en est que le régulateur doit tirer son courant de quelque part, et s'il le tire directement du condensateur de tête, alors cela signifie que le courant modulé audio se referme par ce condensateur de tête via le régulateur série. On n'a donc rien solutionné dans ce cas, l'intermodulation persiste dans le condensateur de tête.

Idéalement adaptée aux amplificateurs en pure classe A, une alimentation du type de la figure 225 peut être envisagée pour un appareil fonctionnant en classe AB, avec des selfs un peu plus fortes.

Après avoir expérimenté ce type d'alimentation, aucun retour en arrière n'est envisageable. Mais avant d'aller plus loin, quelques éléments de calcul sont nécessaires pour dimensionner les composants de ce circuit, en particulier le transformateur et les diodes de redressement, qui souffrent énormément à chaque mise sous tension de l'appareil. La méthode graphique proposée par Schade est issue de l'excellent ouvrage de R. Damaye et C. Gagne "Alimentations électroniques".

Le point de départ du dimensionnement est fixé par la contrainte de bruit de sortie, bruit constitué du résidu de redressement à 100 Hz. L'utilisation d'enceintes à très haut rendement impose un ronflement qui doit se situer à environ -100 dB, soit 10^{-5} en dessous de la tension de sortie maximale pour être inaudible. Avec une tension d'alimentation de + et -35 V, valeur très courante, cela implique un bruit de fond inférieur à 0,35 mV en sortie d'alimentation. Pour rester dans des limites raisonnables, imaginons un projet utilisant des condensateurs de 10 000 μF et des selfs de 200 mH/1 Ω pour alimenter un amplificateur consommant 1,25 A au repos. L'abaque figure 226 nous donne l'efficacité du filtre L-C à la fréquence redressée de 100 Hz.

L'ondulation en entrée du filtre, sur le condensateur de tête, doit par conséquent être inférieure à :

$$U_r = 0,35 \cdot 10^{-3} \cdot 800 = 0,28 \text{ V}$$

Cela représente environ 0,8 % de la tension continue de 35 V (disons moins de 1 %).

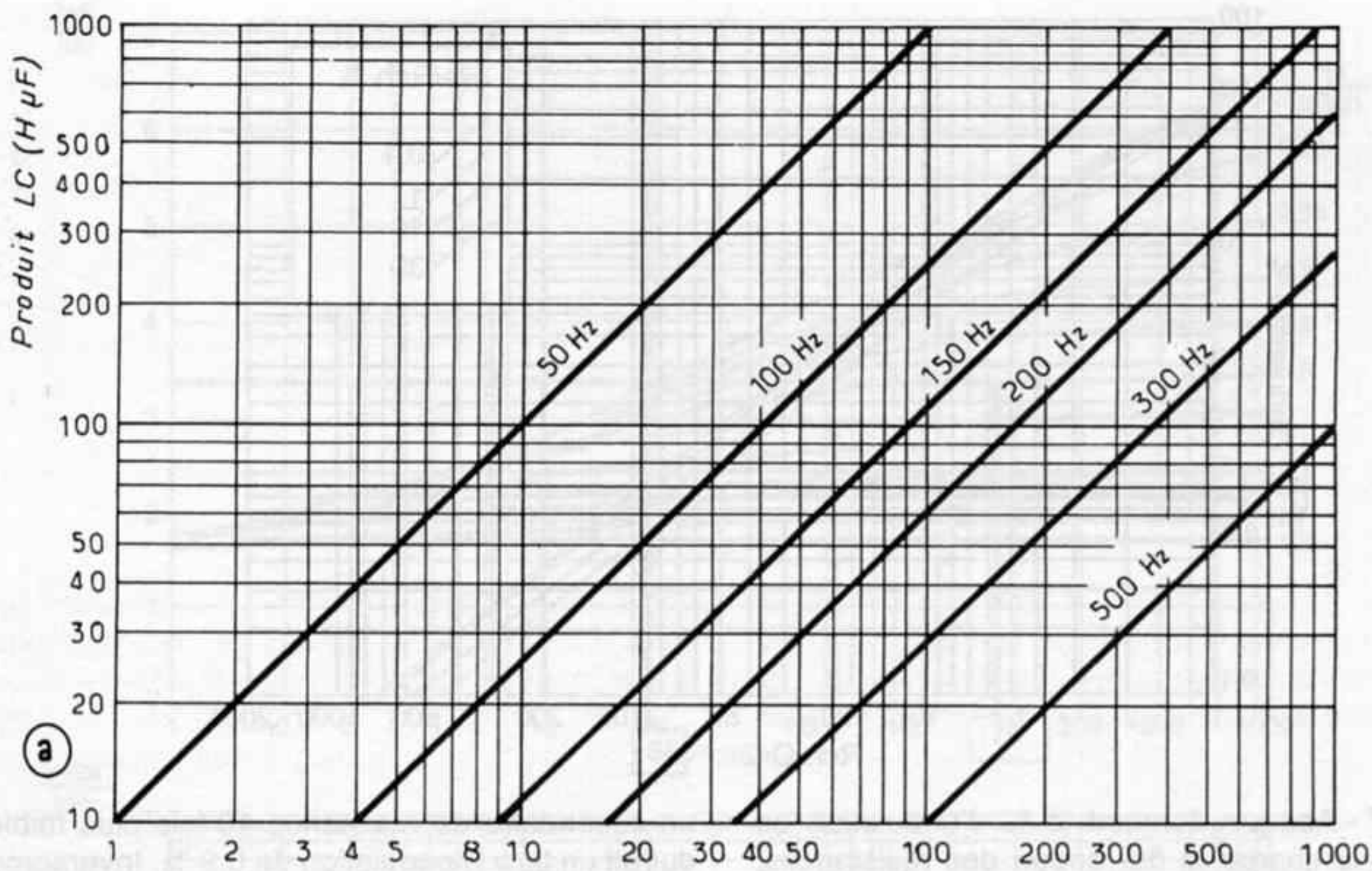


Figure 226 - Le produit LC dans l'exemple choisi est de 2 000. L'abaque peut être utilisé en multipliant par 10 les valeurs lues en abscisse et en ordonnée. Un produit LC de 200 procurant à la fréquence d'ondulation de 100 Hz, issue du redressement, une atténuation de 80,

un produit LC de 2 000 procure donc une atténuation de 800 dans les mêmes conditions. Il est possible de déterminer également l'atténuation des harmoniques. Une self même de très faible valeur est indispensable à un filtrage correct des bruits en sortie de l'alimentation.
(R. Damaye, C. Gagne : Alimentations électroniques)

Cette alimentation débite un courant continu, classe A oblige, de l'ordre de 1,25 A à travers les transistors de sortie.

Sa résistance de charge apparente est :
 $R_{ch} = U / I = 35 / 1,25 = 28 \Omega$

Le produit $R_{ch} \cdot C \cdot \omega$ s'établit à environ 88, avec C en F et $\omega = 314$ pour un secteur à 50 Hz.

L'abaque figure 227 permet de connaître le rapport entre la résistance de sortie des redresseurs et la résistance de charge de l'alimentation, afin de dimensionner correctement le transformateur. Un transformateur sur-dimensionné, avec une résistance de l'enroulement secondaire trop faible, fournit un courant pulsé important qui génère un taux d'ondulation supérieur aux prévisions, et par conséquent une remontée du bruit de fond. Au contraire un transformateur sous-dimensionné est trop chargé par le courant traversant la capacité de tête, et son noyau se sature brièvement à chaque demi-alternance. Cela produit un écrêtage de la tension secondaire, c'est-à-dire de l'harmonique trois, et également un champ magnétique parasite pulsé, rayonné à plusieurs dizaines de centimètres de distance,

et qui induit un crépitement dans les conducteurs qu'il arrose. Le bruit de fond causé par l'alimentation augmente également mais de manière indirecte cette fois. La résistance R_s vue en sortie des redresseurs inclut la résistance ohmique du bobinage secondaire, la résistance dynamique des diodes de redressement, qu'il est parfois difficile d'évaluer, ainsi que les résistances de câblage, et de l'éventuel fusible, parfois non négligeables. Dans l'exemple traité, avec un rapport R_s/R_{ch} proche de 1 %, cette résistance s'établit à environ 0,28 Ω . Les abaques figure 228 donnent les courants débités.

Le secondaire du transformateur sera donc bobiné pour fournir au moins 29 V/5 A, soit 300 VA en stéréo, pour un amplificateur délivrant 25 W en pure classe A. Avec des capacités plus grosses, comme les audiophiles en utilisent parfois, jusqu'à 100 000 μF , c'est un transformateur de plusieurs milliers de VA qui est nécessaire.

Une conclusion très importante doit être tirée de cet exemple : le fait de remplacer les condensateurs de tête d'alimentation d'un amplificateur, en espérant ainsi améliorer son rendu sonore, n'est en général pas très profitable. Le transformateur surchargé sature et rayonne, les courants pulsés intenses génèrent des

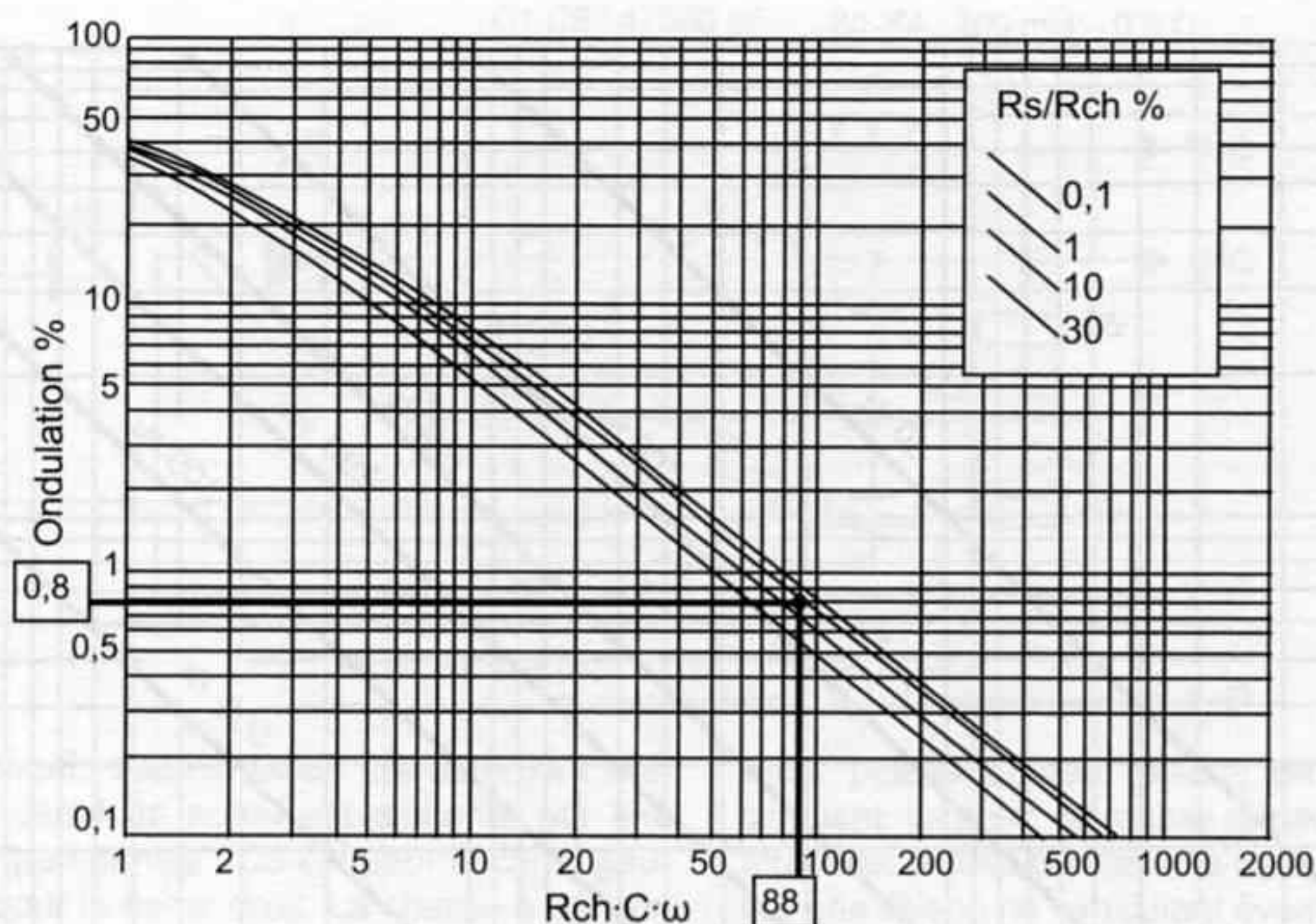


Figure 227 - Abaque donnant le % d'ondulation en fonction de la charge et du rapport des résistances. Avec $R_{ch} \cdot C \cdot \omega = 88$ et un taux d'ondulation devant rester inférieur à 0,8 %, le rapport R_s , résistance série vue de la sortie des redresseurs, sur R_{ch} résistance de charge en sortie de l'alimentation, doit rester supérieur à 1 %. Un rapport R_s/R_{ch} tombant à 0,1 %, soit

un secondaire de résistance 10 fois plus faible, produirait un taux d'ondulation de 0,9 %. Inversement, un secondaire 10 fois plus résistif entraînerait une ondulation plus faible, de l'ordre de 0,65 %. Un redressement par doubleur, ou en simple alternance, produit des taux d'ondulation nettement supérieurs.

(R. Damaye, C. Gagne : Alimentations électroniques)

bruits importants et les diodes de redressement rendent l'âme rapidement. Il est plus efficace de transformer l'alimentation simple en alimentations séparées avec filtrage en π par selfs et capacités, en conservant les capacités de tête adaptées au transformateur et au redresseur.

Les diodes de redressement méritent également un effort, à la fois pour limiter les parasites de commutation qu'elles génèrent, et pour soulager le transformateur, qui subit un court-circuit bref à chaque inversion de polarité, les diodes conductrices mettant un certain temps à se bloquer, alors que les diodes non-conductrices se débloquent presque immédiatement. Pendant un court instant, toutes les diodes du pont redresseur sont conductrices en même temps, le secondaire se trouve donc court-circuité.

La durée de ce phénomène dépend du temps dit de recouvrement des diodes, temps nécessaire à l'évacuation des charges accumulées dans la jonction. Cette énergie emmagasinée est liée à la capacité parasite de la jonction. Les diodes ultra-rapides les plus récentes présentent des temps de recouvrement de 20 à 50 ns pour les plus performantes, grâce à de très faibles capacités parasites, alors que les diodes classiques commutent en plusieurs μs , soit presque mille fois plus lentement.

L'utilisation de diodes ultrarapides en boîtier TO220 largement dimensionnées à environ 2 fois le courant efficace, soit 10 A dans l'exemple choisi, assure une recharge plus rapide des condensateurs de tête de filtre ainsi qu'une réduction audible des parasites haute fréquence. L'antiparasitage des diodes et ponts classiques par capacités céramiques en parallèle ne fait que favoriser le passage des courants haute fréquence...

Les condensateurs méritent également réflexion au moment du choix. En tête de filtre, un excellent condensateur tire des courants pulsés plus importants, ce qui génère des parasites plus intenses. Une technologie classique est préférable ici. Le mieux est parfois l'ennemi du bien. Par contre en sortie de filtre, le condensateur sur lequel est tiré le courant audio demande une attention particulière. Son absorption diélectrique doit être limitée ainsi que son effet de mémoire, et sa résistance équivalente série doit être très faible. Si les modèles industriels de type FRS conviennent très bien, les gammes spécialement étudiées pour l'audio par quelques fabricants donnent des résultats souvent plus naturels, ELNA et Black-Gate en sont de très bons exemples, malgré leur tarifs élevés.

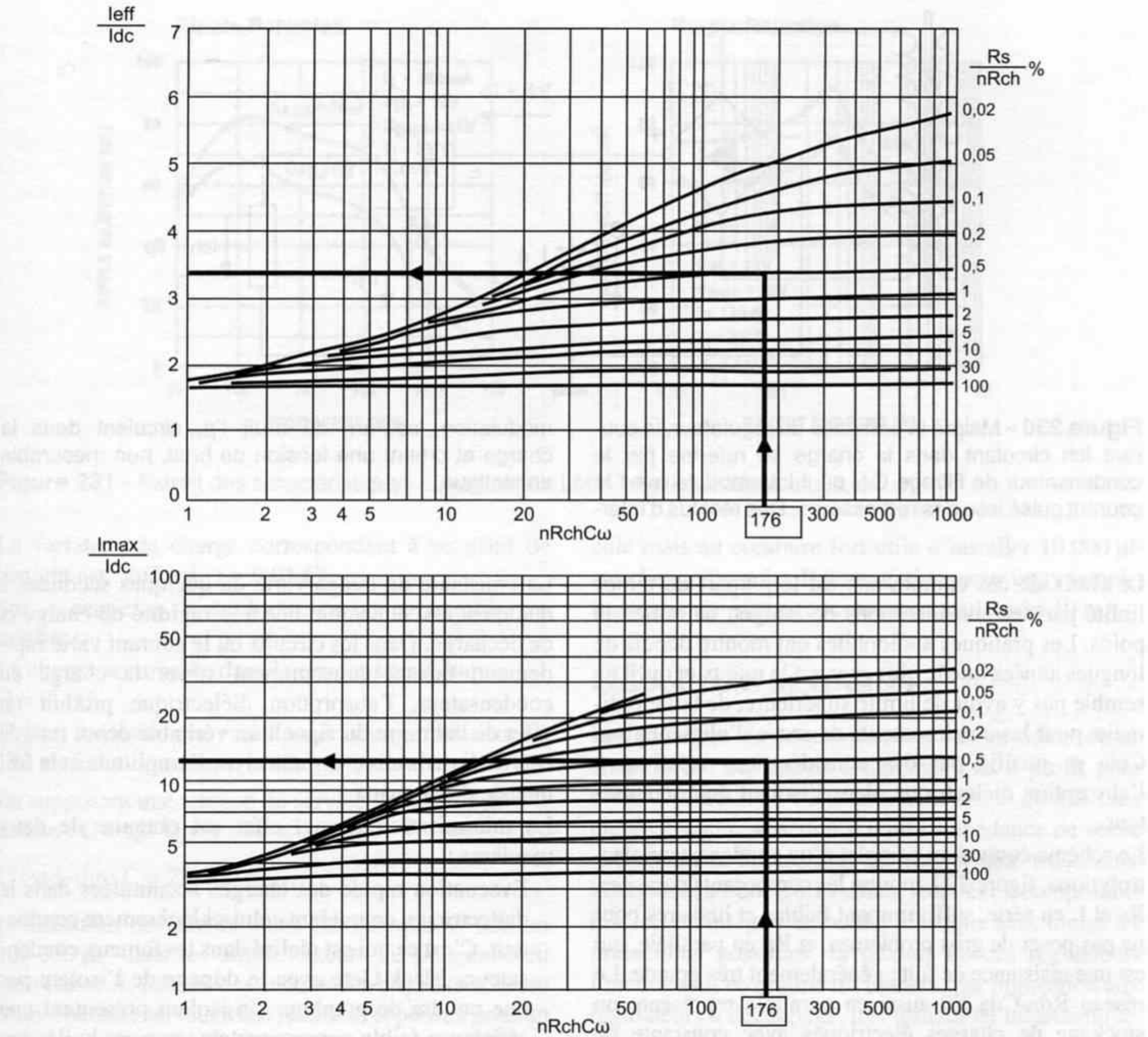


Figure 228 - Le courant efficace tiré au secondaire du transformateur est indiqué par l'abaque supérieur, à partir du produit $n \cdot Rch \cdot C \cdot \omega$ avec $n = 2$ pour un redressement double alternance, et du rapport $R_s / n \cdot Rch$, qui est proche ici de 0,5 %. Le courant efficace s'établit à environ 3,4 fois le courant continu, soit environ 4,25 A.

Cette valeur est notablement plus élevée que le courant de repos de l'amplificateur. Le courant de crête, quant à lui, s'établit avec l'abaque inférieur à environ 13 fois le courant continu, soit environ 19,5 A. Le fusible au secondaire doit être choisi pour supporter 20 A.

(R. Damaye, C. Gagne : Alimentations électroniques)

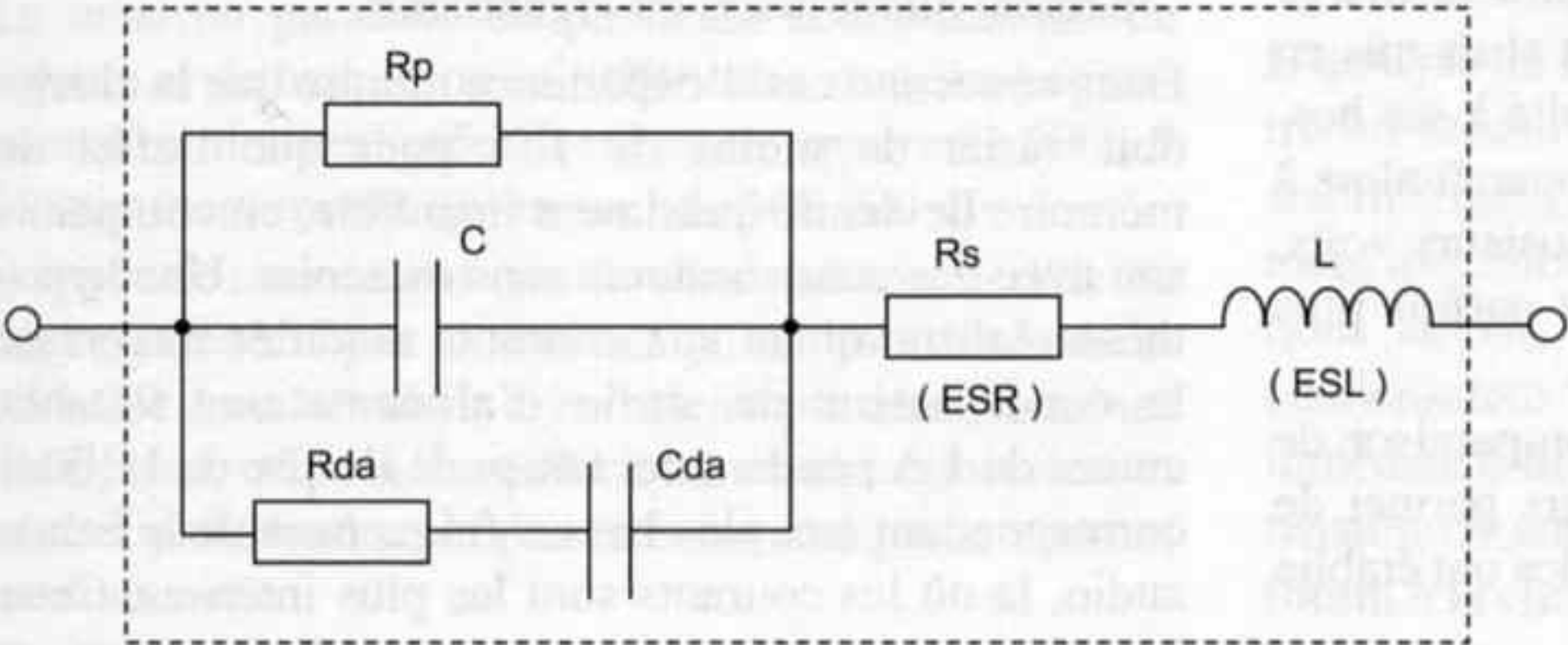


Figure 229 - Schéma équivalent d'un condensateur réel.

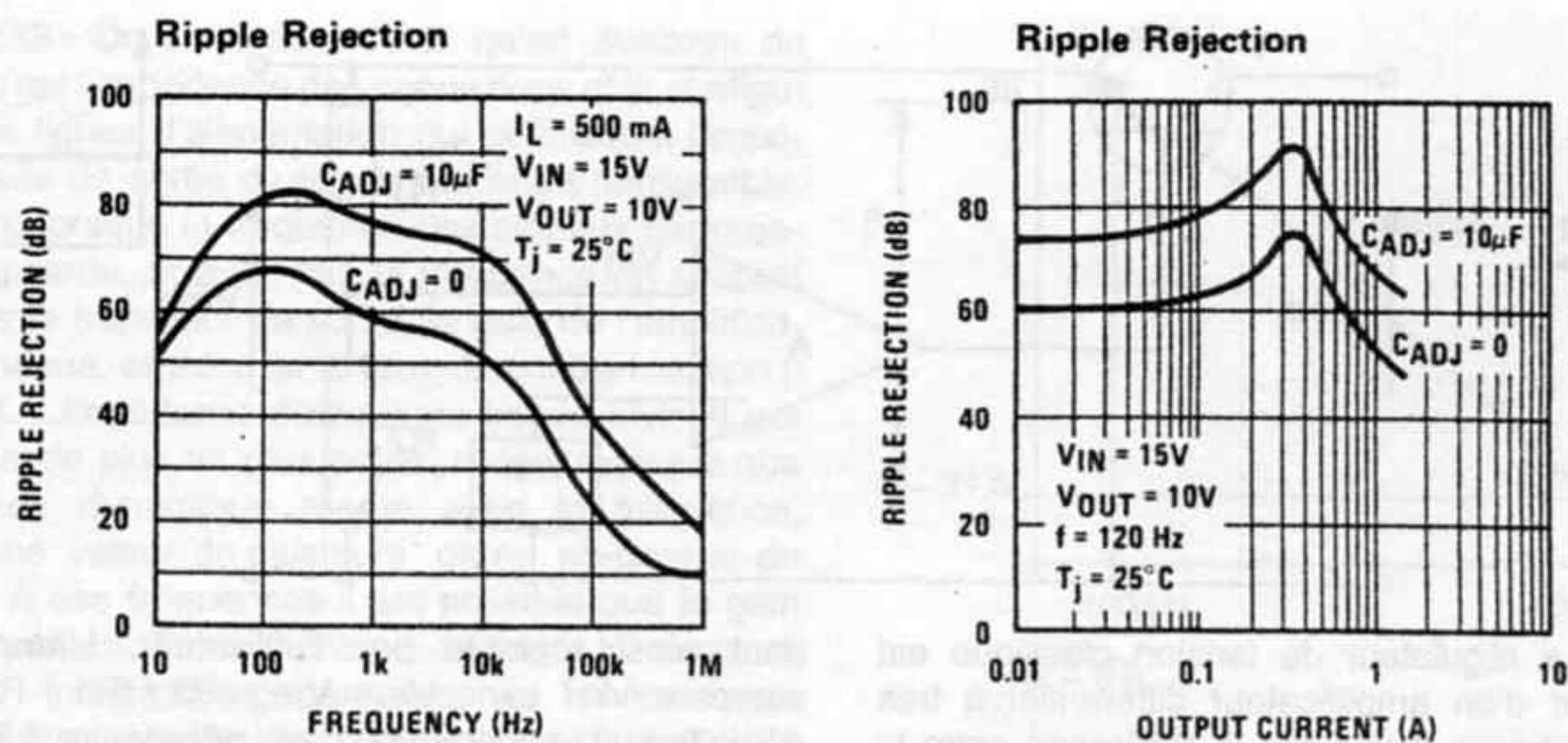


Figure 231 - Extrait des caractéristiques du régulateur LM117 National Semiconductor.

La variation de charge correspondant à ce débit de courant est : $\Delta Q = I \cdot t = 0,01\text{ Cb}$

Soit 1 centième de coulomb, ce qui ne semble pas méchant.

La charge accumulée dans le condensateur étant : $Q = C \cdot U$

Si l'on souhaite une variation de charge inférieure à 1 % en fonctionnement, la charge Q doit être de 1 Cb.

En supposant une tension de service de 40 V, cela amène : $C = Q / U = 1 / 40 = 0,025\text{ F}$

C'est-à-dire $C = 25\,000\text{ }\mu\text{F}$...

L'utilisation de valeurs aussi élevées que 47 000 ou 100 000 μF dans les amplificateurs de puissance en pure classe A, reliés à des enceintes à impédance basse et tourmentée, est tout à fait justifiée, et permet pour un coût nettement plus abordable, d'atteindre les qualités musicales des meilleurs condensateurs spécialement étudiés pour l'audio, avec cependant un encombrement dix fois plus grand et une durée de vie de "seulement" une dizaines d'années car les condensateurs électrolytiques vieillissent, et perdent leurs qualités au cours du temps.

La mise en parallèle de plusieurs condensateurs de valeurs et de technologies différentes contribue également à minimiser l'effet de mémoire, quatre 22 000 μF fonctionnent mieux qu'un seul de 100 000 μF .

Il apparaît maintenant que le condensateur de tête de filtre, parcouru par le courant pulsé issu des redresseurs, et dont la valeur crête atteint plusieurs dizaines d'ampères, ne peut travailler sous charge constante, et ne doit par conséquent pas être traversé par le courant modulé audio.

Ce surdimensionnement des condensateurs de sortie d'alimentation est une pratique qui peut être étendue à l'ensemble des circuits électroniques. Il n'est pas ridi-

cule mais au contraire fort utile d'installer 10 000 μF sur chaque branche d'alimentation, pour un préamplificateur à transistors consommant seulement 10 mA.

RÉGULATEURS DE TENSION

Les principes de contre-réaction vus en début de ce chapitre ont été depuis longtemps mis à profit pour créer des circuits d'alimentation actifs, et dont le taux élevé de contre-réaction β rend l'impédance de sortie extrêmement faible, tout au moins aux fréquences inférieures à F_{bo} . Qu'ils soient réalisés en composants discrets ou intégrés en boîtier plastique avec toutes les protections possibles, la plupart de ces régulateurs fonctionnent en régime dit linéaire, par opposition aux régulateurs à découpage, très utilisés en informatique, vidéo, ou domotique, grâce à leur excellent rendement. La recherche de bruits de fond extrêmement faibles et de rayonnement parasites limités rend l'utilisation des alimentations à découpage très rare dans l'industrie audio, seuls quelques grands constructeurs spécialisés s'y étant essayé, sans montrer de progrès décisif jusqu'à présent.

L'analyse de la tension de sortie d'un régulateur montre un fonctionnement apparemment idéal, avec une stabilité inébranlable de la tension de sortie, un ronflement très faible, une grande insensibilité aux perturbations amont, celles qui apparaissent aux bornes du condensateur de tête, et pour couronner le tout, une impédance de sortie extrêmement faible, qui rend la tension de sortie quasiment indépendante du courant fourni à la charge, tant que ce dernier est continu. Tout cela serait merveilleux si ces caractéristiques étaient invariables avec la fréquence, et si le courant modulé débité était aussi pur que la tension de sortie.

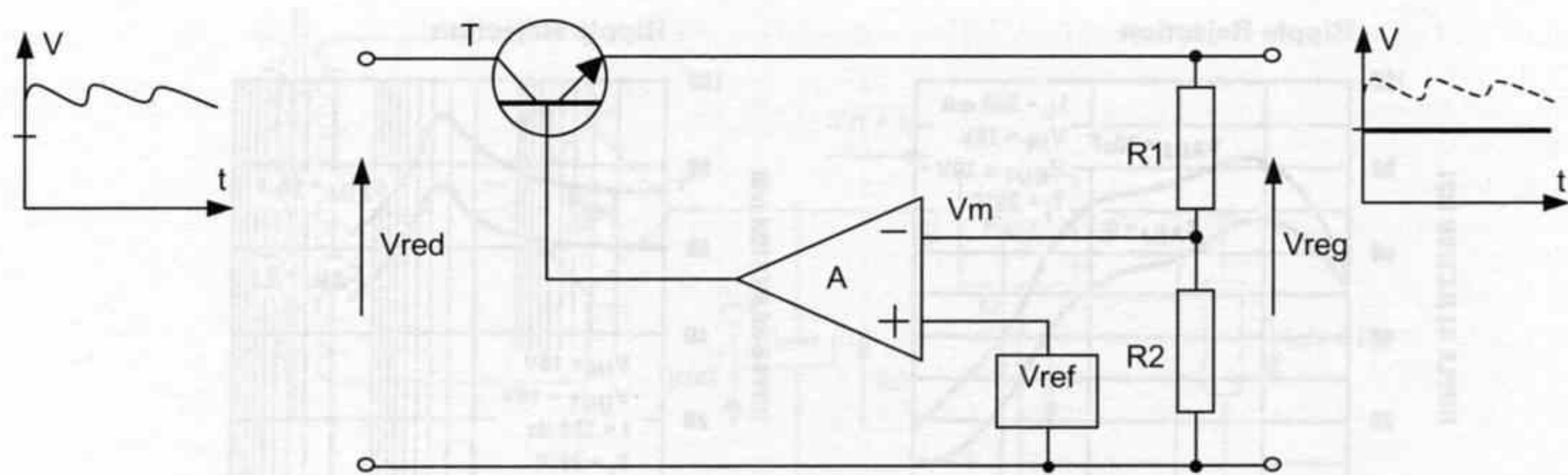


Figure 232 - Le régulateur de tension classique est construit autour d'un amplificateur différentiel à très grand gain A, chargé d'amplifier la différence entre la tension de référence Vref et une fraction de la tension de sortie Vreg. Cette fraction est définie par un pont diviseur, parfois disposé à l'extérieur du régulateur, le ren-

dant ainsi réglable par l'utilisateur. L'amplificateur compare Vref avec $V_m = V_{reg} \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ et sa sortie fournit le courant de base nécessaire à T, transistor de puissance de gain H_{21} pour fournir un courant tel que Vm reste égale à Vref.

Mais un régulateur n'est pas un réservoir, un accumulateur. Il doit puiser son courant de sortie dans un condensateur situé en amont, et qui est en général celui de tête de filtre, celui-là qui précisément est parcouru par les courants pulsés issus des redresseurs, et par lequel il est malvenu de faire circuler des courants modulés audio. Une approche simpliste est de considérer que le régulateur va "nettoyer" ce courant tiré d'un condensateur "bruyant", qu'il va détourner à la masse les composantes harmoniques et les parasites superposés à ce courant, et ne laisser passer que la modulation audio vers le circuit alimenté.

Un examen des fiches de caractéristiques, figure 231 issue de documents National Semiconductor, amène à constater qu'un régulateur, même très bon, n'est pas un filtre.

Il n'en est rien, parce que la réjection par le régulateur des courants parasites, en particulier les courants pulsés, est mauvaise, aussi bien aux très basses fréquences, inférieures à 100 Hz, qu'aux fréquences supérieures à quelques kHz.

L'examen des courbes de droite montre que c'est pour un courant de sortie de 0,4 à 0,5 A que l'immunité aux bruits d'entrée, la réjection de l'ondulation résiduelle de filtrage, est la plus élevée pour ce modèle, un classique LM117. Sans condensateur supplémentaire, cette réjection atteint -75 dB environ, ce qui est très honorable. Aux faibles courants il faut s'attendre à une dégradation de l'ordre de 15 dB au moins de cette réjection.

Le schéma figure 230 résume de manière simplifiée la situation. L'intermodulation inévitable dans le condensateur de tête de filtre C1, surtout sensible aux fréquences où son impédance remonte, produit sur le courant destiné à la charge Ich la superposition de courants parasites Ip. Une partie I'p de ces parasites est évacuée par le régulateur dans sa connexion de masse, mais une autre partie, riche en fréquences élevées, se referme par le circuit alimenté, générant aux bornes de la résistance de charge Rch une tension de bruit En égale à :

Les courbes de gauche montrent comment cette réjection évolue avec la fréquence, et si la valeur à 100 Hz est assez bonne avec environ 68 dB, par contre en bas et en haut de la bande audio, c'est 15 à 20 dB de moins que l'on peut espérer, soit 50 dB environ. Cependant, cette courbe est établie dans les conditions les plus favorables, c'est-à-dire pour un courant dans la charge $I_L = 0,5$ A.

$$E_n = I'p \cdot R_{ch}$$

Aux faibles courants et à très basse fréquence, c'est à peine 40 dB de réjection qui sont obtenus, et de même au-dessus de 10 kHz environ 35 dB seulement.

Ce bruit est corrélé au signal, car constitué de produits d'intermodulation entre le signal et les courants pulsés.

Sur des pointes de courant de 1 A, l'atténuation de ronflement atteint péniblement 30 dB dans le grave et 25 dB dans l'aigu. Ces valeurs sont nettement moins flatteuses.

Ce type de régulateur est étudié pour fournir une tension constante et un **courant continu**, alors que l'alimentation d'un circuit audio demande la fourniture d'un **courant modulé**.

Le constructeur recommande l'usage de condensateurs supplémentaires sur les bornes de sortie et de réglage, et des valeurs supérieures à 100 µF améliorent effecti-

Figure 233 - On peut considérer qu'en dessous de 100 Hz, c'est l'impédance des connexions et la configuration des lignes d'alimentation qui définissent l'impédance, celle de sortie du régulateur étant négligeable. Par contre lorsque la fréquence des signaux perturbateurs augmente, et avec elle la fréquence du courant débité par le transistor de sortie, le gain de l'amplificateur A diminue, et avec lui le taux de contre-réaction β qu'il subit. L'impédance statique se trouve divisée par une valeur de plus en plus petite, ce qui explique que l'impédance dynamique monte avec la fréquence, jusqu'à une valeur de plusieurs ohms au-dessus de 100 kHz. À ces fréquences il est possible que le gain H_{21} du transistor T commence à diminuer lui aussi, et que des inductances parasites au niveau des connexions se manifestent, l'impédance de sortie Z_d continuant alors à augmenter indéfiniment. Une impédance montant avec la fréquence correspond à un comportement inductif, dans lequel les variations du courant sont en retard par rapport aux variations de la tension. C'est exactement le comportement inverse d'un condensateur, qui est capable de fournir du courant avant que la tension à ses bornes ne commence à varier.

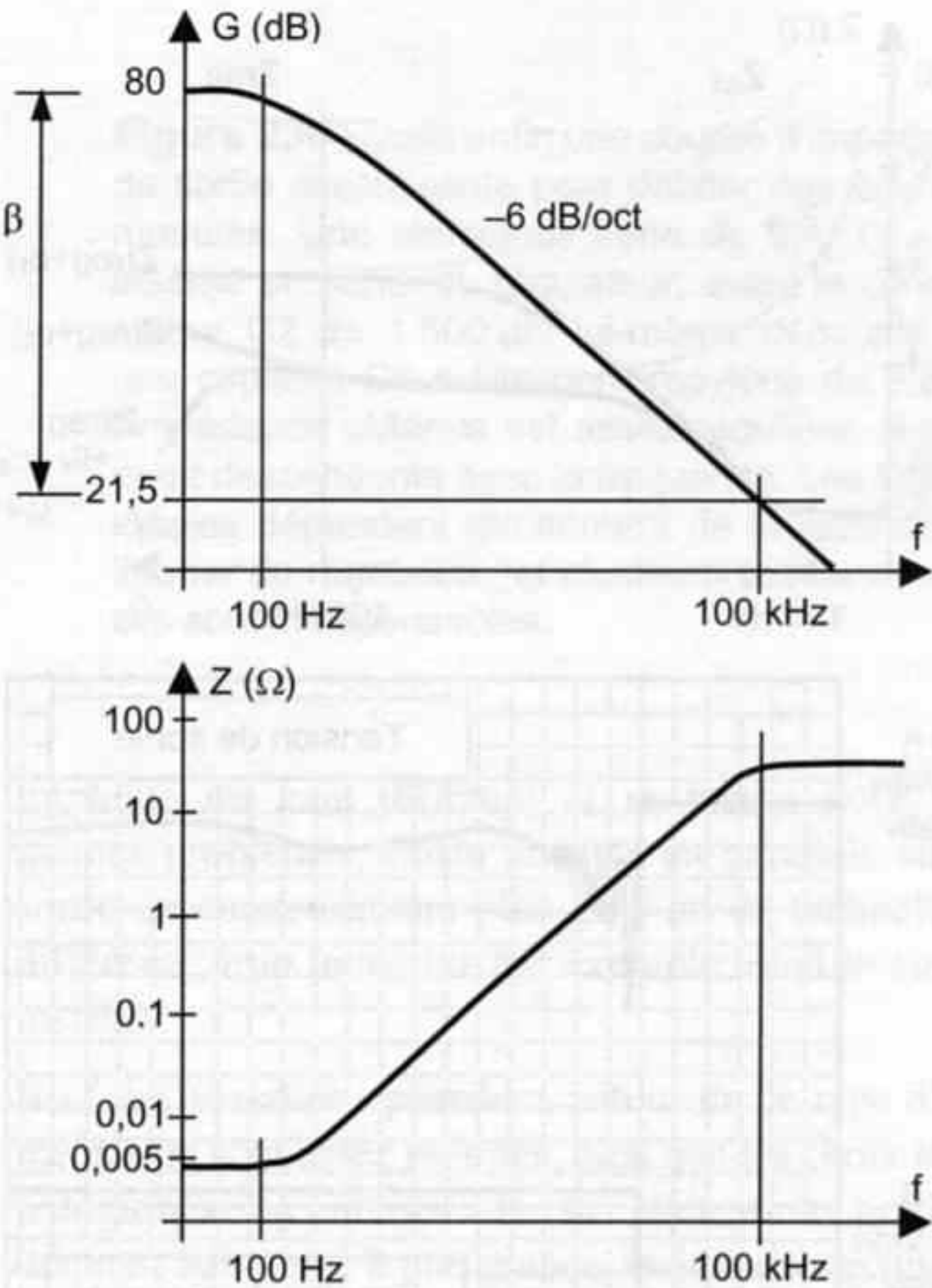
vement le comportement, surtout entre 100 Hz et 10 kHz. Ce sont des valeurs de plus de 1 000 μ F qui permettent un fonctionnement optimal, mais alors on peut se demander à quoi sert le régulateur dans ce cas, l'alimentation ressemblant alors à un circuit passif. Avec une telle valeur de capacité en sortie, le régulateur présente une bande passante de quelques dizaines de Hz, et ne sert donc qu'à stabiliser la tension, il ne fournit pratiquement pas de courant modulé à la charge mais seulement un courant continu, légèrement et lentement variable destiné à recharger le condensateur de sortie.

Tous les régulateurs de tension, qu'ils soient intégrés ou en composants discrets, présentent ce type de fonctionnement, qui n'est pas satisfaisant d'un point de vue musical. La comparaison avec des alimentations non régulées tourne systématiquement en faveur de ces dernières, les versions multiples et surdimensionnées étant subjectivement d'une supériorité écrasante.

La contre-réaction, utilisée ici avec des taux démesurés, parfois supérieurs à 120 dB, appliqués à des circuits dont le gain en boucle ouverte est lui-même gigantesque, produit à nouveau des comportements fréquentiels inadaptés, rendant le circuit bouclé inapte à délivrer des courants modulés audio.

L'impédance de sortie d'un tel circuit, figure 232, semble très intéressante. Elle s'exprime par :

$$Z_d = R_d(A) / [H_{21} \cdot (1 + K \cdot A)]$$



Avec A l'amplification en boucle ouverte du circuit, les circuits intégrés actuels permettent des valeurs de A de 10^4 à 10^6 et parfois plus.

Le rapport $K = R_2 / (R_1 + R_2)$ fraction de la tension de sortie qui est comparée, est compris entre 1 et 1/20 dans la plupart des cas.

H_{21} le gain en courant direct du transistor de sortie T, de l'ordre de 20 à 50 (100 à 1 000 en montage Darlington),

$R_d(A)$ la résistance de sortie de l'amplificateur A, de l'ordre de 1 k Ω .

Avec une tension de référence V_{ref} souvent proche de 1,25 V pour des raisons de fabrication, une tension de sortie de 15 V entraîne $K = 1 / 12$. Le gain en boucle fermée de l'ampli A est donc dans cet exemple :

$$G_{bf} = 20 \cdot \log(12) = 21,5 \text{ dB}$$

Son gain en boucle ouverte étant de 80 dB au moins, c'est donc un taux de contre-réaction supérieur à $\beta = 58,5$ dB qui lui est appliqué, soit un rapport de 841. L'impédance de sortie du régulateur s'établit alors à :

$$Z_d = 1\,000 / [20 \times (1 + 10^4 / 12)] = 0,06 \, \Omega !$$

Avec des transistors de sortie Darlington, de gain 300 il est même possible de faire nettement mieux avec dans ce cas : $Z_d = 4 \text{ m}\Omega$!

C'est miraculeux, mais seulement théorique car les grandeurs intervenant dans ce calcul ne sont pas constantes, en particulier la résistance de sortie $R_d(A)$

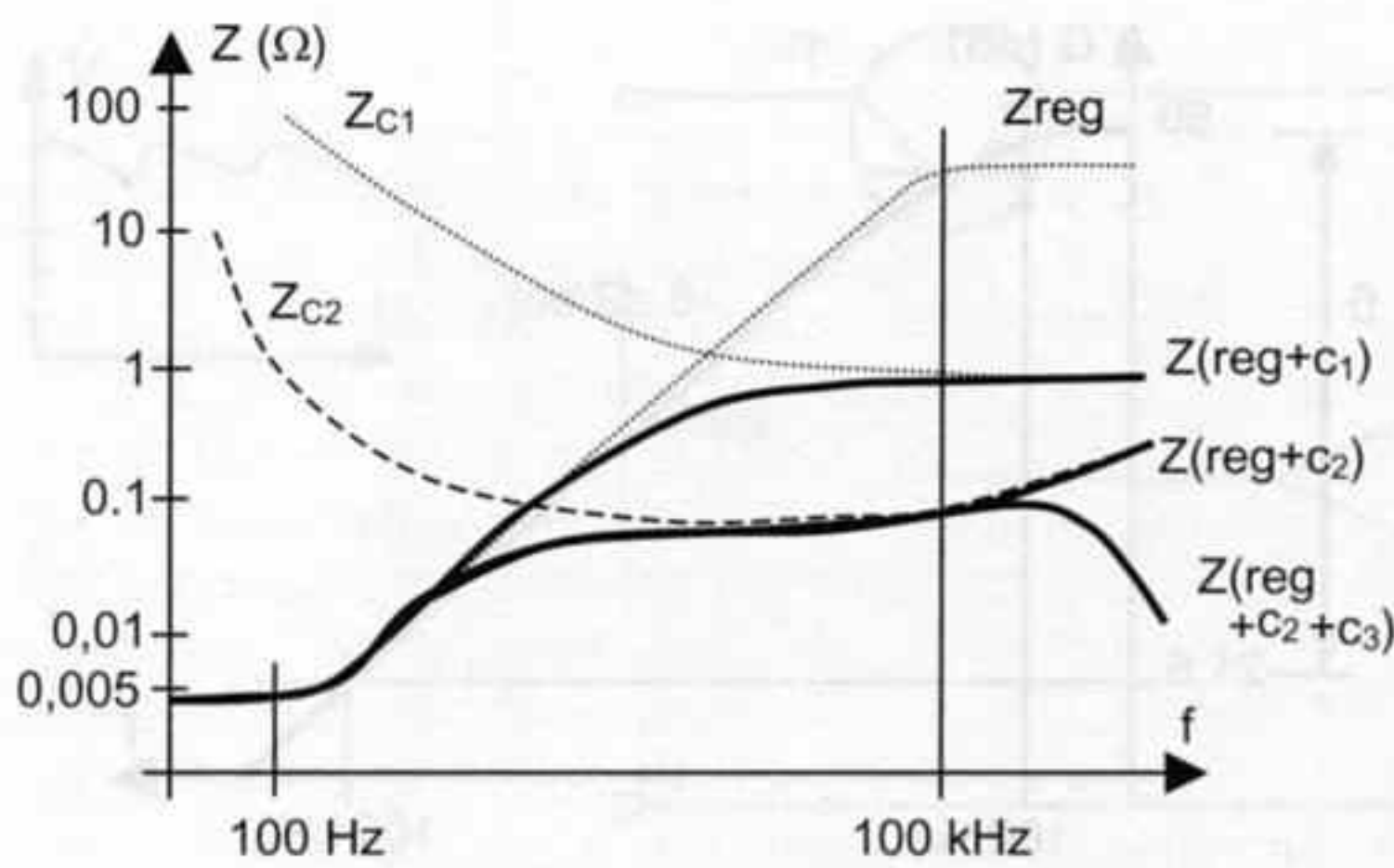


Figure 234 - Un condensateur C1 de 10 μF miniature en parallèle sur la sortie améliore un peu l'impédance au-dessus de 20 kHz environ, il ne sert à rien dans la bande audio. Un modèle C2 beaucoup plus gros de 1 500 μF commence à prendre le relais du régulateur à partir de 1 kHz mais le régulateur reste inductif en dessous de cette fréquence. La mise en parallèle d'un condensateur C3 à film plastique de 0,22 μF se fait sentir aux hautes fréquences mais n'est d'aucune utilité dans la bande audio. La stabilité du régulateur peut l'imposer.

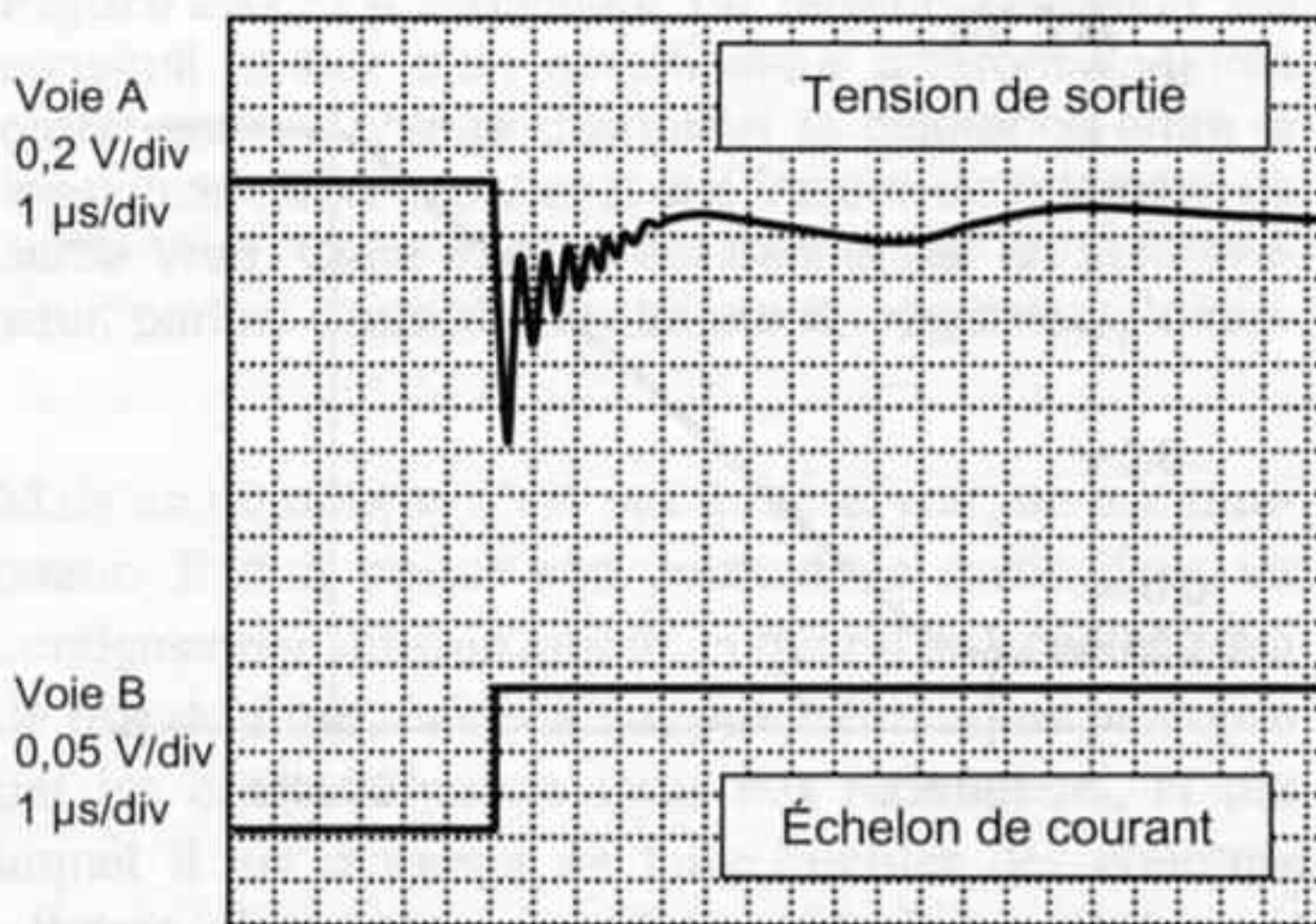


Figure 235 - L'oscillogramme ci-contre montre voie A la réponse à un échelon de courant de 1A en sortie d'un régulateur standard, avec deux condensateurs en parallèle sur la sortie. La voie B montre la tension aux bornes d'une résistance de 0,2 Ω en série avec la charge.

La tension de sortie, de +15 V au repos, avec un faible débit de courant de 20 mA, présente un pic négatif brutal, de 1,5 V environ, le retour à la normale étant entaché de deux oscillations, l'une à un peu plus de 1 MHz assez vite amortie en 4 à 5 μs , et l'autre vers 42 kHz, beaucoup moins vite amortie, en 50 μs approximativement. Les fils de liaison et les condensateurs de découplage décalent ces résonances.

de l'amplificateur, qui augmente sérieusement dès qu'il s'agit de débiter un courant transitoire dans la base de T, ainsi que la tension de référence V_{ref} qui est très facilement perturbée par les courants de polarisation de l'entrée du circuit A. Mais la plus importante limitation des performances du circuit vient de son comportement fréquentiel, qui apparaît dans la figure 233.

On comprend mieux ainsi la nécessité d'installer un condensateur en sortie du régulateur, mais son effet n'est pas aussi radical qu'il y paraît, et l'impédance de l'ensemble régulateur plus condensateur présente une variation étrange, figure 234 et 235.

Les réponses du régulateur à des variations brutales du courant débité se traduisent par des pics de tension négatifs superposés à la tension continue de sortie, et suivis d'oscillations plus ou moins longues et amorties, dues à des résonances du circuit LC formé par l'inductance du régulateur et la ou les capacités de sortie. La valeur, mais aussi la technologie des condensateurs ajoutés en sortie conditionnent les résultats sonores, qui restent inférieurs dans les secteurs grave et bas-médium à ceux d'une alimentation non régulée. L'impression subjective est celle d'un son à la fois retenu, comme freiné, avec un espace manquant d'ouverture et de liberté, et en même temps un peu lourd. Les résultats dans le haut-médium et l'aigu peu-

vent être étonnamment bons avec les excellents condensateurs, mais très mauvais parfois en cas de résonance non maîtrisée, le son devenant alors clinquant, projeté, avec une accentuation désagréable des sifflantes.

Pour faire fonctionner de manière convenable ce type de régulateur, une très forte capacité de sortie est nécessaire, afin que la majeure partie du courant modulé soit issue de cette capacité, même aux très basses fréquences. Le régulateur ne sert plus qu'à maintenir une tension constante aux bornes du condensateur en lui fournissant un courant de charge presque constant, quasiment continu. Certains concepteurs ajoutent une résistance de faible valeur, de 0,47 à 4,7 Ω , en série avec la sortie du régulateur. Cette résistance a pour effet de rendre l'impédance de sortie du régulateur résistive, c'est-à-dire invariable avec la fréquence, et non plus inductive. On obtient alors un régulateur quasiment "passif", dont l'impédance est montrée figure 236.

On peut alors légitimement se demander pourquoi utiliser un régulateur en boucle fermée, dont le taux de contre-réaction élevé procure une bande passante très large de 100 kHz, pour ensuite réduire cette bande passante par un filtre RC en sortie, dont la fréquence de coupure dans le cas présent est de :

$$F_c = 1 / 2\pi R \cdot C = 225 \text{ Hz environ.}$$

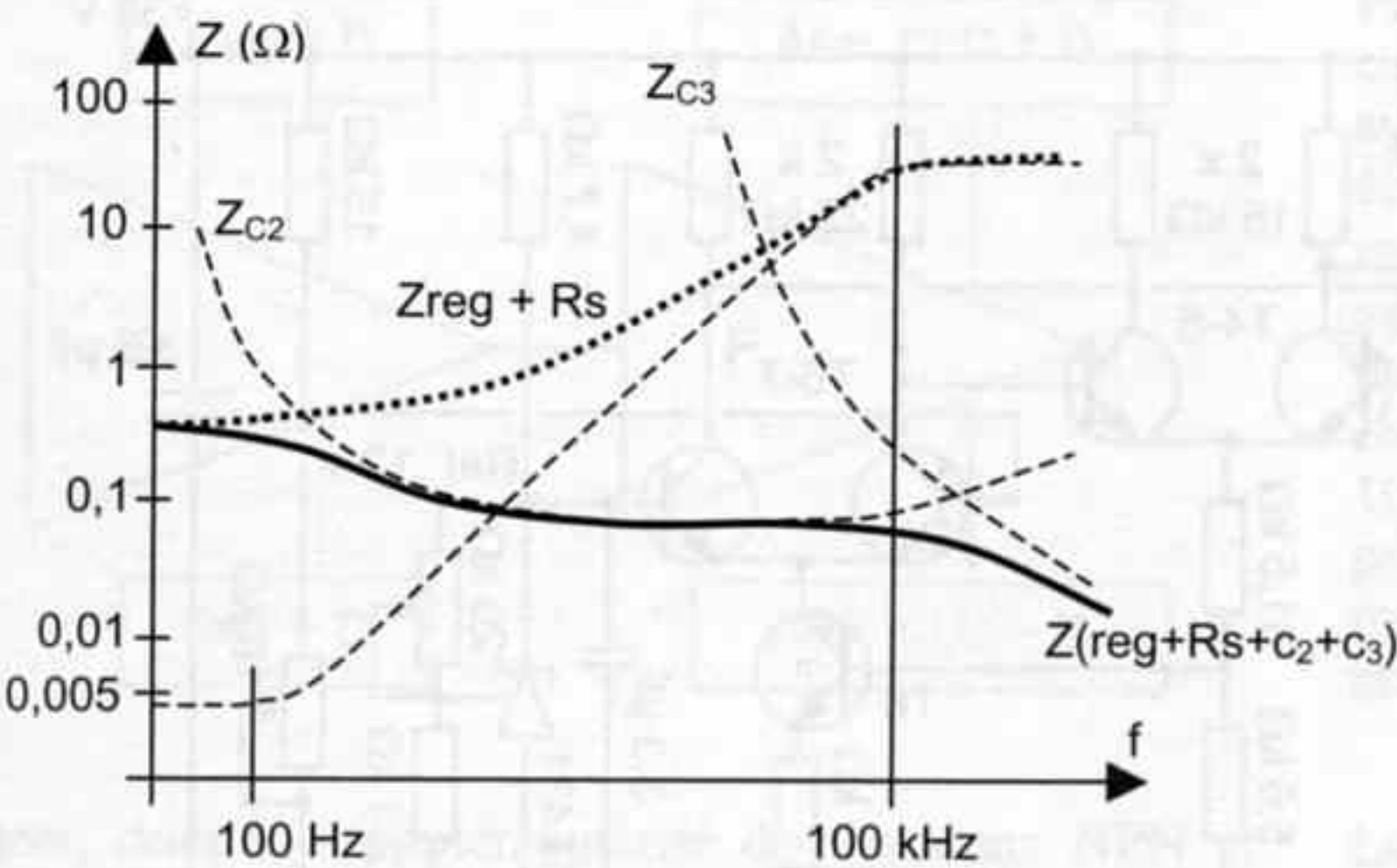


Figure 236 - Voilà enfin une courbe d'impédance de sortie satisfaisante pour débiter des courants modulés. Une résistance série de 0,47 Ω a été insérée en sortie du régulateur, avant le condensateur C2 de 1 500 μF, lui-même découplé par une capacité C3 à film polypropylène de 2,2 μF. l'impédance obtenue est assez régulière, légèrement descendante avec la fréquence. Les valeurs idéales dépendent étroitement de la technologie interne du régulateur, et plusieurs essais successifs sont indispensables.

De même, ce taux de contre-réaction élevé procure une impédance de sortie très faible, que l'on augmente ensuite avec une résistance série. Le gain élevé de l'ampli ne sert plus à rien, son gain en boucle fermée étant seulement nécessaire à la multiplication de la tension de référence.

C'est à partir de ces considérations que les audiophiles ont développé de nouvelles formes d'alimentations régulées, qui contournent les problèmes décrits ci-dessus. Kanéda, encore lui, essaya dès les années 70 de construire des régulateurs présentant un gain en boucle ouverte réduit, un taux de contre-réaction faible, et partant une impédance de sortie ne variant pas avec la fréquence. Il est nécessaire pour cela de reporter la fréquence de coupure Fbo au-delà de la bande audio, et la fréquence de la seconde coupure assez haut pour éviter une instabilité du circuit rebouclé, d'autant plus facile à obtenir que les condensateurs de découplage, installés aux bornes de la charge, ajoutent un déphasage supplémentaire.

Les principes de conception rejoignent ceux énoncés en début de chapitre, concernant les circuits amplificateurs.

L'alimentation régulée ainsi obtenue est réalisée obligatoirement en composants discrets, aucun amplificateur opérationnel intégré ne présentant les caractéristiques voulues.

De nombreux constructeurs s'en sont inspirés avec plus ou moins de réussite, et les diverses tentatives d'amélioration sont restées sans suite. En effet, le choix d'un gain plus faible en boucle fermée conduit à l'instabilité, et le choix d'un gain plus fort réduit la bande passante en deçà de la bande audio. Un gain en boucle ouverte plus élevé rend le taux de contre-réaction, et donc l'impédance de sortie, variable avec la fréquence, tandis qu'un gain plus faible n'apporte aucun avantage, l'impédance de sortie étant plus élevée. Le choix d'une tension de référence différente

implique un gain différent et se heurte donc aux mêmes problèmes. Enfin la mise en parallèle sur la sortie de condensateurs plus gros ou de technologie différente, trop inductive par exemple, rend le circuit instable.

Bref, les variations possibles autour de ce type d'alimentation sont assez réduites, bien que les choix technologiques au niveau de la réalisation pratique donnent naissance à une grande variété de circuits en apparence différents. Un examen approfondi de leurs caractéristiques montre que tous respectent les principes décrits ici.

Après avoir expérimenté un grand nombre de variantes, j'ai retenu deux évolutions intéressantes. La première concerne la référence de tension, qui au lieu d'une simple diode Zener, devient un circuit intégré spécialisé, de référence TL 431 ou équivalent, véritable diode Zener réglable, avec l'avantage d'une impédance dynamique extrêmement basse jusqu'à des fréquences de plusieurs centaines de kHz. Le bruit de tension à ses bornes n'est donc plus lié aux variations du courant qui la traverse. Elle nécessite un potentiomètre multitours pour son ajustage et procure un bruit de fond global du régulateur plus faible qu'avec une Zener traditionnelle, ce qui la rend très appréciée pour l'alimentation des étages préamplificateurs.

La seconde évolution concerne le préfiltrage de la tension non régulée. Sous prétexte qu'il y a un régulateur, la plupart des concepteurs se contentent d'un simple lissage par un condensateur de valeur moyenne en sortie des redresseurs, avec les problèmes d'impédance commune que cela induit. Un filtrage en π à ce niveau est préférable pour les raisons déjà signalées plus haut. Le filtrage en π permet la séparation des alimentations gauche et droite, apportant une très nette amélioration de la sensation d'espace, principalement de sa profondeur et de sa transparence.

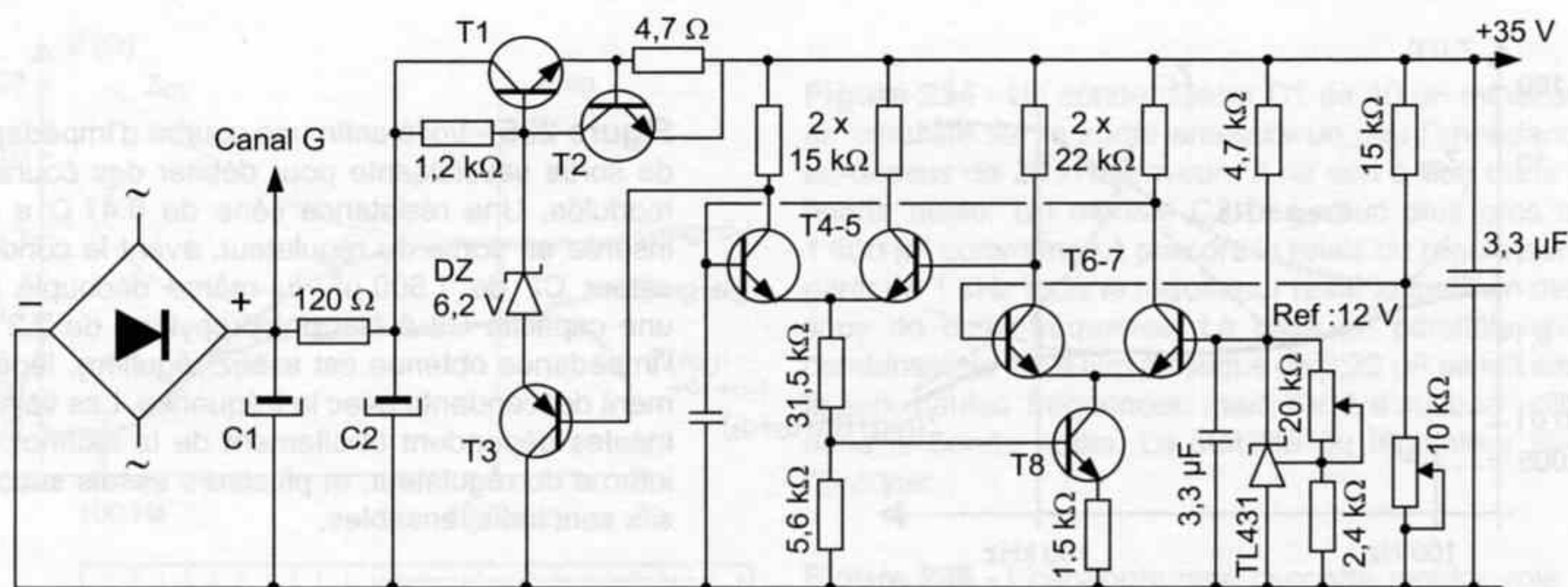


Figure 237 - Alimentation régulée rapide.

Le schéma d'une alimentation 35 à 50 V/120 mA de ce type apparaît figure 237, les valeurs des composants ne sont pas toutes données, car dépendant fortement des transistors choisis :

Le redressement par diodes rapides BYW 98 est suivi d'un filtrage en π par deux capacités de quelques milliers de μF séparées par un peu plus de 100 Ω . L'étage différentiel est ici double avec T4 à T7, mais des transistors à gain plus élevé et large bande permettent de n'utiliser qu'un seul étage. Une protection par limitation de courant est visible autour de T2. Le transistor ballast est de petite puissance 5 à 10 W en boîtier plastique monté sur petit radiateur, et T3 de 1,5 W.

L'alimentation négative est identique, les transistors étant tous de polarité opposée.

Cette alimentation a été décrite dans la revue "L'audio-ophile". Les transistors utilisés à l'époque ne sont plus disponibles mais rien n'empêche de construire ce circuit avec des références différentes, l'essentiel étant de conserver un gain en boucle ouverte de l'ordre de 50 dB maximum, avec une coupure naturelle F_{bo} au-delà de 10 kHz. Le gain en boucle fermée doit rester supérieur à 3 afin de garantir la stabilité même sur charge capacitive. La valeur de C en sortie ne doit pas être augmentée, ce type de régulateur présentant une impédance constante jusqu'à plusieurs kHz, ici environ 30. Si C est augmenté, 47 μF par exemple, le régulateur ne sert plus qu'en dessous d'une fréquence tombant dans la bande audio, ici environ 3 kHz.

Pour aller au bout de cette voie, deux alimentations symétriques sont requises, V_+ et V_- canal droit, et V_+/V_- canal gauche, figure 238. Alimenté de cette manière, un étage préamplificateur ou un étage de gain en tension d'un ampli de puissance révèle une transparence telle que le moindre changement dans les conditions de prise de son devient évident. L'espace est

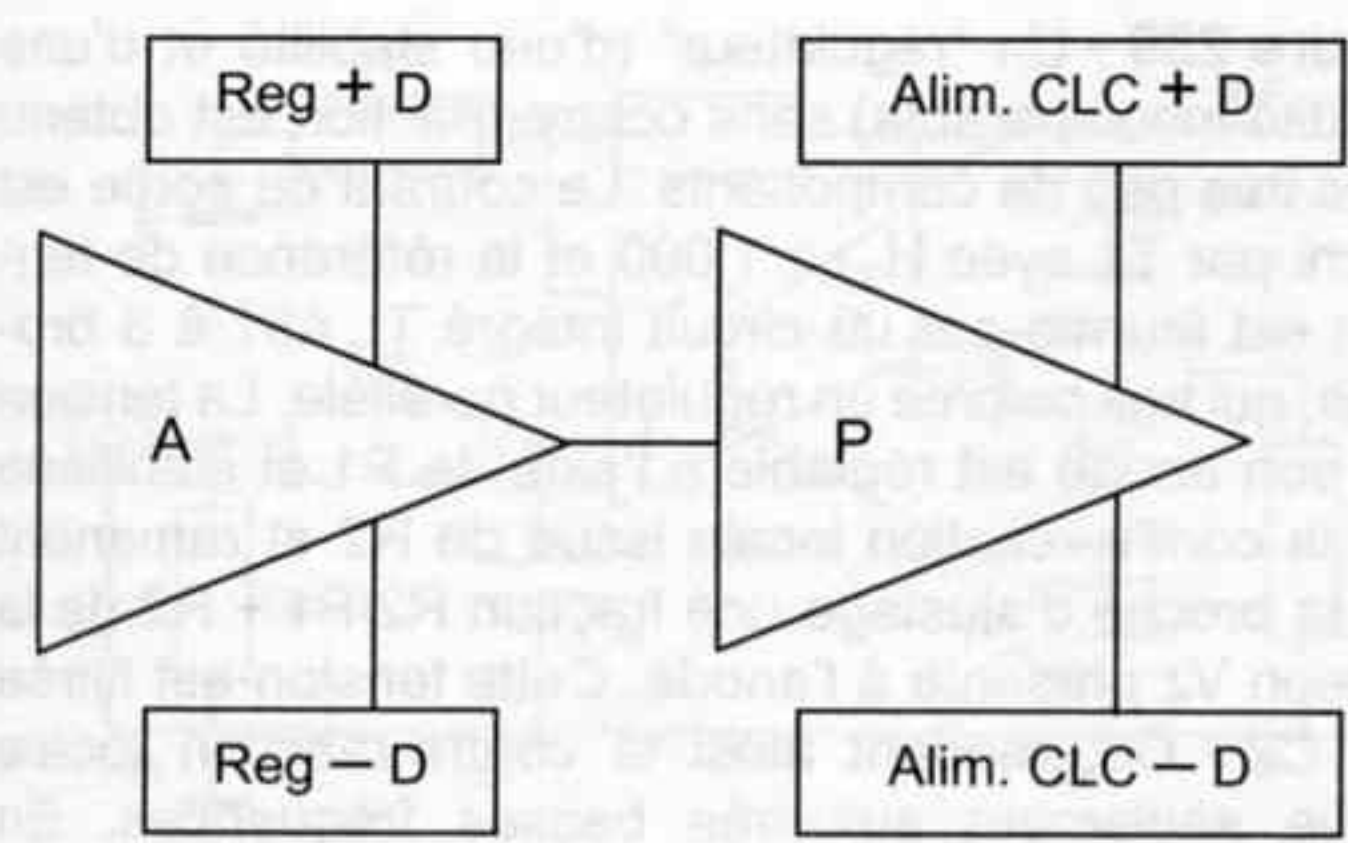
perçu de manière directe, ouverte, avec beaucoup d'aération et une focalisation très précise des sources virtuelles.

En dehors des alimentations passives à condensateurs et selfs, et des alimentations régulées rapides à faible contre-réaction, une troisième voie existe. En effet, à partir de l'idée que la contre-réaction n'est utile au régulateur que pour maintenir un gain en boucle fermée constant, on peut faire quelques constatations :

- La tension de sortie est stable si le gain lui-même est constant, mais surtout si la tension de référence est stable et non perturbée par des courants pulsés ou modulés, ou des écarts de température.
- La réduction de l'impédance de sortie du circuit tient autant au très grand gain en tension de l'amplificateur qu'au très grand gain en courant du transistor de sortie.

Cela entraîne que finalement, si la référence de tension est rendue très stable, et si le transistor de sortie est un Darlington de gain 1 000 ou plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser une contre-réaction.

On obtient alors un stabilisateur de tension, qui n'est plus un véritable régulateur, n'étant pas rebouclé. Cela présente l'énorme avantage d'une réponse transitoire sans aucune suroscillation, associée à un temps de réponse ultra-rapide, mais sans aucun risque d'instabilité. La référence de tension est le TL 431 déjà présenté plus haut, qui gagne à être découplé par d'excellents condensateurs afin de stabiliser et de filtrer complètement sa tension de sortie. Le transistor de sortie est un Darlington en boîtier plastique présentant un gain élevé et surtout constant sur une large plage de courant. De nombreux essais ont révélé une supériorité des modèles TIP142/147 sur l'ensemble des critères subjectifs, par rapport à un large éventail de transis-



tors, dont la complémentarité des versions NPN et PNP n'est pratiquement jamais correcte. Le schéma d'une alimentation de ce type apparaît figure 239.

Le dimensionnement d'un tel circuit est fort simple : Pour une tension de sortie de 25 V par exemple, la tension sur la base de T1 est de 26,2 V environ et le TL 431 doit présenter un gain de :

$V_z / V_{ref} = 26,2 / 2,48 = 10,56$ (valeur théorique).

Le pont diviseur P1/R2 peut consommer sans problème 1 mA, ce qui amène :

$R2 = V_{ref} / 0,001 = 2,4 \text{ k}\Omega$ environ.

Le gain étant $V_z / V_{ref} = 1 / (R2 / P1 + R2)$

Cela amène P1 = 23 k Ω environ. Un potentiomètre multitours de 50 k Ω avec faible dérive en température convient, un réglage plus souple et plus stable avec la température est obtenu avec mise en série de deux résistances de 10 à 15 k Ω séparées par un potentiomètre de 10 k Ω .

Utilisé sans condensateur de sortie, ce circuit présente une impédance de sortie purement résistive, de l'ordre de 0,2 Ω et qui dépend surtout de la résistance d'entrée h_{11} du transistor T1 :

$Z_s = (h_{11} + Z_x) / H_{21}$

Le terme Z_x représentant l'impédance de sortie du circuit TL 431, laquelle vaut en continu environ :

$Z_x = Z_0 \cdot V_z / V_{ref} = 0,4 \times 10,56 = 4,224 \text{ }\Omega$
dans notre exemple.

Avec $h_{11} = H_{21} / 35 \cdot I_s$, on voit qu'il est préférable de faire travailler le transistor T1 avec un courant de repos non nul, une valeur de 0,1 A entraînant une faible dissipation, et donnant une valeur maximale de h_{11} :

$h_{11} = 1\,000 / 3,5 = 285 \text{ }\Omega$ devant laquelle l'impédance de sortie du TL 431 est négligeable.

L'impédance de sortie de T1 est donc proche de :

$Z_s = 1 / 35 \cdot I_s = 0,28 \text{ }\Omega$

Elle présente l'immense et rare avantage de diminuer quand le courant augmente.

Figure 238 - Un amplificateur à transistor en pure classe A mérite des alimentations séparées, régulées symétriques suivant les principes ci-dessus pour les étages de gain en tension, peu gourmands en courant mais sensibles, et passives avec filtrage en π , C-L-C symétriques également pour l'étage de puissance, qui demande de très fortes capacités de sortie, obtenues par mise en parallèle de plusieurs condensateurs de 10 000 à 22 000 μ F. Le condensateur de tête de filtre peut être commun aux deux canaux. Huit circuits d'alimentation sont nécessaires (et suffisant...) pour un amplificateur stéréo.

La résistance R1 est calculée à partir de la tension d'entrée non stabilisée, et qui est supérieure de 3 à 5 V à la tension de sortie, en imposant un courant minimal supérieur à 2 mA environ dans le TL 431, soit un courant total de l'ordre de 3 à 4 mA traversant R1.

Avec une tension redressée et filtrée de 30 V dans l'exemple considéré, cela amène :

$R1 = (30 - 25) / 4 \cdot 10^{-3} = 1,25 \text{ k}\Omega$

En ce qui concerne les condensateurs C2 et C3, les meilleurs résultats subjectifs ont été obtenus avec C2 électrolytique à faible impédance, du type Philips C135 ou C136 pour alimentation à découpage, de valeur 2 200 μ F/35 V découplé par C3 à film polypropylène métallisé de 0,1 ou 0,22 μ F.

Cela produit avec R1 une constante de temps de $\tau = 2,75 \text{ s}$ qui entraîne une montée très progressive de la tension de sortie.

On peut utiliser ce stabilisateur sans aucun condensateur de sortie autre que les découplages locaux de très faible valeur sur les circuits alimentés. Dans ce cas il est impératif que le condensateur C1 sur lequel le courant est tiré soit d'excellente qualité, et surtout non partagé avec un autre circuit d'alimentation, même régulé. Des capacités de 10 000 à 22 000 μ F de type CO56 donnent de très bons résultats.

Cependant les meilleurs résultats en terme d'aération et de naturel sont obtenus avec un condensateur de sortie C4 d'assez forte valeur, au minimum de l'ordre de 10 000 μ F, travaillant alors à charge constante, et maintenu chargé à travers l'impédance de sortie de 0,3 Ω . Ce condensateur, dont l'impédance est nettement inférieure à celle du stabilisateur, fournit pratiquement la totalité du courant modulé audio, le transistor T1 fournissant une valeur moyenne très peu variable, assurant la tension constante aux bornes de C4. T1 consomme donc sur les circuits amont un courant non modulé. Cela évite que ces courants modulés ne partage une impédance quelconque avec d'autres courants modulés ou pulsés. L'isolement de la sortie

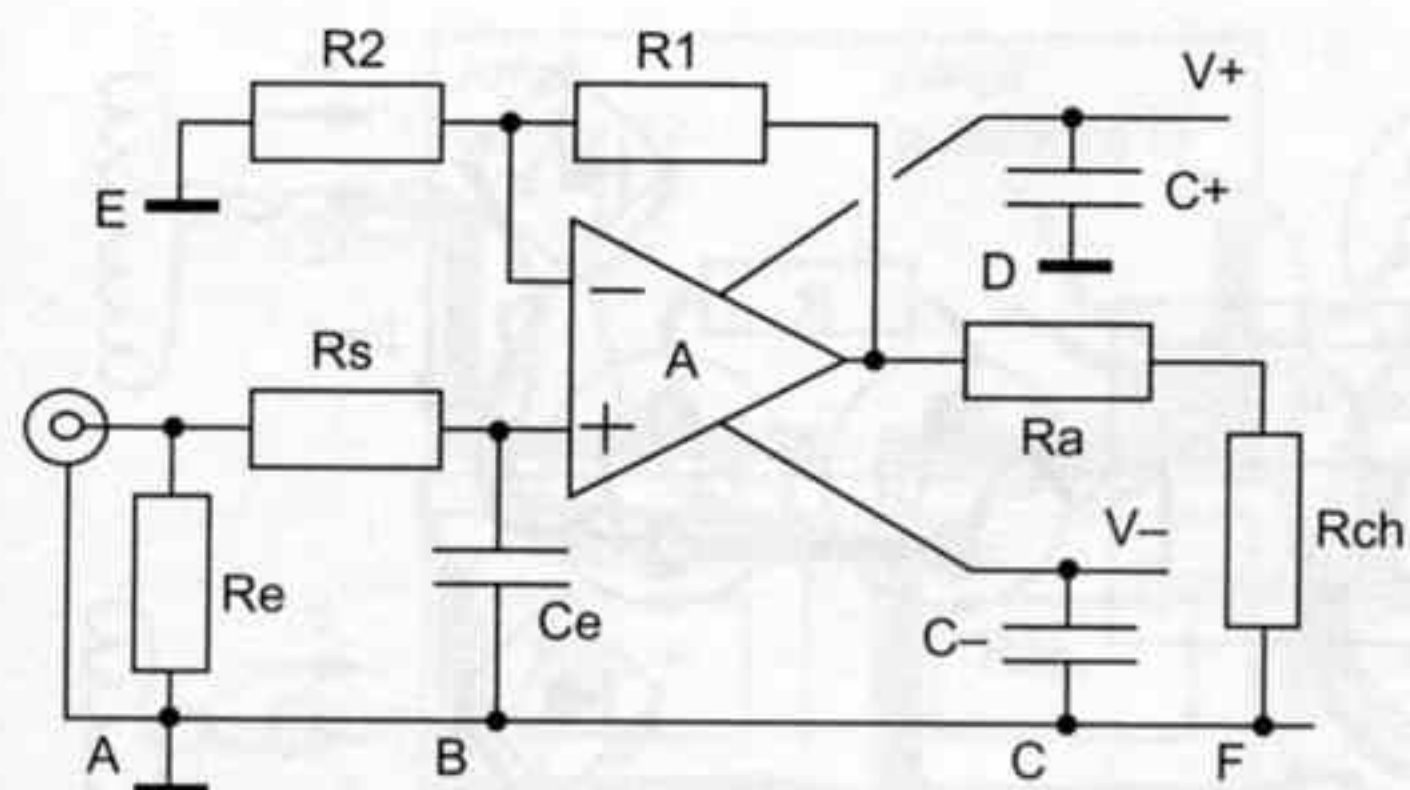


Figure 240 - L'étage amplificateur de tension ci-contre, de gain $1 + R1/R2$, montre que 6 connexions de masse sont nécessaires. A et B pour le signal d'entrée, C et D pour le découplage des alimentations, E pour le réseau de contre-réaction, et F pour la charge. Relier toutes ces masses entre elles en étoile garanti l'instabilité du circuit, le réseau de contre-réaction recevant alors un signal provenant du courant de sortie passant par le point de masse. Les relier à un plan de masse continu est correct en HF mais pas idéal en petits signaux basses fréquences.

Les connexions de masse d'un appareil audio doivent effectivement être reliées en étoile, mais par des liaisons chargées d'assurer l'équipotentialité de ces masses, et non de véhiculer les courants de retour, qui partageraient alors une impédance commune relativement importante.

Un plan de masse doit être utilisé, ou à défaut des pistes de masse très larges, de 10 à 15 mm. Mais ce plan ne doit pas être continu, car il ferait se croiser des courants modulés qui interféreraient entre eux. Le cheminement de chacun de ces courants doit être identifié, et des fentes aménagées dans le plan de masse, afin de diriger ce courant vers sa destination sans qu'il n'en rencontre un autre.

Le dessin d'un circuit imprimé doit commencer par les pistes de masse, et l'implantation des composants en découle de manière imposée.

Un exemple simple d'un étage amplificateur de tension, étage ligne d'un préamplificateur, conçu autour d'un circuit intégré, illustre figure 240 ces règles simples.

L'étude des cheminements des courants montre que le courant d'entrée, passant en continu dans R_e et en haute fréquence dans R_s et C_e , doit retourner dans l'appareil source en passant par A et B sans qu'aucun autre composant ne soit relié à ces points. Le courant de sortie, débité sur la résistance R_{ch} doit se refermer en alternatif par les condensateurs de découplage d'alimentation C_+ et C_- , en passant par les points C et D, si possible confondus ou très proches. Ces points sont reliés à A et B par une connexion ne véhiculant aucun courant. Le courant de sortie modulé, intense, ne risque donc pas de moduler la tension en A ou B, évitant ainsi de créer un signal d'entrée parasite qui entraînerait une oscillation du circuit, devenu instable par ce bouclage.

Le réseau de contre-réaction pose un problème particulier, étant un lien entre sortie et entrée. Doit-il être relié à la masse de l'entrée ou à celle de sortie ? Le courant qui le traverse est issu de l'étage de sortie et doit donc se refermer par les condensateurs de découplage. Le réseau $R1/R2$ est donc relié à la masse en E par une liaison séparée aboutissant en C et D.

Si la charge est extérieure, ce qui est le cas avec un amplificateur de puissance relié à une enceinte acoustique, la liaison de masse entre la borne de sortie F et les découplages d'alimentation doit être séparée et rejoindre directement les points C et D.

La borne de masse de la prise d'entrée n'a aucune raison d'être reliée aux points C et D, le courant qui y circule retourne à l'appareil source directement du point A, la liaison B-C assure l'équipotentialité des masses d'entrée, référence de potentiel du signal d'entrée, et de sortie, référence de potentiel des alimentations symétriques.

Les lignes d'alimentation repérées V_+ et V_- transportent des courants continus, approximativement égaux, ainsi que des composantes à très basses fréquence ne pouvant se refermer par les condensateurs de découplage. Deux liaisons de masse séparées doivent par conséquent relier les deux régulateurs au point commun C/D directement.

Ces régulateurs avec leurs condensateurs de filtrage sont reliés d'autre part au point milieu du transformateur d'alimentation, ou mieux à deux enroulements secondaires distincts de ce transformateur, les courants pulsés issus des redresseurs et traversant les condensateurs de tête de filtre ne devant en aucun cas transiter par C/D ou pire encore par A/B.

La réalisation de circuits imprimés simple face respectant ces règles est très difficile, les masses étant souvent implantées en série, l'une derrière l'autre, avec une mauvaise position du point de retour E du réseau de contre-réaction. Les points de masse C et D des découplages d'alimentation sont parfois raccordés en étoile directement aux régulateurs de tension distants de quelques centimètres, les condensateurs C_+ et C_- devenant alors inefficaces. Quant au point de masse F, les prises d'entrées et de sorties des préamplificateurs du commerce étant montées côte à côte sur le panneau arrière, il est souvent confondu avec le point A, ce qui est la pire des erreurs.

La gestion des masses dans un préamplificateur est extrêmement délicate. Les réalisations à lampes dont il est question plus loin font usage d'une ligne de masse sous forme d'un gros fil de cuivre nu, auquel les

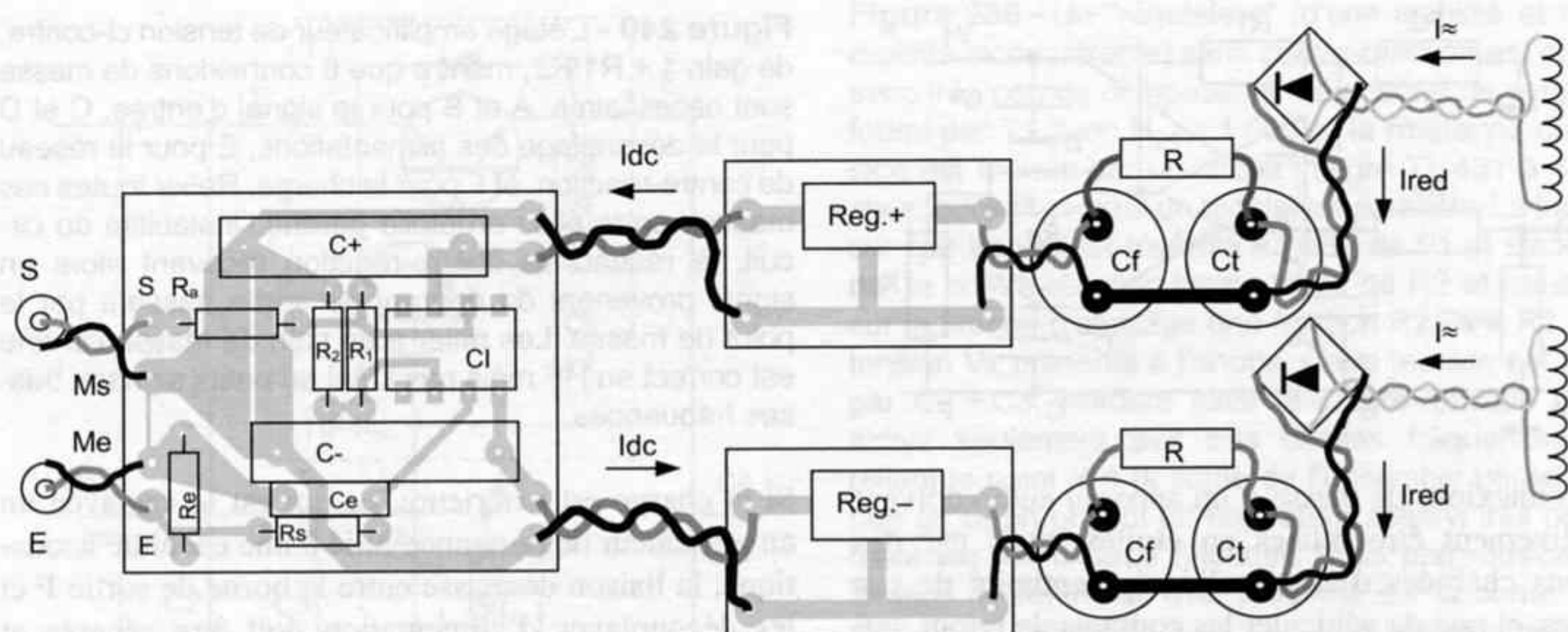


Figure 241 - Distribution des alimentations et des masses pour un étage de gain en tension, préampli ligne par ex.

composants de chaque étage sont raccordés au plus court. L'étage d'entrée est disposé à une extrémité de cette ligne, et l'alimentation avec ses courants pulsés à l'autre extrémité.

Le torsadage des câbles de masse avec les câbles signaux ou alimentation correspondant minimise l'inductance des lignes et évite ainsi des résonances ou des oscillations haute fréquence sur ces lignes. Un exemple d'implantation des masses est décrit figure 241.

Le circuit imprimé assure des liaisons courtes, les condensateurs de découplage d'alimentation étant implantés au plus près du circuit intégré afin d'assurer sa stabilité aux plus hautes fréquences. Le point de masse de la sortie Ms est relié à ces deux condensateurs par des pistes larges.

Le point de masse d'entrée est établi au pied de la résistance d'entrée Re, et le condensateur du filtre radiofréquence installé en entrée, Rs/Ce, revient directement en ce point, car il détourne une partie du courant d'entrée. Le réseau de contre-réaction R1/R2 retourne à la masse des condensateurs de découplage. La fente dans le plan de masse évite que les courants de retour de la sortie n'interfère avec ce réseau. Les plans de masse fendus sont décriés par certains, car il est vrai qu'une fente risque de détourner un courant HF, l'obligeant à contourner la fente, donc allongeant son parcours, c'est-à-dire l'inductance en série. Des instabilités peuvent en résulter, un essai avec ou sans fente permet de lever le doute, le résultat dépend du circuit intégré utilisé, et de l'intensité ainsi que de l'orientation des rayonnements HF locaux.

Les deux masses Ms et Me sont reliées par une connexion ne véhiculant aucun courant.

Les alimentations représentées ici sont flottantes, c'est-à-dire entièrement isolées l'une de l'autre depuis le secondaire du transformateur. Cette disposition

idéale assure qu'aucune boucle de masse n'existe, mais elle impose de doubler les redresseurs et les condensateurs de filtrage Ct et Cf. Une disposition à un seul secondaire avec point milieu est possible si l'on prend soin de faire cheminer les masses des deux alimentations très proches l'une de l'autre pour diminuer la surface de boucle. Cette boucle capte des courants basse fréquence induits par le rayonnement du transformateur et des redresseurs. Là aussi le torsadage des deux lignes d'alimentation permet de réduire efficacement cette boucle de masse.

Les courants alternatifs redressés sont confinés entre le secondaire et les redresseurs et ne circulent dans aucun point ou ligne de masse parcouru par les signaux d'entrée ou de sortie, ce point est fondamental. Les courants pulsés entre redresseurs et capacités de tête de filtre Ct sont confinés également et les impédances qu'ils traversent ne sont pas partagées.

Le condensateur de filtrage Cf n'est traversé que par le courant modulé audio, tiré par le régulateur, et par une composante continue passant par R (ou par une self, c'est encore mieux) assurant le maintien à tension constante.

Les régulateurs sont du type "rapide à faible contre-réaction" ou stabilisateur en boucle ouverte, tel que celui décrit figure 239, et peuvent être implantés sur le circuit imprimé de l'ampli et suivis de condensateurs de qualité audio, surdimensionnés et découplés par capacités polypropylène d'assez forte valeur, 10 μ F au moins.

Un préampli ou un ampli de tension construit selon ces orientations permet, avec un simple "ampli-op" d'accéder à des performances musicales insoupçonnées.

Dans un amplificateur de puissance, la gestion des masses doit prendre en compte séparément les masses relatives à l'ampli de tension, à ses alimentations régula-

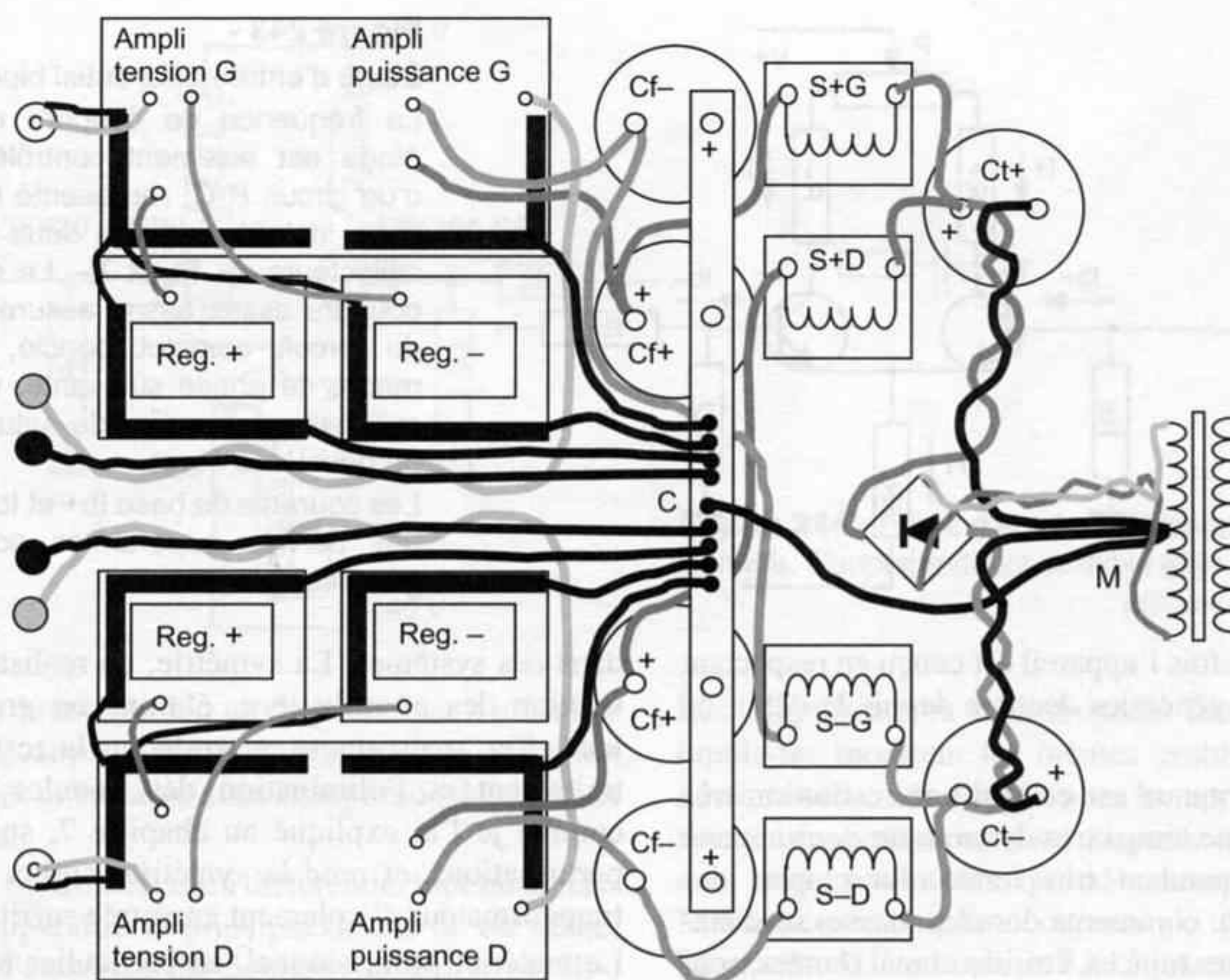


Figure 242 - Implantation rationnelle des cartes et composants, des lignes de masse et d'alimentation, dans un amplificateur de puissance. La construction

lées et aux signaux d'entrée d'une part, et les courants transitant par l'étage de sortie, issus d'une autre alimentation généralement non régulée, d'autre part. Les deux masses ainsi définies sont reliées par un conducteur assurant leur équipotentialité mais ne véhiculant aucun courant. Les bornes de masse des prises d'entrée sont reliées directement au circuit imprimé, lui-même relié aux points de masse des alimentations régulées, au pied du condensateur de sortie. L'autre extrémité de la piste de masse des régulateurs, côté condensateur de filtrage, est reliée au point central de masse.

Un exemple de câblage de masse d'un ampli de puissance est donné figure 242.

Les prises d'entrée sont isolées du châssis, et leur borne de masse est reliée au plus court à la piste de masse de l'amplificateur de tension. Le coaxial n'a pas sa place en basse fréquence, une paire torsadée de fil de cuivre argenté isolé PTFE est bien plus transparente subjectivement.

La masse de l'ampli de tension n'est pas reliée directement au point de masse central C mais aux masses des deux régulateurs Reg.+ et Reg.- car les courants consommés par l'ampli de tension proviennent de ces régulateurs et doivent y retourner au plus court. Bien sûr les deux régulateurs sont reliés au point de masse

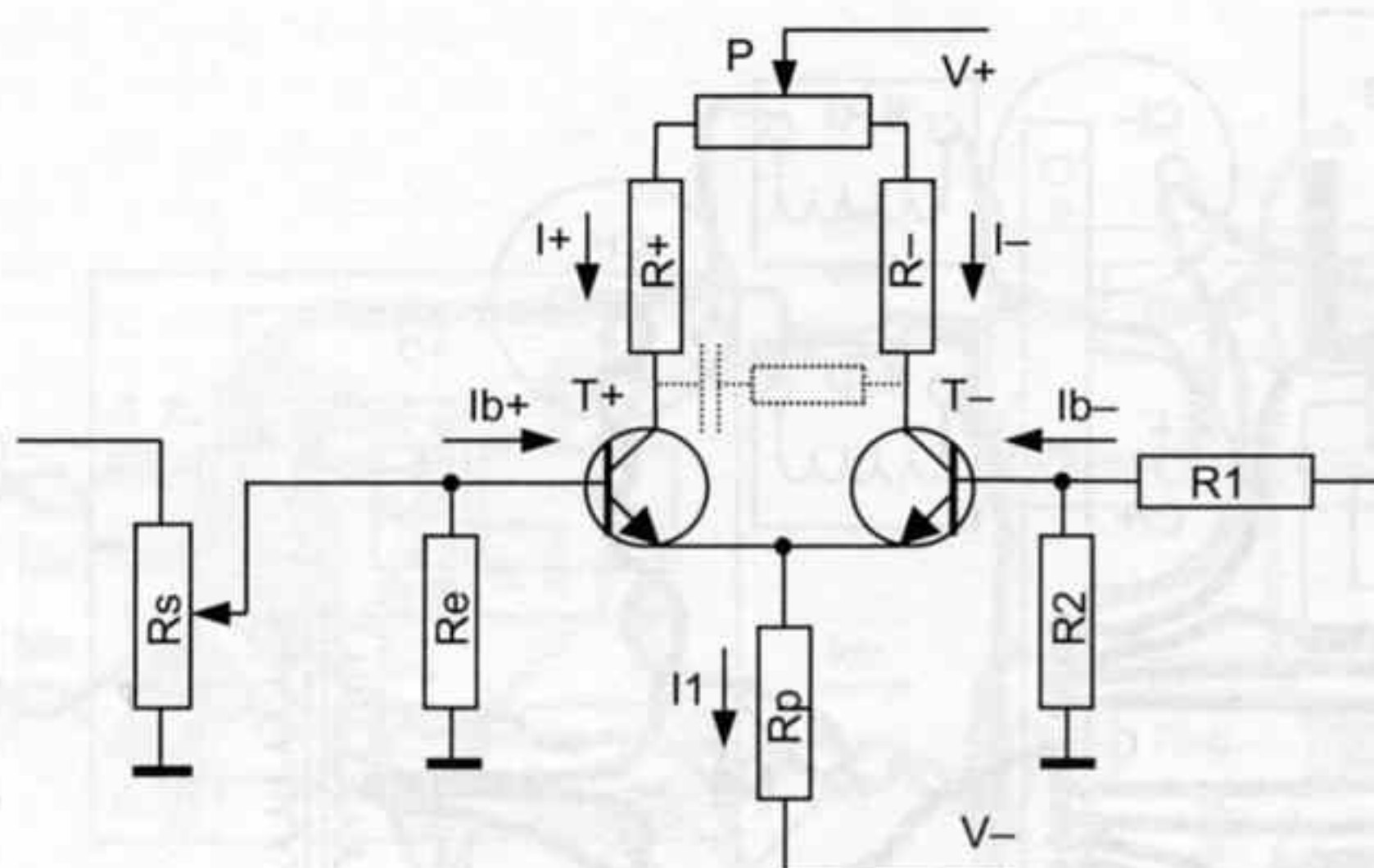
double-mono peut être étendue au transformateur d'alimentation.

central, par l'autre extrémité de leur piste de masse, côté redresseurs et filtrage, ceux-ci étant intégrés sur la carte.

La masse des amplis de puissance est "indépendante" de celle des amplis de tension, elle retourne au pied des condensateurs de filtrage Cf de l'alimentation de puissance, y-compris le retour des courants délivrés à la charge externe. Tous ces courants élevés sont collectés par une barre de cuivre reliant tous les condensateurs de filtrage.

Les courants pulsés traversant les secondaires du transformateur, les redresseurs et les condensateurs de tête de filtre Ct, circulent dans des paires torsadées maintenues contre le châssis, et se referment par le secondaire au point M sans traverser la masse centrale afin de ne pas y développer de tensions impulsionnelles parasites. Bien sûr le point milieu du secondaire est relié au point central de masse C par un conducteur assurant l'équipotentialité, et ne véhiculant aucun courant.

Par rapport aux montages "masses en étoile" ou pire "masses en série" cette disposition apporte un bruit de fond nettement moins élevé, le gain en rapport signal/bruit pouvant être estimé à plus de 15 dB, parfois 20 dB selon les montages. L'amélioration en terme de transparence, de propreté et de douceur est

**Figure 243 -**

Étage d'entrée différentiel bipolaire.

La fréquence de coupure du premier étage est aisément contrôlée à l'aide d'un circuit R-C, représenté ici en pointillés, installé entre les deux sorties aux collecteurs de T+ et T-. Le choix d'une coupure assez basse assure la stabilité du circuit complet bouclé, avec une marge de phase suffisante. Cette pratique évite également de saturer l'entrée du deuxième étage.

Les courants de base I_{b+} et I_{b-} induisent des dérives importantes souvent très gênantes.

décisive, si toutefois l'appareil est conçu en respectant les orientations générales décrites depuis le début de ce chapitre.

L'impression obtenue est celle d'une restitution très calme et en même temps très dynamique, sans aucune dureté mais cependant très ferme. La plupart des amplificateurs du commerce dont les masses sont établies par des pistes minces, étroites et mal routées, sont loin de procurer la même sensation de plénitude et d'aération.

Les qualités subjectives d'un amplificateur à transistors semblent à l'heure actuelle très peu dépendantes du schéma, et au contraire étroitement liées au choix de départ concernant la contre-réaction, la classe de fonctionnement et la typologie des alimentations, ainsi qu'à la rigueur dans l'établissement des circuits et en particulier des pistes de masse. Certains appareils à circuit intégrés construits dans cet esprit donnent des résultats surprenants avec un montage d'une simplicité déroutante, où 90 % du volume est occupé par les alimentations.

Le choix des composants est un point important également, et les transistors, très dispersés et très variables subjectivement au sein d'un même lot, doivent être triés puis essayés avant toute décision. Il est malheureusement impossible de tirer des règles, seule la réputation de certains modèles peut orienter le choix.

Les composants passifs jouent un rôle important dans la transparence finale, et méritent par conséquent un petit détour, mais auparavant quelques mots concernant les schémas les plus musicaux.

9.3 Le plus simple appareil

NATUREL ET SIMPLICITÉ

La symétrie est illusoire, et si quelques appareils symétriques fonctionnent mieux dans certains systèmes, c'est que les boucles de masse et les courants d'équilibrage des potentiels de masse sont mal gérés

dans ces systèmes. La symétrie, en réalisant la soustraction des perturbations, élimine en grande partie leur effet, mais ajoute un voile sur la restitution. Le traitement et l'élimination des boucles de masse, comme je l'ai expliqué au chapitre 7, supprime ces perturbations, et rend la symétrie inutile. Un simple transformateur d'isolement en entrée suffit.

Le matériel professionnel, en particulier les consoles de mixage, est ainsi construit. L'électronique n'y est pas symétrique parce que la complémentarité de deux transistors n'existe pas, sauf peut-être à une température précise, sur une bande de fréquence étroite, et pour une variation de courant très faible. Autrement dit, pour le traitement de signaux audio, il n'existe pas de paire réellement complémentaire.

Le schéma d'un amplificateur à transistors visant la plus grande transparence est tout d'abord un schéma étonnamment simple, avec très peu de composants, actifs comme passifs. Un minimum de trois étages est impératif quel que soit le gain souhaité :

- Étage d'entrée différentiel.
- Étage de gain en tension.
- Étage de gain en courant, adaptateur d'impédance.

La nécessité absolue d'une grande impédance d'entrée, qu'il s'agisse d'un ampli de puissance ou d'un étage ligne, est liée autant à la charge qu'elle représente pour le circuit source, qui doit lui fournir du courant, qu'au courant continu de polarisation absorbé par cette entrée. Sur ce point les transistors bipolaires ne sont pas les plus intéressants, car pour être silencieux et linéaires ils doivent travailler avec un courant d'émetteur suffisant. Leur gain en courant n'étant pas infini, ils nécessitent un courant de base, qui est prélevé à la source du signal. Ce courant traversant la résistance de sortie du circuit source et la résistance d'entrée de l'ampli produit une tension de décalage, appelée "offset". Cette tension continue est parfois compensée par un réglage dissymétrique des charges de l'étage d'entrée différentiel, ce qui amène un gain différent

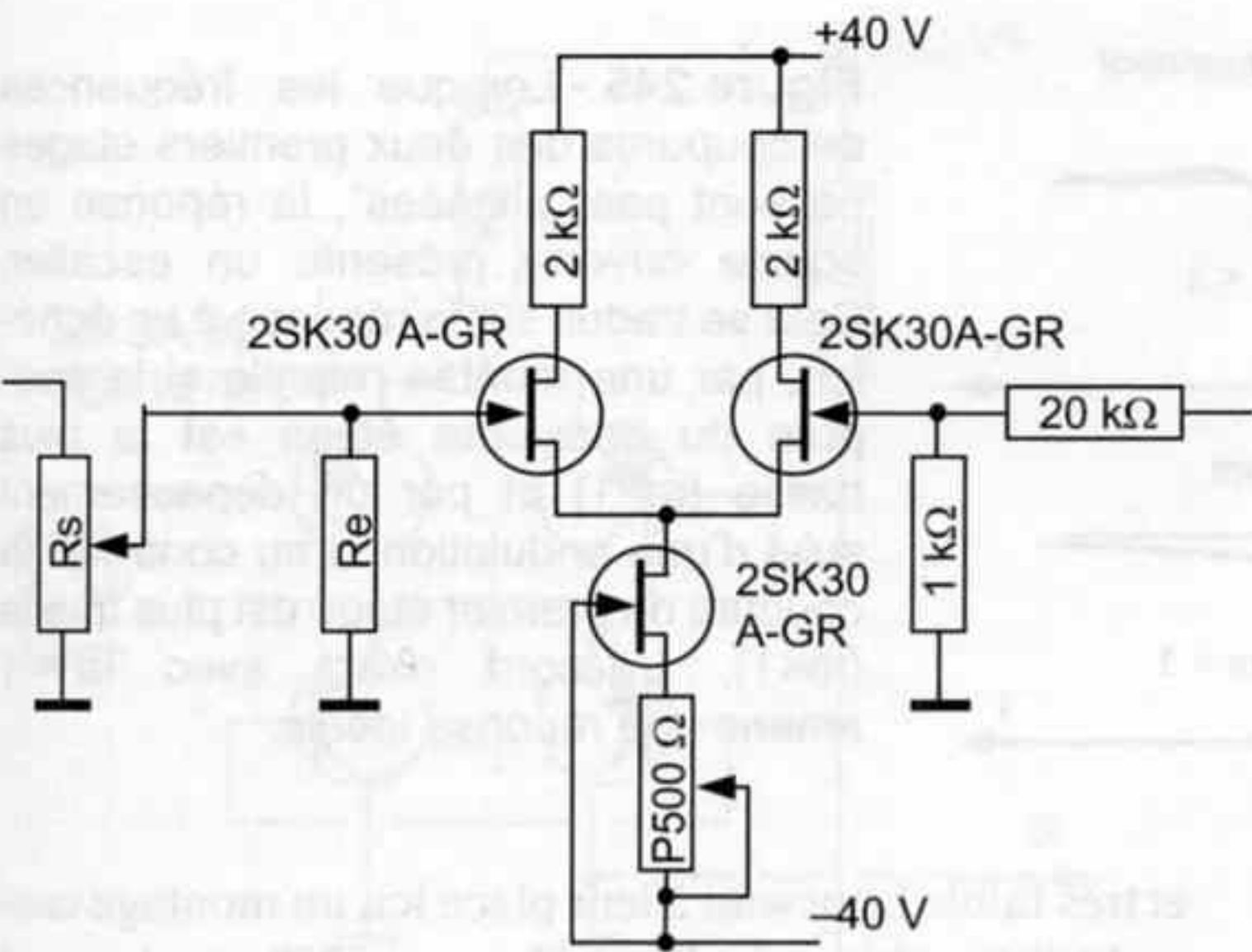


Figure 244 - Étage d'entrée différentiel à FET, de type Kanéda. Couplage direct et faible gain.
(d'après l'Audiophile n°43)

sur les deux branches. Un tel dispositif est à proscrire absolument, car responsable d'un spectre de distorsion très irrégulier et variable avec l'amplitude du signal et la fréquence.

Le schéma, figure 243, d'un différentiel bipolaire classique fait apparaître le principal défaut de cet étage, qui est dû à l'existence des courants de base I_{b+} et I_{b-} , générant en traversant les résistances de source R_s et R_e en parallèle pour l'entrée positive, et R_1/R_2 pour l'entrée négative, des tensions continues différentes. Un réglage de la tension de décalage en sortie de l'ampli est possible à l'aide de P , qui déséquilibre les courants I_+ et I_- donc également les courants de base I_{b+} et I_{b-} , rendant ainsi égales les tensions continues sur les deux entrées. L'échauffement des deux transistors n'est plus identique, leur gain non plus, et leurs charges de collecteur R_+ et R_- ne sont plus égales ! Voilà un beau différentiel dissymétrique, dont les défauts audibles sont masqués par une contre-réaction à taux élevé. Il ne peut s'adapter à notre amplificateur à faible contre-réaction !

La situation la plus défavorable est atteinte avec un préampli dont la sortie est effectuée sur le curseur d'un potentiomètre de forte valeur. La résistance de source R_s vue de l'entrée positive varie alors avec la position du réglage de volume, et avec elle la dérive continue en sortie de l'ampli !

Les schémas usuels montrent un condensateur de liaison (électrolytique...) en série avec cette entrée, et un autre au pied de la résistance R_2 pour bloquer également tout courant continu, ainsi le problème des dérives est réglé ! Hélas, la qualité sonore devient alors très banale, avec une sonorité dans le registre grave qui doit beaucoup à l'effet de mémoire de ces condensateurs, et aux constantes de temps qu'ils introduisent : le fameux "son transistor" est de retour... Les condensateurs sont à proscrire absolument dans cet étage différentiel bipolaire.

Les amplificateurs opérationnels intégrés à entrées bipolaires montrent les mêmes problèmes, bien que quelques-uns, développés pour les applications vidéo, soient très performants sur signaux à haute dynamique, et présentent des aptitudes étonnantes en audio. Malheureusement, les courants de polarisation des bases sont de l'ordre de de 2 à 15 μA en général, et parfois plus, ce qui produit dans une impédance de source de 1 k Ω seulement, une tension continue de 2 à 15 mV, qui est ensuite amplifiée, la dérive en sortie de l'étage de puissance atteignant alors plusieurs centaines de mV. Les impédances de source étant souvent supérieures à 1 k Ω , l'utilisation du différentiel bipolaire est malaisée, même avec des transistors à fort gain.

Les FET sont infiniment mieux adaptés à cet endroit, et s'il est vrai que les performances en bruit ont été pendant longtemps inférieures à celles des meilleurs bipolaires, elles sont à l'heure actuelle du même ordre. L'impédance d'entrée atteint des valeurs gigantesques, et le courant de fuite de gate est de l'ordre de quelques pA, c'est-à-dire un million de fois plus faible que le courant de base d'un bipolaire haute fréquence. Bien sûr ce courant de base est affublé d'un coefficient de température très important, mais avec un appairage correct et un montage des deux transistors en contact, ou mieux en boîtier unique, cela ne constitue pas un problème réel. Des recherches sur la distorsion thermique ont montré la supériorité très nette du FET 2SK30, très prisé des audiophiles et utilisé dans certains montages de type Kanéda, où il produit un son très ouvert. D'autres références conviennent, en particulier la paire 2SK170/2SJ74 de Toshiba, réputée pour son très faible bruit, ainsi que la paire 2SK146/2SJ103 présentant de très faibles capacités parasites. Les 2SK389 et 2SJ109 sont souvent rencontrés également.

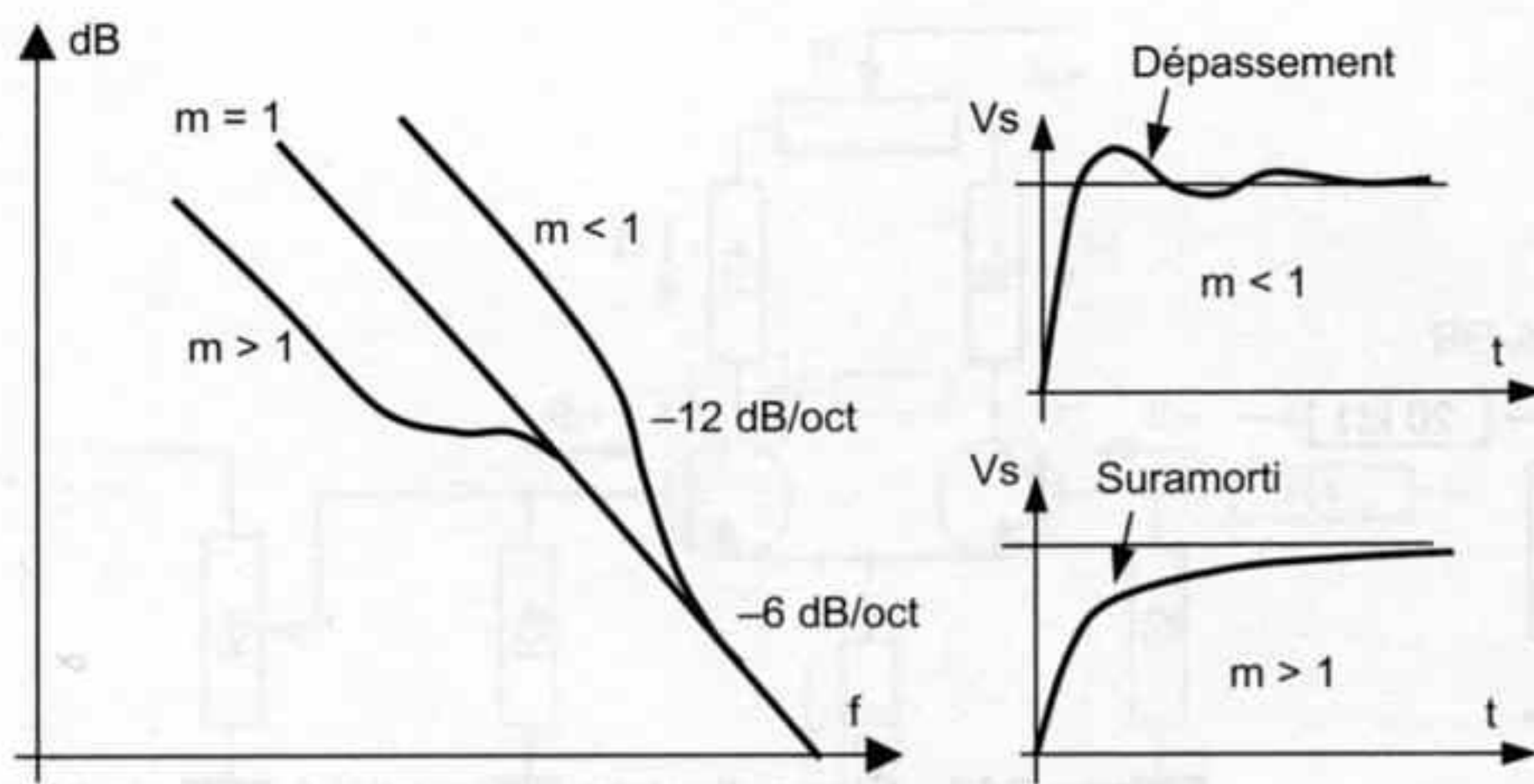


Figure 245 - Lorsque les fréquences de coupures des deux premiers étages ne sont pas "alignées", la réponse en boucle ouverte présente un escalier. Cela se traduit sur la réponse à un échelon, par une montée ralentie si la coupure du deuxième étage est la plus basse ($m > 1$) et par un dépassement suivi d'une ondulation si au contraire la coupure de premier étage est plus basse ($m < 1$). L'accord exact avec $m = 1$ amène une réponse idéale.

Le choix de transistors présentant une transconductance G_m pas trop élevée est essentiel, le gain du premier étage devant rester limité voire unitaire. Un gain de l'ordre de 10 dB semble être un maximum au-delà duquel la sonorité de l'ensemble perd en réalisme, un gain plus grand risquant de saturer l'entrée du second étage, si le signal d'erreur $\mathcal{E} = V_e - V_r$ vient à prendre une valeur "élevée" par suite d'une demande importante de courant de sortie sur une charge capacitive.

Les montages cascodes sont intéressants car procurant un travail à tension V_{ds} constante, minimisant les variations de capacité d'entrée avec la tension (un défaut propre aux FET) et les distorsions thermiques. Le dégradé harmonique qu'ils procurent n'est pas très favorable, et des FET à faibles capacités et faibles distorsions thermiques semblent préférables à l'écoute, quoique théoriquement inférieurs.

De même, la charge du premier étage par miroir de courant, amenant un gain très élevé avec les risques de saturation du second étage qui en découlent, n'est pas à sa place dans un ampli de tension. Son utilisation est intéressante dans un étage d'entrée de préampli amené à traiter de très faibles signaux, un gain élevé au premier étage les mettant alors à l'abri du bruit de fond.

Le générateur de courant de ce premier étage différentiel, R_p dans le schéma simplifié figure 243, ne peut en réalité être une simple résistance de forte valeur. Un transistor monté en générateur de courant, avec une simple diode, ou mieux une LED, convient à cette fonction, mais là encore un FET assure un fonctionnement plus stable, plus silencieux, et plus musical. Le 2SK30 est bien adapté à ce montage, avec la gate directement reliée à la source, ou bien en insérant une résistance ajustable.

L'étage d'entrée différentiel à FET est donc très simple, comme le montre la figure 244.

Le deuxième étage doit par conséquent assurer presque tout le gain en tension en boucle ouverte de l'amplificateur. Les transistors bipolaires à grand gain

et très faible bruit sont à leur place ici, un montage cascode assurant un gain élevé. Certains FET conviennent également.

Les transistors utilisables ici sont par exemple :

- paire 2N3440/5416,
- paire 2SA872/2SC1775,
- paire 2SK216/2SJ79,
- paire BD139/BD140,
- 2SA1316, très réputé et le plus récent 2SA1370,
- paire MJE340/350,
- paire MPSA42/92,
- paire BF469/470.

Ce second étage, de structure différentielle également, a fait l'objet d'études poussées de la part de Kanéda, qui lui attribue une importance capitale. Bien qu'une seule de ses sorties soit utilisée, il doit pourtant conserver des charges rigoureusement identiques sur les deux branches, faute de quoi les performances mesurées et subjectives sont sérieusement dégradées. L'usage d'un générateur de courant à semi-conducteurs sur cet étage est un sujet controversé. La simple résistance semble produire un son plus libre mais peut-être moins neutre, le générateur procure une meilleure tenue, une fermeté indiscutable, mais aussi une sorte de retenue. On peut supposer que la très haute impédance du générateur de courant, associée aux capacités parasites, procure une fréquence de coupure en boucle ouverte plus basse que celle du premier étage. Il s'ensuit alors un décalage des pôles et des zéros de la fonction de transfert, ce qui signifie que le gain en boucle ouverte présente un escalier, les deux coupures des premier et deuxième étages n'étant pas alignées, figure 245 (d'après Analog Devices, Op-Amps AN-359).

Il semblerait qu'il soit préférable du point de vue subjectif que la première coupure soit due au premier étage, et que la seconde soit reportée au-dessus de la fréquence de coupure en boucle fermée pour éviter toute instabilité. L'obtention d'un gain en boucle ouverte constant sur une large plage de fréquence fait préférer une charge par résistance plutôt que par miroir

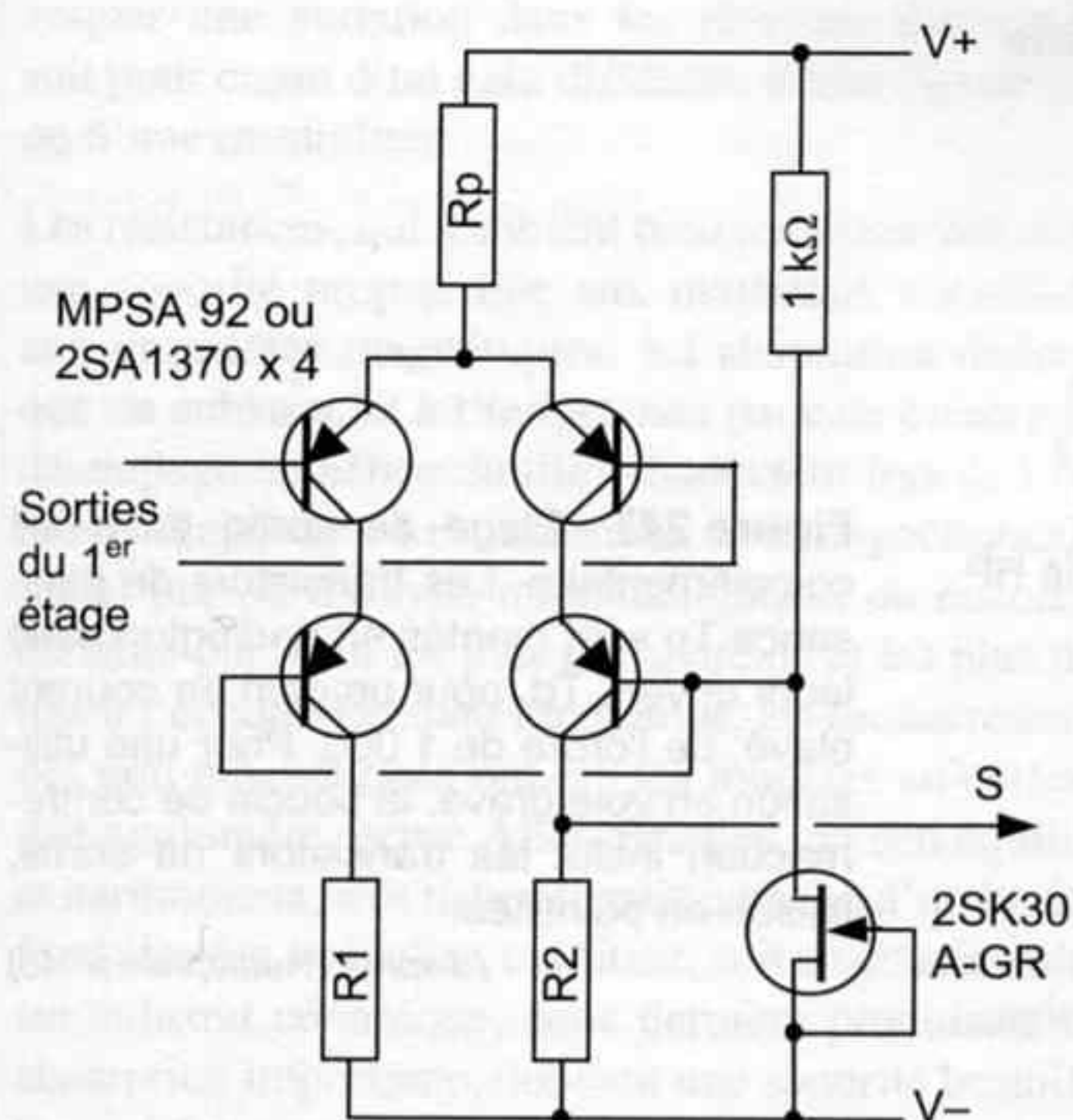


Figure 246 - Deuxième étage de gain en tension, de type Kanéda. c'est un montage différentiel cascode, dont les deux branches ont des charges identiques. La résistance R_p est subjectivement préférable à un générateur de courant.

de courant, pour ce deuxième étage. Le montage cascode, en réduisant l'effet des capacités parasites, assure une bande passante très étendue, et par conséquent une coupure supérieure à celle du premier étage, ce qui est le but recherché. L'ajustage à l'oscilloscope de la coupure haute est obtenu avec une petite capacité de quelques pF aux bornes de la résistance R_2 .

Le deuxième étage différentiel cascode à résistances est également très simple comme le montre la figure 246.

Le FET monté en diode assure la polarisation des bases des deux transistors inférieurs.

Le montage compound, sorte de Darlington constitué de deux transistors complémentaires est adapté également à la réalisation d'un deuxième étage. Il est pourtant assez rarement rencontré.

Le troisième et dernier étage enfin, est polarisé en classe A pure, à la rigueur en classe AB pour un amplificateur de plus de 50 W, avec fonctionnement en pure classe A jusqu'à au moins 25 W et en classe B au-delà. Là aussi, les circuits de polarisation sophistiqués et faisant usage de compensation par diodes, thermistances ou autres composants non-linéaires, en solutionnant les problèmes liés aux dispersions et dérives des composants, apportent un lot d'inconvénients subjectifs. Un simple générateur de courant débitant dans une résistance assure efficacement la différence de tension de l'ordre de 3 V entre les deux bases des drivers du push-pull de sortie, nécessaire au fonctionnement en classe A.

Un transistor monté en émetteur suiveur transmet le signal issu du deuxième étage, à basse impédance vers les drivers, transistors de petite puissance du genre ci-dessous parmi tant d'autres :

- BD139/BD140,
- MJE15030/MJE15031,
- TIP29C/TIP30C,
- 2SA634/2SC1096,
- 2SC2238/2SA968.

Les résistances d'émetteur de ces transistors sont choisies de valeur moyenne, de l'ordre de 100 à 200 Ω . Des valeurs plus faibles laissent espérer sur le papier un comportement plus linéaire mais encore une fois les résultats subjectifs font pencher en faveur d'une charge peu gourmande pour ces transistors.

Leur montage en Darlington avec les transistors de sortie dont ils doivent charger la capacité de base parfois importante, tout en fournissant un courant de base non négligeable, explique en partie pourquoi il est néfaste de leur ajouter une charge supplémentaire par faible résistance d'émetteur.

Les transistors de sortie sont obligatoirement montés avec isolateurs sur des radiateurs très largement dimensionnés. Le montage en parallèle de plusieurs paires complémentaires se traduit inmanquablement à l'écoute par une perte de transparence. Deux paires rigoureusement identiques sont un maximum. Le courant de repos de chaque transistor est donc très élevé, de 1 A environ pour 20 W en classe A, ce qui entraîne une dissipation élevée, de 25 à 35 W au repos pour chaque transistor selon la tension d'alimentation. Un radiateur de 1 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ pour chacun d'eux est une limite maximale de fonctionnement sûr, avec un montage soigné assurant un excellent couplage thermique. La dissipation totale d'un amplificateur stéréo de 2×50 W, équipé d'un double push-pull en sortie, s'établit à plus de 200 W, demandant une mise en châssis assurant la ventilation nécessaire.

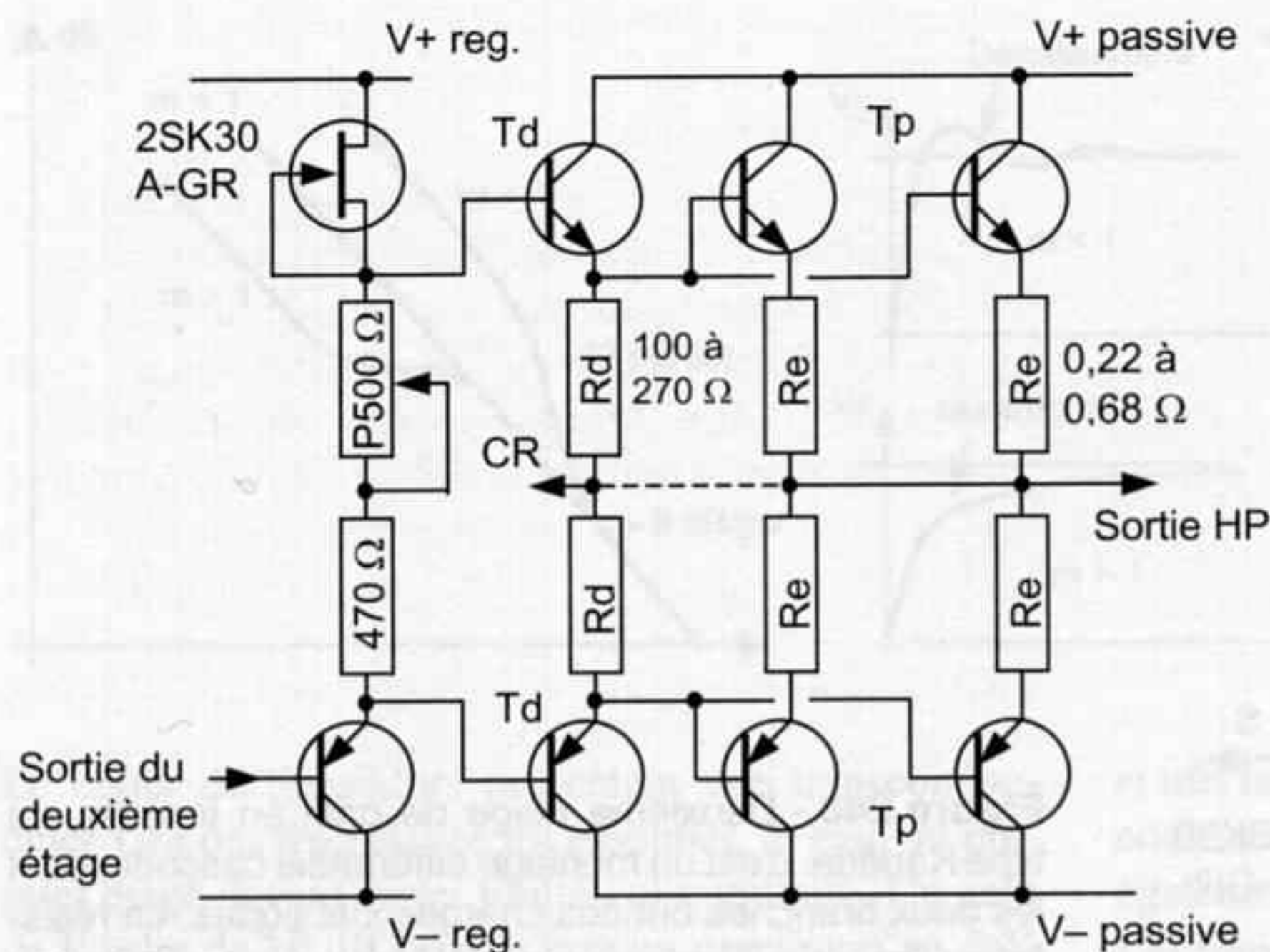


Figure 247 - Étage de sortie push-pull complémentaire. Les transistors de puissance T_p sont montés en darlington avec leurs drivers T_d , pour un gain en courant élevé, de l'ordre de 1 000. Pour une utilisation en voie grave, la boucle de contre-réaction inclut les transistors de sortie, liaison en pointillés.

(d'après l'Audiophile n°43)

Les transistors les plus réputés pour cet étage final sont parmi d'autres :

- 2SA627/2SD188 popularisée par les montages de la maison de l'audiophile, jusqu'à 30 W par paire,
- 2SB754/2SD844 comme ci-dessus,
- MJ802/MJ4502,
- 2SC2922/2SA1216,
- 2SC3281/2SA1302,
- MJE15003/MJE15004,
- MJE15024/MJE15025,
- 2SK1058/2SJ162, en boîtier plastique, dignes successeurs des fameux 2SK135/2SJ70,
- TIP 35C/TIP36C,
- TIP 142/TIP147 en Darlington intégré,
- TIP3055/TIP2955 (versions triées à grand gain).

Le schéma d'un étage de sortie de type Kanéda en classe A est donné figure 247. Deux paires complémentaires T_p en parallèle peuvent fournir jusqu'à 50 W, une seule paire étant suffisante dans de nombreux cas. Les résistances d'émetteur assurent l'équilibrage des courants de repos par une légère contre-réaction de courant locale, ainsi qu'une mesure aisée de ces courants par contrôle de la tension à leurs bornes. Le réglage de ce courant est effectué par P, qui assure environ 3,2 V entre les bases des transistors drivers T_d .

Les alimentations $V+$ reg. et $V-$ reg. ne devraient pas être dérivées des alimentations passives de puissance, très sollicitées. Leurs tensions sont d'ailleurs légèrement plus élevées de 2 à 3 V.

Parmi l'infinie variété des transistors, bien peu ont été développés pour des applications de très haute fidélité, et ceux qui sont dédiés aux circuits audio furent étudiés pour les téléviseurs et l'électronique grand public.

Cela ne signifie pas qu'ils ne sont pas performants subjectivement, mais simplement qu'ils ont été produits en très grande série et présentent par conséquent des dispersions élevées. Les constructeurs compensent ces variations par un taux de contre-réaction élevé et divers circuits compensateurs, mais l'audiophile qui cherche à réaliser un amplificateur en classe A à faible contre-réaction se voit obligé de trier ses transistors au minimum en gain, tension V_{be} , et capacité d'entrée, afin d'obtenir un fonctionnement réellement symétrique jusqu'à la fréquence F_{bf} . Mission impossible sans traceur de courbes, et encore faut-il acheter un énorme lot de composants, parfois plusieurs centaines, avant d'en trouver une paire à peu près complémentaire.

L'amateur se voit contraint de choisir parmi les références tenues en stock et appareillées par quelques fournisseurs spécialisés. Le choix n'est pas très large, mais ces références sont réputées subjectivement. La plupart présentent des capacités d'entrée et des résistances parasites faibles ou très faibles, un gain ou une transconductance moyennement élevés mais qui se maintiennent aux plus hautes fréquences. Ces caractéristiques les rendent faciles à piloter, et ont une influence très positive sur les résultats subjectifs.

INGRÉDIENTS DE BASE

Les composants passifs sont pour l'amateur beaucoup plus faciles à cerner, les caractéristiques subjectives étant définies par la technologie et les matériaux employés et peu dépendante des dispersions du processus de fabrication. Ces dispersions interviennent sur la précision et la dérive de la valeur du composant, mais pas sur sa sonorité propre. Par contre une valeur trop différente de celle prévue sur le schéma peut pro-

voquer une variation dans les résultats d'ensemble, soit pour cause d'un gain différent, d'une dissymétrie, ou d'une instabilité.

Les résistances, qui semblent bien anodines, ont toutes une sonorité propre, liée aux matériaux constitutifs, aux propriétés magnétiques, à l'absorption diélectrique du substrat, et à l'inductance parasite créée par le découpage en hélice du film conducteur lors de l'opération d'ajustage. Les matériaux non magnétiques, de métal pur ou d'oxyde monométallique, ou encore de carbone pur, sont les plus transparents et les plus neutres à l'écoute. Pendant longtemps, les seules résistances non magnétiques ont été les modèles au carbone, soit aggloméré, genre Allen-Bradley, au son équilibré et harmonieux, très naturel, mais entaché d'un bruit de fond élevé et irrégulier, crépitant, soit en couche mince sur substrat céramique, cette dernière produisant une absorption importante, donnant une sonorité brouillée. Des résistances au carbone spéciales audio ont été fabriquées par quelques constructeurs japonais – Kiwame – mais n'ont pratiquement jamais été diffusées auprès des détaillants de composants.

Puis les résistances à film de tantale non magnétiques sont apparues, de marque Beyschlag et plus récemment Audio-Note. Leur prix peut faire hésiter mais leur sonorité, lorsqu'elles sont employées dans un circuit qui le mérite, ne laisse planer aucun doute.

Plus récemment encore sont apparues des résistances à couche de carbone sur substrat ultra-pur, de marque Riken et développées spécialement pour l'audio ultime. Connexions en cuivre pur plaqué or, et sonorité en rapport avec le prix. Les reproches de son sec et métallique parfois faits aux résistances tantale, et peut-être plus dûs aux circuits qu'aux résistances elles-mêmes, ne sont plus de mise avec ces résistances au carbone au son qualifié de lumineux, clair et doux, transparent et naturel.

Un panachage semble judicieux, avec des tantales en polarisation et des carbones sur le trajet du signal, en surdimensionnant de manière à maintenir une température la plus constante possible. Une résistance de 1 W là où seulement 0,25 W sont dissipés n'est pas inutile. Les modèles courants à couche d'alliage métallique (Cr-Ni) magnétique n'ont pas leur place dans un montage audiophile, pas plus que les modèles de très haute précision, à faible coefficient de température, et dont les qualités musicales sont souvent inversement proportionnelles au prix.

Les résistances de puissance des émetteurs des transistors de sortie sont obligatoirement bobinées non inductives, cimentées. De récents modèles à couche métallique épaisse, type MP ou RCH en boîtier plastique, non

inductives et de dissipation élevée, jusqu'à 50 W, peuvent être utilisées à cet endroit. Elles seront vissées contre le châssis métallique.

Les condensateurs ne laissent que peu de choix. Ils sont heureusement peu nombreux dans un circuit transistorisé, sauf bien sûr dans l'alimentation dont nous avons déjà parlé. Pour ce qui est du signal, si un condensateur doit se trouver sur son chemin, un modèle au papier huilé et feuille de cuivre, Mundorf, Jensen ou Audio-Note est absolument conseillé. Un modèle Audyn-Cap ou SCR au polypropylène et feuilles d'étain donne également d'excellents résultats. Les petites valeurs inférieures à 10 nF existent en polystyrène et cuivre (à la rigueur aluminium) ou encore en polypropylène, en choisissant une tension d'isolement élevée, de 250 V ou plus.

Les découplages d'alimentation sont en polypropylène métallisé, d'assez forte valeur, 10 μ F de marque SCR procurant un bas médium remarquable de netteté. Les petites valeurs inférieures à 1 μ F sont inutiles et même parfois néfastes lorsqu'elles sont associées à un électrolytique standard, l'impédance étant alors irrégulière.

Le tantale si apprécié pour les résistances est à proscrire pour les condensateurs. Son usage en découplage en sortie de régulateur est dicté par le besoin d'amortir les résonances HF qui se produisent parfois. En effet, un condensateur tantale présente une impédance ne remontant pas en HF et une résistance série beaucoup plus élevée qu'un chimique classique. Il donne un son à la fois lourd et dur, et devrait être réservé aux circuits numériques. Un régulateur bien conçu se passe de ses services avec bonheur...

Je rappelle les choix de condensateurs d'alimentation passive :

- Tête de filtre : forte valeur 22 000 à 100 000 μ F, standard ou Aérovox ALS30
- Après les selfs : Elna ou Black-Gate, Philips C114 ou C154, Aérovox ALS30, RIFA PEH200, Siemens B41550, de valeurs un peu plus fortes (jamais moins), découplés par polypropylène de 2,2 à... 22 μ F.

Et pour les alimentations régulées :

- Tête de filtre : Philips CO56, Aérovox ALS30, de 10 000 ou 22 000 μ F.
- Découplage de tension de référence : Philips CO135/136, Panasonic FC, de 1 000 à 4 700 μ F.
- Découplage en sortie : aucun, à part un découplage HF de 0,1 μ F polypropylène, ou alors plus de 22 000 μ F avec les mêmes choix qu'en sortie d'alimentations passives. Une valeur moyenne produit un escalier défavorable dans la courbe d'impédance de sortie du régulateur.

Le câblage pour terminer, mérite des soins attentifs. Monobrin ou à faible nombre de brins, argent pur ou cuivre argenté, isolement PTFE, les conducteurs aller et retour de chaque liaison sont torsadés assez serrés, ceux qui véhiculent de forts courants sont plaqués contre le châssis en métal. Les lignes de câbles ne se suivent pas mais se croisent à angle droit. La connectique est de cuivre pur plaqué or ou rhodium 3 μm (et non doré "flash" 0,2 μm ...) ou mieux en argent massif, isolement PTFE bien entendu. Je rappelle que l'isolant PTFE demande un rodage de plusieurs heures avant de sonner merveilleusement, ce qui l'a fait mal juger de certains amateurs. Lorsque pour des raisons économiques les condensateurs utilisés ne sont pas de la plus haute qualité, tels les modèles au polyester genre C368 Philips, ERO 1822, Wima MKS, ou certains MKP économiques, il est préférable de les associer à un câblage cuivre/PVC. Ils donnent en effet un registre aigu peu transparent, surchargé, et dans ce cas un câble argent/PTFE révèle ce défaut alors qu'un câble cuivre/PVC l'atténue quelque peu. Avec les excellents condensateurs de liaison et de découplage, le câblage argent/PTFE apporte une aération extraordinaire du registre aigu, avec la particularité de mettre en avant le moindre défaut du système dans cette bande de fréquence. Au-delà de l'inconvénient passager, cela oriente clairement les recherches d'améliorations, et rend ces dernières évidentes.

Les lignes d'alimentations continues peuvent être câblées avec un multibrin souple isolé au silicone. Secondaires du transformateur, redresseurs et condensateurs de tête acceptent un câblage PVC.

Tous ces détails de conception et de réalisation amènent l'amplificateur à transistor près des limites du réalisme dont les semi-conducteurs sont capables.

En particulier le registre grave et bas-médium procuré par un ampli de 50 W en pure classe A, avec alimentations multiples et surdimensionnées, possède un caractère inimitable, fait d'un mélange harmonieux de douceur et de fermeté extrême, de liberté complète sur les attaques et de tenue irréprochable sur les extinctions. La superposition des informations d'espace, d'aération, au contenu très fluide, avec des sonorités de matière au contraire très mates, sèches, telles que des percussions, et avec des résonances d'instrument, rondes et amples, apparaît sans que ces différentes sonorités ne se mélangent, ne se masquent, évoluant indépendamment au cours du temps sans jamais envahir l'espace. Les différences d'ambiance entre les enregistrements sont perçues sans la moindre hésitation, la taille et l'énergie rayonnée par les grands instruments sont transcrites avec une intensité rare. Les déplacements de masse d'air, dans les tuyaux

d'orgues, les embouchures de grands instruments à vent, les échos de grandes salles, sont reproduits avec beaucoup de légèreté. Ces qualités ne sont évidemment révélées que sur des systèmes de haut-parleur à très haut rendement.

Les registres de médium et d'aigu semblent en comparaison un peu moins libres, moins ouverts, avec une sorte de légère retenue, un petit manque de transparence, comme si un voile léger adoucissait artificiellement la restitution, créant un léger flou agréable mais peu réaliste. Ce manque de finesse semble lié aux défauts de complémentarité des paires de transistors de puissance. Des circuits push-pull quasi-complémentaires conçus avec des transistors MosFET de même polarité tel le 2SK1058 sont possibles, mais les difficultés d'appairage subsistent, et les capacités d'entrée élevées apportent d'autres inconvénients.

Un trait musical plus fin et plus libre, formant un dessin rythmique plus vif, plus léger, impose la suppression du push-pull de sortie.

RETOUR AU SIMPLE ÉTAGE

La symétrie et la complémentarité étant impossibles à réaliser pleinement, le montage push-pull comporte en lui-même une limite à la transparence sonore. Il permet cependant de se passer de l'affreux condensateur électrolytique en sortie, ce qui élimine un énorme défaut. Supprimer le push-pull, c'est retourner plus de 60 ans en arrière, à l'époque du montage en simple étage. Les alimentations d'alors n'étaient pas symétriques, et des transformateurs étaient utilisés pour transmettre la modulation en bloquant la composante continue, et pour procurer un gain en tension, ou une adaptation d'impédance sans composant actif.

Le meilleur exemple est sans aucun doute l'amplificateur Némésis, comportant en tout et pour tout un seul transistor. Sa sonorité exceptionnelle dans les registres de médium et d'aigu ne doit pas faire oublier un grave écourté et timide ainsi qu'une puissance ridicule. Son utilisation se limite aux voies supérieures dans un système multi-amplifié. Sa description dans l'Audiophile n°34, a inspiré la réalisation figure 248.

Cette approche fut suivie de plusieurs tentatives d'amélioration, avec un différentiel en entrée, un enroulement de compensation permettant la suppression de l'entrefer, puis plus récemment par la suppression pure et simple du transformateur de sortie. L'alimentation dissymétrique impose alors un condensateur de sortie, électrolytique car de très forte valeur vue la faible impédance de la charge. Le passage à l'alimentation symétrique et régulée complique le schéma en apparence mais simplifie le chemin du

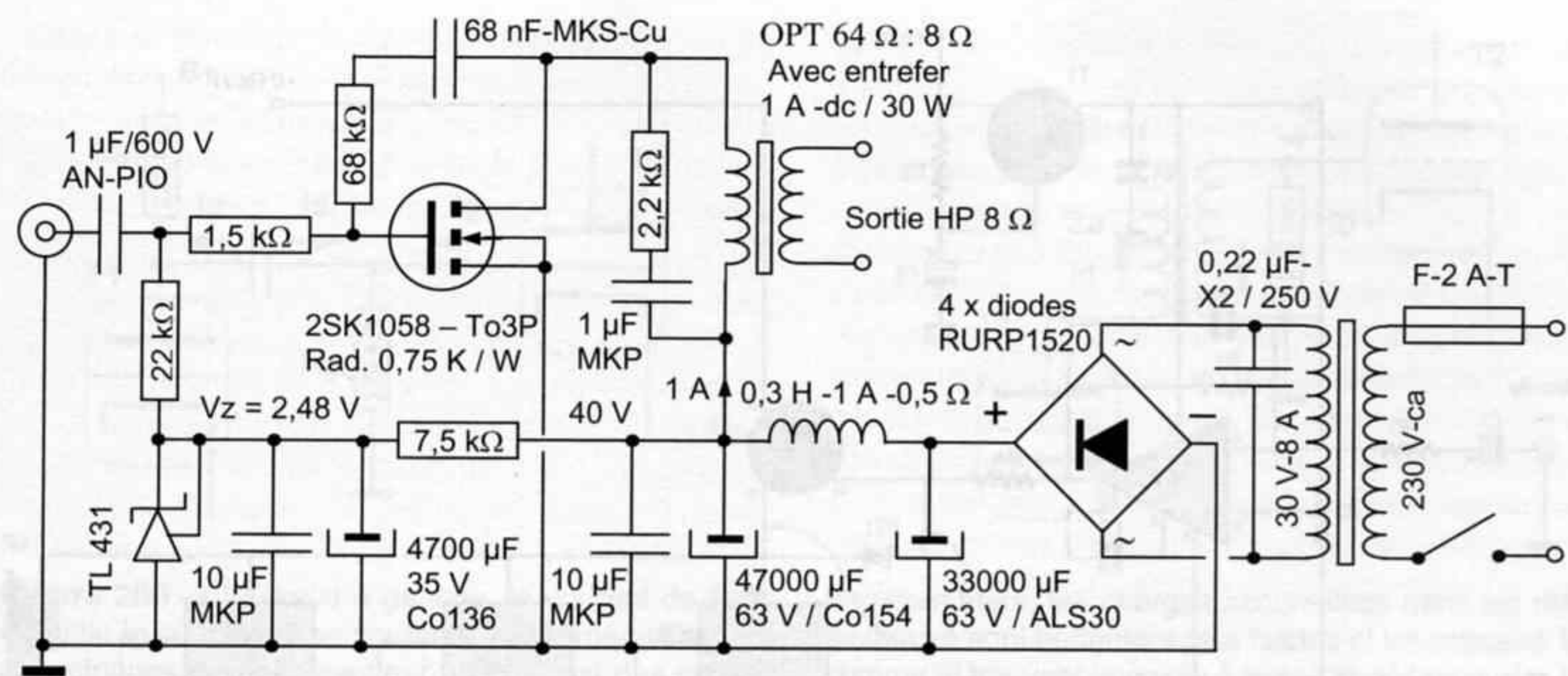


Figure 248 - Amplificateur mon transistor inspiré du Némésis de J. Hiraga, qui utilisait le fameux 2SK135. Les nouvelles versions de transistors MOS-FET 2SK1058 en boîtier plastique permettent une puissance modulée un peu plus forte, 10 à 12 W et une bande passante de 70 kHz sans contre-réaction. La coupure basse se situe vers 50 Hz, et remonte encore aux forts signaux, avec une puissance de sortie très limitée en dessous de 100 Hz. Le transformateur de sor-

tie, possédant un indispensable entrefer, afin d'éviter la saturation par le courant continu de 1 A, est responsable de ces limitations. Son inductance primaire est faible, le nombre de spires étant limité par la basse impédance. Une polarisation très stable est obtenue avec le circuit TL 431. La profondeur des plans, l'espace, le naturel, dépassent tout ce qui a pu être entendu jusque là avec des transistors...

signal. Malgré les inconvénients cités, la simplicité procure une excellente transparence. Un exemple est montré figure 249.

9.4 Aux lampes... adhère !

ENCORE UN PEU PLUS PRÈS DES ÉTOILES

L'intérêt porté aux lampes ne relève pas d'un passéisme rétrograde ou d'une quelconque nostalgie. D'ailleurs les références les plus réputées n'ont jamais cessé d'être fabriquées, bien que parfois avec une qualité très inférieures aux fabrications des années 60, et sont à nouveau produites en série pour satisfaire le marché de l'audio professionnelle, gros consommateur de tubes pour amplificateur de scène, et les constructeurs de haute fidélité à tubes, de plus en plus nombreux depuis un peu moins de dix ans.

La mode du tube, relancée d'abord lentement depuis une décennie, puis en pleine expansion ces cinq dernières années, a fait éclore un grand nombre de modèles, qui prétendent tous à la plus haute musicalité.

S'il est vrai que les lampes permettent de pousser un peu plus loin le réalisme de la restitution, ce but n'est atteint qu'en suivant les orientations décrites jusqu'ici. L'emploi des lampes n'est absolument pas un gage de réussite, et de nombreux amplis à lampes récents, fabriqués à l'économie, ne valent pas plus musicale-

ment que leurs confrères à transistors en classe AB, seul leur prix étant supérieur. Les principes de mise en œuvre sont les mêmes, les limitations sont par conséquent les mêmes. Si le coût de réalisation est un critère décisif, alors les transistors sont préférables, les amplis à lampes fabriqués à l'économie finissent au grenier.

Les lampes présentent des particularités qui se transforment en avantages d'un point de vue musical :

- Interdiction d'un taux de contre-réaction élevé, la coupure en boucle ouverte étant du deuxième ordre à cause du transformateur de sortie, au-dessus de sa résonance haute.
- Pas de problème de complémentarité, les deux branches du push-pull sont identiques, sous réserve d'appareillage correct.
- Pas de courant d'entrée, pilotage de la grille par une tension, d'où une impédance d'entrée très élevée, ne chargeant pas l'étage précédent.
- Obligation d'une forte tension d'isolement de tous les composants passifs, ce qui est pour la plupart d'entre eux synonyme de qualité.
- Utilisation avec un ou plusieurs transformateurs, adaptateurs d'impédance ou de liaison signal, apportant un dégradé harmonique plus équilibré.
- Absence totale de distorsion thermique, le tube travaillant à très haute température pratiquement constante.

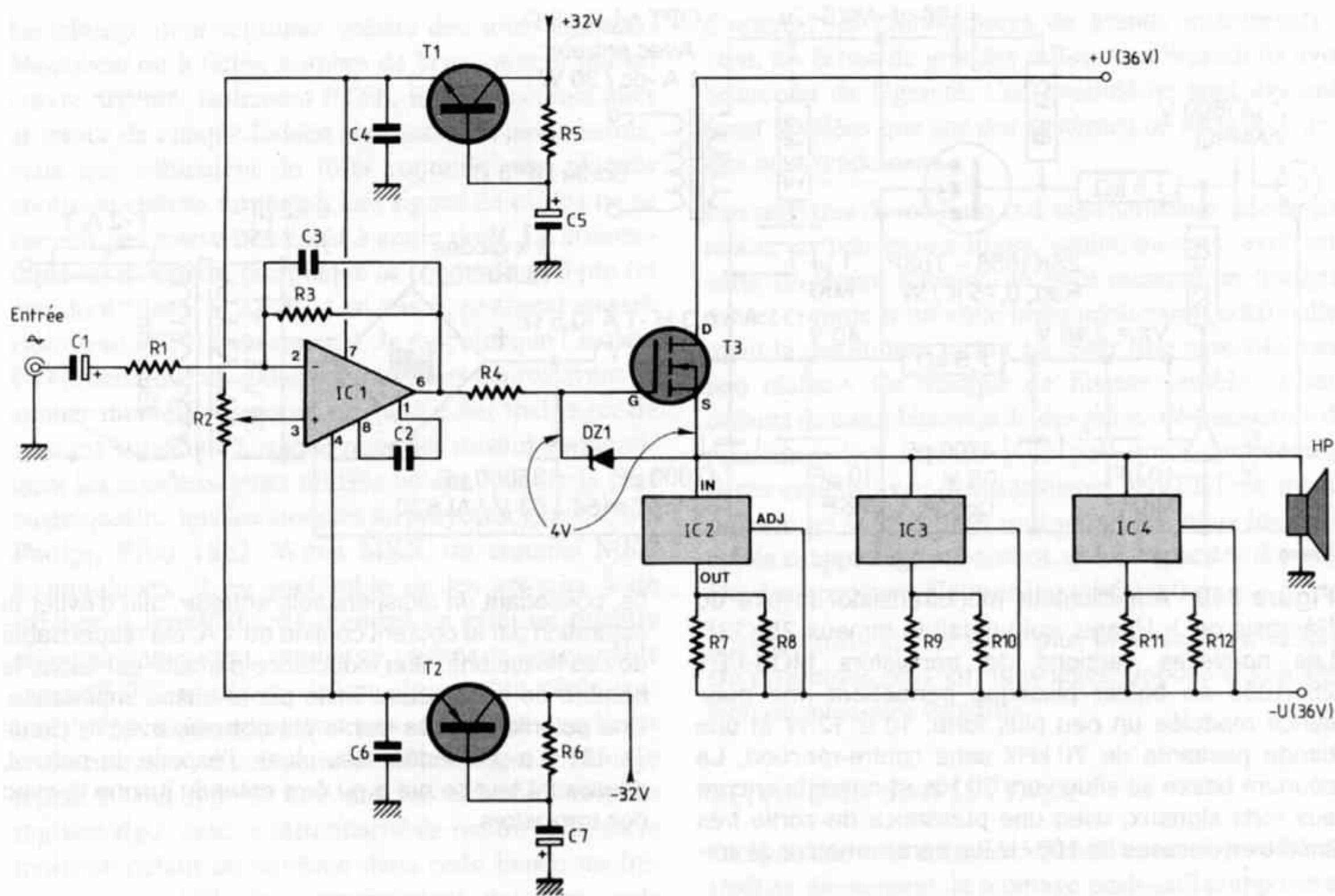


Figure 249 - Apparu il y a une dizaine d'années, dans la revue LED, ce schéma fut d'abord établi avec une alimentation dissymétrique et un Darlington en sortie. Une première évolution eu lieu avec un MosFET, puis deux en parallèle, et enfin une double alimentation symétrique. Le gain de tension est fourni par un ampli-op intégré, avec forte contre-réaction, alimenté par deux

Un transformateur quel qu'il soit produit une distorsion harmonique plus élevée aux basses fréquences, lorsque son impédance primaire diminue, la réaction inductive de son bobinage diminuant avec la fréquence. Les autres composants actifs et passifs produisent une distorsion qui augmente avec la fréquence, et leur nombre élevé a tendance à enrichir le spectre du signal en hautes fréquences. La présence d'un ou plusieurs transformateurs sur le chemin du signal redonne un équilibre spectral plus harmonieux, d'autant plus si le transformateur possède un entrefer qui diminue notablement son inductance, augmentant la distorsion aux basses fréquences. Un spectre de distorsion enrichi et harmonieux est, n'en déplaise à beaucoup, incontestablement plus réaliste, car plus conforme à la sonorité de matière des instruments.

Construire un ampli en recopiant un schéma des années 50 ou 60 en remplaçant la valve de redressement, dont la durée de vie est limitée, par des diodes

régulateurs, qui gagneraient à être améliorés selon les schémas figure 239. Les générateurs de courant à circuits intégrés ne sont pas non plus exempts de défauts, et le condensateur d'entrée C1, chimique, incontournable. Cependant les résultats d'écoute sont au-dessus de la mêlée. Il existe une version avec étage d'entrée à lampes...

standards, en supprimant la self sous prétexte que les condensateurs actuels sont beaucoup plus gros qu'à l'époque, en utilisant des composants modernes, résistances à couche métallique et condensateurs à film plastique procurant une bande passante beaucoup plus étendue et n'adoucissant pas le son, donne un résultat final décevant, d'autant plus si l'étage final est polarisé en classe AB afin d'annoncer une puissance "vendable".

Les lampes ouvrent une porte vers un monde sonore différent, où les perceptions sont plus riches, plus directes. Cette porte se situe au sommet d'un escalier : quelques marches doivent être gravies avant d'entrer dans le monde des lampes. Les utiliser dans l'univers des transistors, avec les outils de conception, la philosophie, les habitudes liées aux transistors et aux circuits intégrés, ne permet pas d'entrer ni même d'apercevoir l'univers des lampes. Les jugements négatifs portés sur le son des lampes sont émis dans un contexte "transis-

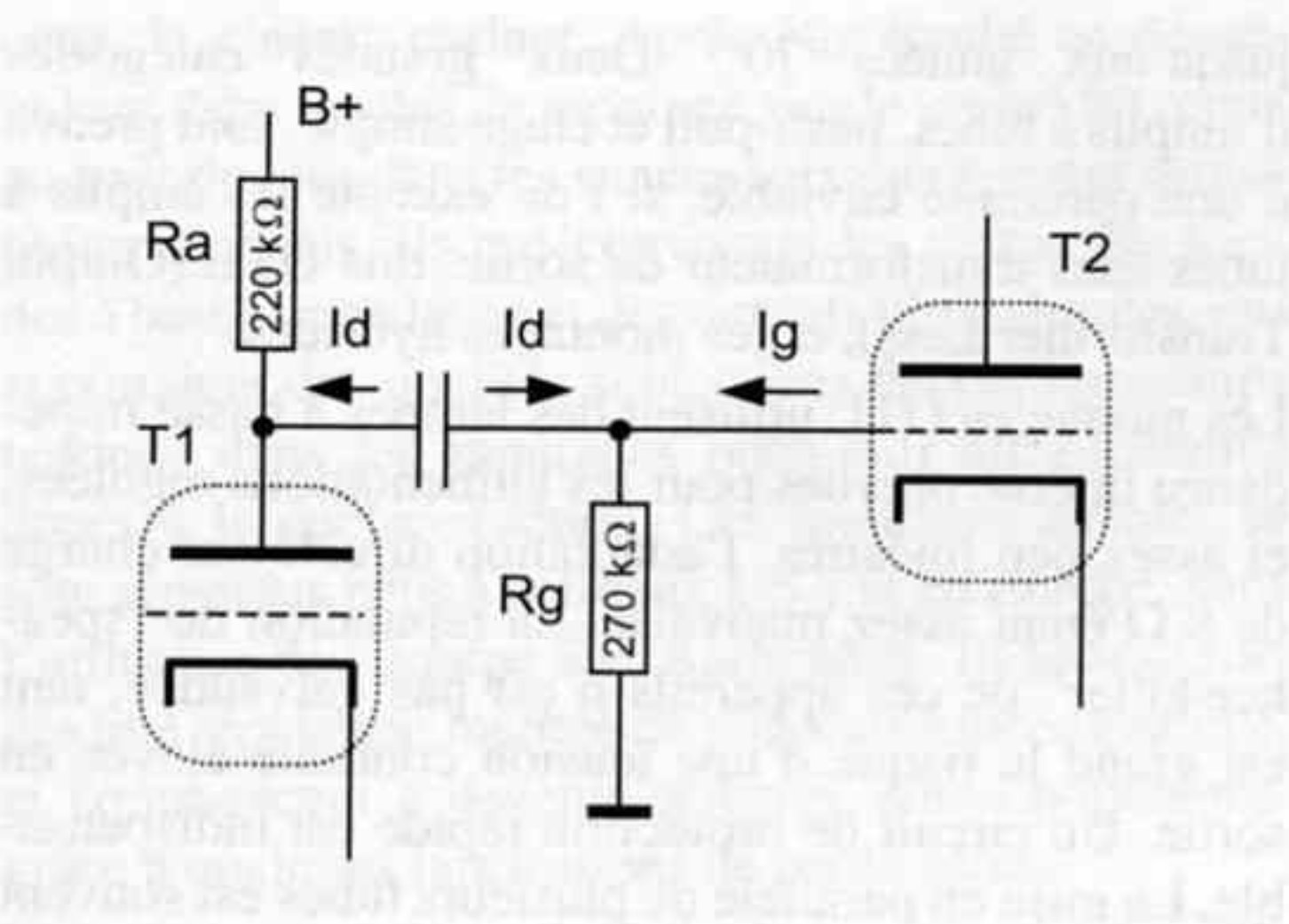
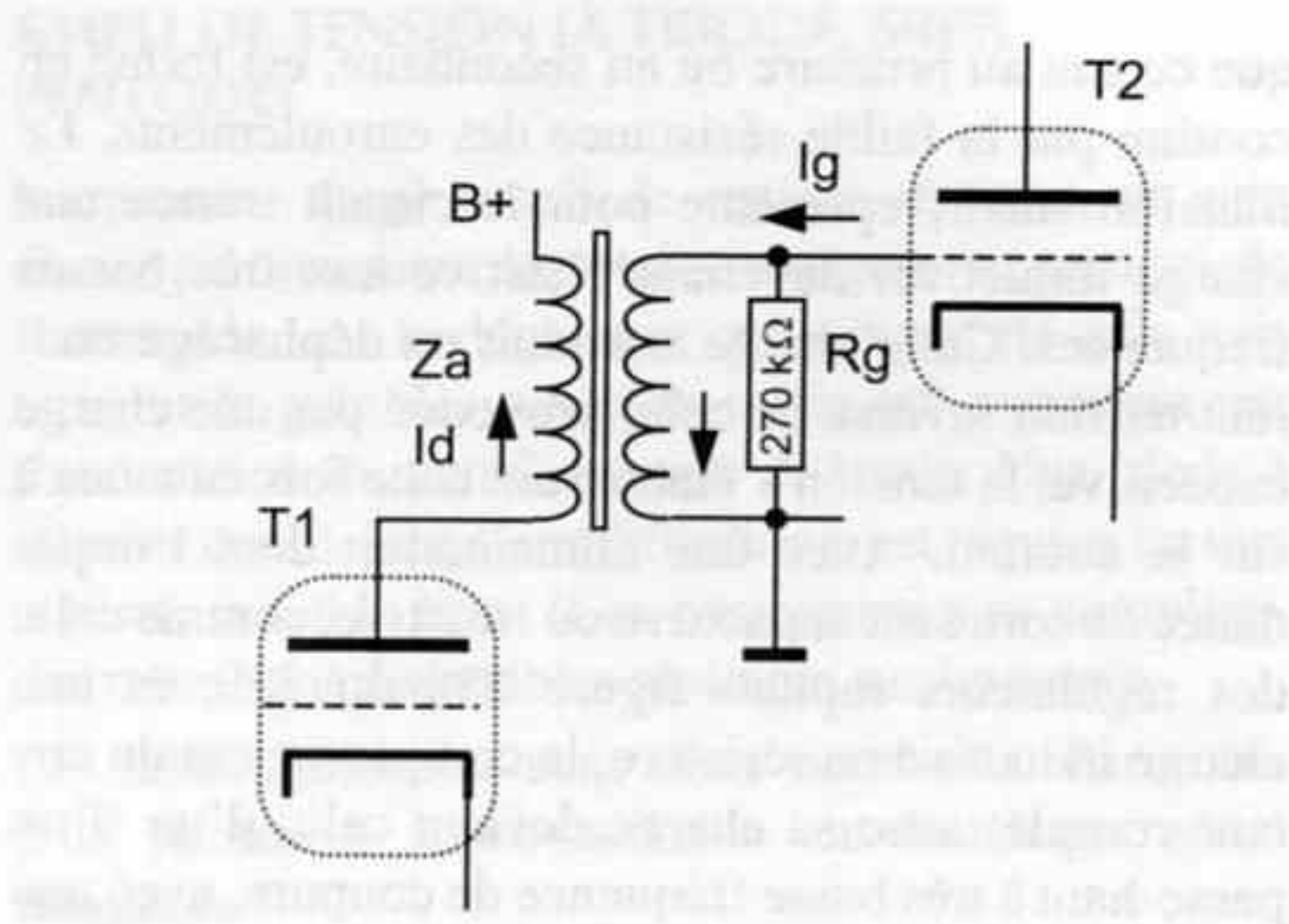


Figure 250 - Ci-dessus à gauche, le courant de fuite de grille I_g et surtout les courants I_d de "mémoire" des diélectriques du condensateur, mais aussi des câbles et capacités parasites, ne trouvent pas de voies d'évacuation à basse impédance, ni par le tube T1 de résistance interne 5 à 100 kΩ, ni par les résistances R_g et R_a supérieures à 100 kΩ. À droite, avec la liaison par



transformateur, les charges accumulées dans les diélectriques sont nettement plus faibles et les courants I_d comme I_g trouvent une voie à basse impédance vers la masse, éventuellement à travers l'alimentation. La faible résistance en continu de l'enroulement amorti correctement la liaison.

tors" avec un matériel standard mis en œuvre à la va-vite. Il me paraît absolument inutile de s'intéresser aux lampes avant d'en sentir réellement le besoin impérieux, et ce besoin est à mon avis lié à l'usage d'enceintes à très haut rendement, mettant en évidence les limitations des circuits à transistors, mais aussi les faiblesses de mise en œuvre du système.

Encore une fois, la hiérarchie est inscrite dans la démarche globale d'optimisation.

Autrement dit, avant d'aller encore plus loin, il faut être déjà... loin.

Fort heureusement, les orientations de conception qui ont été décrites pour les amplis à transistors sont autant de moyens de franchir les degrés vers cette porte d'un autre univers sonore. Un ampli conçu en respectant plus ou moins ces axes, et utilisant des lampes au lieu des semi-conducteurs, montre une supériorité assez nette pour restituer la sensation d'espace et de plénitude, celle de matière sonore. Le son rayonne et remplit l'espace sans l'alourdir, sans boucher la perspective. Cette sensation ne doit pas être confondue avec la fausse impression de chaleur, si souvent citée à propos des tubes, et de réverbération répétitive produite par l'effet microphonique auquel la plupart des lampes sont très sensibles.

Cette grande liberté et cette aération ont été attribuées aussi bien au redressement par valve, pour lequel les courants pulsés sont plus doux, de par la résistance interne élevée de la valve, qu'au filtrage par self. L'énergie élevée stockée dans les condensateurs, proportionnelle au carré de la tension de charge, et donc

notablement supérieure avec des tensions d'alimentation de 250 à... 2 000 V, a été vue comme un autre facteur positif de qualité sonore.

Il me semble bien que le transformateur de sortie soit en grande partie responsable de la sonorité "tubes".

En étudiant les cheminements des courants modulés dans les appareils audio, on constate que les boucles dans lesquelles ils circulent comportent au moins un condensateur en série, celui de l'alimentation, et parfois deux ou trois si des liaisons R-C sont utilisées, ce qui est incontournable dans la plupart des systèmes.

Ces condensateurs bloquent la composante continue indésirable et dangereuse, en ouvrant le circuit aux basses fréquences, introduisant une constante de temps et surtout un déphasage entre tension et courant. Dans un circuit comportant un condensateur, le courant est en avance sur la tension, ce qui signifie que l'alimentation doit débiter dans la charge avant que la tension ne s'établisse. La rapidité de montée de la tension, et par suite la vitesse d'établissement du signal, sont conditionnées par l'aptitude du circuit à délivrer de forts courants instantanés, transitoires, c'est-à-dire son dI/dt , vitesse de variation du courant de sortie. Avec une alimentation dont l'impédance de sortie est inductive ou irrégulière, comme celle des régulateurs habituels, et une charge capacitive, le circuit complet se comporte comme un filtre passe-bas, et sa réponse temporelle est retardée et déformée.

Au contraire un transformateur bloque la composante continue dans le domaine magnétique et non dans le domaine électrique. C'est le circuit magnétique qui est "ouvert" en continu, figure 250. Le circuit électrique,

que ce soit au primaire ou au secondaire, est fermé en continu par la faible résistance des enroulements. Le transformateur représente pour le circuit source une charge inductive, devenant résistive aux très basses fréquences. Cette charge introduit un déphasage courant/tension inverse de celui provoqué par une charge capacitive, la tension s'établissant cette fois en avance sur le courant. Avec une alimentation dont l'impédance de sortie est capacitive ou résistive, comme celle des régulateurs rapides figure 238 ou 239, et une charge inductive ou résistive, le comportement du circuit complet avec sa charge devient celui d'un filtre passe-haut à très basse fréquence de coupure, avec une réponse temporelle nettement plus satisfaisante.

D'autre part la liaison par condensateur présentant un circuit ouvert n'offre pas de voie d'évacuation aux charges parasites stockées dans les diélectriques, contrairement au transformateur présentant un circuit fermé.

L'élimination des condensateurs placés sur le trajet du signal apporte quel que soit l'appareil une amélioration subjective, parfois spectaculaire. Un système complet comporte souvent plusieurs liaisons capacitives, en sortie de lecteur CD, de préampli, en entrée d'ampli, et également dans les cellules de filtrage passe-haut des filtres d'enceintes, qu'ils soient actifs ou passifs. C'est dans le pire des cas un total de 5 ou 6 condensateurs en série sur le chemin du courant modulé audio, chacun d'eux apportant sa coloration, sa personnalité sonore, et son déphasage courant/tension aux basses fréquences.

Un équilibre, une sorte de compensation, ou plutôt une harmonie, sont trouvés lorsqu'il y a autant de liaisons par transformateur que de liaisons R-C. Le transformateur de sortie d'un ampli à lampes est donc tout à fait bénéfique. Un transformateur d'isolement en entrée d'amplificateur, un autre en liaison entre premier et deuxième étage, comme sur le schéma de droite figure 250, et pourquoi pas, un réglage de volume et même un ajustage de niveau de la voie médium par transformateur à prises, sont les possibilités d'implanter ce composant en divers points du système. Avec des noyaux en tôles ultra-minces (0,02 à 0,05 mm) de Permalloy (Fer-Nickel) ou de matériau amorphe, l'encombrement, le poids, le prix et dans certains cas les difficultés de réalisation et de mise au point augmentent considérablement.

Le réalisme de la restitution également.

LES TUBES DE MA JEUNESSE

Que reste-t-il après tant d'années des centaines de schémas, de variantes, d'idées géniales ou farfelues, de l'époque des tubes, qui s'est étalée des années 20

jusqu'aux années 70 ? Deux grandes catégories d'amplis à tubes, push-pull et étage simple, font preuve d'une pérennité enviable, si l'on excepte les amplis à tubes sans transformateur de sortie, dits OTL (Output Transformer Less), et les montages hybrides.

Les montages OTL utilisent des lampes à basse impédance interne prévues pour les alimentations régulées, et assez peu linéaires, l'adaptation directe sur charge de 8Ω étant assez mauvaise. La réputation de "speaker-killer" de ces appareils n'est pas galvaudée, tant est grand le risque d'une tension continue élevée en sortie. Un circuit de protection rapide est indispensable. La mise en parallèle de plusieurs tubes est souvent nécessaire, ce qui nuit à la transparence, mais surtout l'absence du transformateur de sortie ne va pas à mon avis dans le sens d'une harmonie, d'un équilibre, et bien que quelques modèles à base de triodes genre 6C33 donnent d'excellents résultats, leur caractère sonore penche plutôt vers un style d'écoute éthéré, aux sonorités artificiellement légères, avec une aération plus vraie que nature et un manque de matière, de masse, d'énergie et d'épaisseur, qui explique peut-être leur diffusion limitée.

Les montages hybrides assez peu fréquents également relèvent d'une tentation visant à cumuler les avantages procurés par les semi-conducteurs, utiles en certains points du circuit, et les tubes, mieux adaptés en d'autres points. Or les avantages en question ne sont pas liés à tel ou tel composant, mais à leur mise en œuvre donc aux choix de départ ayant orienté la conception. Lorsque ces choix ne sont pas formalisés, qu'ils ne découlent pas d'une intention et d'une démarche, mais sont effectués au seul niveau de la technologie, le résultat est souvent un mélange insipide. Il ne suffit pas de mélanger tel ingrédient au goût plaisant, avec tel autre à la texture agréable, pour obtenir de la grande cuisine, et j'ai bien peur qu'à part quelques rares exceptions les montages hybrides avec tubes en entrée et transistors en sortie ne cumulent les inconvénients des deux technologies. Les montages qui au contraire utilisent des transistors en entrée et des tubes avec transformateur en sortie sont très rares et le seul exemple connu semble être le Lectron JH30, apparu il y a une dizaine d'années et hautement apprécié.

Les deux configurations de circuit qui restent les plus répandues sont le push-pull et l'étage de sortie simple ou single-ended.

Ce dernier fut mis au point au tout début de l'électro-acoustique, dès 1917, pour des applications de téléphonie avec les premières triodes à chauffage direct Western-Electric VT-1 et VT-2, mais il fut rapidement dépassé par le montage push-pull apparu vers 1925 pour les besoins de sonorisation de grandes salles, puis

ceux du cinéma parlant. Après être tombé en désuétude et dans l'oubli, le montage single-ended fut remis au goût du jour dans les années soixante par des audiophiles japonais. Ils redécouvrirent les vertus des triodes à basse impédance et des circuits ultra-simples, qui apportaient des qualités subjectives depuis longtemps perdues dans les montages push-pull ultra-linéaires dopés à la contre-réaction. Ces montages simples se sont répandus petit à petit aux USA et en Europe, sous l'influence de l'équipe de l'Audiophile. Ils se sont forgés une réputation méritée de musicalité incomparable, et commencent à devenir célèbres, sinon populaires, grâce à quelques fabrications de petite série.

Les montages push-pull ont évolué eux aussi, pour culminer vers la fin des années 60 avec des réalisations complexes de 4 ou 5 étages, avec double ou triple push-pull de sortie en montage ultra-linéaire ou à charge répartie entre anode et cathode (MacIntosh), précédés d'un étage driver à faible impédance de sortie, d'un déphaseur, de deux étages d'amplification de tension, le tout contrôlé par une boucle de contre-réaction de taux élevé. Les mêmes excès dénoncés aujourd'hui dans les amplis à transistors ont à l'époque sévi dans le monde des lampes. L'histoire se répète, et les évolutions débordent dans un sens puis dans l'autre avant de parvenir à un équilibre, à une maturité. Un audiophile australien, D. Grimwood résume ainsi : "chaque technologie n'atteint ses ultimes perfectionnements qu'après être devenue obsolète".

DÉJÀ LE PUSH-PULL

Les montages push-pull les plus réputés sont bâtis sur des schémas très simples, autour de 3 étages :

- Amplificateur de tension, à base d'une triode, d'une pentode, ou d'un montage SRPP.
- Déphaseur de quatre types : Schmitt, paraphase, cathodyne et transformateur symétrique.
- Push-pull de sortie de tubes tétrodes ou pentodes, en mode ultra-linéaire ou pentode, avec transformateur de sortie adaptateur d'impédance.

La plupart des autres montages sont devenus anecdotiques, soit pour des raisons de difficulté de réalisation des transformateurs, soit parce qu'étudiés autour de tubes introuvables. L'industrie de l'ampli d'instrument, guitare en particulier, fait usage d'une grande quantité de tubes qui n'ont jamais cessé d'être fabriqués, en ex-URSS, en Chine, Serbie, Europe de l'Est et même aux USA. Ces tubes, les seuls disponibles pendant longtemps, ont permis à quelques schémas de survivre, de traverser les âges. Les autres sont morts et enterrés, sans doute définitivement car on voit mal comment reconstruire des tubes spécifiques adaptés à un seul type d'appareil.

AMPLI DE TENSION (À TRIODE, SRPP, PENTODE)

Le premier étage ampli de tension apporte un gain élevé, pratiquement la totalité du gain en tension de l'ensemble, car le déphaseur est souvent de gain unitaire, et le gain des tubes de sortie est compensé par l'atténuation du transformateur de sortie. Une triode à très fort coefficient d'amplification μ est requise, ou une pentode à faible bruit (Les caractéristiques complètes des tubes sont disponibles aisément sur Internet).

Les tubes utilisables sont assez nombreux. Parmi les plus faciles à approvisionner, en brochage noval miniature :

- Double triode 12AT7/ECC81 et assimilées, $\mu = 70$
- Double triode 12AX7/ECC83 et assimilées, $\mu = 100$
- Double triode 5751, $\mu = 70$
- Double triode 5755, $\mu = 70$
- Double triode 12AY7/6072 et assimilées, $\mu = 40$
- Double triode 6DJ8/ECC88 et assimilées, $\mu = 30$
- Pentode EF86/6267, possibilité de branchement en pseudo-triode
- Pentode EF80/6BX6, E80F,
- Pentode EF802, EF804S, EF805S, EF806S
- Pentode/triode 6AN8A
- Pentode/triode 7199
- Pentode/triode 6U8/ECF82

En brochage octal le choix est très réduit :

- Double triode 6SL7/6113, $\mu = 70$
- Pentode 6SJ7/5693

Citons également la pentode WE310A ou 328A et équivalents en brochage UZ 6 broches

Les schémas type d'utilisation sont donnés figure 251 à 254.

L'ampli de tension à triode est relativement simple à dimensionner. Le réseau de courbes I_p/U_p de la triode utilisée est indispensable, afin de tracer le point de repos et la droite de charge. Les fiches de caractéristiques du fabricant aident à choisir un point de repos adapté à l'utilisation. Ici un courant de repos élevé de 1 mA, avec une tension plaque de 150 V environ, entraîne une tension V_{gk} de 1,2 V aux bornes de $R_k + R'_k$. Une charge de plaque R_a élevée est choisie pour procurer un gain suffisant. La charge R_L à l'entrée de l'étage suivant est en parallèle sur R_a . Dans ces conditions le point de repos est en A, et l'excursion maximale du signal d'entrée est de $\pm 1,2$ V amenant le point de fonctionnement sur la droite de charge Dc en B ou C. La tension de sortie évolue entre 70 V en B et 230 V environ en C, le gain est donc de : $(230 - 70) / 2,4 = 67$ ou 36,5 dB.

Figure 252 - Le montage en SRPP, Shunted Regulated Push-Pull, apporte un gain élevé et une impédance de sortie basse, une distorsion faible, un signal maximal de sortie élevé. Une double triode ECC83 montée comme l'indique le schéma, avec alimentation de 500 V, soit 250 V par tube, et résistance R et Rk de 1 kΩ procure un gain de 36 dB et une impédance de sortie de 17,5 kΩ environ. La mise en parallèle de deux triodes divise par deux l'impédance de sortie. Les seuls inconvénients sont la tension d'alimentation très élevée et le nombre de tubes requis. Le chauffage des filaments et leur polarisation doivent être étudiés, ce point est abordé plus loin. Les équations caractéristiques sont, en négligeant R_L :

$$A = \mu(\mu \cdot R + \rho) / [(1 + \mu)(R_k + R) + 2\rho]$$
$$Z = \rho[R + \rho + (1 + \mu)R_k] / [(1 + \mu)(R_k + R) + 2\rho]$$

Le découplage de Rk entraîne Rk = 0 dans ces équations, il n'est possible que si la contre-réaction globale est absente. Toutes les doubles triodes peuvent profiter de ce montage, avec des résistances série (grid stopper) de 270 Ω environ dans les circuits de grilles pour la ECC88, dont la bande passante est très étendue et qui risquerait l'instabilité.

Figure 253 - Ci-contre, le circuit SRPP parallèle, modifié au niveau de la commande des grilles du tube supérieur, toutes deux pilotées par la tension aux bornes de R1, qui n'est pas perturbée par les courants consommés par la charge R_L .

En effet, le courant tiré par R_L ne traverse pas R2 ce qui entraînerait une diminution de polarisation de la moitié droite de T2 si sa commande était effectuée par R2. Cela produirait un débit de courant plus faible que prévu, et correspond donc à une impédance de sortie non négligeable. Au contraire en commandant T2 par R1, le courant consommé en sortie est sans effet sur la polarisation de T2, on a donc supprimé la réaction de la sortie sur l'entrée, et l'impédance de sortie est nettement diminuée. Elle devient celle du montage anode commune soit approximativement 1/s.

S est la pente du tube, soit 1,25 mA/V pour une ECC83 au point de fonctionnement choisi.

L'impédance de sortie est alors inférieure à 1 kΩ. Ce montage très performant fut mis au point par la société Bel Canto pour attaquer la grille des triodes 845, très difficiles à piloter. Ses possibilités en courant de crêtes sont très largement supérieures à celles de tout autre circuit de gain à tubes miniatures. Un étage de ce type réalisé avec des tubes à forte pente comme les ECC88/6DJ8 avec $s = 12,5$ mA/V constitue un étage de sortie de préampli très performant, dont l'impédance de sortie est de l'ordre de 80 Ω. Le courant de sortie est tout de même limité.

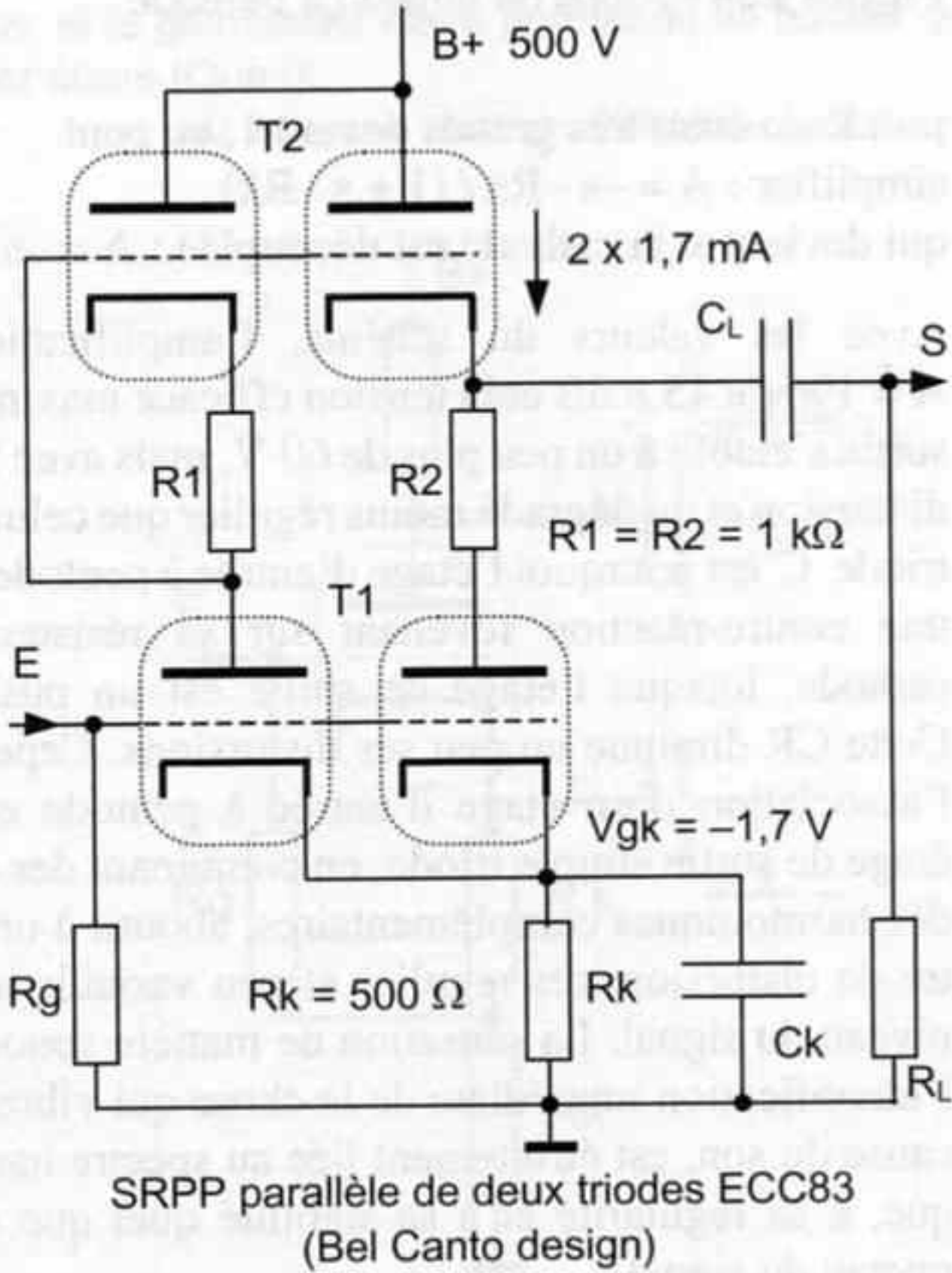
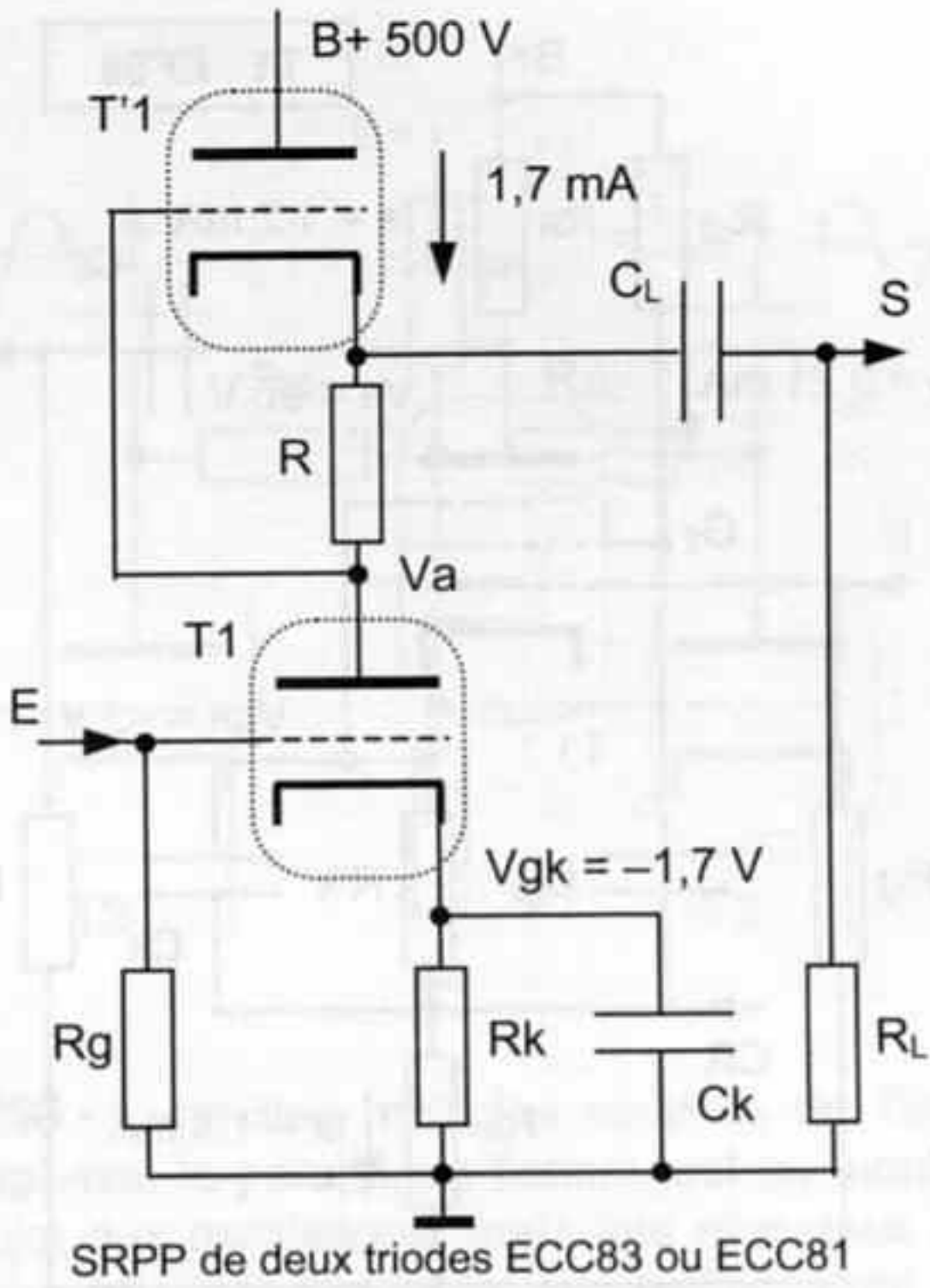
Ce condensateur, même de très haute qualité, apporte des colorations, de même que la forte impédance de sortie du montage, qui constitue avec la capacité d'entrée de l'étage suivant un filtre passe-bas introduisant une limitation de la bande passante vers les hautes fréquences.

Par contre la capacité d'entrée d'un tube pentode est nettement plus faible que celle d'une triode. La bande passante de l'étage d'entrée à pentode risque par

conséquent d'être plus large que celle des étages qui suivent, avec des conséquences néfastes déjà signalées. Le tube EF86 est souvent utilisé en pseudo-triode avec la grille G2 reliée à l'anode, ce qui supprime ces désagréments, diminue le bruit de fond mais aussi le gain.

Les équations caractéristiques sont :

$$A = -\mu \cdot R_a / [R_a + \rho + (\mu + 1)R_k]$$
$$= -s \cdot R_a / [(R_a / \rho) + 1 + (\mu + 1)R_k / \rho]$$



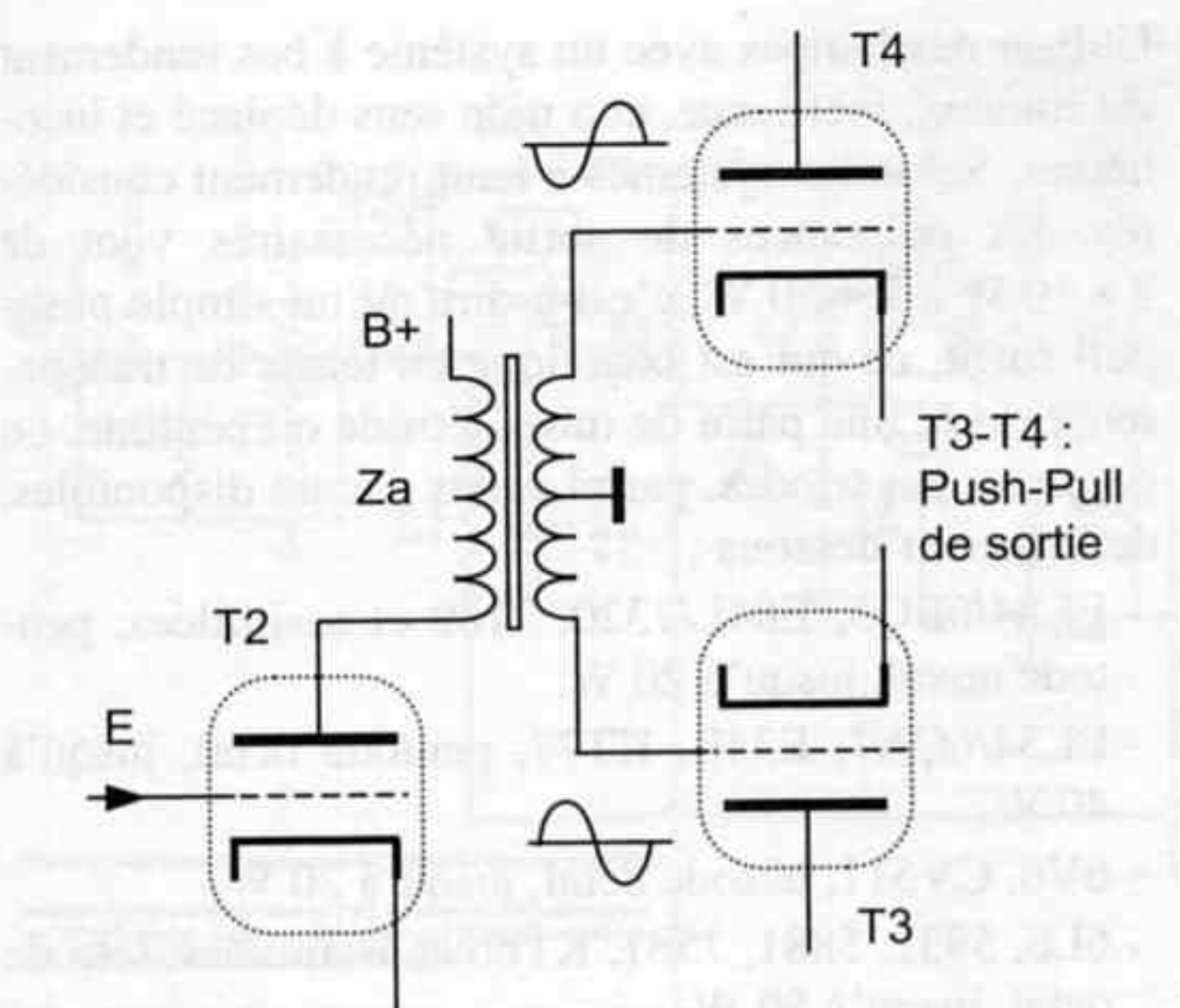


Figure 255 - Le déphasage par transformateur-driver est le plus simple à mettre en œuvre. Il fournit des signaux rigoureusement identiques si les enroulements secondaires sont symétriques, ou mieux, bifilaires. Inconvénients : taille, poids, prix, réponse aux basses fréquences parfois atténuée, à cause de l'entrefer obligatoire.

(J. Mornand, schémas d'électronique tome 1)

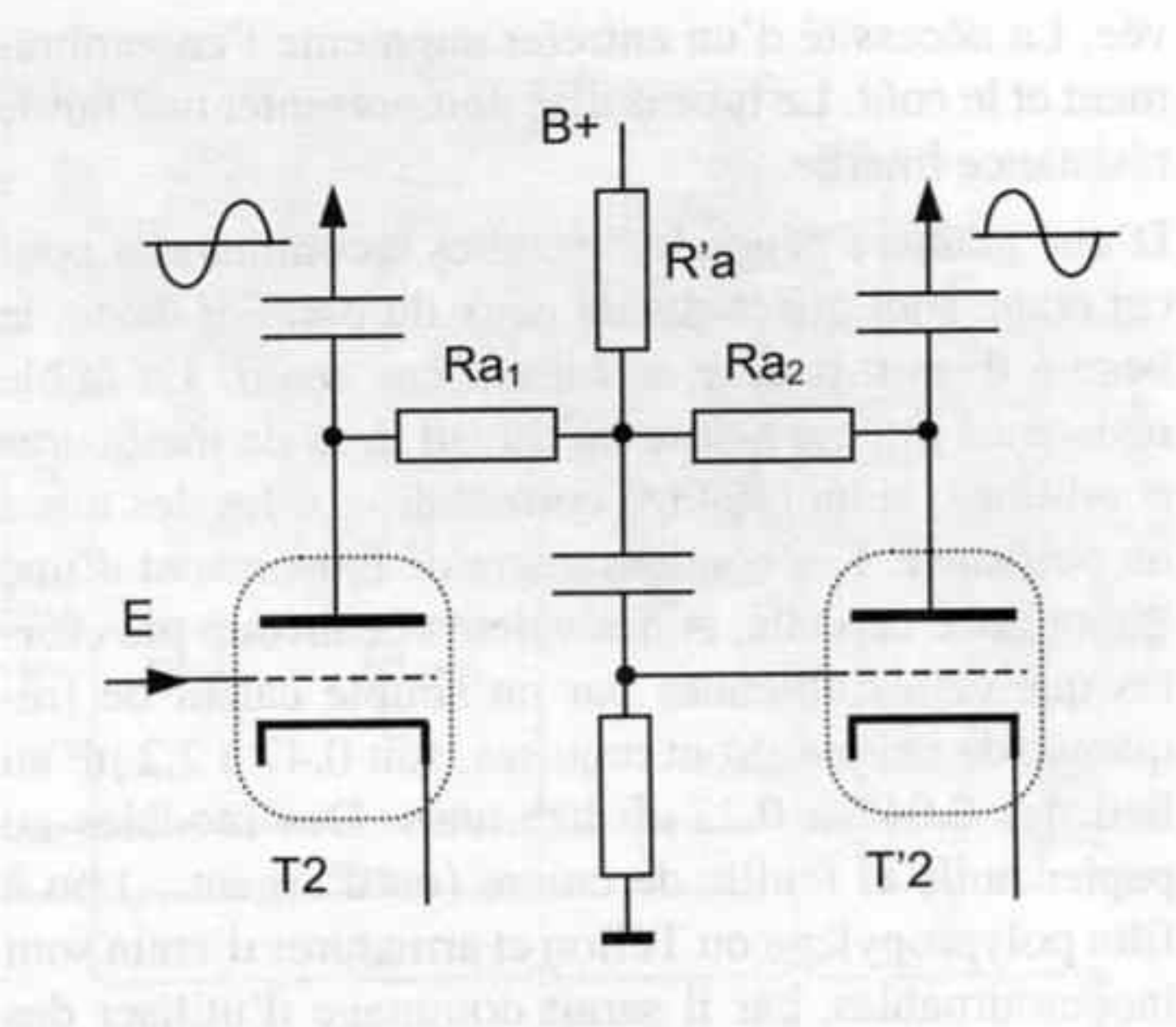


Figure 256 - L'une des multiples versions de l'inverseur paraphase, le paraphase flottant, est un montage délicat sujet aux oscillations, mais très silencieux et à faible distorsion, peu sensible au vieillissement des tubes. Le déphasage est exact sur toute la plage de fréquence, et le gain assez élevé permet de se passer du premier étage (Quad).

(J. Mornand, schémas d'électronique tome 1)

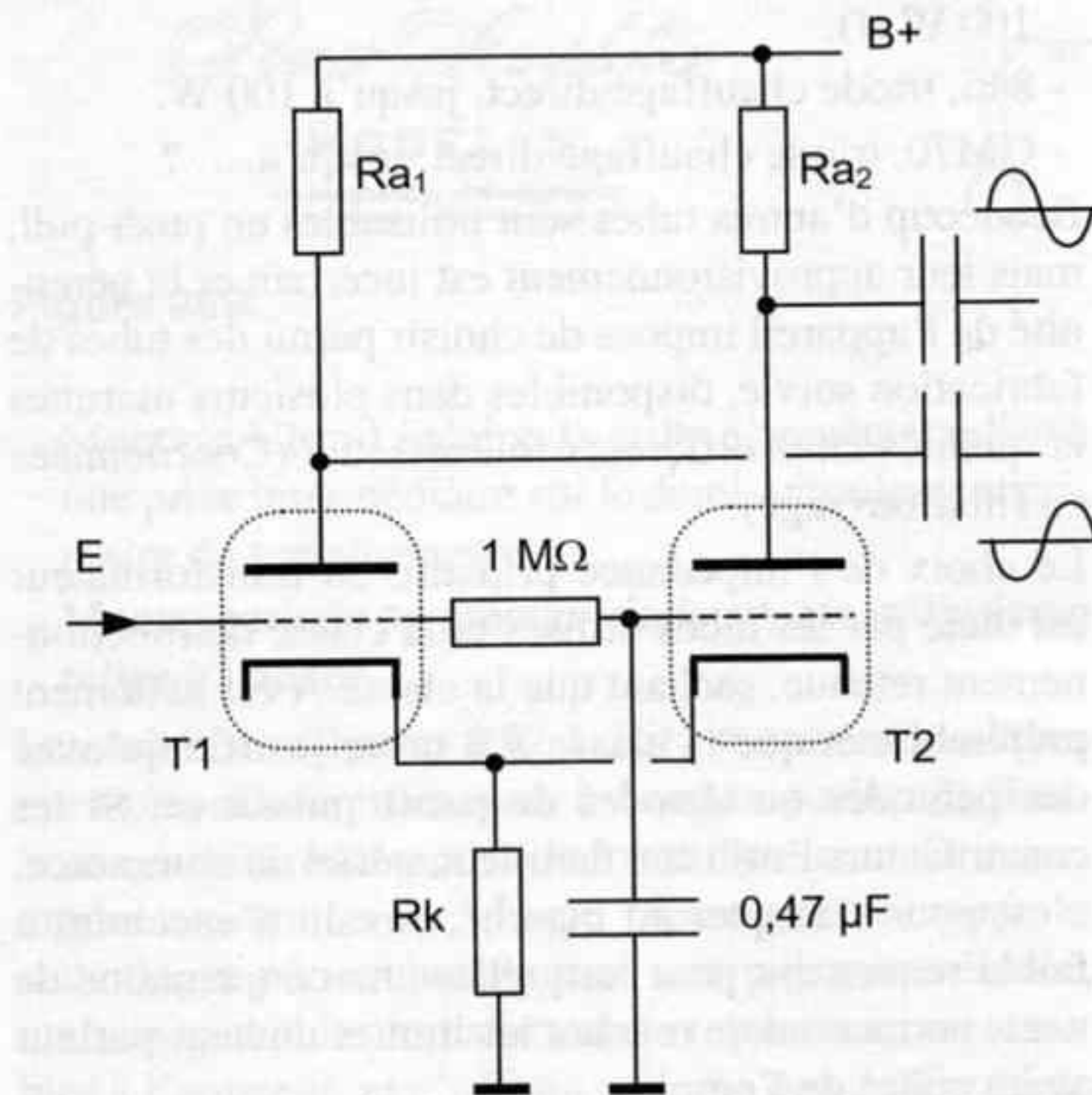


Figure 257 - Le déphaseur de Schmitt est d'une stabilité intéressante grâce à Rk commune aux deux triodes. Les impédances sur les deux sorties sont identiques, constantes et assez faibles, et le gain important. Par contre les tensions de sorties sont légèrement déséquilibrées, à moins d'augmenter Rk, et les distorsions sont élevées, le tube 2 amplifiant les distorsions du tube 1.

(J. Mornand, schémas d'électronique tome 1)

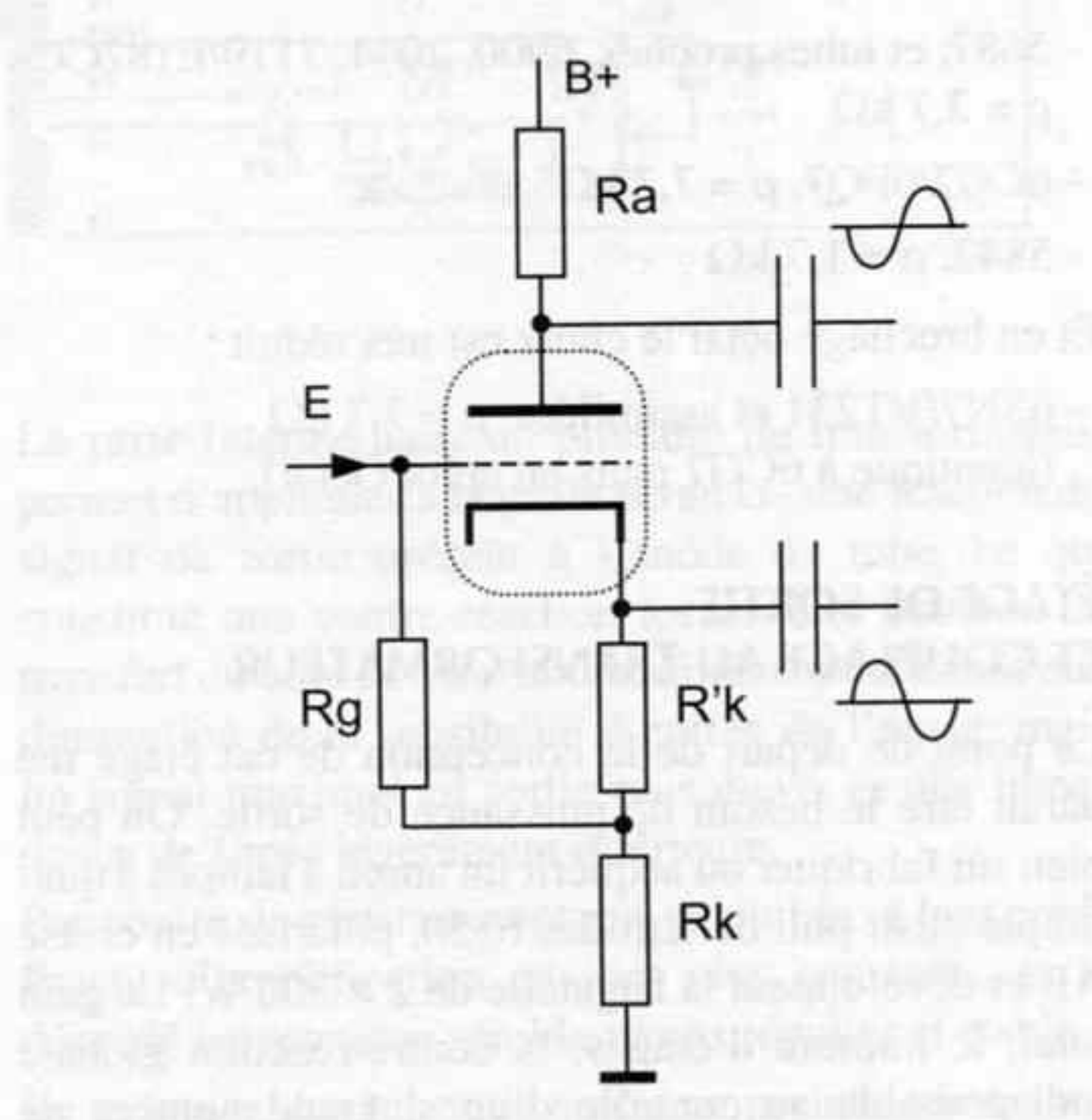


Figure 258 - Le déphaseur cathodyne, grâce à la contre-réaction série due au courant traversant Rk, possède une stabilité inébranlable et un taux de distorsion infime. L'impédance n'est pas identique sur les deux sorties, ce qui peut produire une légère dissymétrie des tensions de sortie aux fréquences élevées, et le gain est très légèrement inférieur à 1. Choisir des résistances inférieures à 20 kΩ, et un tube à fort courant, 5 mA au moins.

(J. Mornand, schémas d'électronique tome 1)

vée. La nécessité d'un entrefer augmente l'encombrement et le coût. Le tube utilisé doit présenter une faible résistance interne.

D'une manière générale, les tubes recommandés pour cet étage sont différents de ceux du premier étage, le besoin d'un fort μ ne se faisant pas sentir. La faible résistance interne assure un travail dans de meilleures conditions, et un pilotage correct des grilles des tubes de puissance. Les condensateurs de liaison sont d'une importance capitale, et des valeurs beaucoup plus fortes que celles obtenues par un simple calcul de fréquence de coupure sont requises, soit 0,47 à 2,2 μF au lieu des 0,047 à 0,22 μF habituels. Des modèles au papier huilé et feuille de cuivre (ou d'argent...) ou à film polypropylène ou Téflon et armatures d'étain sont incontournables, car il serait dommage d'utiliser des lampes à la moitié de leur qualités musicales (Audio-Note, Jensen, SCR).

Les tubes utilisables pour l'étage déphaseur sont, entre autres en brochage 9 broches miniature :

- ECC 82/12AU7 et assimilées, $\rho = 7,7 \text{ k}\Omega$
- ECC 88/6DJ8 et assimilées, $\rho = 3 \text{ k}\Omega$
- 12BH7A, $\rho = 5,5 \text{ k}\Omega$
- 5687, et tubes proches, 6900, 7044, 7119/E182CC, $\rho = 2,7 \text{ k}\Omega$
- 6CG7/6FQ7, $\rho = 7,7 \text{ k}\Omega$
- 5842, $\rho = 1,7 \text{ k}\Omega$

Et en brochage octal le choix est très réduit :

- 6SN7/VT231 et assimilées, $\rho = 7,7 \text{ k}\Omega$
(identique à 6CG7 mais en culot Octal).

ÉTAGE DE SORTIE ET COUPLAGE AU TRANSFORMATEUR

Le point de départ de la conception de cet étage me paraît être le besoin de puissance de sortie. On peut bien sûr fabriquer ou acquérir un ampli à lampes à quadruple push-pull de tétrodes 6550, polarisés en classe AB et développant la bagatelle de $2 \times 300 \text{ W}$. Le gain total, le nombre d'étages, la contre-réaction globale indispensable au contrôle d'un si grand nombre de tubes, vieillissant différemment, font qu'il ressemblera étrangement à un circuit à transistors, sauf qu'il sera plus gros, plus lourd et plus cher, et qu'il se comportera nettement mieux avec les enceintes difficiles à "driver", à bas rendement.

Néanmoins le résultat global sera inférieur à celui obtenu avec un petit ampli intégré à transistors en classe A associé à une paire d'enceintes à pavillons. La comparaison est édifiante et permet de comprendre que quoi que l'on fasse en amont, c'est le haut-parleur qui décide, c'est lui qu'on entend.

Utiliser des lampes avec un système à bas rendement est ruineux, inefficace, et a mon sens déplacé et incohérent. Selon les systèmes à haut rendement considérés, les puissances de sortie nécessaires vont de $2 \times 10 \text{ W}$ à $2 \times 50 \text{ W}$, c'est-à-dire qu'un simple push-pull suffit, ce qui est bénéfique en terme de transparence, avec une paire de tubes tétrode ou pentode, ou pourquoi pas triodes, parmi celles encore disponibles, de la liste ci-dessous :

- EL84/6BQ5, E84L/7320, 7189 et assimilées, pentode noval, jusqu'à 20 W.
- EL34/6CA7, E34L, KT77, pentode octal, jusqu'à 40 W.
- 6V6, CV511, tétrode octal, jusqu'à 20 W.
- 6L6, 5932, 5881, 7581, KT66 et assimilées, tétrode octal, jusqu'à 50 W.
- 6550, tétrode à faisceau dirigé octal, jusqu'à 60 W.
- KT88, KT90/99 tétrode à faisceau dirigé octal, jusqu'à 70 W.
- 2A3/5930, triode chauffage direct, jusqu'à 12 W.
- 300B, 4300 et équivalents, triode chauffage direct, jusqu'à 25 W.
- 211/VT4C, triode chauffage direct, jusqu'à 100 W (!).
- 845, triode chauffage direct, jusqu'à 100 W.
- GM70, triode chauffage direct, jusqu'à.... ?

Beaucoup d'autres tubes sont utilisables en push-pull, mais leur approvisionnement est incertain et la pérennité de l'appareil impose de choisir parmi des tubes de fabrication suivie, disponibles dans plusieurs marques et qualités chez différents fournisseurs (Coordonnées en fin d'ouvrage).

Le choix de l'impédance primaire du transformateur est dicté par les tubes utilisés et la classe de fonctionnement retenue, sachant que la classe A est nettement préférable, et que la classe AB ne se justifie qu'avec des pentodes ou tétrodes de petite puissance. Si les constructeurs l'utilisent dans le matériel du commerce, c'est pour s'adapter au marché, envahi d'enceintes à faible rendement pour lesquelles une cinquantaine de watts permettent de toucher les limites du haut-parleur avant celles de l'ampli...

Si le besoin d'une puissance de l'ordre de 30 W est réel, alors un push-pull de tétrodes 6550 en pure classe A donnera de bien meilleurs résultats qu'une paire de tubes EL84 en classe AB. Le coût de réalisation sera un peu plus élevé, mais on ne fait pas d'économie avec les lampes !

Les trois principaux types de branchement des tubes avec le transformateur de sortie sont définis par le branchement de la grille écran G_2 :

- Montage en pentode (ou tétrode), la grille écran étant portée à un potentiel fixe.

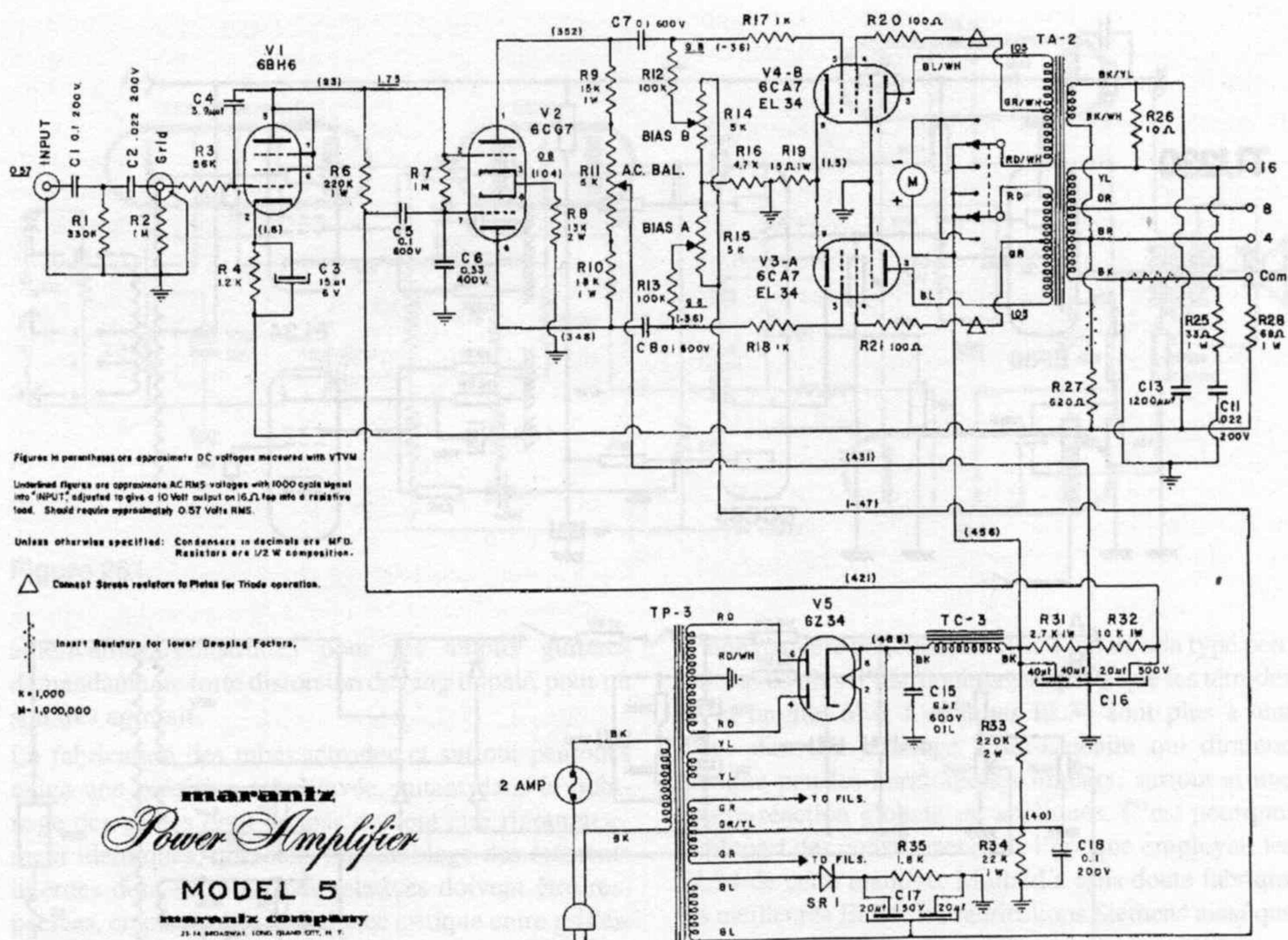


Figure 259.

- Montage Ultra-Linéaire, la grille écran étant reliée à une prise intermédiaire sur le demi-enroulement primaire du transformateur.
- Montage triode ou pseudo-triode avec la grille écran reliée à l'anode.

Les schémas (figures 259 à 261) montrent quelques exemples d'amplificateurs à lampes push-pull illustrant ces différents modes de fonctionnement. D'autres modes existent, avec charge répartie entre anode et cathode, et permettant de tirer une puissance élevée, mais exigeant des transformateurs spéciaux inaccessibles à l'amateur, et n'offrant que très peu de liberté de conception et d'évolution.

Figure 259 : étage d'entrée à pentode 6BH6 montée en pseudo-triode, déphaseur de Schmitt avec la double triode 6CG7, identique à la 6SN7 mais en Noval, et simple push-pull de pentodes EL34 en mode ultra-linéaire. Le transformateur de sortie a un enroulement secondaire séparé pour la contre-réaction globale. Le redressement est assuré par la valve 6Z34 et le filtrage comporte une self. On n'a pas fait beaucoup mieux depuis.

La prise intermédiaire au primaire du transformateur permet d'appliquer à la grille écran G_2 une fraction du signal de sortie présent à l'anode du tube, ce qui constitue une contre-réaction locale. Les courbes de transfert du tube se trouvent modifiées, produisant une diminution de la sensibilité d'entrée de l'étage, mais un signal maximal en sortie plus élevé, et une impédance de sortie légèrement inférieure.

Par contre, la résistance interne des tubes et leur coefficient d'amplification ne sont plus constants, et le dégradé harmonique semble moins régulier et stable.

Le montage des tubes de sortie en pseudo-triodes est possible, mais la puissance chute sérieusement. La sonorité obtenue gagne en aération et en naturel, la dynamique semble mieux répartie.

Le schéma suivant (figure 260) montre une réalisation artisanale, sur laquelle des comparaisons des différents montages ont été effectuées.

Même le tube d'entrée 6BH6 est monté en triode, la sonorité globale est donc typée triode, avec un son clair et ouvert, ample et léger. La puissance est de l'ordre de 2×25 W et s'avère suffisante avec des mini-Onken. Le dégradé harmonique n'est pas aussi

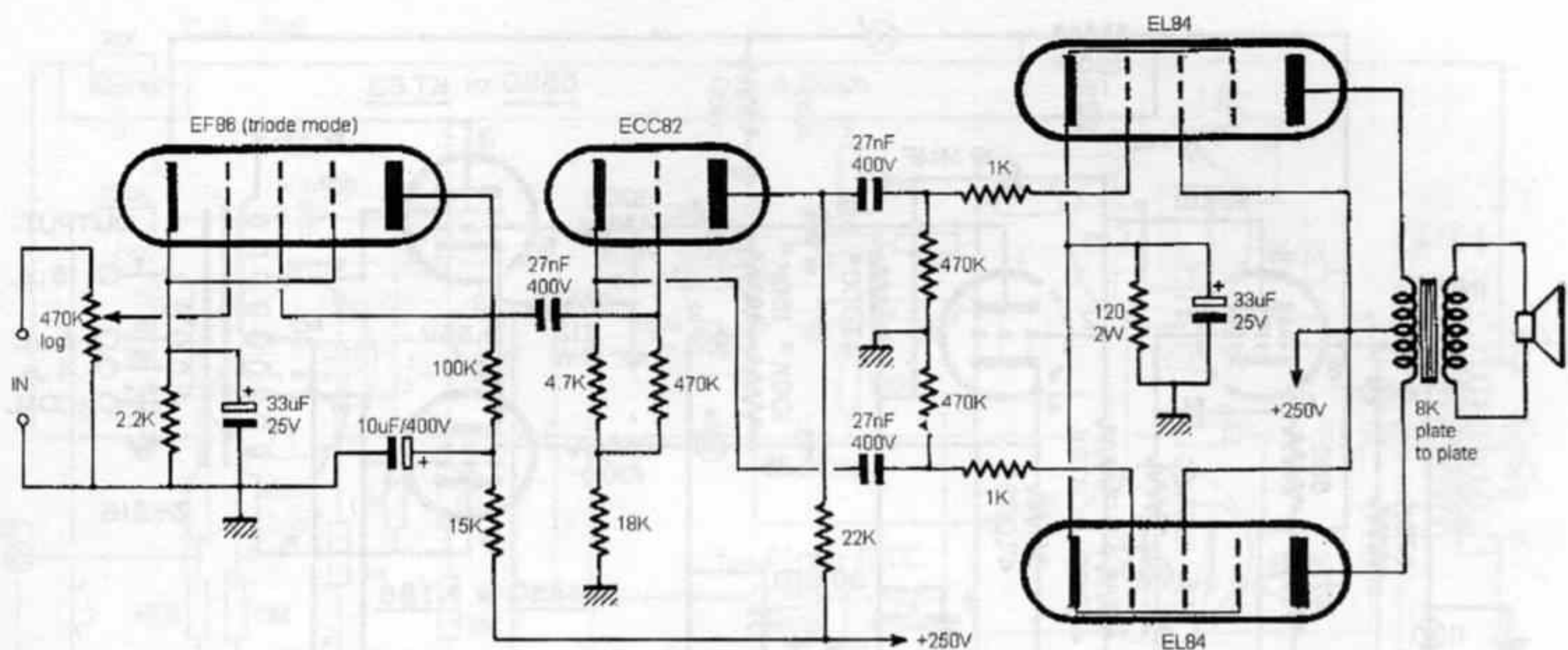


Figure 261.

américaines, construites pour les amplis guitares demandant une forte distorsion de rang impair, pour un son très agressif.

La fabrication des tubes tétrodes et surtout pentodes exige une précision très élevée, autant dans le bobinage des grilles dont les pas doivent être rigoureusement identiques, que dans l'assemblage des éléments internes dont les positions relatives doivent être respectées, en particulier la distance critique entre grilles. Les difficultés de réalisation sont sans commune mesure avec celle d'une simple triode.

On peut distinguer deux familles, issues des recherches concurrentes menées en Europe et au USA entre 1930 et 1950.

La plus ancienne de ces familles descend de la première tétrode à faisceau dirigé, qui fut créée par Shade et la RCA en 1936. Baptisée 6L6, elles donna naissance à une longue lignée, construite sur les mêmes gabarits : 6V6, 807, 6L6G, GA, GB, GC, WGB, 5881, 7581 et 5932, tous ces tubes sont des 6L6. La plupart ont été fabriqués aux USA par Tungsol, RCA, Sylvania ou General-Electric. Philips en Europe en réalisa d'excellente facture, en particulier les STR387, appelées 7581 en version militaire et très prisées des guitaristes, sans doute grâce à son taux élevé d'harmonique 3.

En Angleterre, Genalex produisit la célèbre KT66, très réputée dans sa version "Gold Lion", puis plus tard vers 1950 la fameuse KT88.

Aux USA, la concurrente RCA copia la recette et sortit la 6550, devenue 6550A.

La seconde famille est apparue au début des années 50 pour contourner les brevets déposés par RCA : Mullard lança en 1953 un tube concurrent des 6550, mais plus économique à fabriquer, la pentode EL34. Sa petite sœur EL84 suivit bientôt.

D'une manière générale, les EL34 ont un son typé pentode, avec plus d'harmoniques impairs que les tétrodes de la famille 6L6. Ces tubes EL34 sont plus à leur place dans un montage Ultra-Linéaire qui diminue quelque peu les harmoniques impairs, surtout si une contre-réaction globale est appliquée. C'est pourquoi la plupart des constructeurs de l'époque employait les EL34 de cette manière. Mullard a sans doute fabriqué les meilleures EL34, les fabrications Siemens ainsi que les actuelles JJ-Tesla étant d'une très haute qualité.

Les fabrications américaines de General-Electric, de référence 6CA7, sont en fait des tétrodes qui présentent une qualité musicale exceptionnelle. Elles ont été fabriquées également en Angleterre sous la référence KT77. Ces deux versions sont très rares et très recherchées.

Les tubes EL34 vendus sous les marques Sovtek (diverses fabrications distribuées par New-Sensor, USA) Electro-Harmonix, ou STR E34L (origine Sylvania ?) sont mieux adaptés aux amplis pour guitare.

Les fabrications approximatives, ou avec des dispersions élevées, ne sont pas rares dans cette famille. Une mesure des débits de courants à l'anode, mais aussi à la grille-écran, permet de juger rapidement du sérieux de fabrication. Un courant d'écran trop élevé indique à coup sûr un mauvais alignement des grilles, ce qui entraîne un taux d'harmonique impair élevé. Le fournisseur effectue ce contrôle lors de l'appareillage des tubes.

Les plus petites EL84/6BQ5 ou 7320, support Noval, sont évidemment très économiques mais ne se justifient plus vraiment aujourd'hui. Les versions Mullard, Philips ou G-E sont les plus recherchées, et parmi les

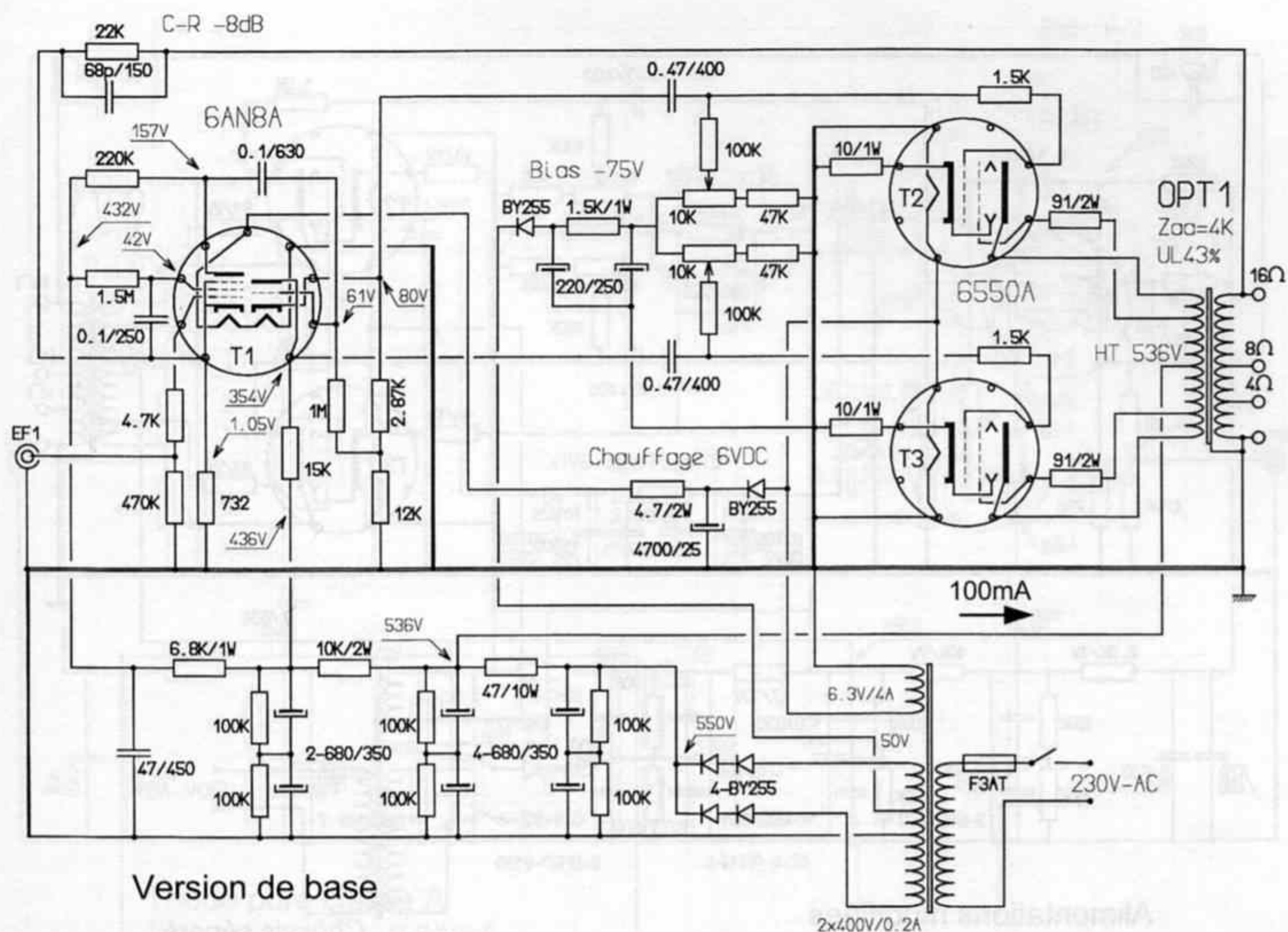


Figure 263 - Avec un bruit de fond situé vers -92 dB, la **version de base** laisse entendre dans les voies grave et médium un ronflement 50 et 100 Hz, doublé d'un crépitement gênant. L'absence de self de filtrage n'est pas la seule responsable, pas plus que l'appariage indispensable des tubes, malgré la présence des

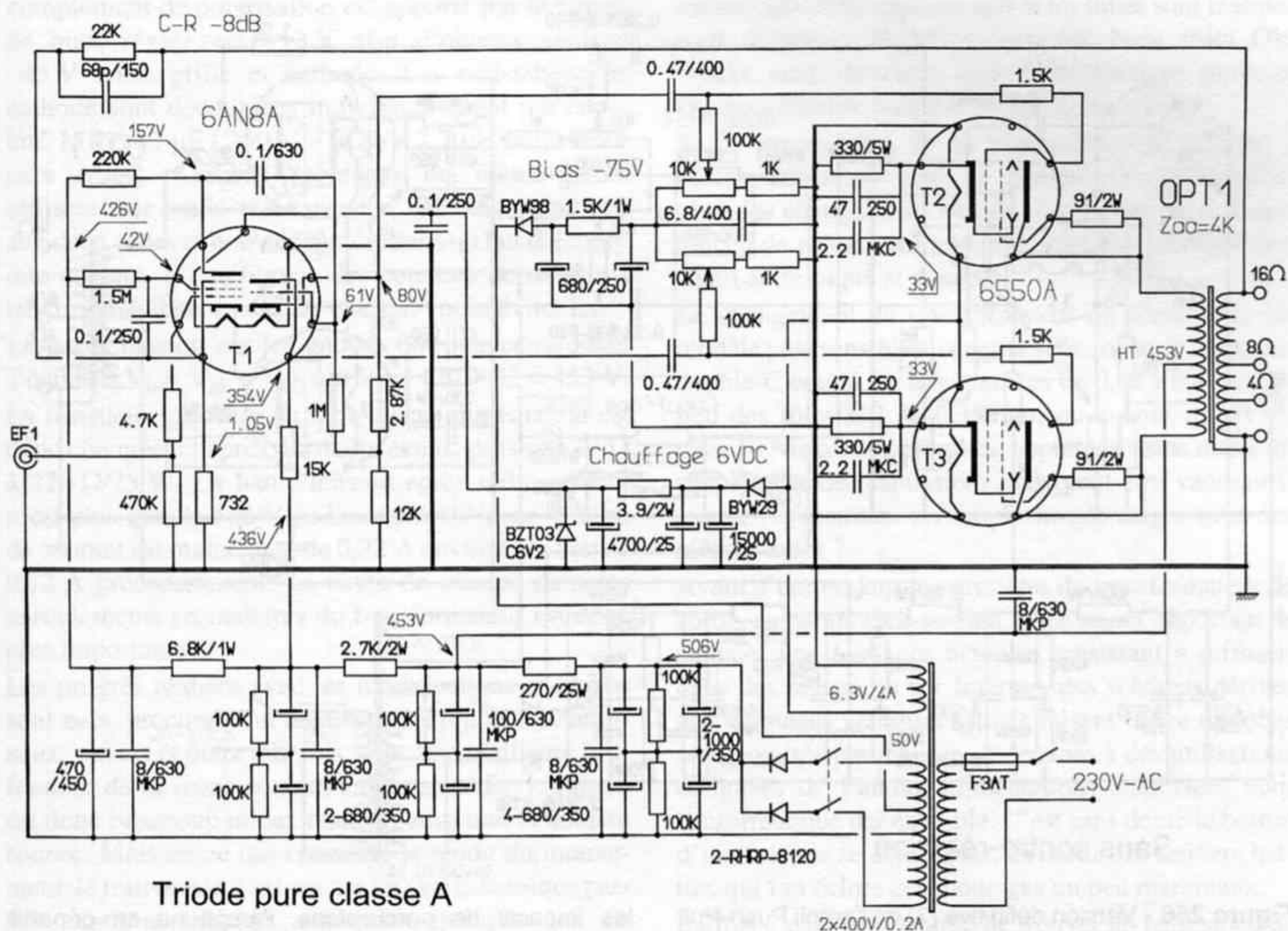
réglages individuels de polarisation grille. La recherche des sources de bruit de fond est souvent longue et fastidieuse, et c'est son analyse spectrale qui permet d'en identifier les causes. Les remèdes en découlent alors presque directement...

C'est en passant d'un fonctionnement en pentode classe AB, qui n'a rien à faire dans le monde de la très haute-fidélité, à un branchement ultra-linéaire avec courant de repos plus élevé, pour aboutir à la pure classe A, puis au fonctionnement en triode, pour finalement supprimer la contre-réaction globale devenue inutile, que l'on constate que chaque réduction de la puissance de sortie et du rendement s'accompagne d'une amélioration subjective très positive, à condition que le système puisse rendre compte du gain de transparence. Ces modifications des amplificateurs à lampes doivent être effectuées petit à petit, pas par pas, seulement quand le besoin s'en fait sentir. Après quelques expérimentations, essais et comparaisons, les limites du circuit push-pull sont assez vite cernées. Elles sont souvent liées au transformateur de sortie.

ÉVOLUTIONS D'UN SIMPLE PUSH-PULL

Pour illustrer ces possibilités d'évolution des amplificateurs à lampes, je présente figure 263 un ampli en blocs mono, push-pull de tétrodes 6550A, montage Ultra-Linéaire de 60 W. La version de départ est polarisée en classe AB avec un courant de repos de 50 mA par tube. La polarisation est réglable, pour obtenir 0,5 V aux bornes des résistances de cathode de 10 Ω . Les figures 264 à 266 montrent les modifications successives, aboutissement d'essais étalés sur plusieurs mois.

C'est au départ la nécessité d'améliorer le rapport signal sur bruit qui a motivé les premières modifications. Le filtrage imparfait de la haute tension (ronflement clair à 100 Hz, en dents de scie), mais aussi le chauffage en courant redressé mal lissé du tube d'entrée (ronflement sourd à 50 Hz), ainsi qu'un rayonnement parasite du transformateur d'alimenta-



Triode pure classe A

Figure 265 - La pure classe A se traduit par une baisse assez considérable du rendement. En effet, La puissance de sortie passe à 25 W alors que la dissipation totale atteint 120 W environ. Toutes les résistances traversées par un fort courant sont choisies du type bobiné, soit vitrifiée genre RB57 pour les cathodes, soit

6,3 V ! Une diode rapide et deux capacités de 15 000 μF ont permis un lissage énergique, et une stabilisation par diode Zener 3 W de 6,2 V, elle aussi découplée par 4 700 μF + 0,1 μF /MKP a ramené l'ondulation à quelques mV. L'influence de cette tension de ronflement sur les cathodes des tubes d'entrée est souvent négligée, à tort.

Toutes ces modifications d'alimentation, regroupées sur la figure 264, ont apporté une amélioration décisive du bruit de fond (environ -112 dB), se traduisant par une dynamique nettement plus grande, et une sensation de "nettoyage" des sons assez étonnante.

Une self en lieu et place de la résistance de $47\ \Omega$ aurait amélioré encore le fonctionnement du filtrage en π en tête de l'alimentation, mais la place manquait...

Le but de l'amélioration suivante était l'obtention d'une texture de timbre plus précise, plus réaliste, respectant mieux la matière des instruments, en particu-

en boîtier à visser pour châssis genre RCH25 ou 50 pour l'alimentation. Multiplier par 2 la dissipation calculée $P = RI^2$ afin d'assurer une tenue correcte des résistances aux plus hautes températures... Et laisser de l'air autour !

lier dans le secteur haut-médium/aigu. Les sons métalliques des percussions, cymbales ou triangle par exemple, manquent de piqué, de brillance, et sont un peu chuintants, avec des impacts peu précis et pas assez focalisés. Le bas médium est un peu épais, trop riche.

Un passage en mode pseudo-triode des tubes de puissance, en reliant la grille-écran à l'anode, fait baisser l'impédance interne des tubes de $12\text{ k}\Omega$ à $670\ \Omega$, ce qui permet une bien meilleure adaptation au primaire du transformateur de sortie, figure 265. La capacité parasite de ce primaire demande en effet aux tubes des courants croissants avec la fréquence. Une impédance interne basse permet de charger cette capacité parasite sans effort, repoussant ainsi la fréquence de coupure haute bien au-delà de la bande audio, près de 50 kHz . Le registre aigu se trouve ainsi totalement libéré, comme on doit s'y attendre avec des triodes.

complément de polarisation est apporté par le circuit de bias, réglé vers -12 V afin d'obtenir environ -45 V entre grille et cathode. Les résistances de cathode sont découplées individuellement par capacité MKP $47\text{ }\mu\text{F} / 250\text{ V} - \text{SCR} + 2,2\text{ }\mu\text{F}$ polycarbonate MKC. Certains montages du même genre utilisent une seule résistance de cathode, commune aux deux tubes et non découplée, dans un but d'économie évident. L'équilibrage des courants de repos est très instable dans ce cas, ce que j'ai voulu éviter ici.

La haute tension sur les anodes doit par conséquent s'établir à $V_b = V_{ak} + V_{k0}$ soit $V_b = 420 + 33 = 453\text{ V}$. La résistance du filtre en π de tête d'alimentation est donc changée, et après plusieurs essais, passe de $47\text{ }\Omega$ à $270\text{ }\Omega / 25\text{ W}$. La haute tension après redressement n'est plus que de 506 V au lieu de 550 V , car le débit de courant est maintenant de $0,22\text{ A}$ environ, au lieu de $0,12\text{ A}$ précédemment. La chute de tension dans les enroulements secondaires du transformateur est donc plus importante.

Les progrès réalisés avec les modifications ci-dessus sont nets, procurant un aigu beaucoup plus fin, lumineux, ouvert et doux à la fois, avec une meilleure profondeur de la scène sonore, ample et aérée. L'espace est donc beaucoup mieux restitué, ainsi que la matière sonore. Mais en ce qui concerne le rendu du mouvement, le trait musical est encore un peu mécanique parfois, comme saccadé, manquant quelque peu de liberté.

La contre-réaction globale, pourtant de taux modéré, semble responsable de cette particularité. Les distorsions induites par le transformateur de sortie sont principalement non-linéaires, ni avec la fréquence, ni avec le niveau du signal. En particulier, le circuit magnétique réalisé en tôles au silicium d'épaisseur $0,3\text{ mm}$ est assez peu sensible aux petits signaux (voir paragraphe suivant). La contre-réaction ne peut corriger convenablement ce type de distorsions, ce qui se traduit par une altération des petits signaux.

La suppression pure et simple de cette ligne de contre-réaction est possible, figure 266, à condition de revoir le calcul du premier étage, afin de diminuer son gain. Le gain global de l'ampli doit en effet rester le même, soit 30 dB . Par conséquent, la résistance de charge d'anode de l'ampli de tension (section pentode du tube combiné 6AN8A) est diminuée, et après plusieurs essais, c'est une valeur de $150\text{ k}\Omega$ qui est retenue.

La résistance d'écran est diminuée également pour s'établir à $1\text{ M}\Omega$, et la haute tension alimentant cet étage est ramenée aux environs de $285\text{--}290\text{ V}$ avec une résistance de $100\text{ k}\Omega$ en amont du découplage de $470\text{ }\mu\text{F}$.

Enfin pour apporter une touche finale, cerise sur le gâteau, les condensateurs de liaison sont changés pour des modèles Audio-Note au papier huilé et feuilles de

cuivre (AN-PIO, paper in oil) et les tubes sont maintenant d'époque, N.O.S. c'est-à-dire New from Old Stocks, neufs de stocks anciens, Sylvania en entrée et General-Electric pour les 6550A appareillées.

Si la suppression de la contre-réaction globale a incontestablement rendu le médium plus expressif et libre, les changements de composants ont apporté une touche de raffinement, une transparence, un équilibre subtil entre piqué et douceur.

Le changement du transformateur de sortie pour un modèle plus sensible aux petits signaux, avec noyau en double-C coupé, en tôles minces de $0,05$ à $0,1\text{ mm}$ au lieu des tôles E-I de $0,35\text{ mm}$, ou encore mieux en tôles au Nickel ou amorphes, apporterait sans doute un supplément de respiration, mais peut-être vaudrait-il mieux reconstruire un ampli simple-étage, avec les mêmes tubes ?

Avant d'entrer dans les mystères du transformateur de sortie, au paragraphe suivant, il me paraît important de signaler une tendance actuelle consistant à diffuser, dans des revues ou sur Internet, des schémas dérivés des montages classiques, mais faisant usage de tubes rares, ou très particuliers, et destinés à des utilisations éloignées de l'audio, alimentations stabilisées pour l'informatique par exemple. C'est sans doute le besoin d'innover, de se démarquer, de sortir des sentiers battus, qui fait éclore ces montages un peu marginaux.

Parfois c'est l'opportunité de trouver un petit stock de tubes neufs à prix intéressant (déstockage, brocante ou vide-grenier) qui amène le concepteur à développer un montage autour de ces tubes, puis à le publier si les résultats sont corrects.

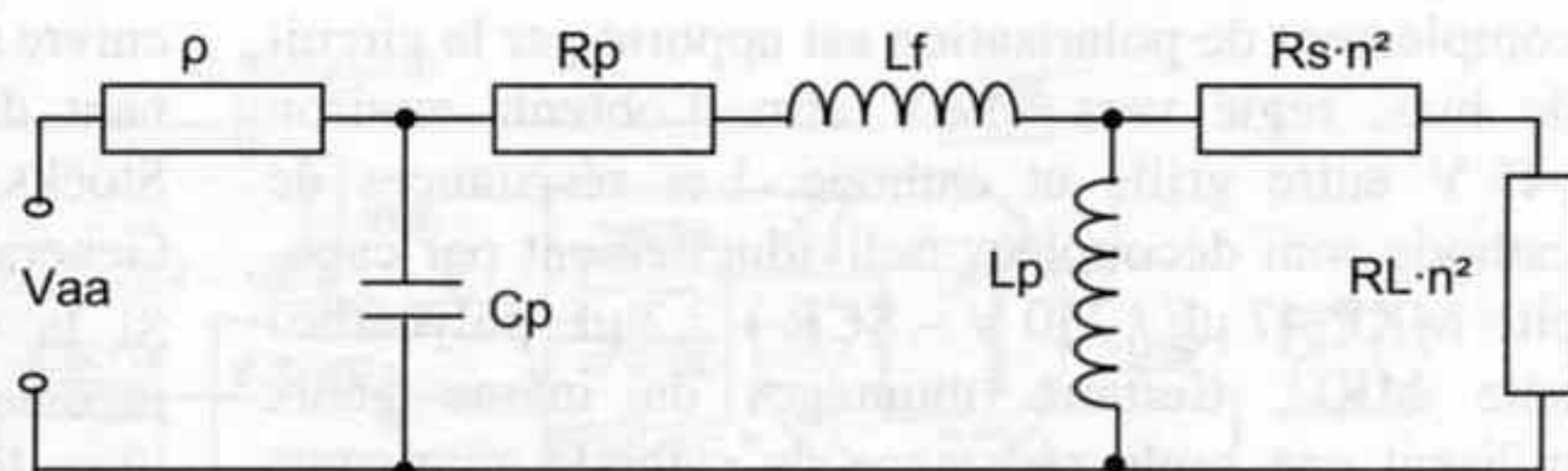
Vouloir alors à tout prix refaire le même appareil, et partir pour cela à la recherche des tubes en question, quitte à les acheter au prix fort alors qu'ils ne sont pas les plus intéressants d'un point de vue musical, me semble complètement hors de propos. Préférer les tubes classiques et innover sur les alimentations et le transformateur de sortie, ainsi que les liaisons, apporte plus de liberté tout en assurant la pérennité de l'appareil.

9.5 Transformateur de sortie

UN SANDWICH AVEC NOYAU

Le transformateur de sortie est une pièce maîtresse de l'amplificateur, et sa réalisation demande un savoir-faire particulier, qu'assez peu de constructeurs maîtrisent. Les techniques de bobinage en sandwich, qui alternent les couches du primaire et celles du secondaire, permettent un excellent couplage de ces enroulements, diminuant l'inductance de fuite du primaire, c'est-à-dire la "portion" de bobinage primaire qui n'est pas chargée par le secondaire. Cette induc-

Figure 267 - Vu de la plaque des tubes de puissance, le transformateur de sortie de rapport $n = N_p / N_s$ (nombres de tours des enroulements) est un filtre passe-bande complexe. Son comportement aux fréquences élevées est lié aux capacités parasites C_p du primaire, et à son inductance de fuite L_f , ainsi qu'à la résistance interne ρ des tubes de sortie. Les résistances des enroulements primaire R_p et secondaire R_s sont souvent négligeables.



Modèle électrique, ramené au primaire, du transformateur de sortie. D'après M. van der Veen, *Amplificateurs à tubes de 10 à 100 W à transformateurs de sortie toriques* (cf bibliographie).

tance L_f fictive, mais néanmoins active, forme avec les capacités parasites C_p entre spires du primaire, un filtre du deuxième ordre, figure 267, qui peut présenter une résonance aux fréquences élevées, selon les valeurs relatives de L_f et C_p .

D'autre part la résistance interne des tubes ρ forme avec ces mêmes capacités un filtre de premier ordre. Si les deux fréquences de coupure de ces deux filtres sont trop proches l'une de l'autre, des irrégularités dans les réponses fréquentielle et temporelle sont à craindre, se traduisant par des suroscillations après chaque front montant. L'effet subjectif de ces dépassements est généralement une sonorité plus brillante, scintillante, avec un côté métallique renforcé, un manque de soyeux et de finesse du grain. En classe AB, les commutations des tubes de puissance, qui cessent de conduire à chaque demi-alternance, font varier brutalement la charge du primaire, provoquant également une oscillation de ce circuit L-C peu amorti.

Le transformateur ne fait que refléter au primaire l'impédance de charge R_L reliée au secondaire, en la multipliant par le rapport des enroulements élevé au carré. Le simple fait de charger un peu plus le secondaire suffit parfois à réduire ces suroscillations, car l'impédance ramenée au primaire est alors plus faible, et par conséquent les fréquences de coupure se trouvent déplacées vers le bas, l'amortissement du filtre étant également augmenté. Un réseau R-C en parallèle avec l'enceinte réalise cet amortissement, qu'il est possible de régler finement en visualisant sur l'oscilloscope la forme des signaux carrés à 10 kHz à la sortie de l'amplificateur. Les bons transformateurs montrent des carrés réguliers, avec des fronts peu inclinés et des plateaux bien plats, et de petits arrondis dans les angles. Ils n'ont pas besoin d'être amortis extérieurement. Eventuellement, une petite capacité supplémentaire inférieure à 1 nF aux bornes du primaire, en parallèle avec C_p , procure le même effet.

Cependant une réponse haute fréquence bien maîtrisée ne suffit pas à garantir un comportement correct du transformateur. D'inévitables distorsions prennent

naissance dans le noyau, du fait que la perméabilité magnétique μ_r n'est pas constante mais varie avec l'induction B à l'intérieur du noyau, figure 268.

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES ET CONSTRUCTION

Par principe, dans l'étage de sortie push-pull, le champ magnétique permanent dans le noyau du transformateur est nul, les courants circulant au repos dans les deux branches du push-pull étant égaux et de signes opposés. Les particules magnétiques élémentaires appelées domaines de Weiss, et qui s'orientent dans le sens des lignes de champ, renforçant l'inductance du bobinage, ne sont pas "excitées" au repos, μ_r est alors faible et l'inductance n'est pas à son maximum dans ces conditions. Par contre, lorsqu'un courant dissymétrique circule, les particules magnétiques quittent leur position de repos et leur mobilité augmente, ainsi que μ_r et l'inductance du bobinage devient plus forte. Aux forts courants, toutes les particules sont orientées dans le sens des lignes de champ, et une augmentation de ce champ n'est donc plus possible. C'est la saturation du noyau, l'inductance chute au-delà. L'inductance primaire du transformateur, qui définit son impédance, n'est donc pas constante mais minimale lorsque le signal est à zéro, et augmentant de part et d'autre. L'impédance de charge des tubes est donc variable avec le niveau du signal de part et d'autre du zéro. Si l'impédance interne des tubes est faible par rapport à leur impédance de charge, ce qui est le cas des triodes, cet effet est minimisé, mais pas annulé. Avec des pentodes, dont la résistance interne est très élevée, les petits signaux sont étouffés, absents et le son paraît simplifié, synthétique.

Les variations de μ_r avec le champ magnétisant H sont données par le fabricant du matériau magnétique du noyau, figure 269.

Ces variations de perméabilité se répercutent directement sur la valeur de l'inductance primaire L_p et de l'inductance secondaire L_s , qui sont liées par le rapport de transformation n : $L_p = n^2 \cdot L_s$

Avec n rapport des nombres de spires au primaire N_p et au secondaire N_s , soit $n = N_p / N_s$

Figure 268 - Le champ magnétique H créé par le passage du courant modulé au primaire, induit dans le noyau une induction B dont la variation n'est ni linéaire, ni symétrique. Elle suit une courbe qui décrit un cycle d'hystérésis. La perméabilité relative du noyau $\mu_r = B_a / H_a$ varie en tous points de cette courbe, dans de grandes proportions. Le champ coercitif est le champ magnétique $H_c < 0$ nécessaire pour ramener l'induction à zéro lors de ce cycle. Dans un montage push-pull le courant primaire évolue autour de zéro, et le champ H fait de même, ce qui entraîne un changement de sens de l'induction B à chaque demi-alternance du signal, l'hystérésis entraînant une forte distorsion du courant. Au contraire dans un circuit simple-étage, fonctionnant autour du point i par exemple, ces grandeurs évoluent localement et la perméabilité incrémentielle est $\mu_\Delta = \Delta B / \Delta H$. Elle est beaucoup plus faible que μ_r mais presque constante au cours d'une alternance complète, et varie assez peu avec le niveau du signal.

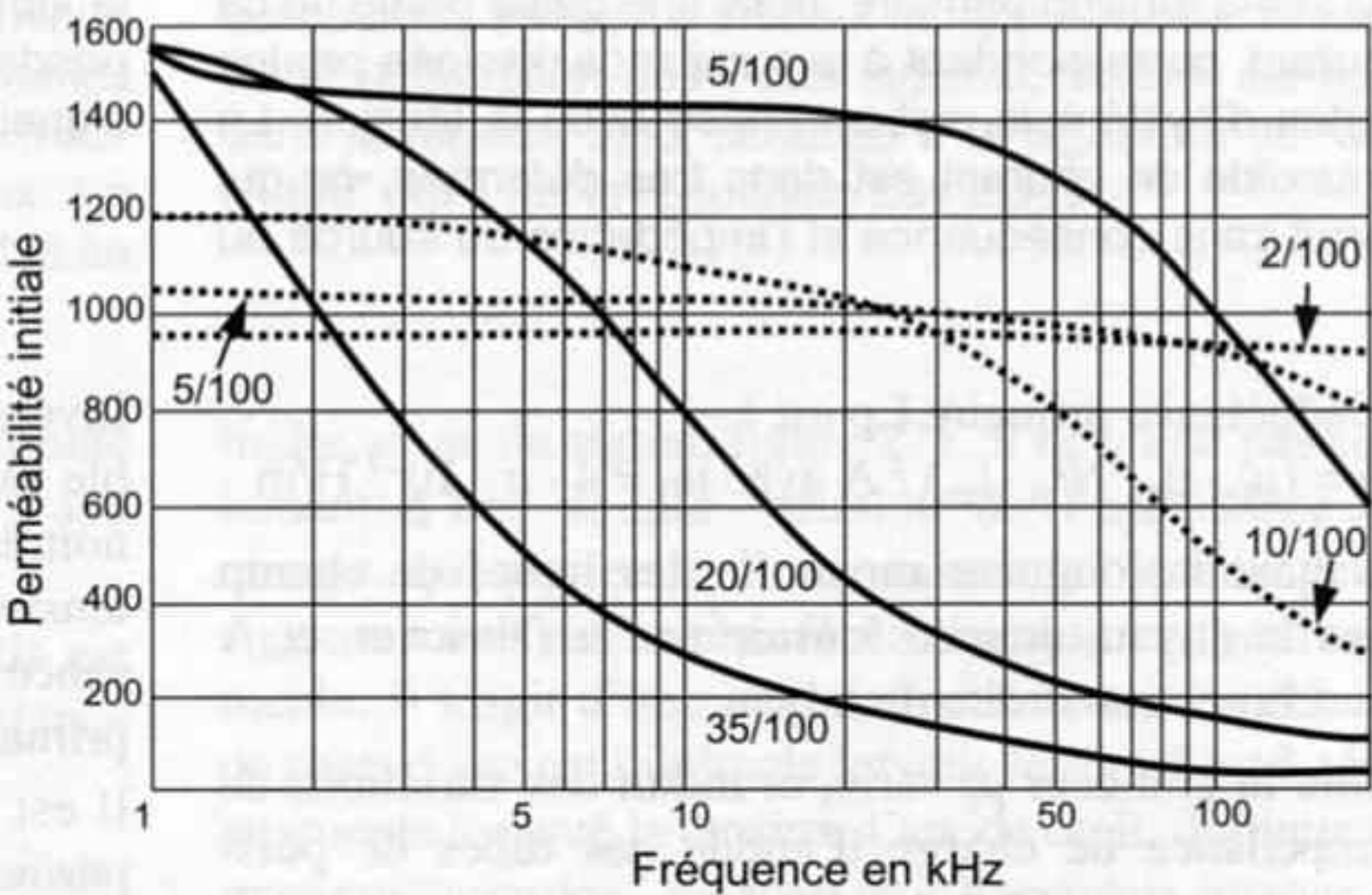
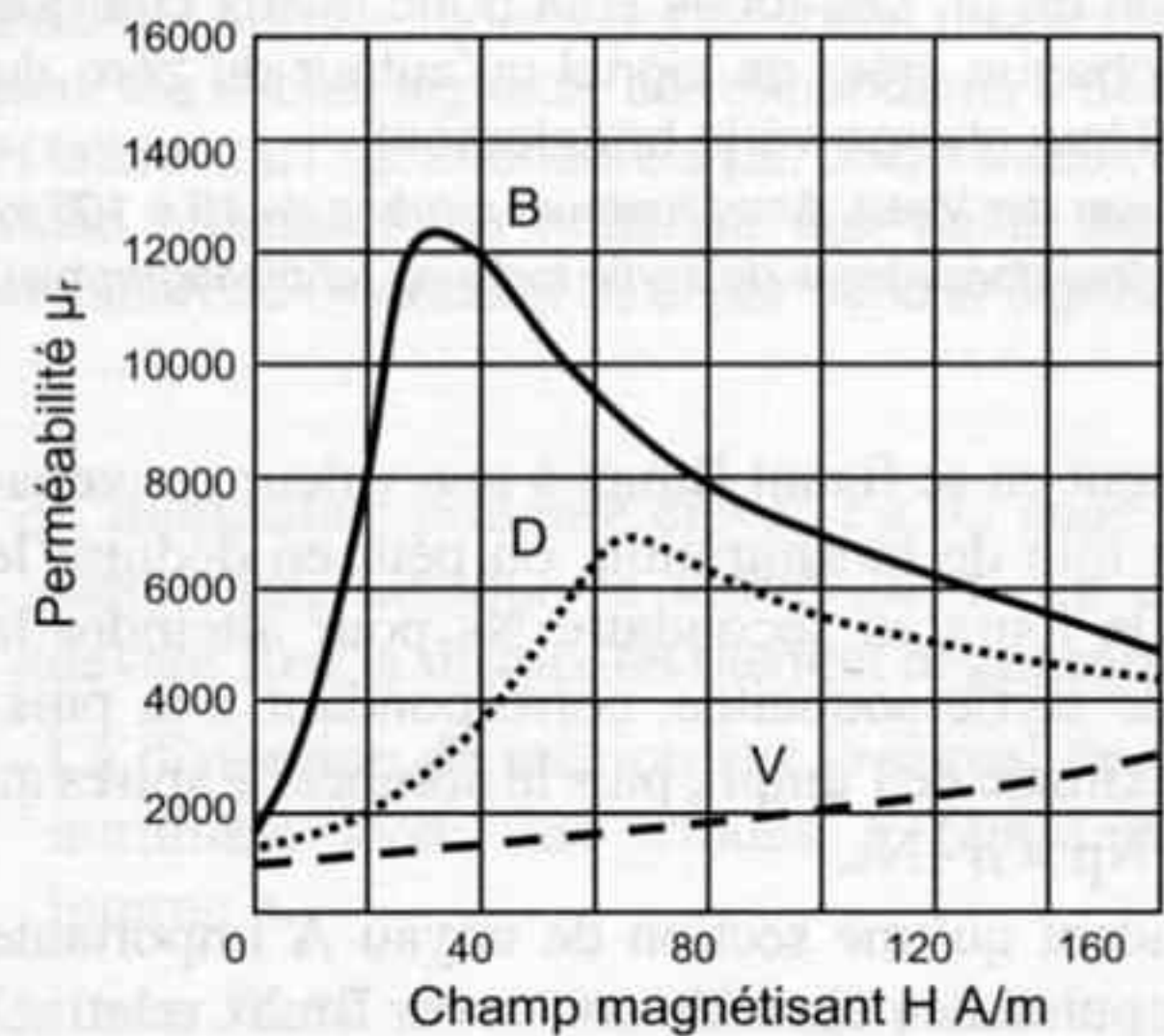
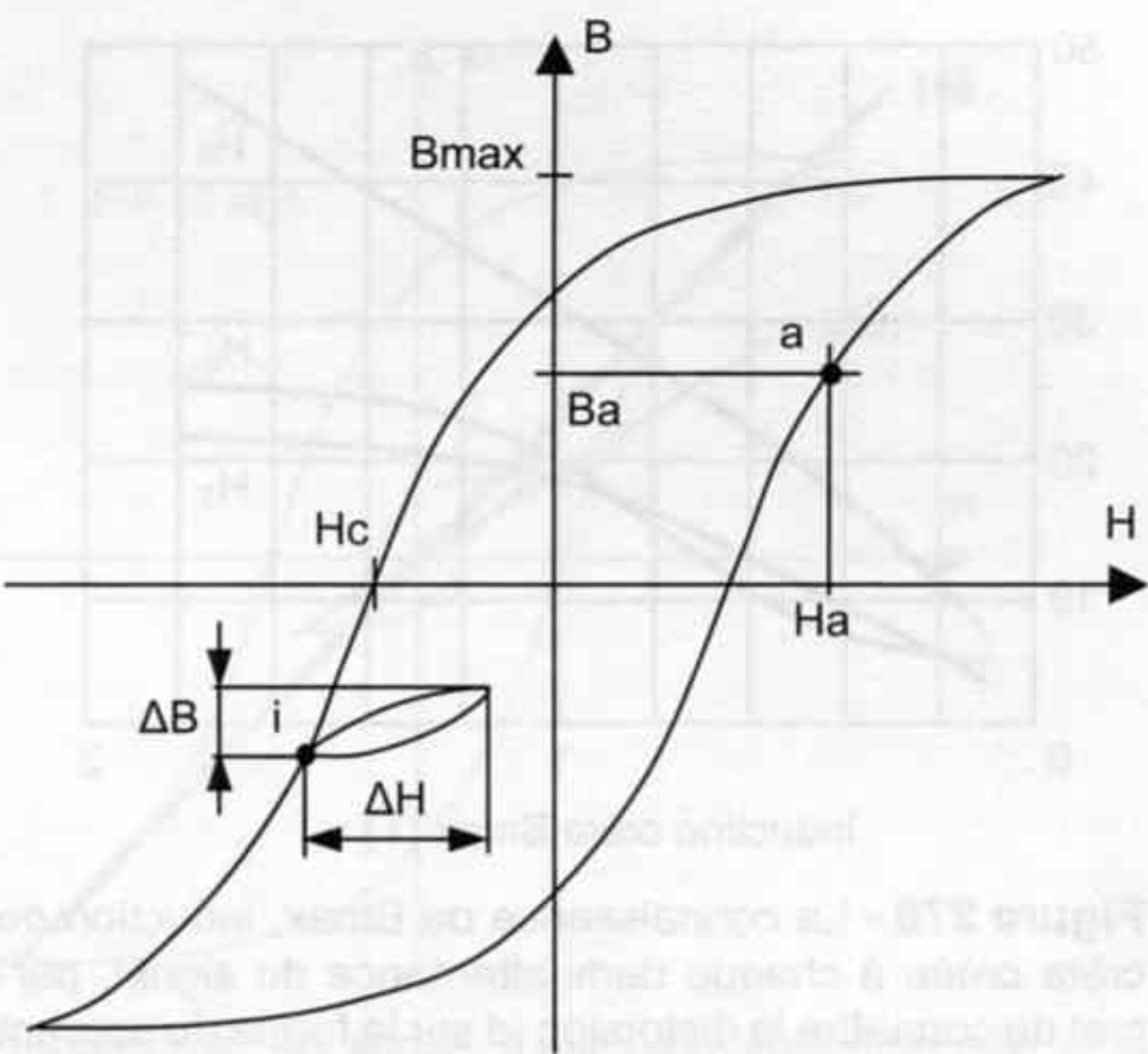


Figure 269 - Ci-dessus à gauche, variations de la perméabilité relative en fonction du champ magnétisant, donc du courant primaire, pour différents matériaux magnétiques en épaisseur 35/100^e : en B, un Permalloy B à 47 % de nickel, qui montre une très forte perméabilité dans un domaine réduit de champ, autour de 30 A/m, et qui par conséquent est bien adapté à un travail sous champ continu, avec composante alternative. Il sature vers 1,6 T et ses pertes par hystérésis sont de l'ordre de 0,25 W/kg à 50 Hz et 0,5 T, contre 1 à 4 environ pour les tôles magnétiques en acier au silicium. Il permet la réalisation de transformateurs d'entrée ou inter-étage de petites dimensions, avec un nombre de spires réduit par rapport aux noyaux de tôles ordinaires. En D un Permalloy D moins performant, saturant vers 1,3 T, et dont les pertes sont de l'ordre de 0,5 W/kg. Il ne permet pas la même miniaturisation que le précédent, mais sa perméabilité varie moins. En V un Permendur V, saturant à 2,4 T mais dont les pertes sont importantes. C'est le métal idéal pour plaques de champ de moteur magnétique de haut-parleur. Sa perméabilité varie peu sur une large plage de champ magnétisant.

À droite, variations de perméabilité en fonction de la fréquence et de l'épaisseur des tôles pour les Permalloy B et D. L'utilisation de tôles minces, d'épaisseur inférieure à 0,1 mm, est une nécessité qui apparaît clairement si l'on souhaite transmettre des fréquences jusqu'à 20 kHz.

Les tôles habituelles en acier à 3,5 % de silicium, et même jusqu'à 4,5 % sont nettement moins performantes et leur utilisation doit se limiter aux transformateurs d'alimentation secteur...

Les Mumétals à 75 % de Nickel et plus, présentent une perméabilité très élevée ($> 10^5$) permettant une miniaturisation extrême, et de très faibles pertes. Par contre ils saturent avec un champ H faible (B_{max} de l'ordre de 0,7 T), ce qui rend délicate leur utilisation dans un transformateur de sortie push-pull où les courants des deux demi-enroulements primaires ne sont jamais rigoureusement égaux, et a fortiori dans un transformateur pour étage de sortie à lampe unique.

(documentation Techniques de l'Ingénieur, Electronique)

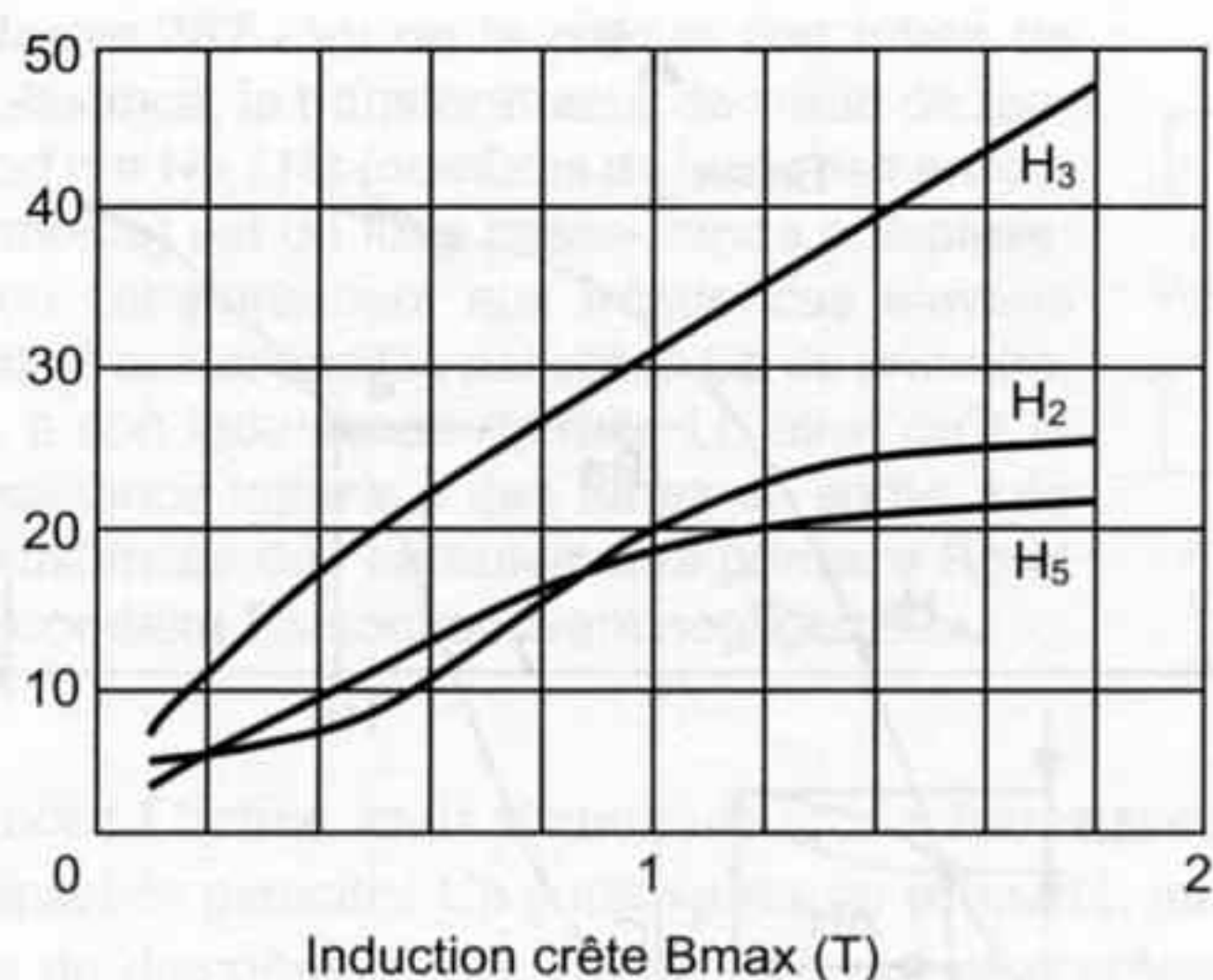
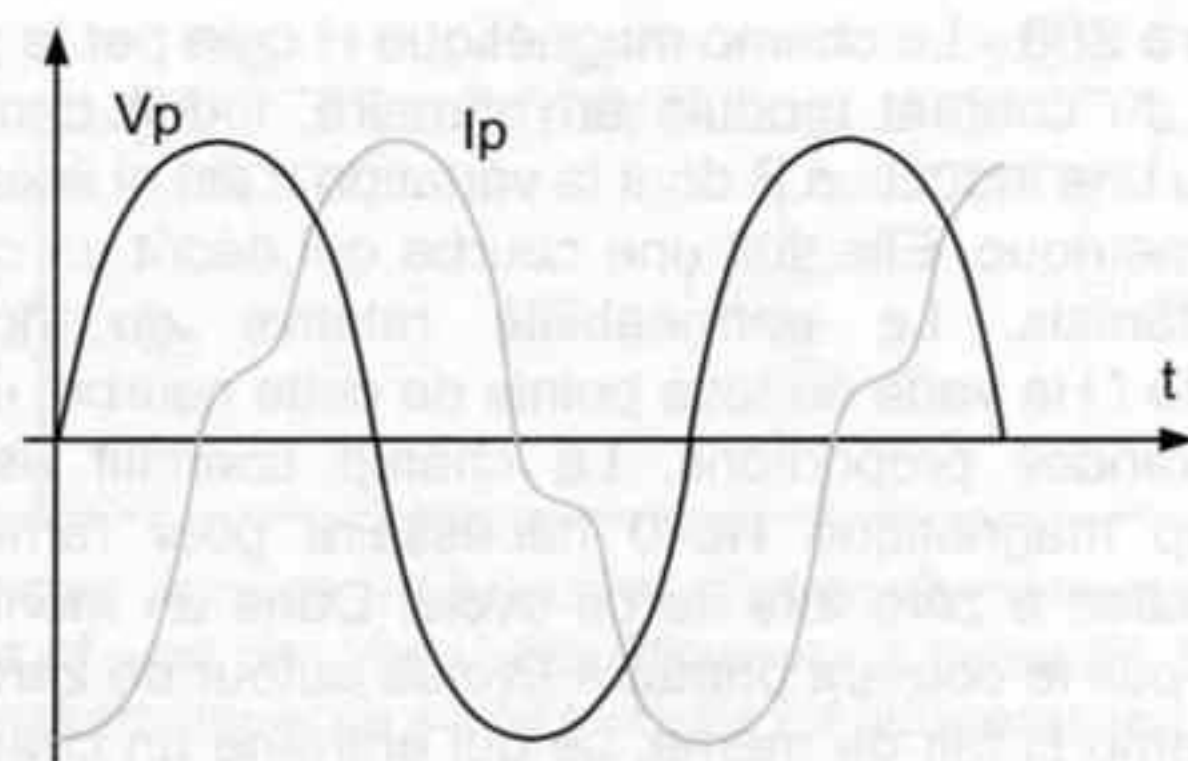


Figure 270 - La connaissance de Bmax, induction de crête créée à chaque demi-alternance du signal, permet de connaître la distortion Id sur la forme du courant primaire. Cette dernière est essentiellement constituée de l'harmonique 3. Le courant primaire est déphasé de $\pi/2$ sur la tension primaire, mais une petite partie de ce courant, correspondant à la puissance dissipée par les pertes d'hystérésis, est en phase avec la tension. La sinusoïde de courant est donc très déformée, ce qui serait sans conséquence si l'impédance de source au



Formes d'ondes de tension et courant primaires montrant la distortion du courant primaire.

primaire –résistance interne des tubes– était nulle (attaque en tension). Lorsque la tension du signal augmente sur les anodes des tubes de puissance, le courant n'augmente pas dans les mêmes proportions, car l'impédance de charge augmente elle aussi à cause de la variation de μ_r . Les tubes sont donc mieux chargés pendant chaque crête de signal qu'autour du zéro du signal, où leur charge varie brutalement.

M. van der Veen, Amplificateurs à tubes de 10 à 100 W à transformateurs de sortie toriques (cf bibliographie).

L'inductance primaire L_p est :

$$L_p = (\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N_p^2 \cdot l_m) / A \text{ avec } \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

l_m étant la longueur moyenne des lignes de champ dans le noyau, donnée fournie par le fabricant, et A étant la section droite du noyau.

Seule la grandeur μ_r varie, et induit des variations de l'impédance de charge d'anode des tubes de puissance, ce qui entraîne des distorsions sur le courant primaire.

Les études réalisées par Partridge ont mis en évidence des taux d'harmoniques 2, 3 et 5 dépendant de la valeur de Bmax, induction maximale dans le noyau, correspondant au courant crête lors d'une demi-alternance du signal, figure 270. Ces distorsions dépendent étroitement de la surface limitée par la courbe d'hystérésis, les matériaux à faibles pertes dont le cycle d'hystérésis est très étroit et rectiligne procurant moins de distortion. Ces matériaux présentent généralement une haute perméabilité initiale, ce qui permet l'obtention d'une inductance élevée avec un faible nombre de spires.

Les expériences faites sur des tôles à 3,5 % de silicium montrent des taux de distorsions du courant par harmonique 3 allant jusqu'à 50 % (!) pour une induction Bmax proche de 1,8 T.

Si le nombre de spires du secondaire N_s est connu, l'induction crête Bmax peut être facilement calculée en fonction de la tension de sortie au secondaire V_s :

$$B_{\max} = \sqrt{2} \cdot V_s / (2\pi \cdot f \cdot N_s \cdot A)$$

Inversement en se fixant Bmax à une valeur convenable assez loin de la saturation, on peut en déduire le nombre de tours au secondaire N_s pour atteindre la tension de sortie souhaitée, correspondant à la puissance maximale de l'ampli, puis le nombre de spires au primaire $N_p = n \cdot N_s$.

Il est évident qu'une section de noyau A importante permet à puissance égale de conserver Bmax relativement faible, ou bien de diminuer les nombres de tours, ce qui diminue à la fois l'inductance de fuite L_{sp} et les capacités parasites C_p , augmentant la bande passante. Un bon transformateur de sortie, c'est donc tout d'abord un noyau largement surdimensionné, fait d'un matériau à faible variation de μ_r , en tôles minces de 0,1 mm d'épaisseur au plus.

La distortion de tension sur le signal de sortie présent au secondaire, se déduit par la relation :

$$V_d = I_d \cdot \frac{R_{eq}}{2\pi \cdot f \cdot L_p} \cdot \left[1 - \frac{R_{eq}}{8\pi \cdot f \cdot L_p} \right]$$

R_{eq} étant la résistance équivalente à la mise en parallèle de l'impédance primaire totale entre anodes Z_{aa} et de la résistance interne des deux tubes ρ .

$$R_{eq} = 2\rho \cdot Z_{aa} / (2\rho + Z_{aa})$$

Ces formules appellent des constatations importantes :

- C'est bien aux basses fréquences que les distorsions sont les plus élevées, opposant en cela le transformateur à tous les autres composants actifs ou passifs.

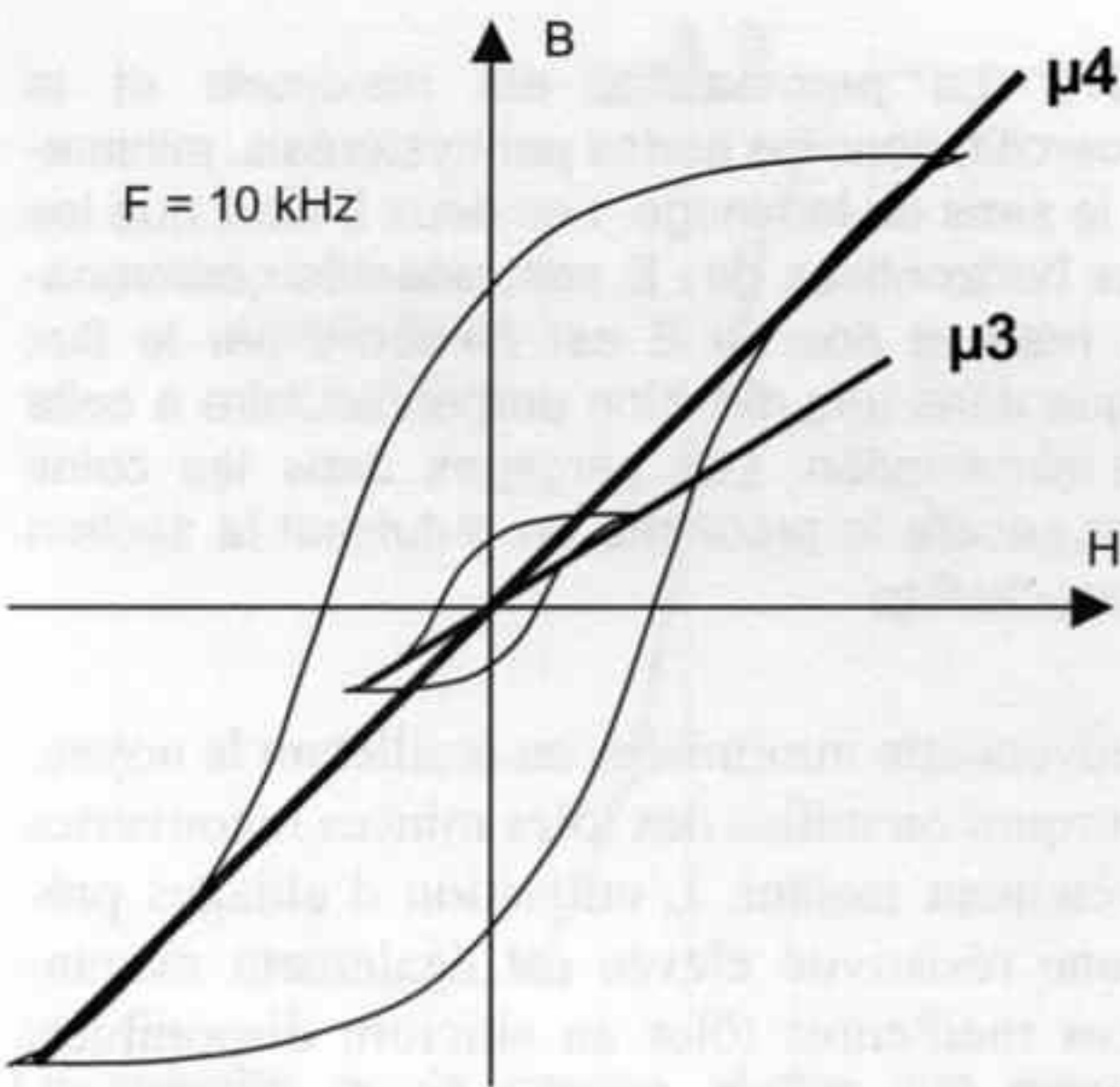
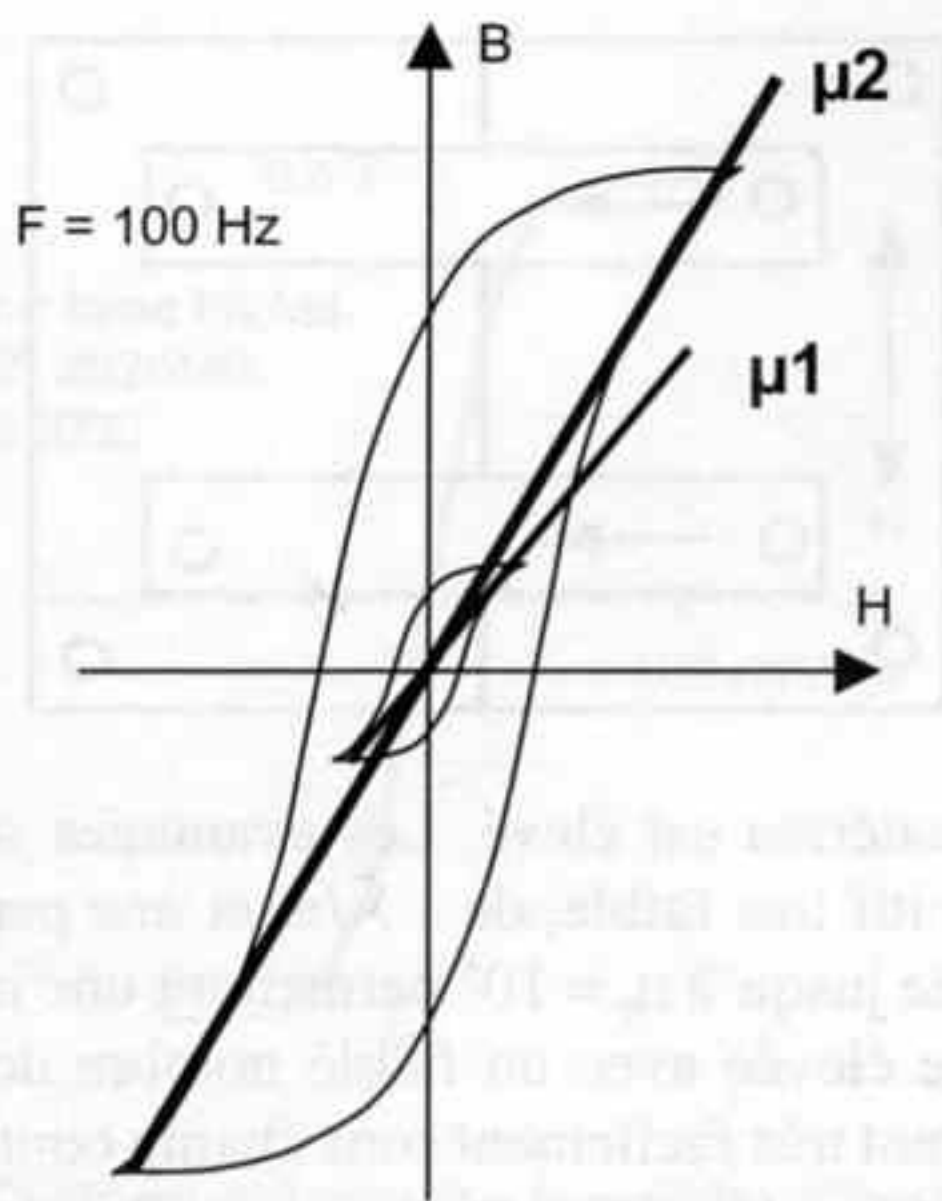


Figure 271 - Ci-dessus les courbes $B = f(H)$ appelées cycles d'hystérésis, pour une classique tôle d'acier à 3,5 % de silicium. On constate sur la figure de gauche tracée à 100 Hz, que la perméabilité moyenne diminue pour les faibles signaux, correspondants à des champs H faibles : μ_1 est inférieure à μ_2 , ce qui traduit une mauvaise sensibilité du matériau aux petits signaux. La variation de l'induction B , et par suite le signal induit au

- L'inductance primaire élevée est un gage de faible distorsion. Lorsque le terme $2\pi \cdot f \cdot L_p$ est grand devant R_{eq} la distorsion devient négligeable.
- La distorsion de tension sur le signal de sortie est minimale avec des triodes à faible résistance interne ρ .

Un tube EL34 monté en pentode présente une résistance interne $\rho = 15\text{ k}\Omega$ et la charge de plaque est $Z_{aa} = 6 \text{ à } 7\text{ k}\Omega$. Dans ces conditions pour un simple push-pull, $R_{eq} = 5\text{ k}\Omega$. Avec une inductance primaire de 100 H, une induction $B_{max} = 1,5\text{ T}$ et à la fréquence de 30 Hz, on obtient une distorsion du courant de l'ordre de $I_d = 40\%$ en harmonique 3, la plus gênante (abaque figure 270) et une distorsion de tension de presque 10 % !

En montage triode, le même tube EL34 présente une résistance interne de $\rho = 910\text{ }\Omega$ et dans ce cas $R_{eq} = 790\text{ }\Omega$. La distorsion de tension ne dépasse pas 1,7 % soit 6 fois moins qu'en mode pentode.

C'est aussi avec un noyau de section élevée, un doublement des dimensions permettant de multiplier la section A par 4, apportant une inductance supérieure à 400 H, que l'on peut limiter les distorsions aux basses fréquences.

Cependant, même minimisées, ces distorsions restent dépendantes du niveau du signal, car l'inductance L_p dépend directement de la perméabilité μ_r , laquelle varie constamment avec les variations du courant pri-

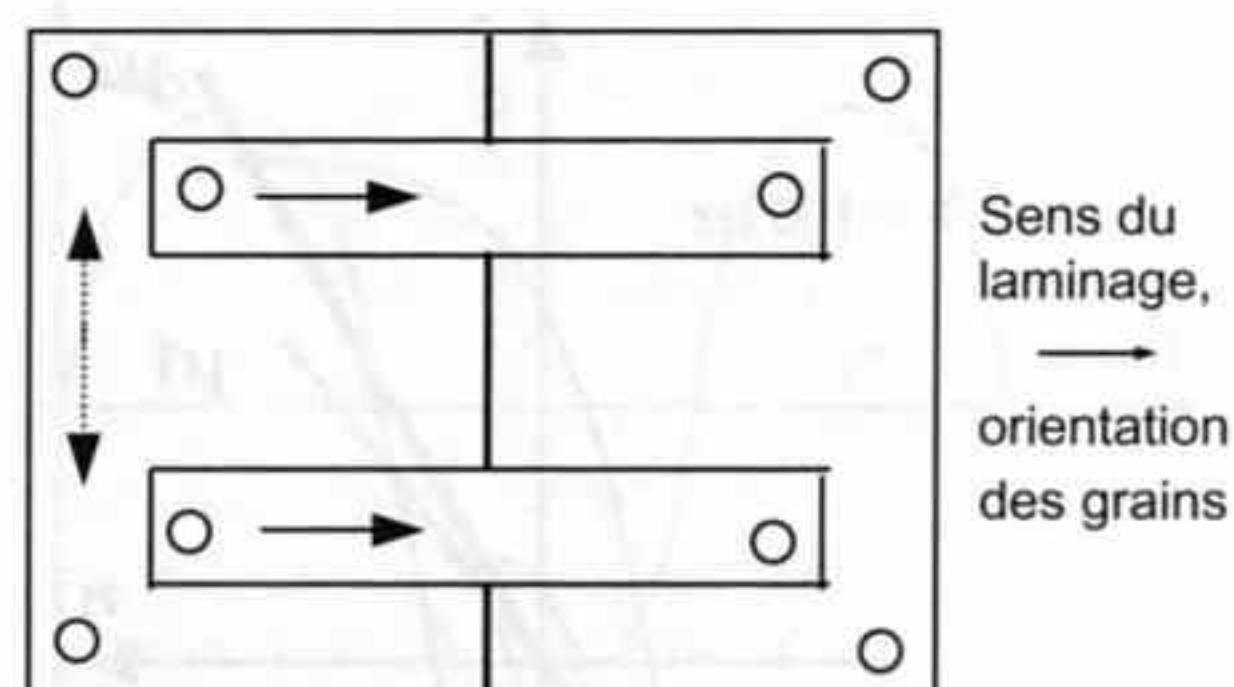
secondaire, en sortie, n'est pas proportionnelle à la variation du courant primaire. Cet effet est encore plus accentué aux fréquences élevées, comme le montrent les courbes tracées à droite à la fréquence de 10 kHz. Cette atténuation des petits signaux, surtout sensible dans le registre aigu, participe à la signature de "son chaud" qui a fait la réputation des tubes.

maire, donc du signal, figure 271. Il ne s'agit pas seulement d'une simple variation de l'impédance de charge, qui passerait d'une valeur faible aux petits signaux à une valeur plus élevée lorsque le signal augmente. Il s'agit d'une modulation de cette impédance de charge, qui est minimale lorsque le signal est à zéro, augmente lorsque la tension d'anode croît, diminue de manière "retardée" à cause de l'hystérésis lorsque la tension décroît.

L'amplitude des harmoniques varie donc constamment en fonction du niveau et de la forme du signal. Cette modulation du spectre de distorsion se superpose au signal et l'enrichi d'une manière tout à fait inconstante. Cela entraîne une variation des timbres entre les attaques de note et leur extinction, ainsi qu'avec l'intensité de la note jouée. La perception auditive d'une source sonore dont le timbre est constamment modulé produit une impression peu réaliste d'un instrument dont la matière est inconstante, ainsi que la taille et la position spatiale. L'appareil auditif est très sensible aux variations de ce type, alors qu'une distorsion élevée mais dont le spectre est stable et indépendant du signal se trouve filtrée, oubliée, même si elle fausse manifestement le timbre par rapport à l'éventuel timbre de référence de l'instrument.

En plus des pertes par hystérésis, proportionnelles à la fréquence du courant, le noyau magnétique supporte des pertes par courants induits, dits courants de Foucault, proportionnelles au carré de la fréquence. Ces

Figure 272 - La perméabilité est maximale et le champ coercitif, donc les pertes par hystérésis, minimales dans le sens du laminage. Les deux I, ainsi que les 3 portions horizontales des E sont orientées convenablement, mais le dos du E est parcouru par le flux magnétique dans une direction perpendiculaire à celle de facile aimantation. Les perçages dans les coins aggravent encore le problème en réduisant la section de passage du flux.



pertes peuvent être minimisées en feuilletant le noyau. C'est pourquoi on utilise des tôles minces recouvertes d'un revêtement isolant. L'utilisation d'alliages présentant une résistivité élevée est également avantageuse. Les meilleures tôles au silicium disponibles, appelées HiB en raison de leur forte induction à saturation B_{max} , présentent ainsi des pertes deux fois plus faibles que les tôles classiques. En version "scratchée" c'est-à-dire striées par faisceau laser perpendiculairement au sens de laminage, les pertes sont réduites à environ 0,4 W/kg à 50 Hz et pour 1,7 T. Les recherches actuelles s'orientent soit vers des aciers à 6,5 % de silicium, obtenus par trempe rapide en épaisseur 0,05 et 0,1 mm, soit vers des tôles enrichies superficiellement en silicium par dépôt chimique en phase gazeuse. Grâce à ces matériaux les pertes peuvent être réduites de plus de 30 %, et jusqu'à 50 % pour une direction de flux perpendiculaire à la direction de laminage.

Cet avantage prend tout son sens lorsque l'on sait qu'un circuit magnétique traditionnel de forme E-I présente une région où le flux n'est pas orienté dans le sens préférentiel de la tôle, ceci dans la branche verticale du E, figure 272.

Le découpage des formes E et I dans la bande de tôle est effectué, pour des raisons économiques, sans aucun déchet, deux E étant découpés face à face, les I étant inscrits dans les encoches des E comme le montre le schéma figure 272 (*scrapless lamination*).

Le circuit magnétique en C ou double C, obtenu par enroulement en spirale d'un ruban mince, enrobage en résine puis découpe (pour permettre le montage) fait circuler le flux dans la direction préférentielle en tous point du circuit, ce qui contribue à minimiser encore les pertes.

Cependant, c'est la mise en œuvre de matériaux à très faible hystérésis qui permet une très grande sensibilité du noyau aux petits signaux. Pendant longtemps, seuls les alliages fer-nickel, appelés Mumétal, Permalloy, Supermalloy, ou Radiométal, ont été disponibles. Leur induction à saturation (36 à 40 % de Ni : 1,3 T, 45 à 50 % de Ni : 1,55 T) plus faible que celle des aciers au silicium, impose une taille de noyau supérieure, ce qui entraîne un surcoût important, d'autant plus que le prix

du matériau est élevé. Les avantages sont un champ coercitif très faible, de 1 A/m et une perméabilité très élevée jusqu'à $\mu_r = 10^5$ permettant une inductance primaire élevée avec un faible nombre de spires. Ils se saturent très facilement sous champ continu très faible, ce qui pose problème pour une utilisation en transformateur de sortie. Quelques constructeurs – Tamura, Audio-Note – proposent des transformateurs de sortie en alliage Fe-Ni, de très haute qualité, mais de prix... inavouables.

De nouveaux matériaux ferromagnétiques doux, figure 273, appelés ainsi car faciles à aimanter mais aussi à désaimanter, grâce à leur champ coercitif H_c très faible, sont depuis peu obtenus avec des alliages **amorphes**, disponibles en double-C ou en rubans minces, épaisseur 0,02 à 0,05 mm produits par trempe rapide, ou **nanocristallins** disponibles seulement en tores. Les hystérésis obtenues sont extrêmement réduites, et très rectilignes, ce qui entraîne une excellente sensibilité aux petits signaux sur toute la gamme des fréquences.

Le tableau (figure 274) compare les caractéristiques de quelques matériaux magnétiques modernes :

On peut constater aisément la supériorité des alliages amorphes à base de cobalt, pour lesquels des traitements thermiques adaptés amènent des propriétés magnétiques spécifiques. Ils se distinguent par des pertes extrêmement faibles en hautes fréquences, ainsi qu'une absence de magnétostriction (déformation élastique sous l'effet du champ magnétique, entraînant des vibrations audibles et des résonances non maîtrisées). Les bruits haute fréquence dus aux mouvements des particules magnétiques (bruits de Barkhausen) sont également très faibles.

Cependant leur induction à saturation plutôt faible obligerait à surdimensionner le noyau. Le prix très élevé du cobalt limite l'emploi de ces alliages à de (très) petites pièces magnétiques, capteurs, têtes de lecture... Le fabricant suédois Lundahl utilise ces alliages pour ses transformateurs miniatures, pour entrées micro ou ligne.

Afin de remplacer ces alliages trop coûteux, les recherches s'orientent vers des amorphes à base de Fer, enrichis en Bore et en Silicium, mais la magnétostriction

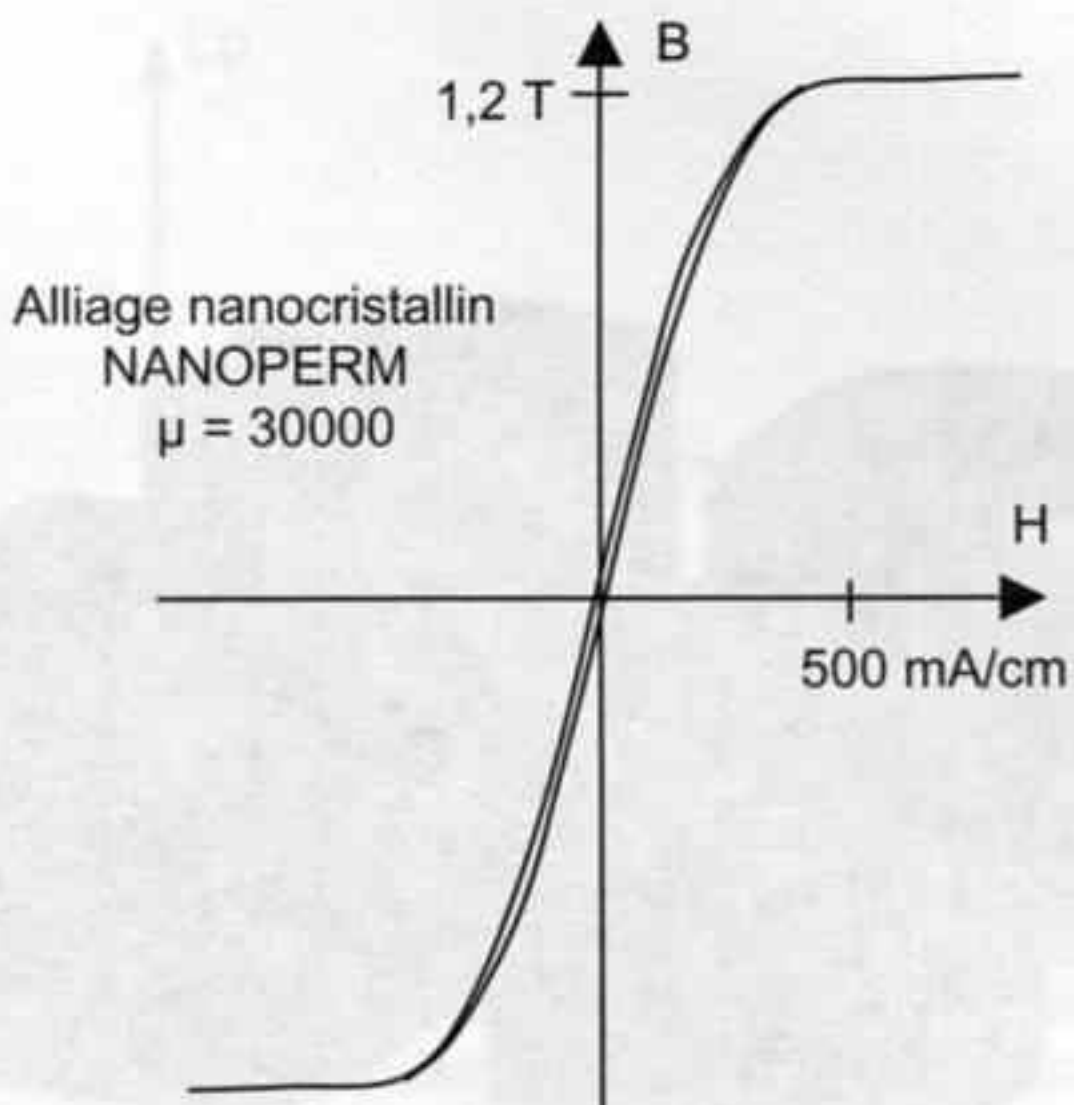
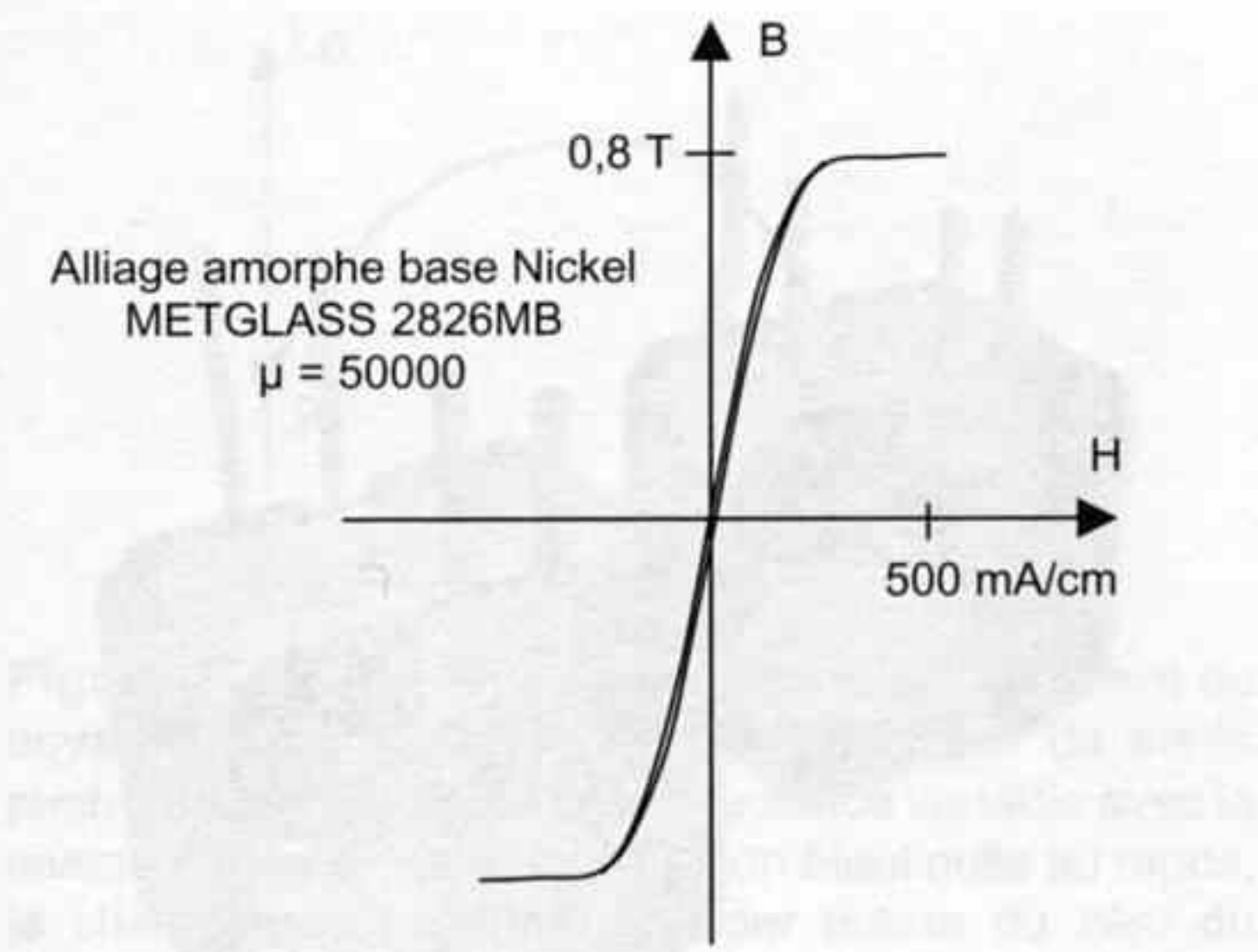


Figure 273 - Ci-dessus à gauche la courbe d'hystérésis d'un "verre métallique" amorphe (structure ultra-désordonnée et non cristalline) de composition Fe40-Ni38-Mo4-B18 de nom commercial Metglass 2826MB. La présence de Molybdène et de Bore lui confère des propriétés intéressantes, très faible hystérésis et induction maxi de 0,6 à 0,88 T selon les traitements thermiques. À droite, hystérésis d'un matériau nanocristallin (taille du grain inférieure à 0,01 μm !) de composition Fe73,5-Cu1-Nb3-Si15,5-B7 appelé Nanoperm. De faible coût car ne contenant que de petites quantités de métaux nobles et de terre rare (Néodymium), il est produit par Magnetec en tores de petites dimensions.

La linéarité de la courbe révèle une perméabilité constante, qui associée à une induction maxi de 1,2 T permettrait de réaliser des noyaux de transformateur de très haute qualité. Amotech ou Metglass proposent des noyaux en double C coupé, en matériaux amorphes à base de fer, donc peu coûteux, et présentant une induction maxi de 1,5 à 1,6 T. Quelques fabricants spécialisés, comme la société Automatic-Electric-Europe (Schagen, Hollande) ou Tribute, construisent avec ces noyaux des transformateurs de sortie de la plus haute transparence possible, avec enroulements sandwichés et secondaires en fil d'argent.

(d'après documentations Metglass et Magnetec GmbH)

Matériau / Alliage	Composition	Épaisseur	Pertes W/kg à 20 kHz 0,2 T	Induction Maxi B sat (T)	Magnéto Striction (ppm)	Perméabilité μ _{max} à 50 Hz
Alliage Fer-Silicium 6,5 %	Fe93,5-Si6,5	0,05	40	1,3	0,1	16000
Permalloy (cristallin)	Ni60-Fe40	0,05	45	1,2	10	20 à 30000
Super-Permalloy (cristallin)	Ni80-Fe20	0,03	14	0,8	1	100 à 300000
Amorphe base Fer	Fe76-(Si-B)24	0,025	18	1,5	25	5000 à 50000
Amorphe base Cobalt -I	Co73-(Si-B)27	0,025	5	0,55	< 0,2	100 à 150000
Amorphe base Cobalt -II	Co77-(Si-B)23	0,025	5,5	0,82	< 0,2	2000 à 4500
Amorphe base Cobalt -III	Co80-(Si-B)20	0,025	6,5	1	< 0,2	1000 à 2500
Nanocristallin (Nanoperm)	Fe76-(Si-B)24	0,02	4	1,2	0,1	20 à 200000

Figure 274.

parfois élevée de ces alliages pose problème. C'est pourquoi les tôles enrichies en silicium à 6,5 %, utilisées en circuit double-C, Figure 275, constituent une concurrence sérieuse.

Les transformateurs utilisés ont une influence notable sur la sonorité, et là encore les matériaux nobles, à haute perméabilité constante et faible hystérésis sont nettement plus performants subjectivement. Les enroulements en fil d'argent apportent un ultime per-

fectionnement à ce composant capital. Mais malheureusement, d'autres limitations interviennent, propres au montage push-pull, liées autant aux inévitables dissymétries de cet étage qu'aux imperfections du déphaseur, quel qu'il soit. On peut bien sûr pousser très loin les améliorations d'un ampli à lampes push-pull, avec tubes de sortie branchés en triode, transformateur à tôles en alliage au Nickel, condensateurs au papier huilé, résistances au carbone Riken, redressement par

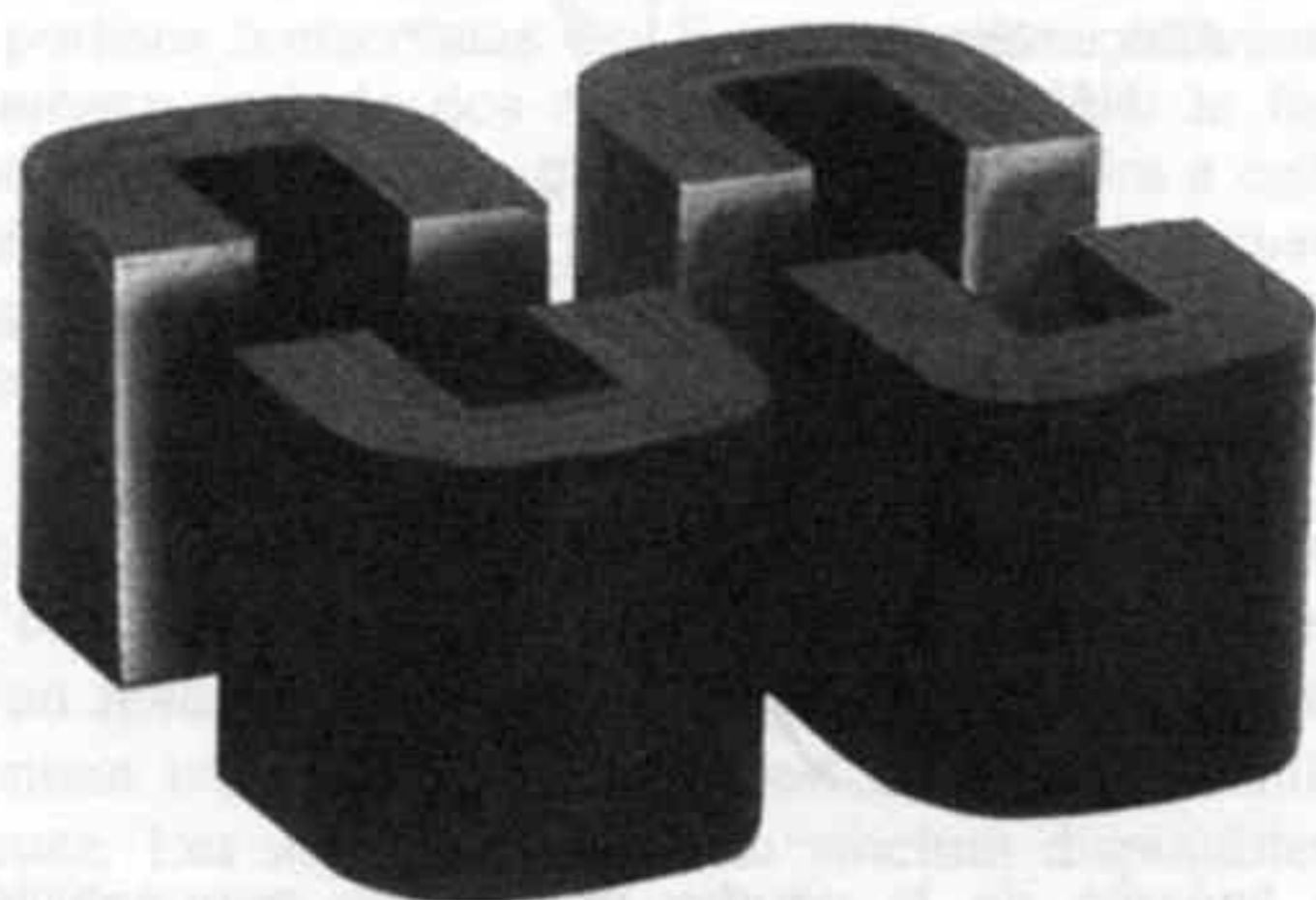


Figure 275 - En passant du circuit magnétique standard de forme EI en tôles à grains orientés, OW6 puis M6X ou encore mieux M4, au circuit en double-C ci-dessus en tôles au Nickel à haute perméabilité d'épaisseur

valve et self de filtrage, condensateurs d'alimentation Black-gate, câblage en fil d'argent isolé au Téflon, pour finir par des tubes neufs d'époque, des années 60, en version militaire ou dans des marques réputées, Mullard, Telefunken, Siemens, Mazda ou Philips entre autres.

Cependant, si les lampes rendent incontestablement mieux l'espace et la matière sonore, si les modifications ci-dessus apportent encore une amélioration en terme de finesse du trait, ce dernier manque encore un peu d'élan, de liberté, de vivacité. Ce manque est imputable au circuit push-pull dans son ensemble, et il me semble que le transformateur de sortie symétrique porte une responsabilité dans cet état de fait.

9.6 Monotriode

ÉTAGE DE SORTIE SIMPLE

À nouveau, un retour en arrière vers le circuit simple-étage est le seul moyen de contourner cette limite. Dans le transformateur single-ended, le courant continu constant dissymétrique produit un champ moyen non nul, qui est limité par la présence d'un entrefer évitant la saturation du noyau. Les particules magnétiques sont en partie orientées au repos, les moindres variations de champ se traduisant immédiatement par une réaction de ces particules, dans un sens comme dans l'autre, sans phénomène de seuil ou de non-linéarité. Le noyau fonctionne avec un champ au



0,1 mm, ou en matériau amorphe, le fonctionnement du noyau est amélioré, linéarisé, avec des effets subjectifs très positifs et un coût bien évidemment croissant. À droite un modèle Tribute sans son boîtier.

repos non nul, et le signal fait varier ce champ de part et d'autre de la valeur moyenne. C'est une sorte de fonctionnement en classe A, figures 276 et 277.

D'un point de vue subjectif, le montage simple étage de sortie réunit des avantages décisifs :

- Pas de déphaseur, donc seulement deux étages en général.
- Tube de sortie triode à très faible résistance interne et grande linéarité de transfert.
- La contre-réaction globale est superflue, quoique possible si nécessaire.
- Peu de composants d'où possibilité de choix optimisés.
- Transformateur surdimensionné, obligatoire à cause de l'entrefer.

Cela se traduit par une spontanéité du trait musical absolument inimitable. La perception du mouvement cause de la vibration entendue est évidente, l'identification de la matière sonore est flagrante, indiscutable.

Le plus connu et le plus "répandu" des amplis monotriode est très certainement le 300B, dont un grand nombre de variantes existent, popularisées par l'équipe de "L'audiophile", figure 278. D'autres triodes sont utilisables, depuis la 2A3 ou la R120 pour les faibles puissances de moins de 5 W, en passant par les PX25, PX4, VT25, VT52, 6B4G, jusqu'aux énormes TM100, GM70, SV572 ou encore VT4C/211 et les impossibles 845 extrêmement difficiles à driver.

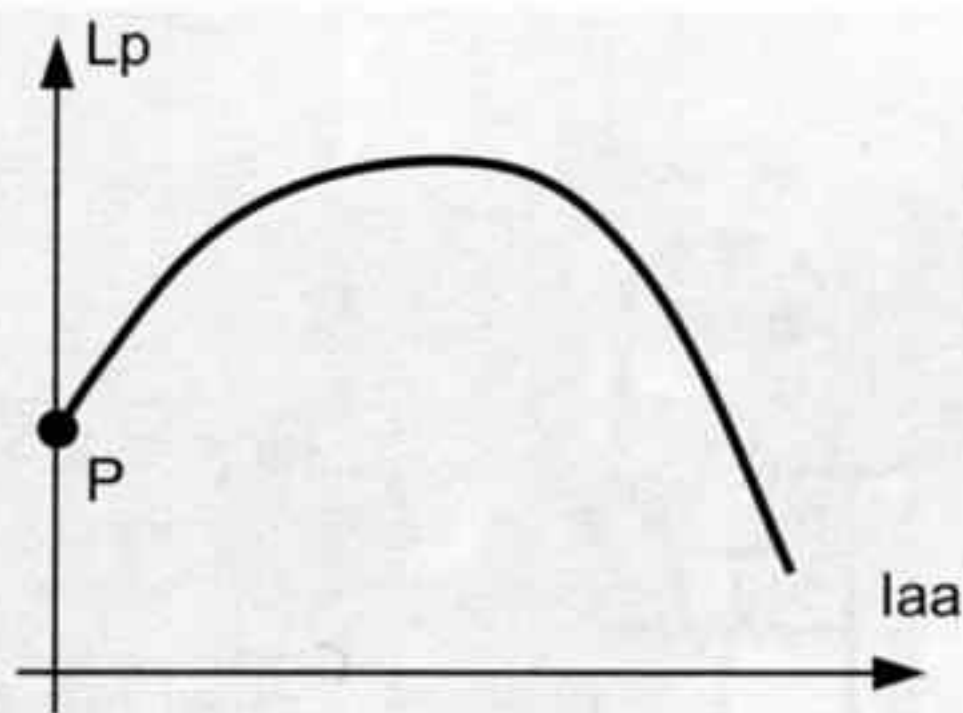


Figure 276 - Le point de repos de fonctionnement du noyau magnétique, pour un transformateur de sortie push-pull, correspond à une inductance variable avec le niveau du signal. La magnétisation étant nulle au repos, le champ a plus de mal à varier autour du zéro du signal, que lors des excursions élevées.

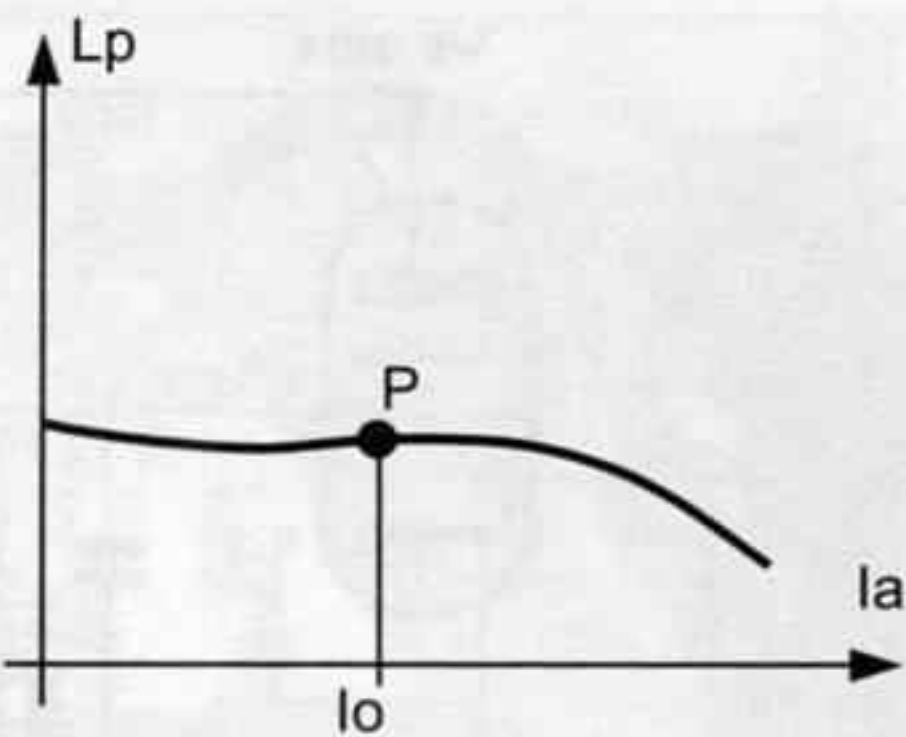


Figure 277 - Le transformateur de sortie simple-étage présente une inductance beaucoup plus faible, souvent inférieure à 50 H, mais constante autour du point de fonctionnement. Les variations même très faibles du courant primaire induisent des variations proportionnelles du champ, et donc du courant secondaire, en sortie.

Les tétrodes 6550 ou pentodes EL34 peuvent être utilisées en pseudo-mono-triode, mais les vraies triodes à chauffage direct sont subjectivement plus transparentes, plus aérées.

Deux étages seulement, l'étage d'entrée amplificateur de tension étant soit une triode à fort μ type ECC83 seule ou en parallèle, ou bien un montage SRPP de ces mêmes triodes, le montage à pentode étant semble-t-il plus harmonieux dans ce cas précis. La pentode WE310A peut être remplacée par la 6SJ7/5693. La simplicité du schéma n'en fait pas pour autant un montage économique, transfos, selfs et tubes neufs étant de prix très élevés, et les composants passifs prenant alors une importance capitale, le moindre changement de résistance étant immédiatement audible. L'équilibre et l'harmonie sont trouvés en mélangeant diverses technologies de composants, résistances tantale Audio-Note par exemple sur le trajet du signal, résistance carbone Riken en anode, cathode et écran de l'étage d'entrée, et bobinées non inductive ou film épais pour châssis sur la cathode du tube de puissance.

Le chauffage des tubes en alternatif produit un léger bruit de fond très difficile à annuler, mais les essais de chauffage en continu n'ont pas donné d'aussi bons résultats subjectifs, et ce point mérite d'être discuté.

CHAUFFAGE FILAMENT

Le ronflement est induit par le courant alternatif de chauffage du filament, chauffage direct pour la plupart des triodes de puissance, le filament servant de cathode émissive. Le filament directement alimenté par un secondaire séparé du transformateur d'alimentation subit une variation de tension à 50 Hz, dont une partie se retrouve en sortie du montage, à cause des inévitables dissymétries impossibles à compenser exactement avec un point milieu fictif, établi par le potentiomètre de 50 Ω /3 W sur le schéma de la

figure 278 (page 296). Ce ronflement à très basse fréquence est parfois gênant, même si l'ampli est utilisé en voie de médium ou d'aigu, ces voies étant incapables de rendre des fréquences aussi basses. Un brouillage des petits signaux, et un manque de transparence s'en suivent.

Si l'ampli monotriode est utilisé en bas-médium ou en large bande, ce qui n'est pas son couplage idéal, ce ronflement est audible (-75 à -80 dB), et varie avec la température et le vieillissement du tube, obligeant à des retouches fréquentes du réglage. L'idée d'un chauffage en courant continu est donc tout à fait légitime.

Cependant, le redressement et le lissage par condensateurs, de la tension de chauffage, sont largement insuffisants. Dans ce cas, le courant pulsé issu des redresseurs produit des composantes harmoniques jusqu'à des fréquences élevées, et au ronflement se superpose alors un crépitement encore plus gênant. Le fait de gonfler à outrance les condensateurs de lissage n'est d'aucun secours, l'impédance commune aux courants pulsés et au courant de chauffage n'étant pas supprimée, et les courants pulsés étant encore plus forts, jusqu'à saturer transitoirement le transformateur d'alimentation. Des champs magnétiques parasites sont rayonnés, les enroulements de haute tension sont pollués, et le bruit de fond présente alors un spectre très riche en hautes fréquences qui intermodulent avec le signal. La sonorité obtenue est décevante.

Ces problèmes ont déjà été discutés pour les alimentations des amplis à transistor. Les mêmes remèdes s'appliquent ici : filtrage en π avec self et grosse capacité de sortie. Les régulateurs de tension habituels, genre LM317, 78XX, avec leur impédance de sortie irrégulière, n'assurent pas non plus un fonctionnement convenable. Par contre, les régulateurs rapides et les stabilisateurs en boucle ouverte, dont des exemples ont été donnés, peuvent apporter de très bons résultats

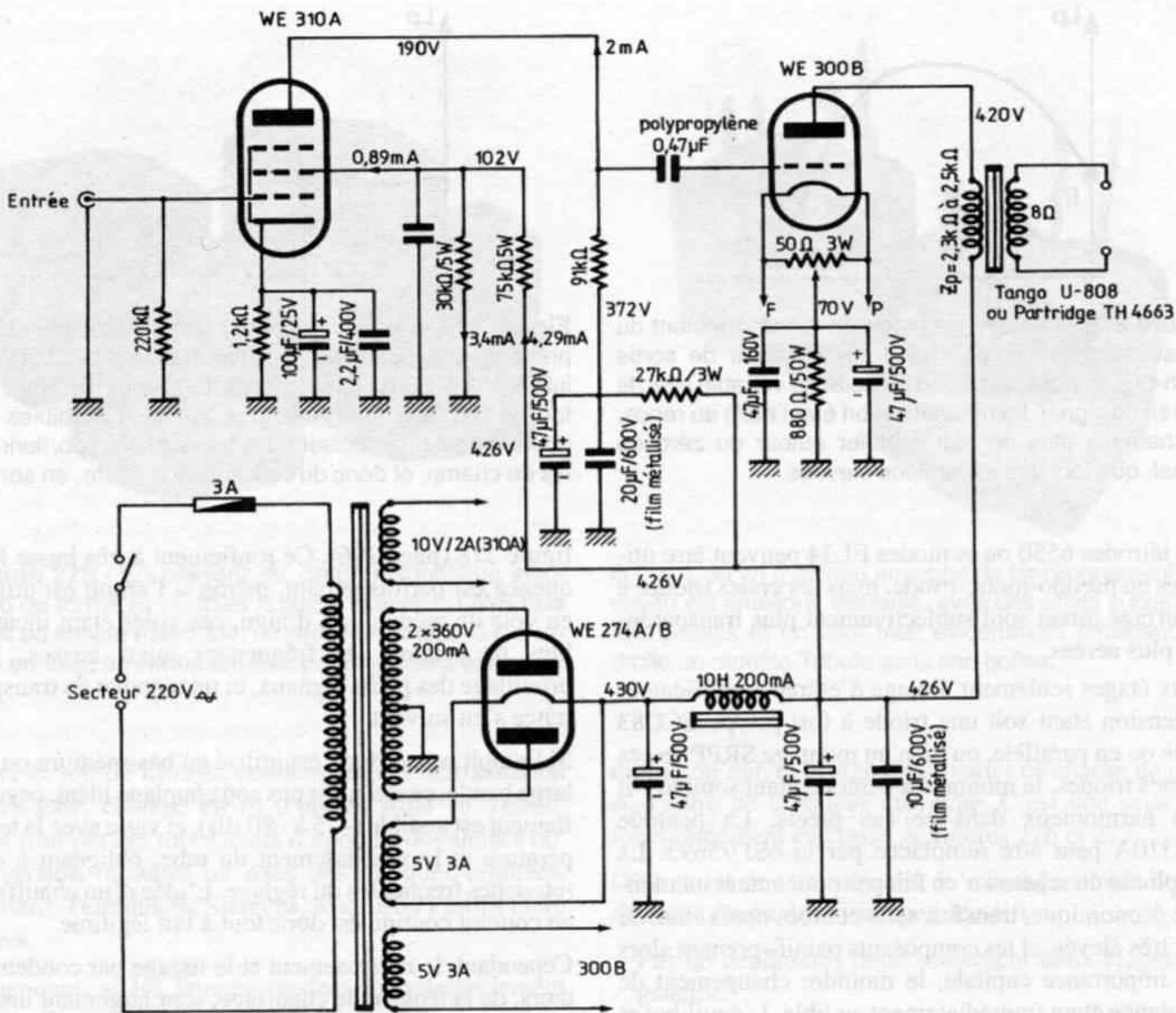


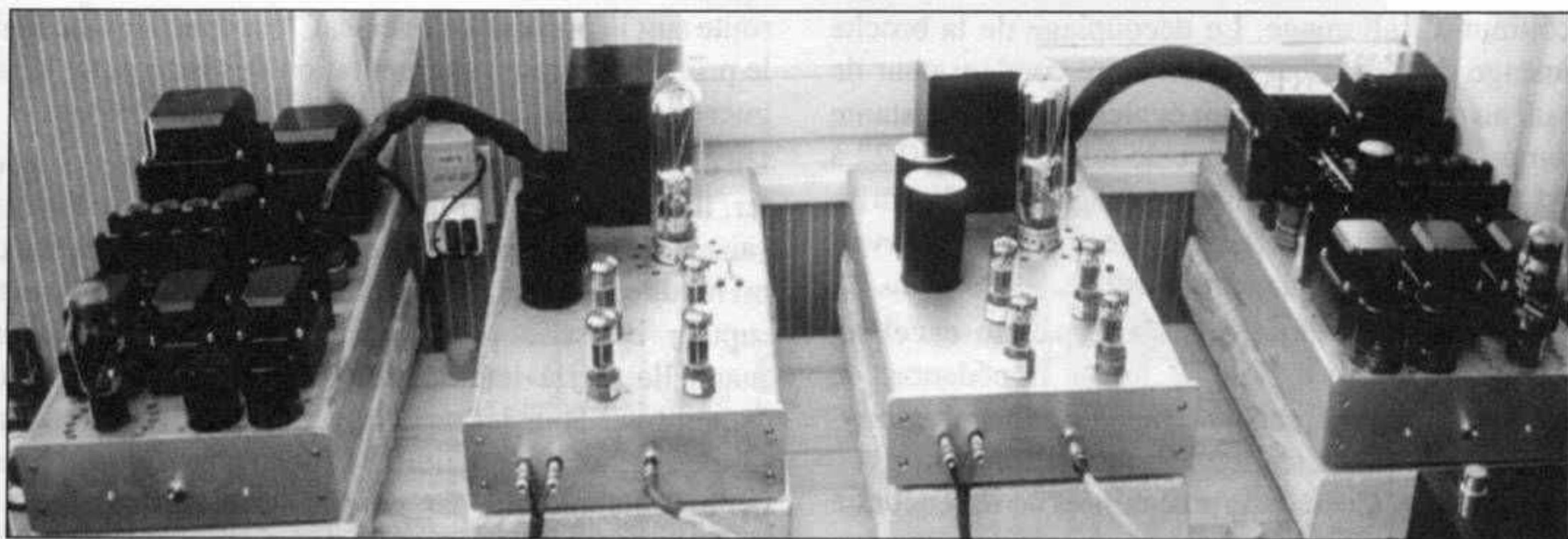
Figure 278 - Ampli simple-étage 300B décrit dans la revue l'Audiophile n°40. Le schéma est dérivé d'un montage de M. Tanaka, adapté par J. Hiraga.

grâce à leur impédance de sortie purement résistive, s'ils sont suivis d'une forte capacité, 10 000 μF par A de courant continu semblant bien être un minimum.

Je répète qu'une telle valeur seule (ou même multipliée par 10) en sortie de redresseurs n'est pas une pratique correcte, et que l'alimentation du filament doit être pensée comme la source même de l'énergie de sortie, grandeur modulée. C'est en effet le chauffage du filament qui crée la charge d'espace, nuage d'électrons entourant la cathode, et dans lequel la plaque tire son courant modulé. Ce nuage ne doit en aucun cas être "agité" par des champs électromagnétiques rayonnés par des courants alternatifs, même infimes, ou par des tensions de bruit sur la cathode. Le courant de chauffage doit par conséquent être parfaitement continu ou à défaut parfaitement sinusoïdal à 50 Hz. La plupart des schémas monotriode négligent à tort l'alimentation des filaments.

Un filtrage en π étant coûteux et volumineux reste réservé aux forts courants de chauffage, de 2 à 5 A, des triodes à chauffage direct. Les tubes miniatures à chauffage indirect, moins gourmands, 0,3 à 0,6 A en général, ou les tubes octal ampli de tension, peuvent être chauffés en remplaçant ce filtrage en π par un pré-régulateur. Un montage économique et surtout peu encombrant est ainsi réalisé avec deux LM317 en série, une résistance de 0,47 Ω étant mise en série en sortie (impédance de sortie selon figure 236) et un condensateur de 4 700 μF en découplage final.

Les câbles acheminant le courant de chauffage, même s'il est continu, doivent impérativement être torsadés serrés et plaqués contre le châssis métallique, afin de les soustraire aux influences des champs parasites. Les éventuels parasites induits sont filtrés aux bornes du filament par un condensateur polypropylène ou papier de type antiparasite (classe X2), de 0,22 ou 0,47 μF .



Les boucles parfois inévitables créées par les différents circuits de chauffage sont éliminées en utilisant des enroulements secondaires distincts et des alimentations flottantes pour le chauffage de chacun des tubes. Cette pratique est aisée à respecter avec un ampli monotriode utilisant seulement deux tubes, mais devient vite onéreuse avec les montages SRPP ou cascades, dans lesquels 2 ou 4 tubes demandent des chauffages filament séparés. Ces montages imposent d'autre part de polariser le filament à une tension supérieure de 20 à 30 V à celle de la cathode, dans le but d'éliminer le courant de fuite filament/cathode. Une tension continue réglable, dérivée de la haute tension par un circuit $R_1 - R_2 - C$ est à cet effet appliquée au point milieu fictif de l'alimentation du filament. Ce point milieu est établi par deux résistances identiques d'assez forte valeur reliant les bornes de sortie de cette alimentation.

Notons au passage que cette alimentation du filament doit être effectuée sous tension constante, et non sous courant constant, bien que certains praticiens conseillent cette dernière solution. L'argument avancé tient à la protection du filament vis à vis de la surintensité à l'allumage. Le filament froid présente en effet une résistance très faible, ce qui provoque une pointe d'intensité s'il est alimenté par un régulateur de tension dont l'impédance de sortie est basse. L'alimentation à courant constant élimine cette pointe de courant à l'allumage, mais par contre elle ne garantit absolument pas que le filament sera correctement chauffé. Les manuels d'utilisation de la grande époque des lampes, tels que le "RCA tube handbook" préconisent une tension de chauffage à $\pm 5\%$ en précisant certains points :

- Une tension de chauffage élevée, $+5\%$ au dessus de la valeur nominale, divise par deux la durée de vie du tube, ceci sans augmenter sa transconductance (pente s).

- Une tension de chauffage basse, -5% en dessous de la valeur nominale, peut augmenter la durée de vie du tube, mais au détriment de ses performances. La cathode sous-chauffée ne présente pas un pouvoir émissif correct, ce qui limite la pente du tube ainsi que son courant maximal. De plus, le getter chargé de maintenir le vide dans l'enveloppe sera lui aussi sous-chauffé et ne remplira pas son office, ce qui entraînera à la longue l'apparition de gaz résiduels, puis une pollution de la surface de la cathode qui perdra rapidement son pouvoir émissif, par formation d'une barrière.

Si l'on souhaite améliorer la longévité des tubes, c'est sur l'alimentation haute tension qu'il est utile de se pencher. En effet, l'application de la haute tension sur un tube froid produit une pointe de courant cathodique, alors que le nuage d'électrons n'est pas encore formé. Il s'en suit un vieillissement très rapide de la cathode. Un préchauffage des tubes est indispensable, et un post-chauffage après la coupure, jusqu'à disparition complète de la haute tension, leur garantit une durée de vie optimale. Ce point est détaillé plus loin.

Le respect d'une tension de chauffage précise est difficile en alternatif, à cause d'une part des inévitables variations de tension du secteur, et d'autre part d'une consommation de courant variable avec la température, le vieillissement, l'origine du tube et sa référence. Un changement de tube entraînerait alors un risque de surchauffe si le filament du nouveau tube consomme un peu moins que prévu. Les tolérances sur le courant filament étant larges, car liées à sa résistance donc à sa section, un chauffage en alternatif pris directement sur un enroulement secondaire n'est pas une solution viable.

C'est bien une tension continue régulée qui est nécessaire. Les régulateurs intégrés fixes n'existant pas pour les valeurs habituelles de 6,3 V ou 12,6 V, c'est un (ou des) régulateurs ajustables qu'il convient d'utiliser. Un condensateur de tête de filtre d'assez forte valeur, en sortie du pont redresseur, permet une montée suffisamment progressive de la tension pour éviter une pointe

de courant à l'allumage. Le découplage de la broche d'ajustage du régulateur par un autre condensateur de 100 μF au minimum introduit également une constante de temps. Enfin une résistance de faible valeur, 0,22 à 0,47 Ω , en série avec la sortie du régulateur, linéarise son impédance de sortie, et protège encore le filament contre une hypothétique surintensité.

Le découplage en sortie est assuré par un excellent condensateur électrolytique à faible impédance, de type CO135, doublé par un condensateur polypropylène métallisé implanté directement sur les broches du support de tube. Ce luxe de précautions ne se rencontre pratiquement jamais au niveau du chauffage filament. Le gain en bruit de fond, en transparence sur les petits signaux, en aération de l'espace, est pourtant indiscutable.

L'exemple complet présenté un peu plus loin illustre ces principes d'alimentation des filaments. Les schémas des régulateurs utilisés sont donnés figure 281, alimentation basse tension.

Pour terminer avec les alimentations des amplis à lampes, une pratique qui n'était pas indispensable à l'époque des redressements par valves, grâce à leur montée en tension progressive, est d'appliquer les tensions de chauffage des filaments avant de mettre en fonction le circuit d'alimentation haute tension. Une temporisation de l'ordre de 30 s est amplement suffisante et permet aux tubes d'atteindre leur température de cathode. L'application de la haute tension sur un tube dont la cathode est froide provoque un courant élevé alors que le nuage d'électrons de la charge d'espace n'est pas encore formé. Le courant est débité directement par la surface de la cathode qui perd alors rapidement son pouvoir émissif. De nombreux amplis du commerce sont ainsi équipés d'un redressement par diodes, sans aucun circuit de temporisation. Dans ces conditions les tubes de sortie durent en moyenne 1 ou 2 ans, 3 ans au maximum si l'utilisation est vraiment épisodique.

Un ampli construit selon le schéma de la figure 266 utilisant un push-pull de tétrodes 6550, pourtant polarisé en pure classe A au maximum des possibilités des tubes, fonctionne avec les mêmes tubes depuis 2 000 heures, soit plus de 5 ans en utilisation quasi journalière, et le débit des tubes n'a pas beaucoup baissé. Bien utilisés, les tubes ont parfois une durée de vie de plus de 10 000 h. Mal mis en fonction, leur vie est réduite à quelques centaines d'heures avec des caractéristiques qui se dégradent rapidement.

Un simple interrupteur (bien isolé, et de puissance) sur le circuit de haute tension, de préférence en tête de l'alimentation, suffit à assurer cette longue vie des tubes. L'arrêt de l'appareil se fait alors en deux temps : coupure de la haute tension tout d'abord, puis après quelques minutes, extinction de l'appareil. Sa mise en

route suit le processus inverse. C'est contraignant mais le prix en constante augmentation des lampes ne laisse guère le choix.

Un circuit de temporisation à l'allumage est aisé à ajouter. Il est alimenté par la tension de chauffage, si nécessaire redressée et sommairement filtrée, et commande un relais qui coupe ou établit la haute tension. Un interrupteur en série avec ce relais permet la coupure manuelle de la haute tension, laissant l'appareil en "stand-by". Tous les amplificateurs à lampes de scène ou de studio, pour guitares et instruments, possèdent cette fonction, qui par contre est plutôt rare sur le matériel audio haute-fidélité.

UN EXEMPLE COMPLET : MONOTRIODE 845 ALIMENTATIONS SÉPARÉES

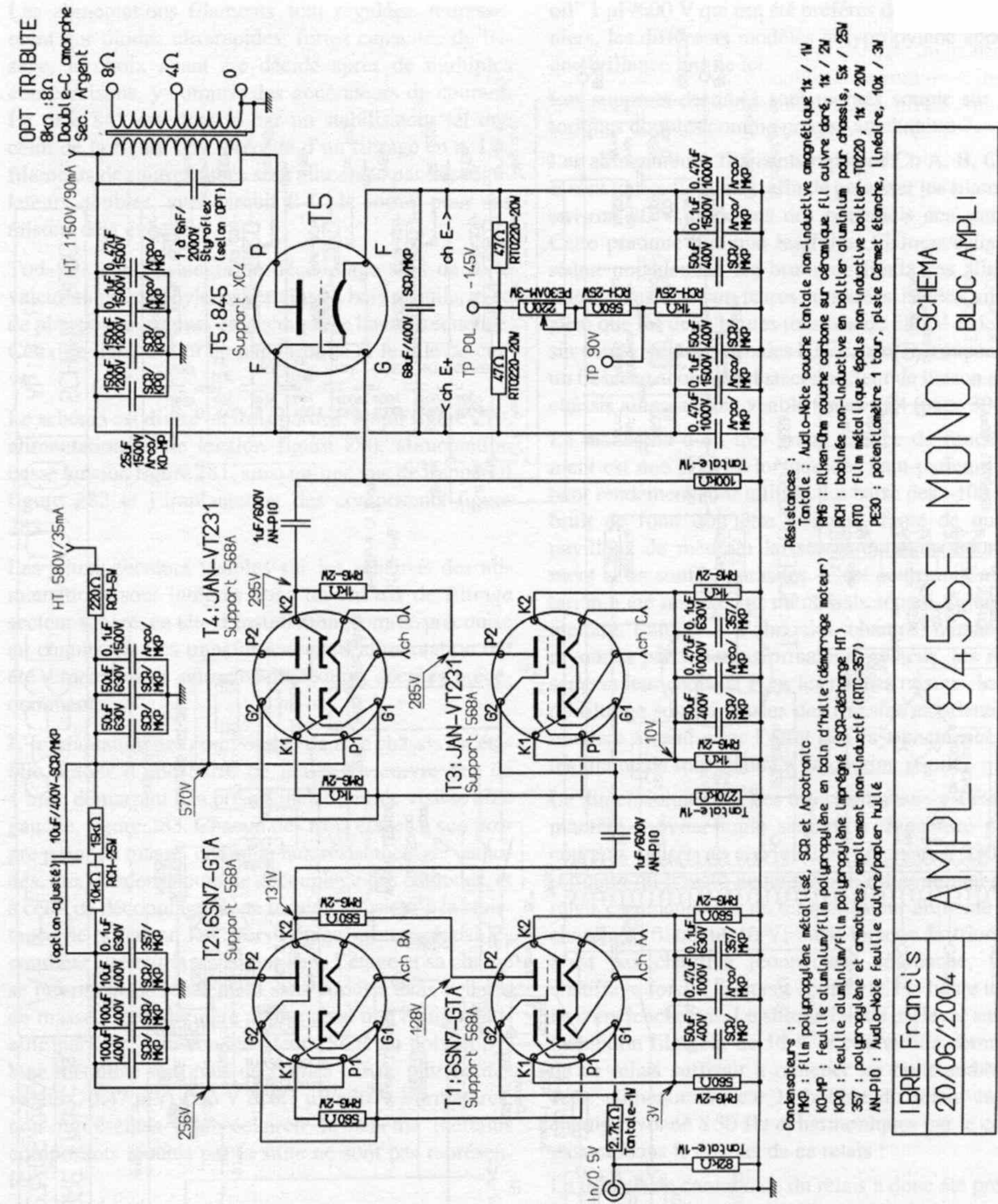
Afin de montrer comment mettre en application ces orientations, et de permettre au lecteur de se faire une idée de ce à quoi elles aboutissent, une réalisation est décrite, sans toutefois entrer dans les détails des calculs, des essais, des choix de composants.

Le tube de puissance utilisé est la triode à chauffage direct 845, réputée pour la linéarité exceptionnelle de ses courbes de transfert autant que pour sa difficulté d'attaque, la grille devant recevoir une tension crête de près de 300 V pour être modulée à fond, et le courant de fuite de grille n'étant pas négligeable. Le transformateur de sortie a été réalisé sur mesure par Tribute, avec une impédance primaire de 8 k Ω et un circuit en double-C en matériau amorphe à faibles pertes. Il est imprégné dans une résine anti-vibratoire. Des modèles du commerce (Tamura, Sowter, Lundahl, Bartolucci, Magnétic...) ne pouvaient convenir, l'isolement devant être assuré à 2,5 kV !

L'étage driver est un casse-tête pour ce tube. Pentode EL34, transfo de couplage, et même une triode 300B ont été essayés par divers constructeurs pour tirer le meilleur de la terrible 845. Un étage SRPP parallèle modifié, tel que celui présenté plus haut, est utilisé ici. Son impédance de sortie est de 500 Ω environ. Il est construit autour de 2 tubes 6SN7, double triode octal. La version VT-231 militaire, fabriquée dans les années 40 par Sylvania a été préférée après comparaison de quelques versions réputées.

Le premier étage reprend la même structure de circuit avec des points de fonctionnement différents, procurant une compensation des distorsions par son travail en opposition de phase avec l'étage driver. Les tubes retenus sont les 6SN7-WGT-B de Tungsol, versions militaires JAN des années 60.

L'alimentation haute tension de 1 200 V est redressée par diodes, avec filtrage en π , aucun montage simple à valve n'étant possible. Une valve 5U4G redresse la



tension de 600 V avec filtrage en π pour les deux premiers étages. Un circuit de polarisation des filaments, ainsi qu'une temporisation à la mise sous tension sont installés. Cette temporisation est alimentée par la tension de 10 V de chauffage du tube 845, reprise au niveau du connecteur (broches pontées deux-à-deux) reliant le châssis alimentation au châssis ampli. Ainsi,

en cas de branchement non-effectué, incorrect ou défaillant, la temporisation ne démarre pas. Cette temporisation utilise un ampli-op intégré qui enclenche un optocoupleur, afin d'isoler complètement les circuits. Cet optocoupleur commande un relais de puissance situé près du transformateur haute tension, dont il coupe le primaire.

Les alimentations filaments sont régulées, redressement par diodes ultrarapides, fortes capacités de lissage, le choix ayant été décidé après de multiples comparaisons, y-compris des générateurs de courant. Le tube 845 est chauffé par un stabilisateur tel que celui de la figure 239, précédé d'un filtrage en π . Les filaments des autres tubes sont alimentés par des régulateurs doubles, avec circuit R-C de sortie, pour des raisons déjà évoquées.

Tous les condensateurs de découplage sont de forte valeur au polypropylène, certains en bain d'huile, avec de plus petites valeurs en découplage haute-fréquence. Ceux de liaison sont au papier huilé et feuille de cuivre.

Le schéma est divisé en trois parties, ampli figure 279, alimentation haute tension figure 280, alimentation basse tension figure 281, ainsi qu'une vue de l'appareil figure 282 et l'implantation des composants figure 283.

Les filtres secteurs visibles sur les schémas des alimentations sont intégrés dans un châssis de filtrage secteur séparé, en tête d'installation, comme préconisé au chapitre 7. Les transformateurs d'alimentation ont été dimensionnés selon les procédures décrites précédemment.

L'implantation des composants dans le châssis est établie autour d'une barre de masse en cuivre pur de 4 mm, démarrant à la prise Cinch d'entrée visible côté gauche, figure 283. Chacun des trois étages a son propre point de masse, commun aux résistances de cathodes, aux condensateurs de découplage des cathodes, et à celui de découplage haute tension, ainsi qu'à la résistance de la liaison R-C vers l'étage suivant. Ainsi les courants alternatifs transitent dans l'étage et sa charge se referment-ils localement sans circuler dans la barre de masse. Cette dernière assure ainsi une équipotentialité parfaite. Les condensateurs SCR au polypropylène métallisé sont tous découplés par de plus petites valeurs, 0,47 μF /1 000 V et 0,1 μF /630 V à armatures, non représentés pour éclaircir le schéma (certains composants ajoutés par la suite ne sont pas représentés).

Les résistances en boîtier To220 de 560 Ω au premier étage et de 1 k Ω au deuxième étage, ont été comparées à d'autres modèles tantale 2 W Audio-Note, Kiwame, Allen-Bradley. Elles ont été remplacées finalement par des Riken RMG 2 W. Différents condensateurs de liaison ont été essayés, Shizuki 0,47 μF polypropylène, Arcotronic 1 μF /1 kV MKP, Audyn-Cap "Plus" et KP-SN à feuille d'étain, Philips papier en bain d'huile et boîtier métal, sortie sur perles de verre, et c'est finalement les modèles Audio-Note "paper in

oil" 1 μF /600 V qui ont été préférés de peu sur ces derniers, les différents modèles polypropylène apportant une brillance inutile ici.

Les supports de tubes sont montés souple sur joints toriques doubles comme précisé au chapitre 7.

Les alimentations filaments repérées Ch A, B, C, D et E sont toutes flottantes, afin de polariser les filaments à environ 30 V au-dessus des potentiels des cathodes. Cette pratique diminue les fuites filament/cathode et réduit notablement les bruits de fond. Ces alimentations, transitant sur paires torsadées isolées silicone, ainsi que les deux hautes tensions de 580 V et 1 140 V sur paires torsadées isolées PTFE, sont regroupées dans un faisceau aboutissant au connecteur de liaison avec le châssis alimentation, visible figure 284 (page 304).

La recherche d'un très grand silence de fonctionnement est une priorité lorsque des haut-parleurs à très haut rendement sont utilisés. La barre des -100 dB de bruit de fond doit être franchie, faute de quoi les pavillons de médium laisseront entendre un ronflement et un souffle parasites. C'est pourquoi l'alimentation a été montée sur un châssis séparé, figure 284, mettant l'ampli à l'abri des champs magnétiques rayonnés par les transformateurs secteur, les redresseurs et leur cablage. Pour les mêmes raisons, les selfs de filtrage sont éloignées des transfos et orientées de manière à minimiser l'effet des rayonnements. Tous les filaments sont chauffés en continu régulé.

Le dimensionnement des transformateurs est établi de manière à éviter toute saturation transitoire par les courants pulsés au secondaire. Le secteur 230 V au primaire du transfo haute tension est commuté par un relais commandé par un temporisateur alimenté par le chauffage filament 10 V, ainsi lorsque la triode 845 n'est pas chauffée (connecteur débranché, fusible chauffage fondu, filament coupé etc.) la haute tension ne s'enclenche pas. Le simple fait de prélever sur l'alimentation filament de 10 V le courant de commande de ce relais suffisait à ramener un bruit audible sur cette alimentation, car la bobine du relais capte le champ rayonné à 50 Hz et harmoniques par le courant passant dans le contact de ce relais !

La tension de commande du relais a donc été prélevée en amont du régulateur 10 V et une isolation par optocoupleur à transistor MOS assure une immunité totale au bruit (voir schéma alimentation haute-tension).

Les points de fonctionnement des tubes, figure 285 à 288, ont été choisis de manière à obtenir un spectre de distorsion le plus régulier possible. Les triodes produisent des harmoniques paires, de par la courbure de leur caractéristiques, alors que le transfo de sortie produit majoritairement de l'harmonique trois. Ces deux effets ne se compensent pas exactement, et les étages d'entrée

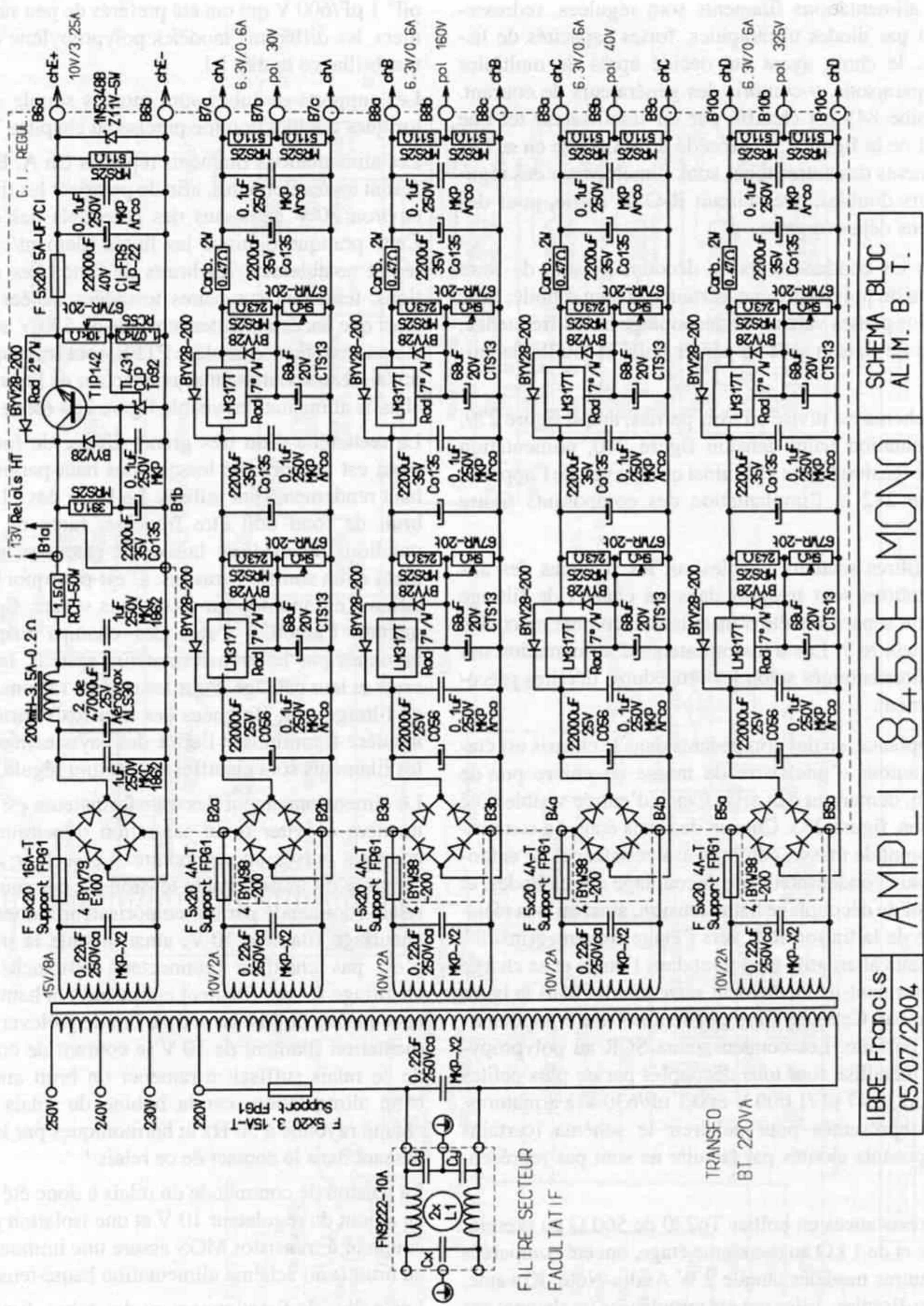


Figure 281 - Schéma des alimentations basses tensions 6,3 V/0,6 A et 10 V/3,3 A de l'amplificateur monotriode 845.

doivent apporter un très léger enrichissement en harmoniques paires pour que le dégradé soit régulier. C'est pourquoi le choix s'est porté sur des triodes.

Le besoin d'un gain élevé pour attaquer la grille de la 845, qui demande 300 V en crête, sous basse impédance, a orienté le choix vers un montage SRPP. La distorsion procurée par un étage seul a fort gain



Figure 282 - Ampli à lampe 845 mono-triode. Ici le châssis ampli gauche, avec son connecteur multibroche vissant et sa prise très haute tension Lemo coaxiale, pour le raccorder au châssis alimentation, visible figure 284. À l'arrière-plan le transfo de sortie à circuit double-C en boîtier imprégné Epoxy. Les 2 premiers étages SRPP sont équipés de 4 tubes 6SN7 de marque Tung-sol, au premier plan. Après diverses comparaisons, les tubes retenus pour le deuxième étage sont les VT231 de Sylvania des années 40, versions militaires de la 6SN7, à la sonorité magique, transparente et aérée, dynamique et rapide.

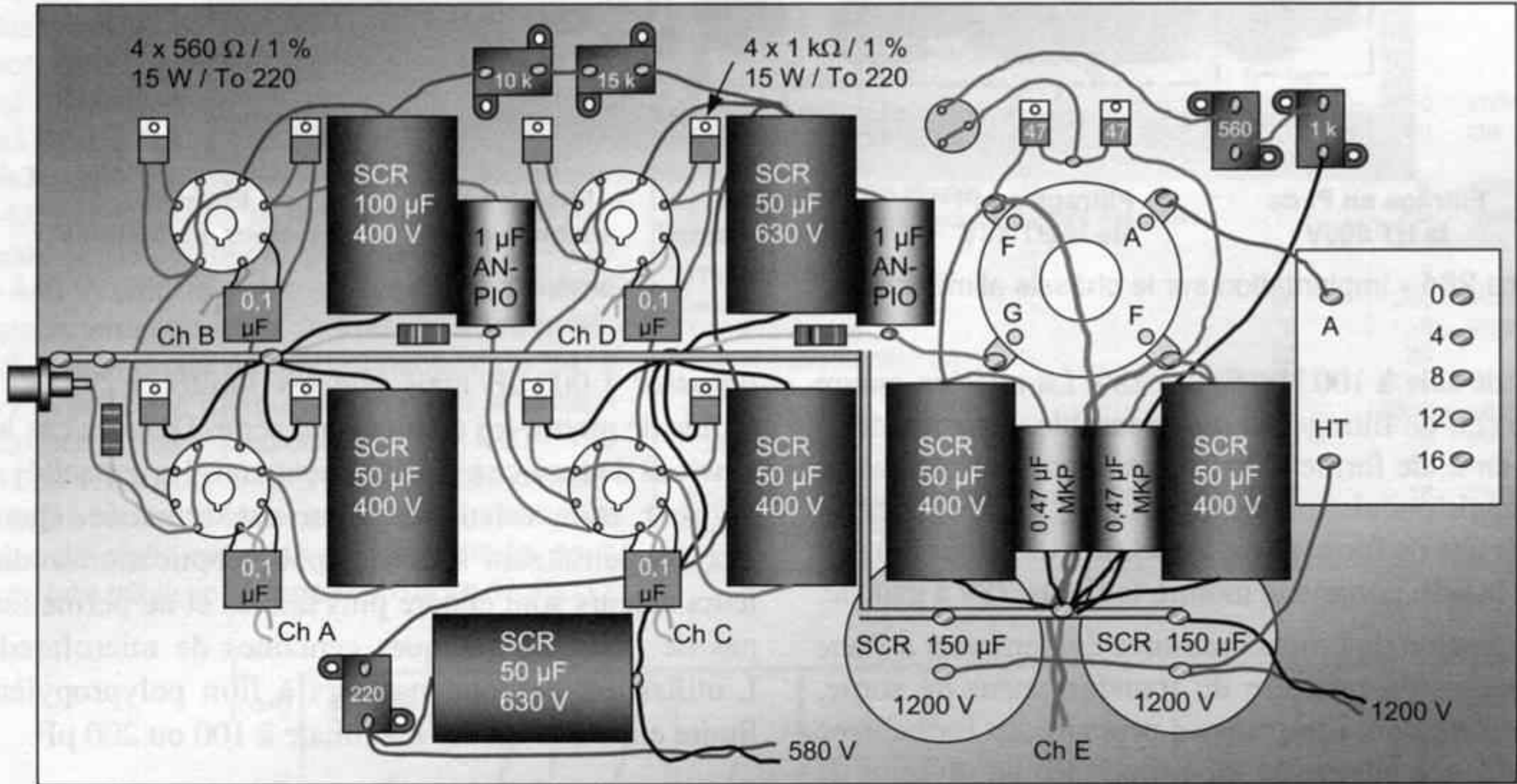


Figure 283 - Schéma d'implantation des composants de l'amplificateur monotriode 845.

(ECC83) étant un peu trop élevée, une solution à base de deux étages à gain moyen, travaillant en opposition de phase, donc avec annulation partielle des distorsions, a été retenue. Ces deux étages ne sont pas tout à fait identiques, les points de fonctionnement ayant été optimisés après plusieurs essais. Le deuxième étage, de gain 24 dB, est polarisé près de -9 V/-10 V sous 9 à 10 mA environ de manière à fournir en sortie les 300 V nécessaires à la grille de la triode.

Le premier étage est polarisé à -3,4 V avec 6 mA en un point où la distorsion est très faible, mais cette dernière est amplifiée par l'étage suivant. La combinaison de la distorsion propre au deuxième étage avec celle venant du premier, en opposition de phase, produit un faible résidu d'harmonique deux, qui augmente un peu à l'approche de l'écrêtage, vers 24 Watts. (les spectres sont donnés figure 313).

L'étage de puissance est polarisé à -140 V environ, sous 90 mA, avec une tension plaque/cathode de 1 000 V. La polarisation par résistance de cathode de 1 560 Ω , reliée au point milieu fictif du filament, et découplée par condensateurs polypropylène, amène la cathode à +140 V environ par rapport à la masse, la haute tension requise est par conséquent de 1 140 V environ. Le primaire du transfo de sortie procure une charge de plaque assez basse, de l'ordre de 7 à 9 k Ω , ce qui améliore le couplage à l'impédance de charge des H-P (voir figures 294 et 295).

SIMPLE ÉTAGE ET BRUIT D'ALIMENTATION

Un reproche souvent formulé à l'encontre des triodes en simple étage est leur mauvaise réjection du bruit d'alimentation, résidu de filtrage de la haute tension en

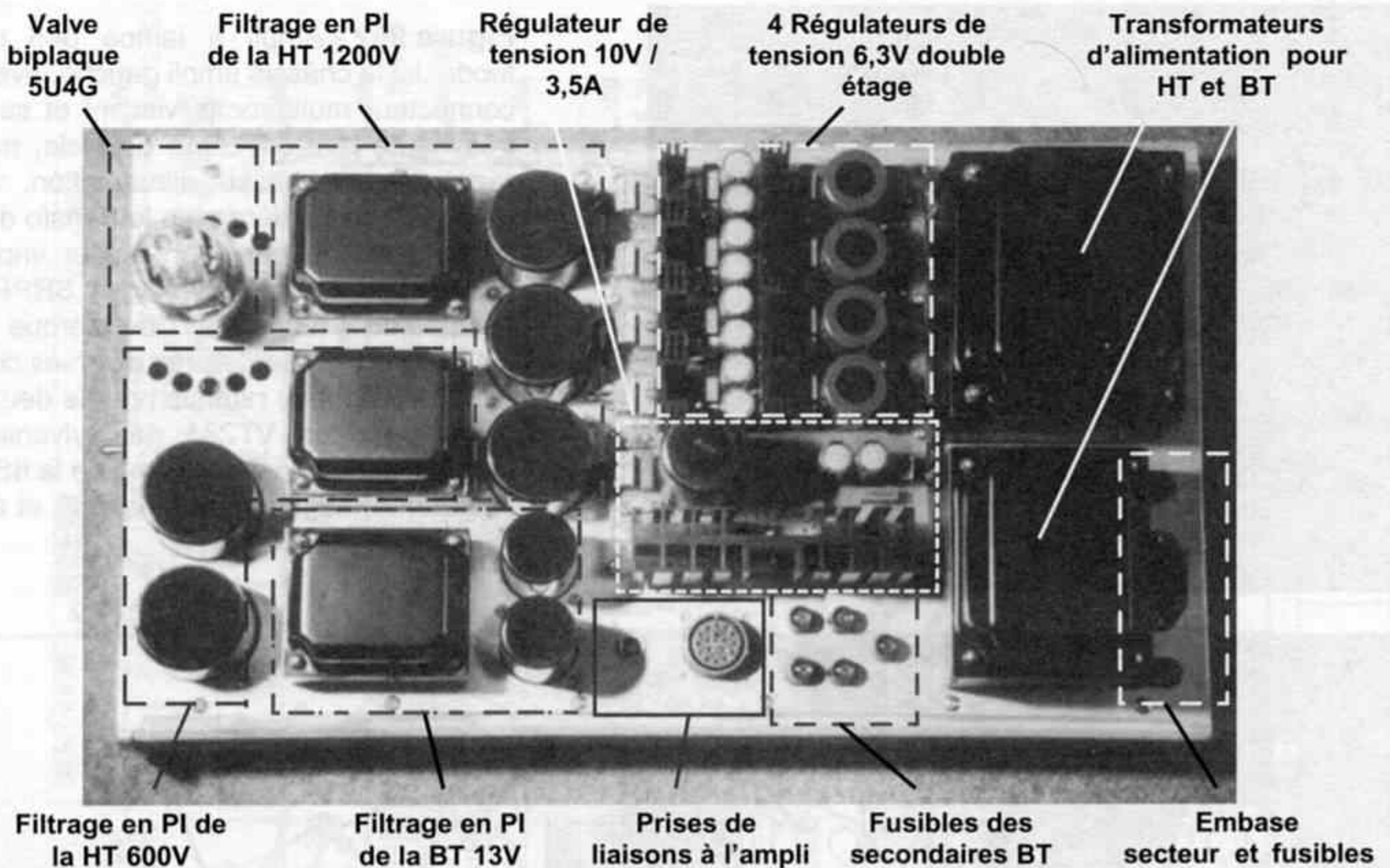


Figure 284 - Implantation sur le châssis alimentation.

dents de scie à 100 Hz, figure 289. La mise en œuvre d'une self de filtrage est indispensable, constituant un filtre en π , de forme C-L-C qui atténue ces résidus de filtrage. L'ondulation, de quelques V sur le condensateur de tête de filtre, passe à quelques (dizaines de) mV après la self, comme le montre la figure 289 à gauche.

Cette tension de bruit se retrouve évidemment à l'une des bornes du primaire du transformateur de sortie, figure 290, dont l'impédance primaire Z_p forme avec l'impédance interne du tube triode R_p un diviseur de tension. R_p étant en général beaucoup plus faible que Z_p , souvent 5 fois plus faible, la tension de bruit se retrouve atténuée, divisée par 5, à l'anode du tube, superposée à la tension d'anode V_a .

Le primaire du transformateur voit donc à ses bornes une tension de bruit pratiquement égale (4/5) à la totalité du bruit présent sur la haute tension filtrée. C'est ce qui fait dire que la réjection du bruit d'alimentation par un étage de sortie simple est assez mauvaise, voire nulle !

Le bruit au secondaire, sur la sortie H-P, est atténué par le rapport de transformation, mais reste souvent important, sous forme d'une ronflette crépitante, et il est difficile de descendre en-dessous d'un seuil de -90 dB pour le rapport signal/bruit d'un tel étage.

Il n'est hélas pas toujours possible de gonfler à outrance la valeur du condensateur final du filtrage en π , pour des raisons de prix mais aussi d'encombrement. Seule la technologie électrolytique permet de

dépasser 1 000 μF mais elle est limitée à 500 V, à moins de mettre les éléments en série. Dans ce cas les tensions de service s'additionnent mais les capacités se divisent, et la valeur résultante est diminuée. Quant aux condensateurs spéciaux pour application audio, leurs valeurs sont encore plus faibles et ne permettent pas de dépasser quelques centaines de microfarads. L'utilisation de condensateurs à film polypropylène limite encore la valeur maximale à 100 ou 200 μF .

En réinjectant, à l'aide d'un condensateur C_i , une fraction de ce bruit d'alimentation sur la cathode du tube de puissance, on retrouve à l'anode ce bruit amplifié, en phase avec le bruit d'alimentation. Le transformateur a alors à ses bornes deux signaux identiques, donc en mode commun, qu'il rejette presque complètement !

Le bruit sur la sortie H-P est alors éliminé (figure 291).

TRIODE ET IMPÉDANCE DU HAUT-PARLEUR

La contre-réaction globale de tension qui sévit à taux élevés dans les appareils à transistors, et dans une moindre mesure dans les amplis à tubes Push-Pull Ultra-Linéaire, en asservissant la tension de sortie, produit en plus des effets néfastes déjà discutés, des non-linéarités de réponse fréquentielle. Ces défauts sont liés aux variations parfois importantes de l'impédance de charge que représente le haut-parleur, autour de sa fréquence de résonance, figure 292.

Figure 285 - Principales caractéristiques de la double triode 6SN7 rappelées ci-contre, ainsi que le réseau de courbes I_p/U_p d'après documents Tung-Sol.

Figure 286 - Les points de repos et les droites de charge des tubes inférieurs V1 et V3 sont tracés ci-dessous, sachant que leur charge de plaque est égale à $\mu R + \rho$. La charge du premier étage est :

$(20 \times 560) + 7\,700 = 18,9\text{ k}\Omega$

et celle du deuxième étage est :

$(20 \times 1\,000) + 7\,700 = 27,7\text{ k}\Omega$

Les courants dans les tubes supérieurs et inférieurs sont à peu près égaux, la charge étant une résistance de forte valeur. Cela permet de tracer les droites de fonctionnement des tubes V2 et V4, sachant que la haute tension est constante. Par exemple, lorsque V3 est polarisé à $V_{gk} = 0$ son courant est de $I_{a3} = 14,5\text{ mA}$ et sa tension plaque de $V_{a3} = 120\text{ V}$. Le tube V4 est donc traversé par $14,5\text{ mA}$ lui aussi, et la tension entre sa plaque et sa cathode est $V_{ak4} = 560 - 120 = 440\text{ V}$, d'où le point extrême E. Le même raisonnement permet de trouver l'autre extrémité de la droite de fonctionnement de V4, à 4 mA et 150 V . L'excursion maxi de la tension aux bornes de V4 est donc de $V_s = 440 - 150 = 290\text{ V}$. La plaque de V4 étant reliée directement à la haute tension de 560 V , cette tension de sortie est prise sur sa cathode, sous une très faible impédance de l'ordre de $400\ \Omega$.

6SN7GTB DOUBLE TRIODE MEDIUM-MU

Tube verre à embase octal utilisé en oscillateur vertical et amplificateur de déflexion verticale, et en oscillateur de déflexion horizontale, dans les récepteurs de télévision couleurs et noir-et-blanc. Chaque triode peut être utilisée en multivibrateur ou en étage amplificateur couplé par résistance dans les équipements radio. Nécessite un support octal. Excepté le filament qui est commun, chaque triode est indépendante.

Tension filament (ac/dc)	6,3	Volts
Courant filament	0,6	Ampère
Temps de chauffage (moyenne)	11	Secondes
Tension filament-cathode :		
Valeur crête	+200 max	Volts
Valeur moyenne	100 max	Volts
Capacités interélectrodes directes (approx.) :		
Grille à plaque	4,0	3,8 pF
Grille à cathode et filament	2,2	2,6 pF
Plaque à cathode et filament	0,7	0,7 pF

AMPLIFICATEUR CLASSE A₁ (Chaque Triode)

VALEURS MAXIMUM		
Tension plaque	450	Volts
Courant cathode	20	mA
Dissipation plaque :		
Pour chaque plaque	5	Watts
Pour les deux plaques opérant ensemble	7,5	Watts

UTILISATION TYPIQUE		
Tension plaque	90	250 Volts
Polarisation grille	0	-8 Volts
Facteur d'amplification (μ)	20	20
Impédance de plaque	6700	7700 Ohms
Transconductance	3000	2600 μ mhos
Courant plaque	10	9 mA
Courant plaque pour polarisation de -12,5 volts.	-	1,3 mA
Polarisation grille (approx.) pour courant de 10 μ A	-7	-18 Volts
Résistance de grille, avec polarisation fixe		1 Megohm

Figure 286.

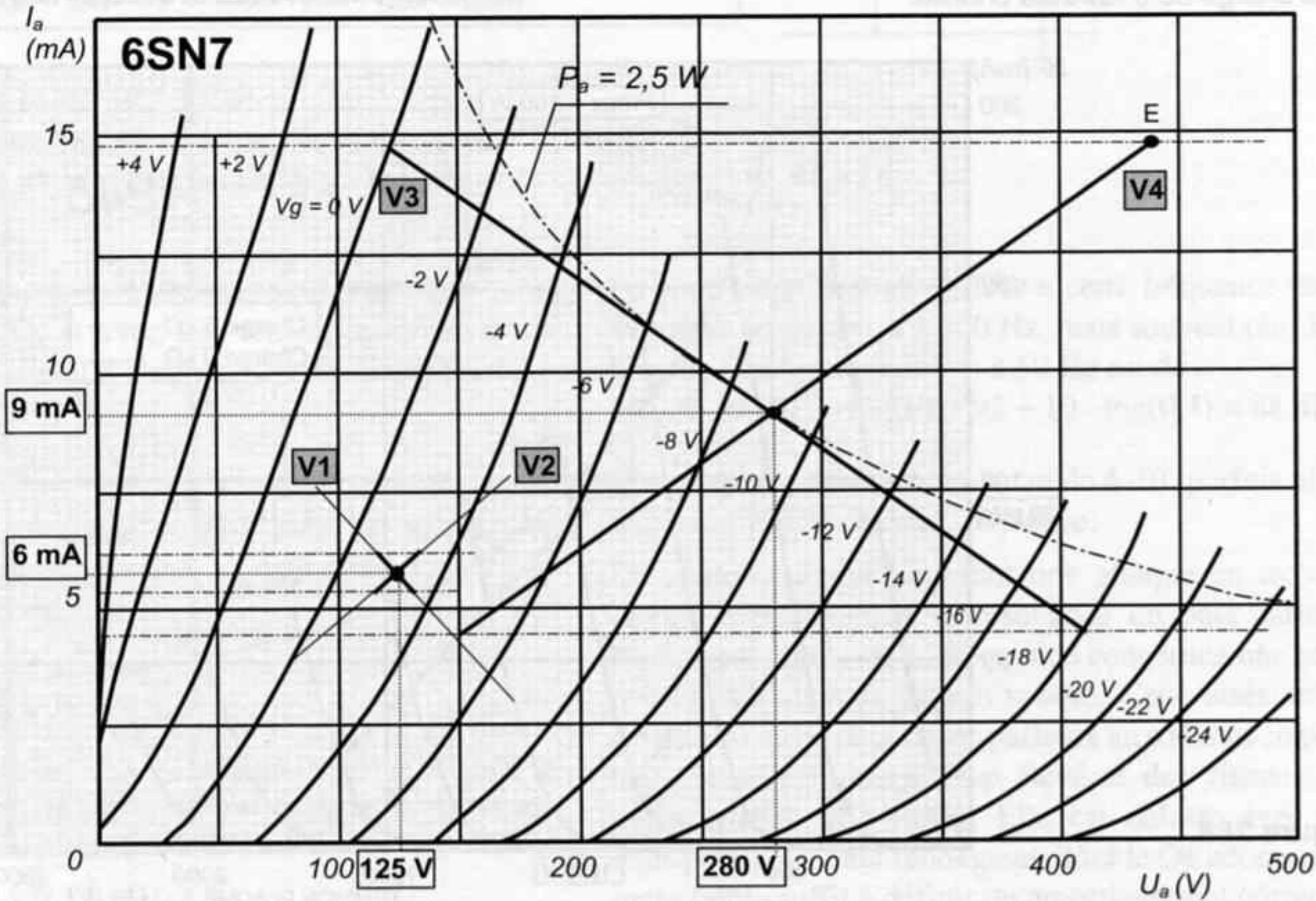


Figure 287 - Figure 288.

Caractéristiques de la triode à chauffage direct 845, d'après documents RCA, et son réseau de courbes I_p/U_p d'une régularité remarquable. En contrepartie son coefficient d'amplification est faible, entre 3 et 5 selon la charge, et sa résistance interne est plus forte que celle d'une WE-300B. La tension de grille nécessaire pour la moduler à fond est de l'ordre de 300 V. Avec une charge par un transfo de primaire 6 k Ω , le point de repos est à 90 mA environ, avec une polarisation à -140/-145 V. La droite de charge correspondante est tracée, elle est tangente à l'hyperbole de dissipation maximale (100 W). Le courant modulé est très important : de 10 à 180 mA ! Ce qui impose de gonfler l'alimentation. La tension modulée est comprise entre 380 V et 1 520 V pour V_g variant de 0 à -300 V, soit un coefficient d'amplification inférieur à 4 (12 dB). Sur charge secondaire de 8 Ω , le rapport du transfo de sortie est de $(6\,000/8)^{1/2} = 27,4$ soit une atténuation de 28,8 dB. Le gain des deux premiers étages SRPP étant de 24 dB chacun, le gain total s'établit à : $24 + 24 + 12 - 29 = 31$ dB.

La puissance maximale dans une charge de 8 Ω est de 24 W, avec 5 % de distorsion harmonique, et la sensibilité d'entrée est de 400 mV. Le rapport signal sur bruit ressort à -106 dB avec impédance de source de 2,5 k Ω , et près de -112 dB avec l'entrée court-circuitée et mesure différentielle. Une charge de 9 k Ω sera choisie.

845

Filament	Tungstène thorié	
Voltage	10	a-c ou d-c Volts
Courant	3,25	Ampères
Facteur d'amplification	5,3	
Capacités interélectrodes directes :		
Grille à plaque	13,5	μ F
Grille à filament	6	μ F
Plaque à filament	6,5	μ F
Hauteur maxi hors-tout		7-7/8" (200mm)
Diamètre maxi		2-5/16" (58,75 mm)
Bulbe		T-18
Embase		Jumbo 4 - Large Pin
Support RCA		Type UT - 541

VALEURS MAXI et CONDITIONS D'UTILISATION NORMALES

AMPLI DE PUISSANCE A-F & MODULATEUR - Classe A₁

Tension Plaque D-C		1250 max.	Volts
Dissipation Plaque		100 max.	Watts
Utilisation Normale :			
Tension plaque	750	1000	1250
Polarisation Grille*	-98	-145	-195
Signal Grille A-F Crête	93	140	190
Courant Plaque Continu	95	90	80
Transconductance	3100	3100	3100
Impédance de plaque	1700	1700	1700
Impédance de charge	3400	6000	11000
P. Sortie Maxi (DHT 5% H ₂)	15	24	30

AMPLI DE PUISSANCE A-F & MODULATEUR - Classe AB₁

Tension Plaque D-C		1250 max.	Volts
Polarisation Grille		-400 max.	Volts
Courant Plaque		120 max.	mA
Dissipation Plaque		100 max.	Watts
Utilisation Normale :			
Tension plaque	1000	1250	Volts
Polarisation Grille*	-175	-225	Volts
Signal Grille à Grille A-F Crête	340	440	Volts
Courant Plaque Continu Sans Signal	40	40	mA
Courant Plaque avec Signal Max.	230	240	mA
Impédance de Plaque (par tube)	1150	1650	Ohms
Impédance de Charge (plaque à plaque)	4600	6600	Ohms
P. Sortie Maxi (DHT 5% H ₂)	75	115	approx. Watts

*avec chauffage filament alternatif

DIMENSIONS EXTERIEURES, SCHEMA, et DIMENSIONS DU SUPPORT pour le tube 845 sont similaires à ceux du tube 211.

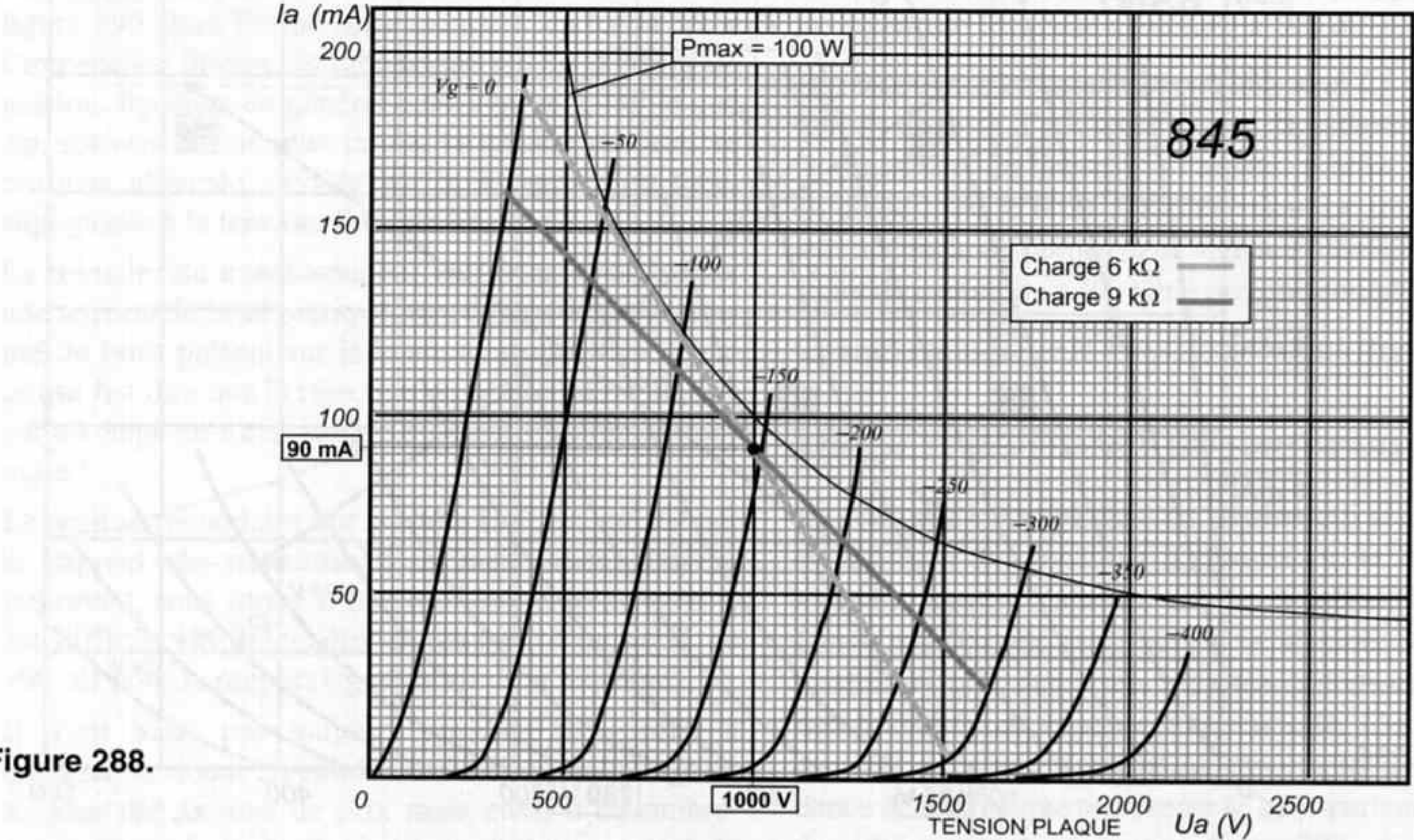


Figure 288.

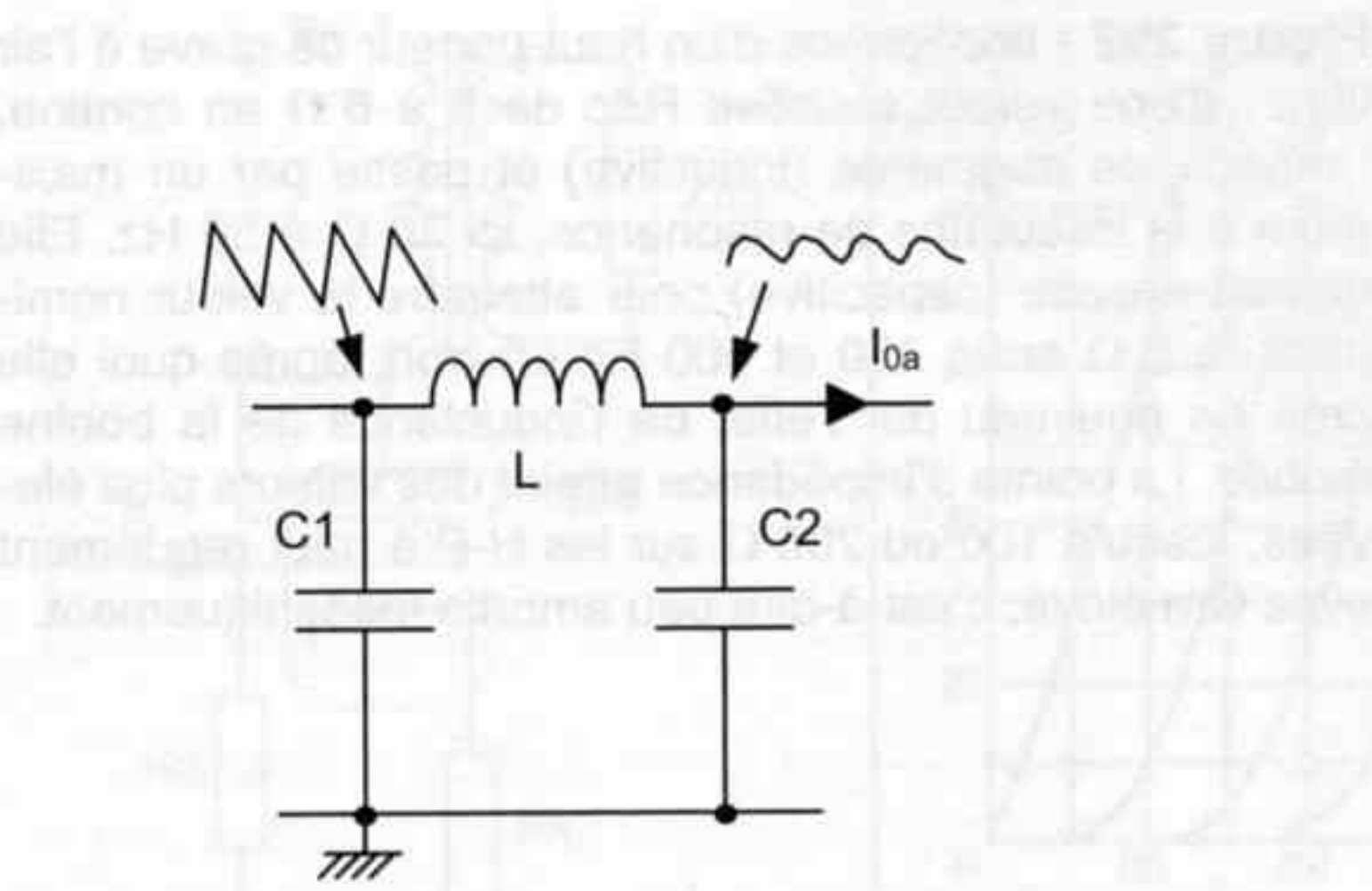


Figure 289 - Filtrage en π de la haute tension, réduisant le bruit à quelques mV.

Figure 291 - L'impédance du condensateur C_i forme avec celle du condensateur C_k de découplage de cathode un diviseur de tension. On retrouve sur la cathode une fraction U_k du bruit d'alimentation U_b :

$$U_k = U_b \cdot Z_{ck} / (Z_{ci} + Z_{ck})$$

Le tube recevant ce signal sur sa cathode, avec sa grille référencée à la masse, est un étage amplificateur "grille commune" qui produit sur son anode une tension U_a :

$$U_a = (\mu + 1) U_k \cdot Z_p / (Z_p + \rho)$$

Ce signal U_a est en phase avec U_k (car un étage grille commune n'inverse pas la phase) donc en phase avec U_b .

En négligeant ρ petit devant Z_p ,

$$U_a = (\mu + 1) U_k \text{ soit : } U_a = (\mu + 1) U_b \cdot Z_{ck} / (Z_{ci} + Z_{ck})$$

On en tire :

$$Z_{ci} + Z_{ck} = (U_b / U_a) \cdot (\mu + 1) Z_{ck}$$

Et si l'on souhaite annuler le bruit, il suffit de $U_b/U_a = 1$,

$$\text{Soit : } Z_{ci} + Z_{ck} = (\mu + 1) Z_{ck} \text{ et } Z_{ci} = \mu \cdot Z_{ck} ; \text{ ce qui s'obtient avec : } C_i = C_k / \mu$$

Dans cet exemple à la fréquence de 200 Hz, pour laquelle $Z = 8 \Omega$, et avec une tension normalisée de 2,83 V pour le signal d'attaque, la puissance électrique reçue est de :

$$P = U^2 / Z = 2,83^2 / 8 = 1 \text{ W}$$

La sensibilité nominale du H-P étant de 92 dB/1 W à 1 m, le niveau de pression acoustique mesuré à 1 m à cette fréquence est de :

$$N_{(200)} = 92 \text{ dB.}$$

Par contre à 50 Hz, avec $Z = 20 \Omega$, et pour un même signal d'attaque de 2,83 V, tension indépendante de la fréquence, imposée par la contre-réaction, la puissance électrique reçue est de :

$$P = U^2 / Z = 2,83^2 / 20 = 0,4 \text{ W}$$

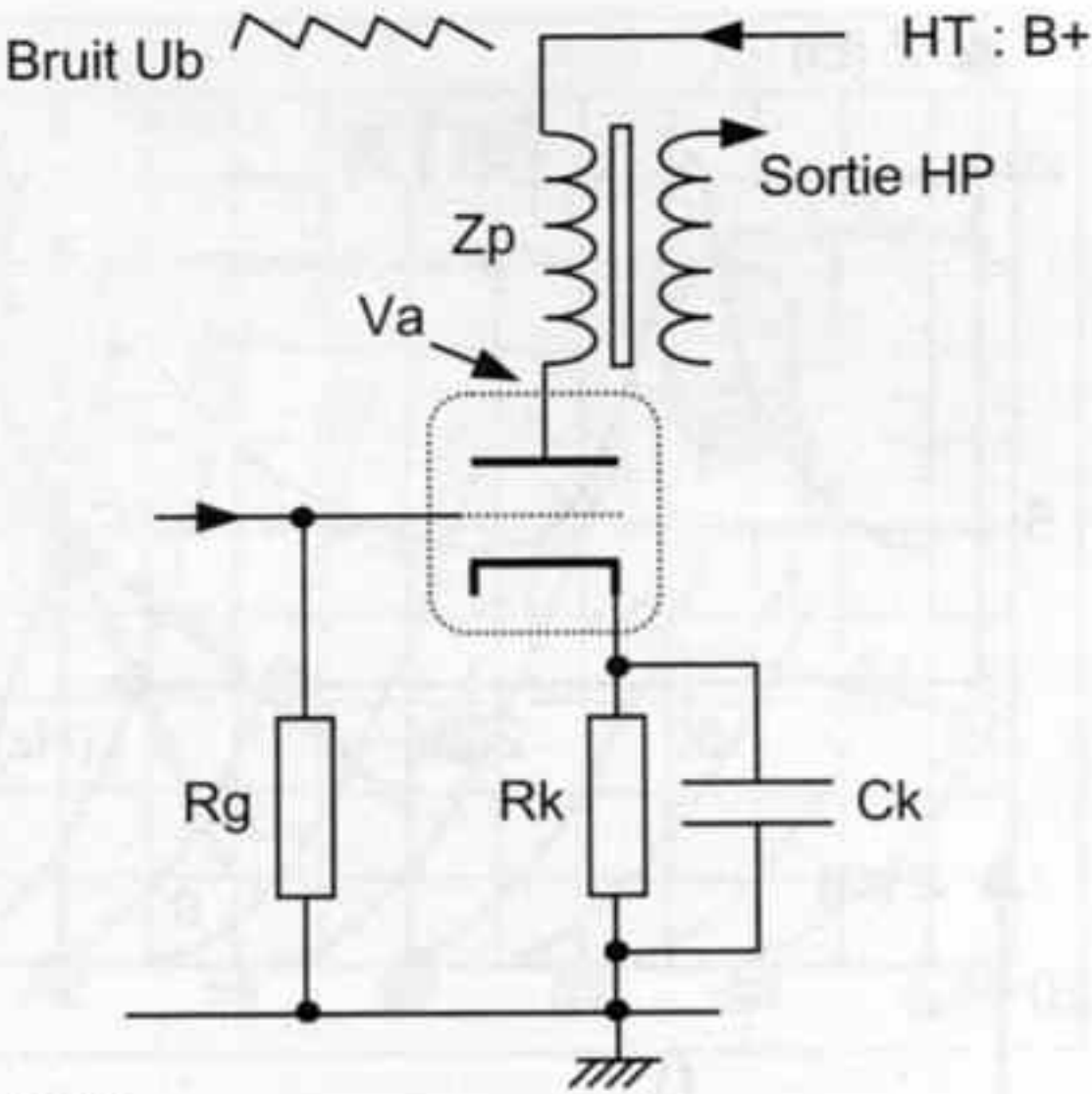
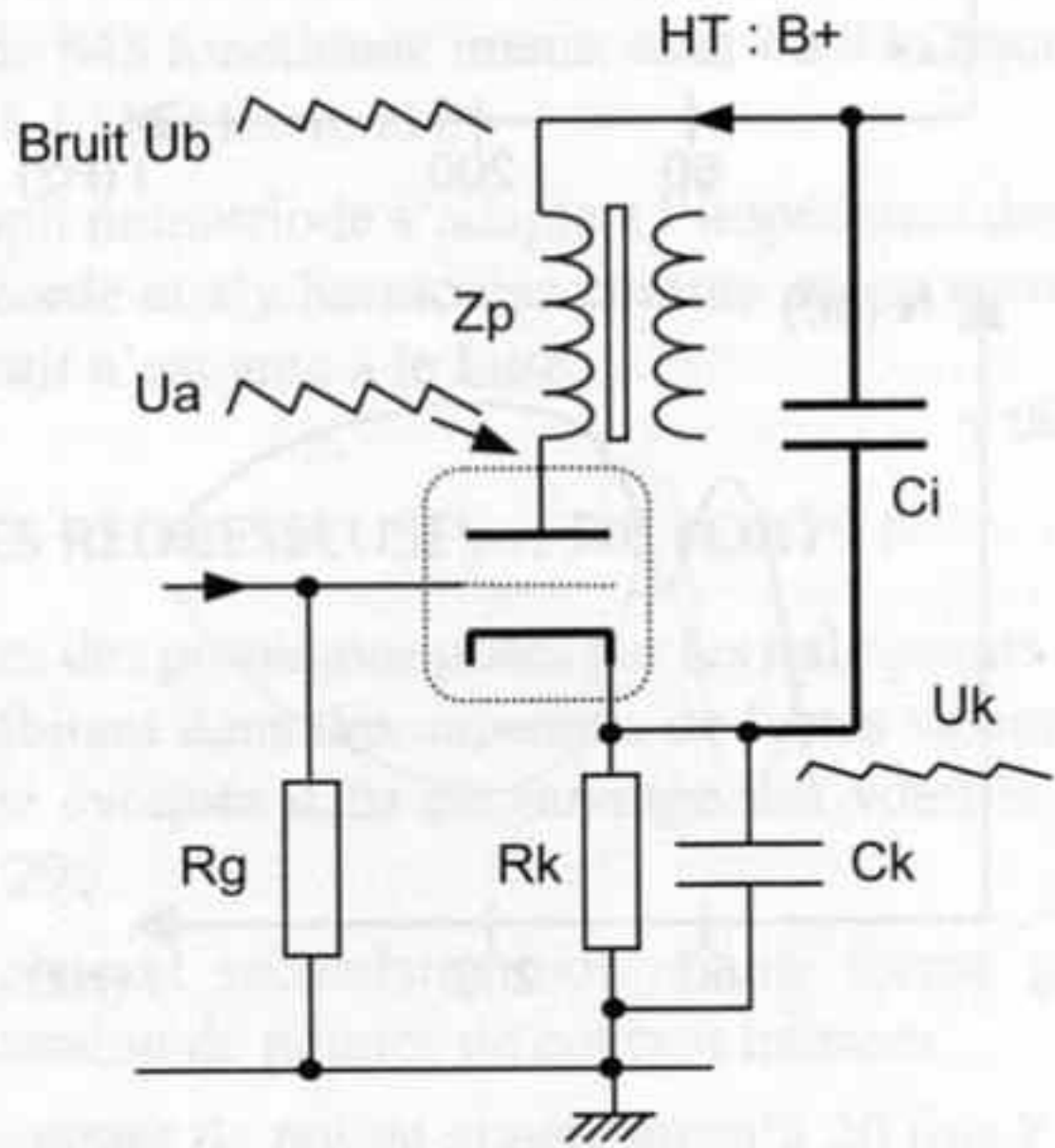


Figure 290.



La sensibilité du haut-parleur à cette fréquence étant au mieux la même qu'à 200 Hz, mais souvent plus faible, le niveau sonore à 1 m à 50 Hz est de :

$$N_{(50)} = 92 + 10 \cdot \log(P) = 92 + 10 \cdot \log(0,4) = 88 \text{ dB}$$

C'est donc une baisse de niveau de 4 dB, parfois plus, qui est introduite à cette fréquence.

La contre-réaction imposant une attaque en tension amorti complètement la résonance du haut-parleur, produisant autour de la fréquence concernée une atténuation sérieuse du niveau sonore. Cette atténuation est utile avec de petits haut-parleurs au traînage important, causé par un Q_e trop élevé et des vitesses de déplacements trop fortes. Elle est néfaste avec les haut-parleurs à haut rendement, dont le Q_e nécessairement faible suffit à définir un amortissement correct.

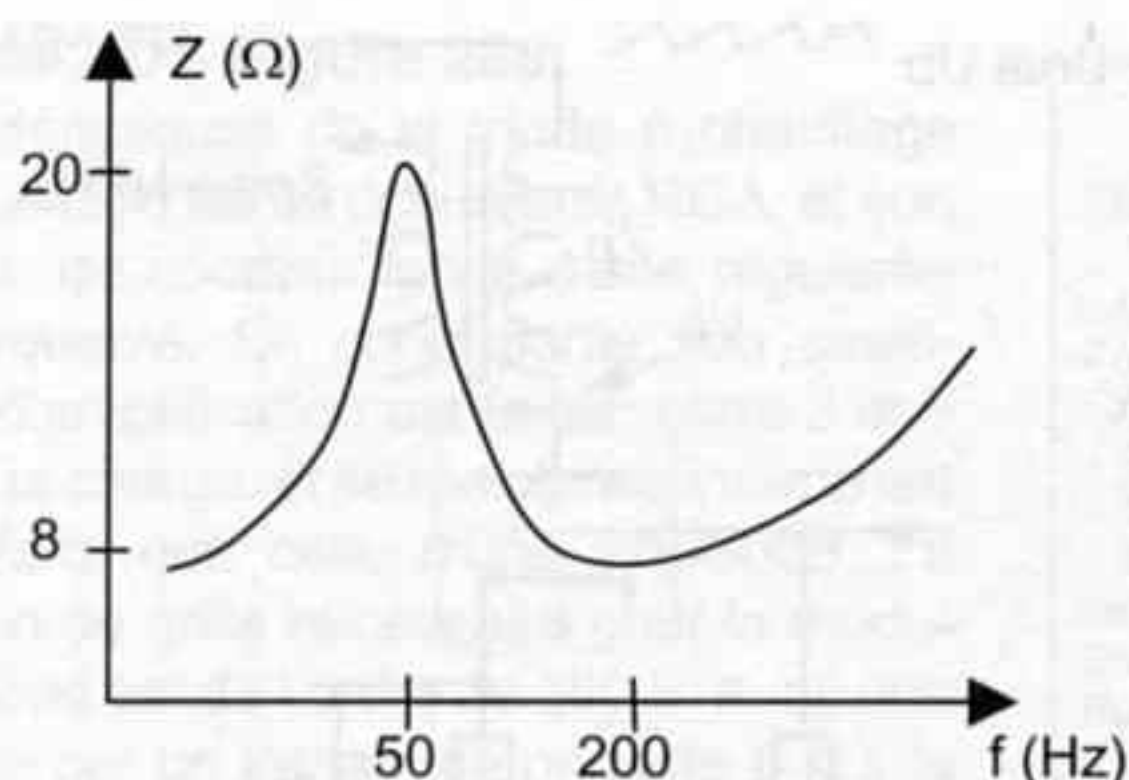


Figure 292 - Impédance d'un haut-parleur de grave à l'air libre : d'une valeur résistive R_{dc} de 5 à 6 Ω en continu, l'impédance augmente (inductive) et passe par un maximum à la fréquence de résonance, ici 20 Ω à 50 Hz. Elle décroît ensuite (capacitive) pour atteindre la valeur nominale de 8 Ω entre 150 et 500 Hz environ, après quoi elle croît de nouveau par l'effet de l'inductance de la bobine mobile. La pointe d'impédance atteint des valeurs plus élevées, jusqu'à 100 ou 200 Ω sur les H-P à haut rendement avec Q_m élevé, c'est-à-dire peu amortis mécaniquement.

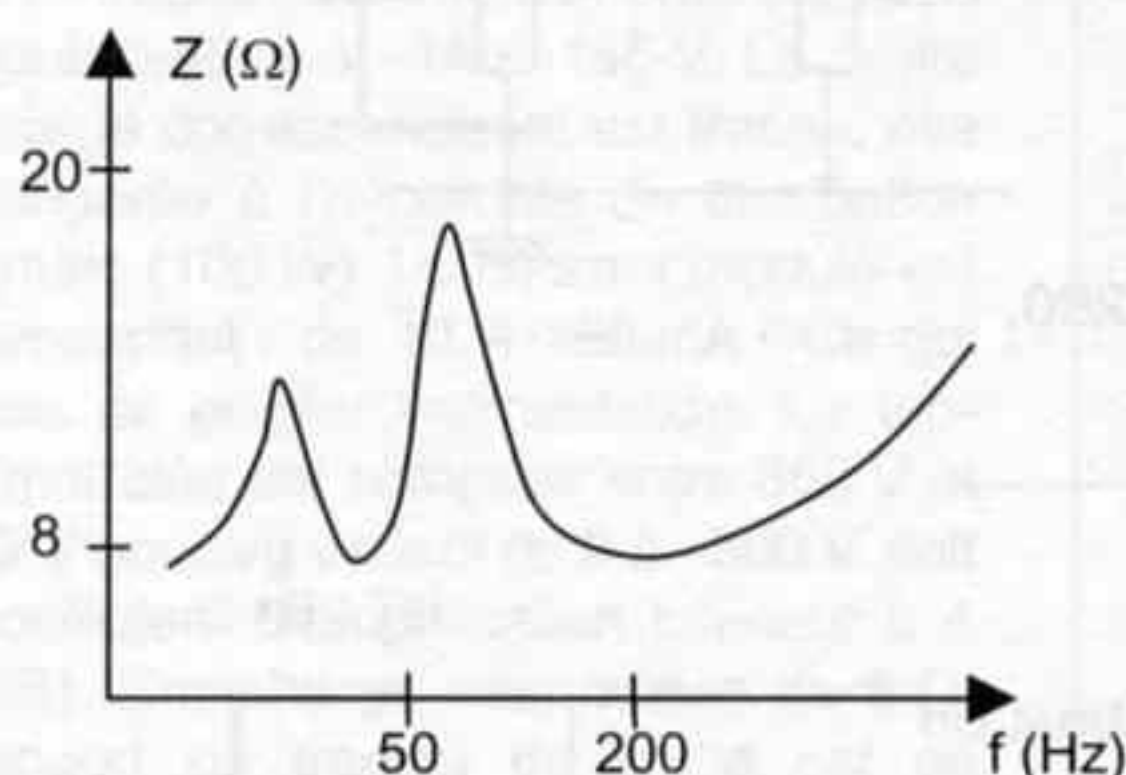


Figure 293 - L'accord Bass-Reflex de l'enceinte produit deux bosses de résonance. La fréquence d'accord est ici inférieure à la fréquence de résonance du haut-parleur (voir chapitre 8) et produit deux bosses inégales, la première vers 20 Hz d'amplitude 13 Ω environ et la seconde vers 63 Hz de 18 Ω environ. Cette forme de courbe d'impédance est typique des petites enceintes actuelles.

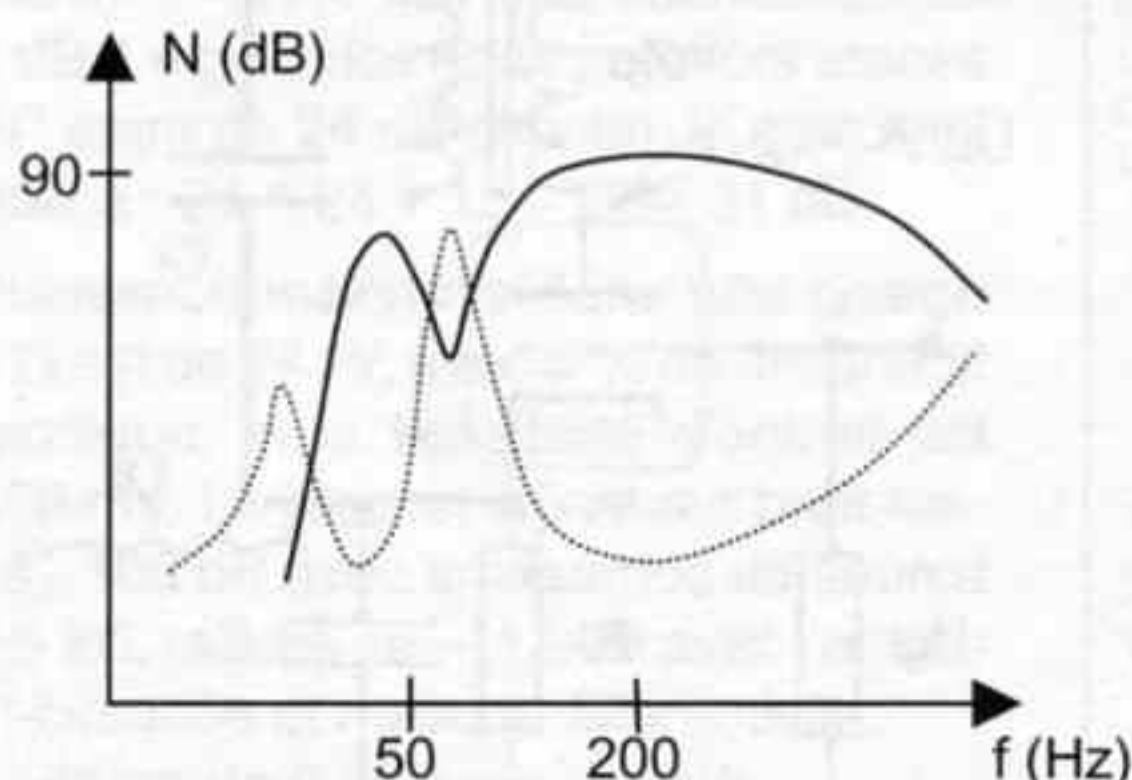


Figure 294 - La réponse fréquentielle correspondante, lorsque l'amplificateur fournit une attaque en tension, présente deux creux d'atténuation, ici vers 20 Hz et 63 Hz, correspondant aux bosses de la courbe d'impédance. Si l'amortissement de la bosse à 63 Hz est quelque peu utile pour diminuer les effets "boomy" donnant un son de tonneau, il est ici excessif. L'amortissement vers 20 Hz procure une coupure basse très rapide, ce que le petit haut-parleur apprécie, mais pas l'audiophile...

Dans une charge Bass-Reflex, l'amortissement des deux pointes de résonance produit une réponse fréquentielle tourmentée, figures 293 et 294 :

L'attaque en tension procurée par l'amplificateur transistorisé à fort taux de contre-réaction convient très bien aux petites enceintes à la mode actuellement, mais s'adapte très mal aux haut-parleurs de qualité, qui se comportent un peu mieux avec une attaque en courant. Cependant c'est une attaque à puissance constante, c'est-à-dire indépendante de la fréquence qui procure les meilleurs résultats subjectifs. Un ampli à taux de contre-réaction faible procurant un peu d'amortissement supplémentaire convient mieux au registre grave, surtout si des résonances de salle sol/plafond vers 68 Hz (2,52 m) s'ajoutent aux résonances de l'enceinte.

Un taux de contre-réaction nul étant par contre requis en médium et aigu afin de libérer complètement le trait musical. Une triode bien utilisée procure une réponse pratiquement indépendante des variations d'impédance de la charge, comme le montre l'exemple

figure 295 d'un ampli pour voie d'aigu, avec un tube KT66 branché en pseudo-triode et monté en simple-étage, avec un transformateur de rapport $n = 17,68$. L'impédance primaire est donc de 2,5 k Ω lorsque la charge au secondaire est de 8 Ω car :

$$Z_p = n^2 \cdot Z_s = 17,68^2 \times 8 = 2\,500\,\Omega.$$

L'impédance primaire de 2,5 k Ω correspond à la droite de charge D_1 passant par le point de repos choisi A, avec $V_{ak} = 400\text{ V}$ et $I_{oa} = 50\text{ mA}$, soit une puissance dissipée de 20 W. La polarisation grille est de -40 V .

Une excursion de la tension d'entrée sur la grille de $+ ou - 20\text{ V}$, amène les points de fonctionnement en B ou C. La tension d'anode évolue donc entre 480 V en B et 300 V en C, le gain de tension est alors de :

$$A = (480 - 300)/(-60 - (-20)) = 180 / 40 = 4,5$$

La tension crête-à-crête au secondaire est de $180/17,68 = 10,2\text{ V}$ soit une tension efficace de 3,6 V et une puissance efficace dans 8 Ω de :

$$P = 3,6^2 / 8 = 1,62\text{ W}.$$

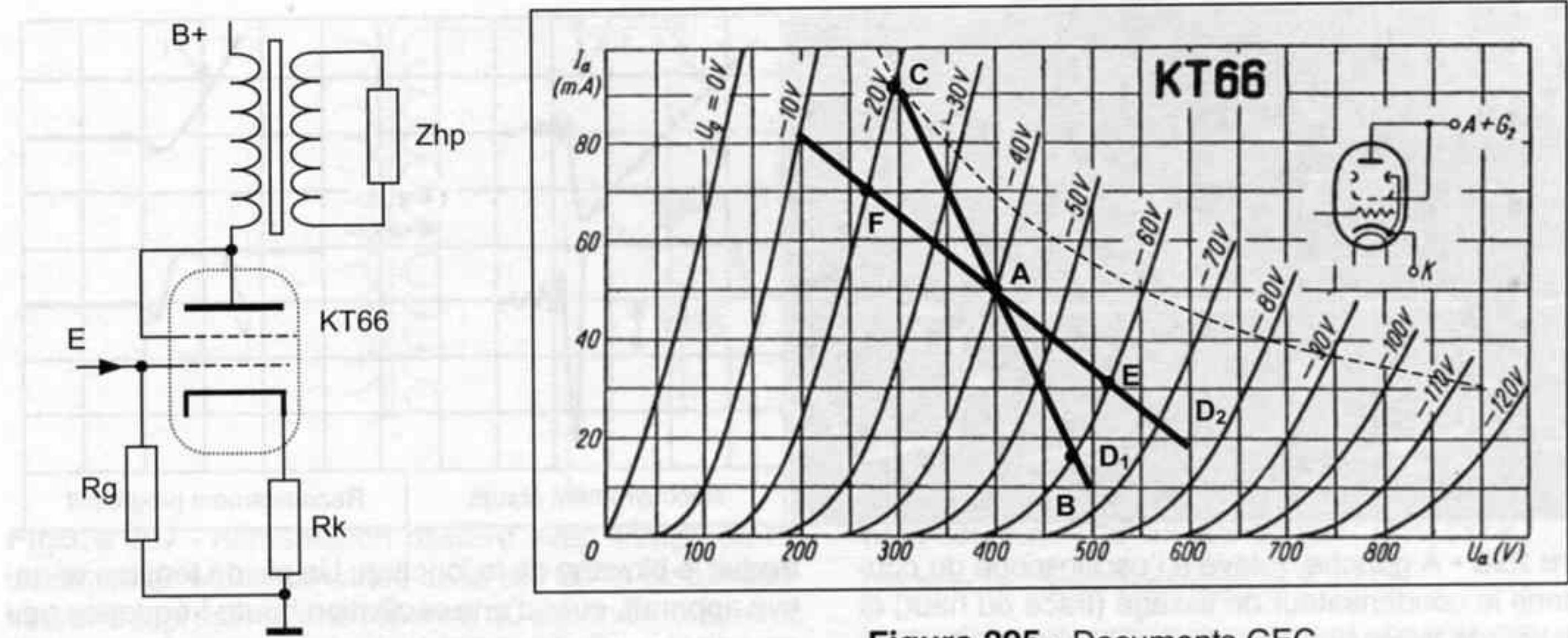


Figure 295 - Documents GEC.

Si maintenant l'impédance de charge passe à $Z's = 20 \Omega$ à la fréquence de résonance de l'enceinte (voir figure 292), alors l'impédance ramenée au primaire vaut $Z_p = n^2 \cdot Z's = 6\,252 \Omega$. Sur la droite de charge correspondante D_2 une excursion de $\pm 20 \text{ V}$ de la tension de commande amène les points de fonctionnement en E ou F. La tension d'anode évolue donc entre 520 V en E et 260 V en F, le gain de tension est alors de :

$$A = (520 - 260) / (-60 - (-20)) = 260 / 40 = 6,5$$

L'amplification en tension de l'ampli a donc augmenté, et aucune contre-réaction n'agit pour la ramener à la valeur prévue. À cette fréquence l'ampli apporte un gain supplémentaire de $G = 20 \log(6,5 / 4,5) = 3,2 \text{ dB}$.

La tension crête-à-crête secondaire est de : $260 / 17,68 = 14,7 \text{ V}$ soit une tension efficace de 5,2 V et une puissance efficace, sur charge de 20Ω cette fois, de $P' = 5,2^2 / 20 = 1,35 \text{ W}$.

La perte de niveau à cette fréquence est de : $N = 10 \log(1,35 / 1,62) = -0,8 \text{ dB}$ environ.

Les variations dans la réponse fréquentielle dues aux irrégularités d'impédance de l'enceinte sont donc nettement moins sensibles avec un étage de sortie à triodes. Cette particularité est d'autant plus vraie que l'impédance primaire est choisie assez basse, de manière à ce que le gain de tension augmente lorsque l'impédance de la charge, et par suite celle ramenée au primaire, augmente.

Cela explique en partie pourquoi les mises aux points subjectives d'amplis monotriodes aboutissent généralement à des choix d'impédances primaires relativement faibles, de 2,3 à 3 k Ω seulement par exemple pour une triode WE-300B, alors que l'étude du réseau de courbes laisse penser que la charge adaptée, procu-

rant le moins de distorsion, est de 3,5 à 5 k Ω . De même la triode 845 fonctionne mieux sous 7 à 9 k Ω que sous les 10 à 12 k Ω habituels.

Un ampli monotriode s'adapte à l'impédance des H-P, s'y accorde et s'y harmonise comme aucun autre type de circuit n'est apte à le faire.

VALVES REDRESSEUSES... DE TORTS !

Certains des problèmes posés par les redresseurs à diodes, débitant dans des capacités de fortes valeurs, ont déjà été évoqués dans cet ouvrage. En voici le bilan, figure 296 :

- Le courant secondaire montre une forme pulsée, succession de pointes de courant intenses.
- Le courant de pointe atteint jusqu'à 20 fois l'intensité du courant continu demandé par les circuits alimentés.
- Le transformateur peut être saturé transitoirement à chaque demi-alternance par ces pointes de courant (bruits induits à 150 Hz et harmoniques).
- Le temps de recouvrement des diodes, nécessaire à leur blocage, entraîne une conduction simultanée des quatre diodes d'un pont redresseur pendant plusieurs ms avec des diodes classiques, ce qui constitue un court-circuit bref du secondaire du transformateur.
- Une saturation transitoire accompagne ce court-circuit.
- Un rayonnement de champs magnétiques pulsés accompagne ces saturations transitoires.
- Ces champs magnétiques rayonnés jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres de distance induisent des pics parasites -50 Hz et harmoniques surtout impairs jusqu'au rang 20, et bruit hautes fréquences

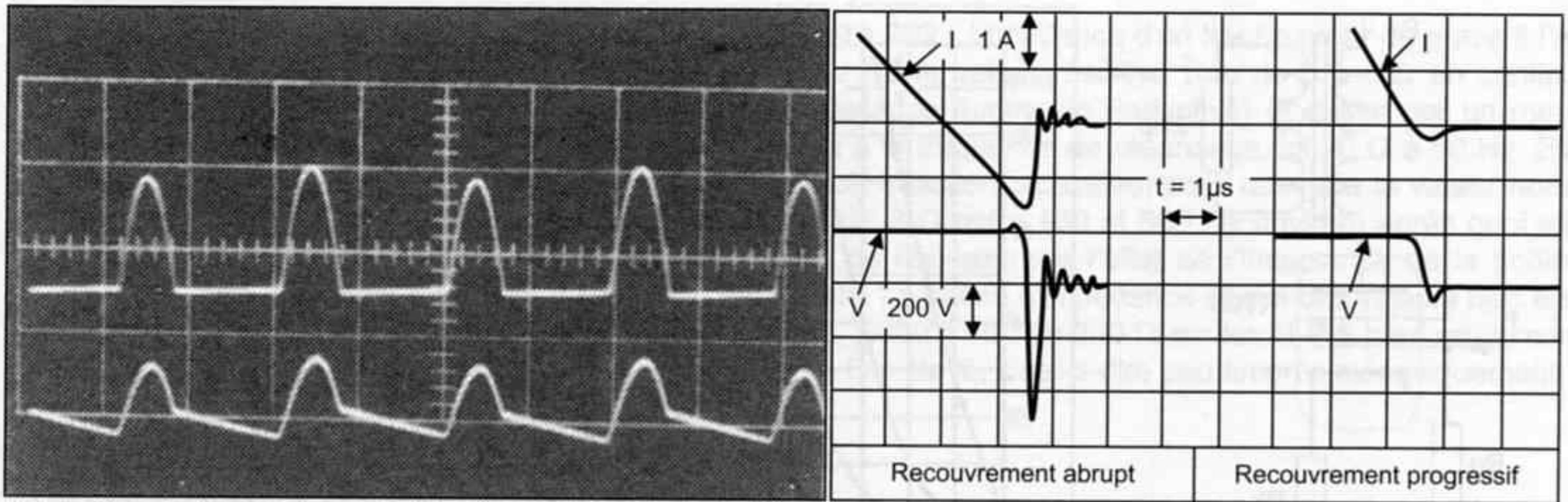


Figure 296 - À gauche, relevé à l'oscilloscope du courant dans le condensateur de lissage (trace du haut) et ondulation de la tension aux bornes du circuit alimenté (trace du bas). La durée des impulsions de courant augmente avec le courant dans la charge. À droite, examen à la loupe de l'inversion de tension aux bornes d'une diode classique BY255. Une pointe de courant inverse

traduit le blocage de la jonction. Un pic de tension négative apparaît, suivi d'une oscillation haute fréquence peu amortie. Les diodes rapides, à recouvrement progressif, ne présentent pas autant de parasites. Ici à droite un modèle BYV96, avec un temps de recouvrement de 300 ns. Les versions ultra-rapides commutent en 25 à 35 ns !

(R. Damaye et C. Gagne : Alimentations électroniques)

- dans toutes les boucles formées par les pistes de circuit ou les conducteurs aller-retour, d'alimentation et de signal.
- D'autres enroulements secondaires peuvent être parasités par ces phénomènes.
- Le déblocage et le blocage des diodes produisent des pics de courant inverse, se traduisant par des pointes parasites sur la tension secondaire, pointes appelées pics de commutation.
- Ces pics sont riches en hautes fréquences, jusqu'à plusieurs MHz.
- L'inductance de l'enroulement secondaire et la capacité de filtrage forment un circuit oscillant (comme tout circuit L-C) peu amorti, facilement excité par ces transitoires.

Les effets audibles, en plus d'un bruit de fond, grésille-ment à caractère crépitant, scintillant, "rugueux", sont sensibles dans le registre haut-médium/aigu qui se montre à la fois chuintant, dur et trop brillant. Les sifflantes de la voix sont accentuées, et les bruits de frottement, de glissement, peu naturels.

Une forme de courant redressé beaucoup plus douce, arrondie, avec des commutations nettes sans courant inverse, est nécessaire pour diminuer ces perturbations. Le changement des ponts de diodes moulés ou des diodes classiques par des modèles plus rapides, ou ultrarapides, à avalanche contrôlée ou Schottky, amène déjà un progrès. Le changement du condensateur de lissage en tête de filtre pour un modèle plus gros fait en revanche empirer le problème, les courants de crête absorbés étant alors plus forts. Il est préférable de laisser le condensateur d'origine et d'implanter un circuit en π , avec self si possible ou résistance de faible valeur sinon. Le deuxième condensateur de ce filtre en π peut en revanche être surdimensionné largement à raison de 10 000 μF par A consommé.

L'insertion de résistances de quelques 10 Ω en série avec les redresseurs, entre secondaires et diodes, va également dans le sens d'un adoucissement du courant secondaire, et se traduit par une ondulation plus forte de la tension redressée, ainsi qu'une diminution des parasites. Autrement dit le spectre du bruit de fond est déplacé vers les basses fréquences, là où il est beaucoup moins gênant. Cette pratique est évidemment irréalisable avec une alimentation directement prise sur le condensateur de tête de filtre, car alors le ronflement à 100 Hz atteindrait un niveau insupportable. Là encore, le filtrage en π est nécessaire.

Ces phénomènes parasites sont révélés par un bruit de fond parfois important, propagé par conduction sur la tension redressée et filtrée, et par induction sur les conducteurs, composants et circuits environnants. S'il est vrai que les basses fréquences présentes sur la tension d'alimentation sont en partie rejetées par le montage push-pull, elles sont par contre entièrement retrouvées en sortie d'un circuit simple-étage. Les hautes fréquences ne sont jamais symétriques, les impédances des demi-enroulements, des redresseurs et celles des circuits alimentés n'étant pas elles-mêmes symétriques, avec des capacités parasites différentes. Ces hautes fréquences, sous forme de pics parasites, ne sont donc pas rejetées et intermodulent gravement avec le signal audio dans tous les composants, non linéaires à ces fréquences, transformateurs de sortie ou de liaison en particulier.

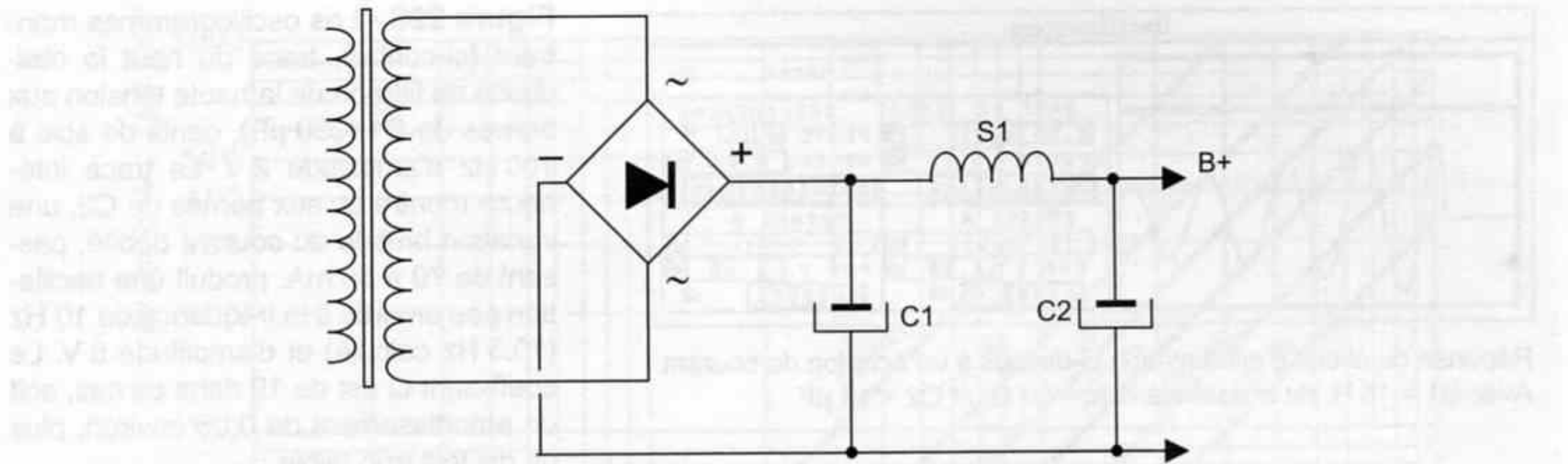


Figure 297 - Alimentation passive avec filtrage en Pi. Le circuit de sortie constitué de la self S1 et du condensateur C2, présente une réponse du second ordre, avec par conséquent un risque d'oscillation plus ou moins amortie. La période des oscillations est donnée par :

$$T = 2\pi / (\sqrt{[1/(LC) - R^2/(4L^2)]})$$

Ou $T = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$ si R est négligeable.

Le principe correct est donc de redresser/lisser d'une part, avec un condensateur de valeur faible ou moyenne, chargé par un redresseur présentant une résistance de source pas trop faible afin de limiter les pointes de courant et les pics parasites, et de filtrer d'autre part, avec un réseau L-C ou à défaut R-C, avec capacité réservoir de forte valeur sur laquelle le courant modulé est prélevé. Une réponse apériodique (sans oscillation) du circuit d'alimentation, lors d'un brusque appel de courant transitoire, impose que le condensateur de tête de filtre soit plus petit que celui situé après la self, et que la résistance-série de cette dernière soit suffisante pour amortir toute oscillation de la tension filtrée.

Les oscillogrammes suivant figures 298 à 300 montrent les résultats obtenus avec des circuits passifs L-C pour diverses valeurs de la self S1 et du condensateur C2, et pour deux valeurs différentes de la résistance-série du bobinage. Les relevés ont été effectués (sonde 1 : 100) sur l'alimentation 1 200 V de l'ampli montré figures 279 à 281.

Depuis l'arrivée des semi-conducteurs cette pratique a été "oubliée" pour des raisons évidentes d'économie. L'argument du rapport signal/bruit très élevé avec une alimentation "moderne" est fallacieux : La mesure de ce rapport ne renseigne pas sur le spectre du bruit de fond, en particulier sur son contenu en hautes fréquences, et la composante basse fréquence est prépondérante dans cette mesure. D'autre part la mesure statique, sans signal, ne révèle pas les dissymétries des parasites, ni l'intermodulation lorsqu'une modulation audio est appliquée.

Et le coefficient de surtension par : $Q = (1/R) \cdot \sqrt{L/C}$

Ou encore l'amortissement $m = 1 / Q$

L'amortissement critique, assurant une réponse apériodique (sans oscillation) est $m = 0,5$ correspondant à $Q = 2$

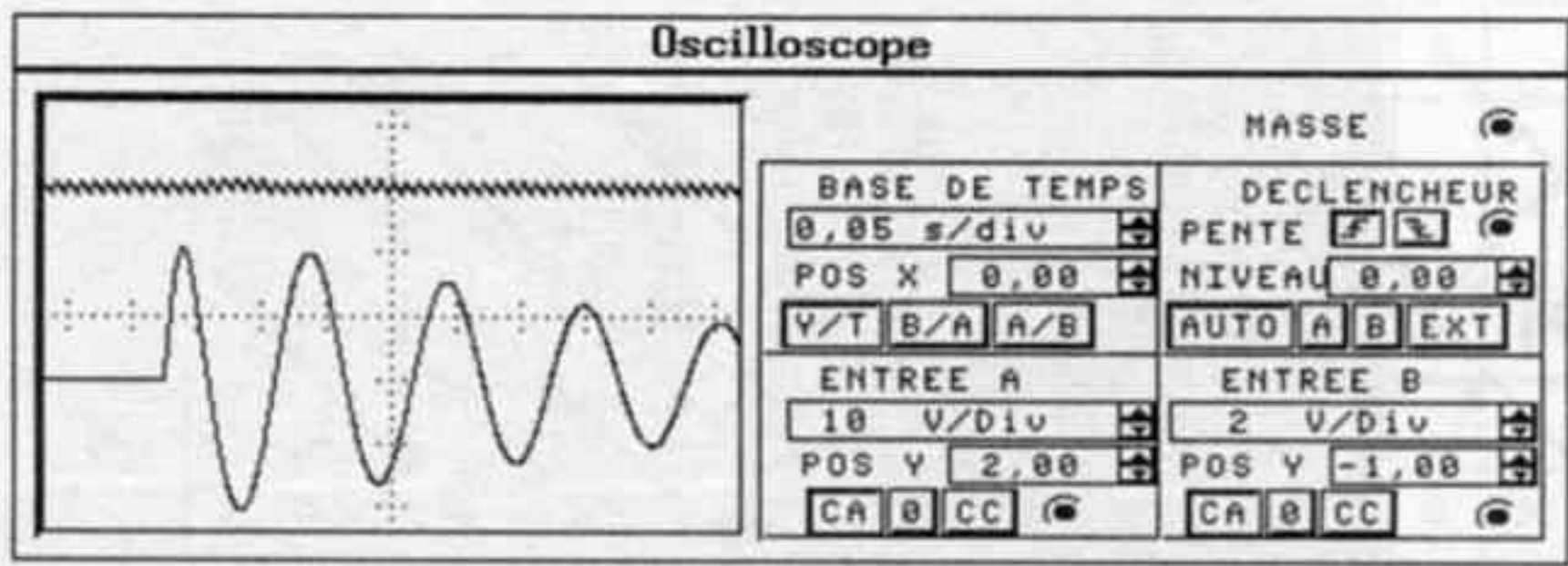
La valeur de la self étant variable avec le courant débité, c'est avec $Q = 1$ à $1,5$ qu'un fonctionnement correct est obtenu.

Le redressement par valve permet d'aller au bout de cette philosophie d'alimentation. L'impédance interne d'une valve, ou diode à vide, appelée aussi résistance de plaque (à ne pas confondre avec la charge de plaque) est très nettement plus élevée que celle d'une diode. Son courant maximal étant limité à quelques centaines de mA dans le meilleur des cas, la taille de la capacité de tête de filtre est obligatoirement limitée, des valeurs de 10 à 100 μF étant habituelles. Dans ces conditions le courant de crête reste assez limité et sa forme est arrondie, sans pointes violentes.

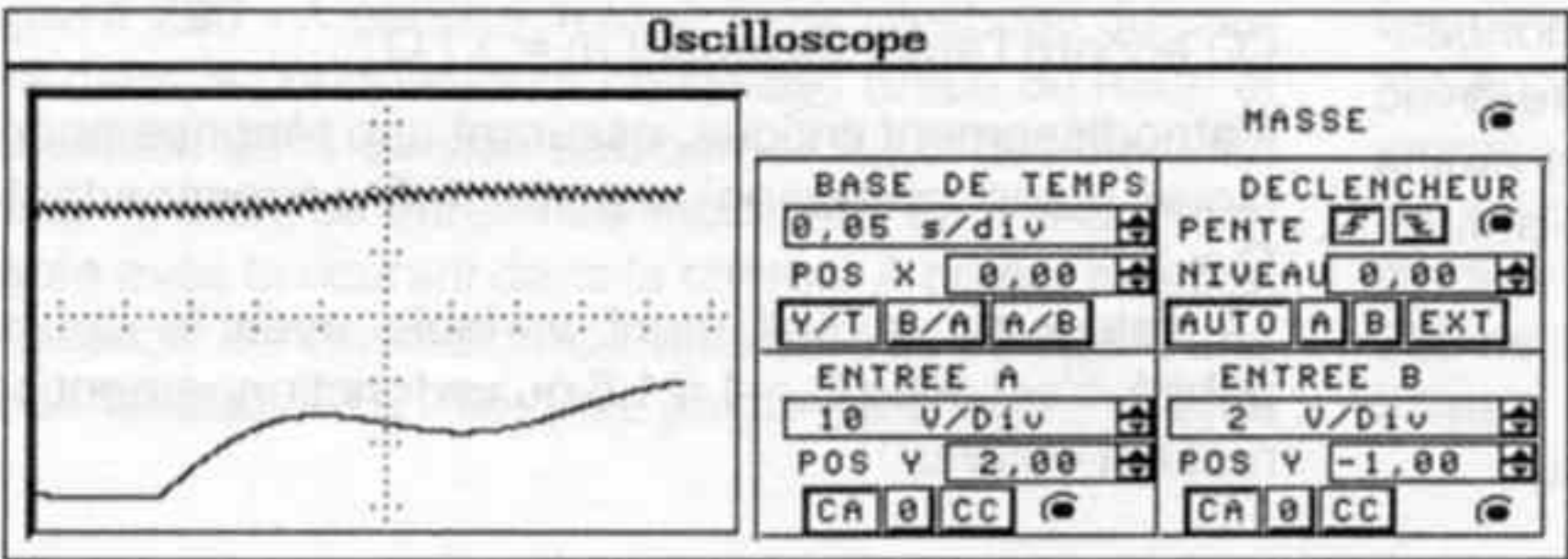
D'autre part, les commutations d'une valve sont par principe exemptes de courants inverses et ne produisent pas de pics parasites.

Un troisième avantage, involontaire, vient du fait que le transformateur est surdimensionné, étant constitué de deux demi-enroulements secondaires identiques, débitant chacun à leur tour à travers chacune des deux plaques de la valve, dite bi-plaque. Dans ces conditions un enroulement unique avec redressement en pont occuperait moins de place, et le circuit magnétique serait plus petit, d'où une induction plus élevée, et une saturation plus rapide.

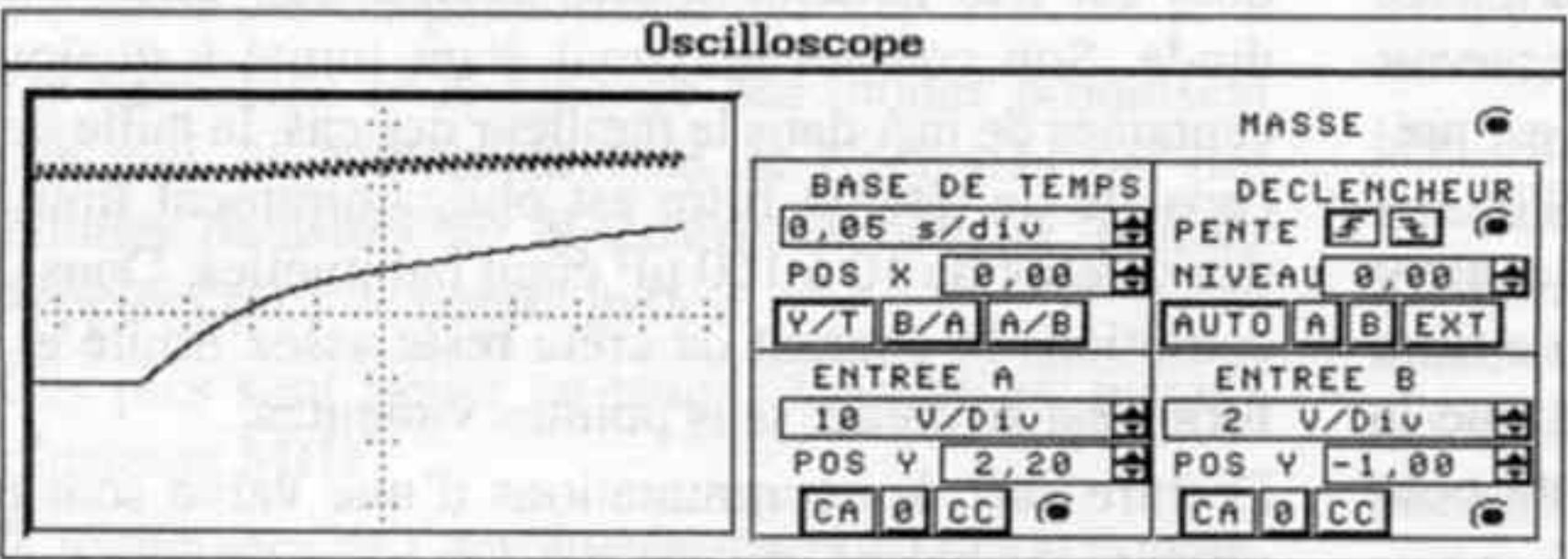
Cette disposition produit une tension redressée/lissée avec une ondulation importante atteignant typiquement 2 à 5 % de la tension continue, c'est-à-dire plusieurs V et jusqu'à plus de 25 V dans les amplis à lampes habituels. Une telle ondulation ne peut être réduite qu'en faisant suivre la capacité de lissage par un réseau L-C. L'abaque figure 226 permet de dimensionner aisément un tel filtre. Une combinaison classique 10 H/100 μF apporte d'après cet abaque une atténuation de l'ondulation 100 Hz d'un facteur 400,



Réponse du circuit d'alimentation ci-dessus à un échelon de courant. Avec S1 = 15 H, de résistance Rdc = 50 Ω, et C2 = 16 μF.



Réponse du circuit d'alimentation ci-dessus à un échelon de courant. Avec S1 = 15 H, de résistance Rdc = 50 Ω, et C2 = 300 μF



Réponse du circuit d'alimentation ci-dessus à un échelon de courant. Avec S1 = 15 H, Rdc = 250 Ω, et C2 = 300 μF. On obtient Q = 0,9

l'ondulation en sortie est alors réduite à quelques dizaines de mV, ce qui est suffisamment faible pour alimenter un étage de puissance push-pull avec un bruit de fond reporté à -90 dB.

Un étage de sortie simple alimenté dans les mêmes conditions présenterait un bruit de fond à -70 dB environ, ce qui est très nettement insuffisant avec des H-P à haut rendement. Une deuxième cellule de filtrage est requise dans ce cas, avec réseau R-C. La combinaison 220 Ω/100 μF procure, d'après l'abaque figure 301, un facteur d'atténuation de 12 à 100 Hz, soit -21,5 dB. Le bruit de fond atteint alors une valeur inférieure à -90 dB, bien que les composants utilisés ne présentent pas des valeurs surdimensionnées. C'est donc la structure de l'alimentation qui importe, plus que sa taille.

Figure 298 - Les oscillogrammes montrent (ci-contre), trace du haut la résiduelle de filtrage de la haute tension aux bornes de C1 (330 μF), dents de scie à 100 Hz d'amplitude 2 V. La trace inférieure montre qu'aux bornes de C2, une variation brutale du courant débité, passant de 70 à 80 mA, produit une oscillation peu amortie à la fréquence de 10 Hz (10,3 Hz calculé) et d'amplitude 8 V. Le coefficient Q est de 19 dans ce cas, soit un amortissement de 0,05 environ, plus de dix fois trop faible.

Figure 299 - Avec 20 fois la valeur précédente C2 augmenté jusqu'à 300 μF, le problème n'est pas résolu : il reste une ondulation lors de la réponse à un échelon. La fréquence des oscillations a diminué et s'établit à 2,5 Hz, avec une amplitude de 4 V. Le calcul donne un coefficient Q de 4,5 environ, soit un amortissement de 0,22 encore deux fois trop faible. En doublant la valeur de C2, l'amortissement est multiplié par $\sqrt{2}$. C'est donc avec C2 quatre fois plus forte, soit 1 200 μF qu'on approcherait de l'amortissement critique, avec 0,44 !

Figure 300 - Plutôt que de gonfler à outrance la capacité de sortie C2, ce qui serait volumineux et coûteux, il est préférable d'améliorer l'amortissement en augmentant la résistance-série de la self, sans dépasser une valeur trop forte qui ferait chuter la tension lors des pointes de courant. Ici, c'est avec 250 Ω (200 Ω du fil émaillé du bobinage, et 47 Ω en série) qu'une réponse correcte est obtenue, C2 restant à 300 μF. La variation de tension n'est que de 5 V, soit 0,4 % environ.

Bien sûr, des valeurs de 100 μF/20 H/470 μF/220 Ω/470 μF sont tout à fait possibles, la première cellule apportant une atténuation de 4 000, et la seconde de 60, soit un total de 240 000, ou -107 dB (moins de 1 mV). Le bruit de fond de l'ampli tombe alors sous la barre des -110 dB théorique, mais d'autres bruits d'origine thermique limitent malheureusement cette performance.

Les valves redresseuses ont été parfois critiquées pour leur durée de vie limitée, comparativement aux diodes semi-conductrices. La plupart du temps cette durée de vie est réduite par une mauvaise utilisation, en particulier un surdimensionnement de la capacité de tête de filtre et du secondaire du transformateur. Un circuit de redressement par valve doit impérativement présenter une résistance série totale suffisante pour limiter le cou-

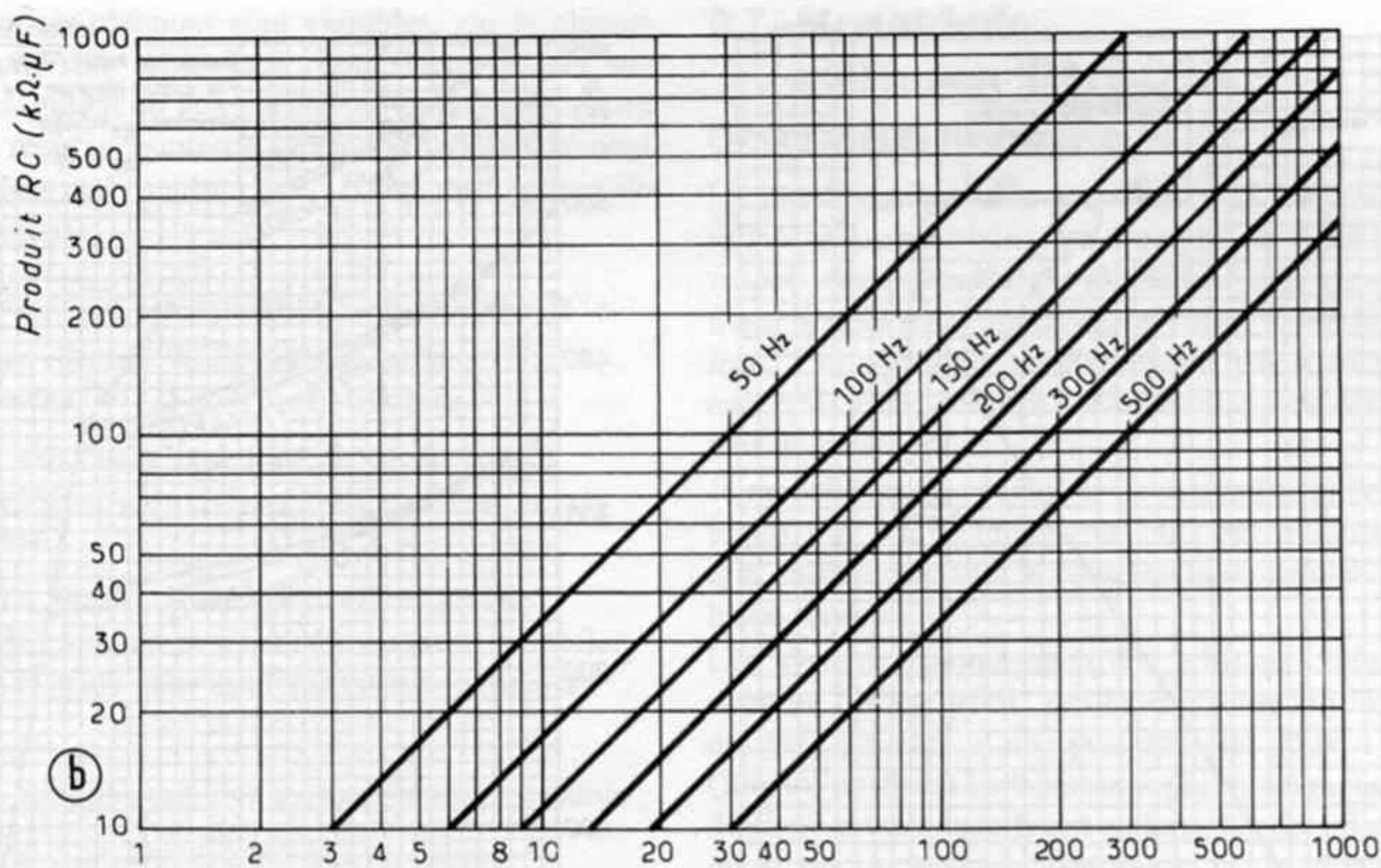


Figure 301 - Facteur d'atténuation de l'ondulation résiduelle par filtrage R-C.
D'après R.Damaye et C.Gagne, Alimentations électroniques.

rant de crête dans la cathode de la valve. Cette résistance est en partie constituée par la résistance de plaque de la valve (mais cette résistance est souvent insuffisante) et en partie par la résistance ramenée au secondaire du transformateur. Cette dernière est constituée de la résistance de l'enroulement secondaire à laquelle s'ajoute celle du primaire multipliée par le rapport de transformation au carré. La figure 302 indique pour la valve EZ81 la résistance série minimale requise. Une résistance supplémentaire en série avec les plaques de la valve peut être ajoutée pour limiter le courant, et la résistance parasite du condensateur ESR doit être relativement élevée, une technologie classique étant par conséquent préférable.

C'est à partir de ces courbes qu'un dimensionnement correct des circuits est possible. Il est préférable de choisir au départ une valeur de tension continue un peu plus élevée que nécessaire, tension qui sera réduite par les résistances des cellules R-C successives. L'exemple du schéma donné figure 280 illustre ces principes. La valve utilisée est la 5U4G à chauffage direct 5 V/3 A et support octal. Elle supporte 550 V maxi sur chaque plaque, 275 mA maxi en continu, et 4 A en crête au démarrage.

Des résistances série de 33 Ω sont insérées dans le circuit de sortie haute tension, entre les extrémités du filament qui est aussi la cathode, et le condensateur de lissage de tête de filtre. Ces résistances limitent le courant d'appel à une valeur tolérable, inférieur à celle qui serait obtenue avec un branchement direct sur un

condensateur de 40 μF, taille maxi recommandée. Ici le condensateur a été porté à 220 μF et la résiduelle d'ondulation est de seulement 0,4 Vmesuré. L'abaque figure 227 permet de prévoir approximativement ce pourcentage d'ondulation, si l'on connaît la résistance de l'enroulement secondaire, et la résistance de charge. Dans le cas étudié l'enroulement secondaire a été mesuré à $R_s = 120\ \Omega$ environ, et la charge est estimée à 30 mA sous 600 V, soit $R_{ch} = 20\ k\Omega$. Le rapport des impédances est de :

$$R_s / R_{ch} = 120 / 20\ 000 = 0,6\ \% \text{ soit moins de } 1\ \%.$$

D'autre part le produit $R_{ch} \cdot C \cdot \omega$ s'établit à $(20 \times 10^3) \times (220 \cdot 10^{-6}) \times (2\pi \times 50) = 1\ 382$.

Une telle valeur situe le point de lecture hors de l'abaque, mais une extrapolation est possible : en divisant par dix la valeur ci-dessus, on lit pour $R_s / R_{ch} = 1\ \%$ environ 0,6 % d'ondulation. Les courbes étant quasiment droites, pour un produit dix fois plus grand, l'ondulation sera dix fois plus faible soit 0,06 %.

La tension alternative résiduelle théorique aux bornes du condensateur de tête est :

$$U_r = 0,06\ \% \times 600 = 0,36\ V.$$

La première cellule de filtrage 10 H/220 μF divise par 800 (figure 226) cette ondulation, qui tombe sous 0,5 mV.

La deuxième cellule, avec 220 Ω/100 μF apporte une atténuation de 12 environ (figure 301), l'ondulation tombant alors à 0,04 mV.

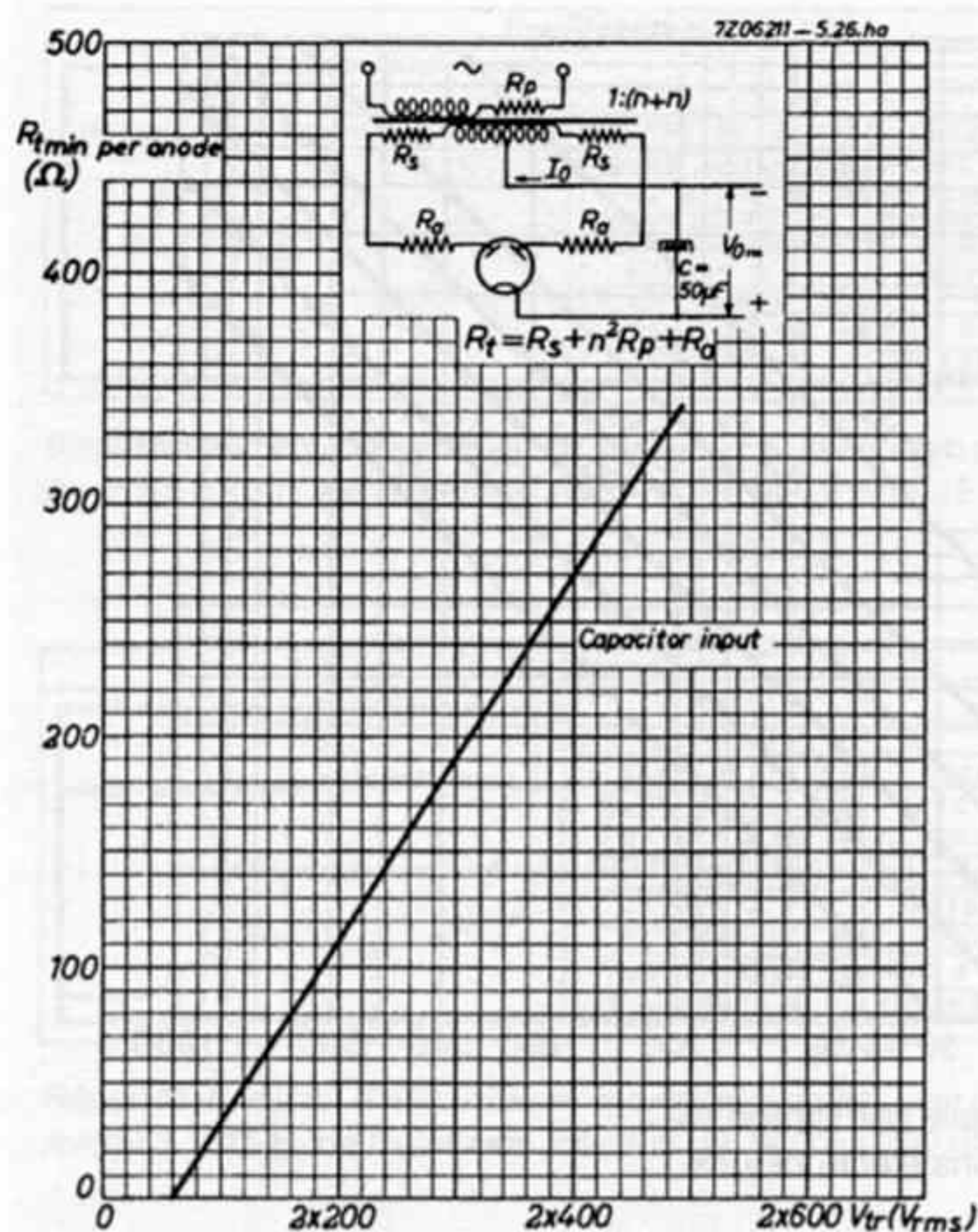


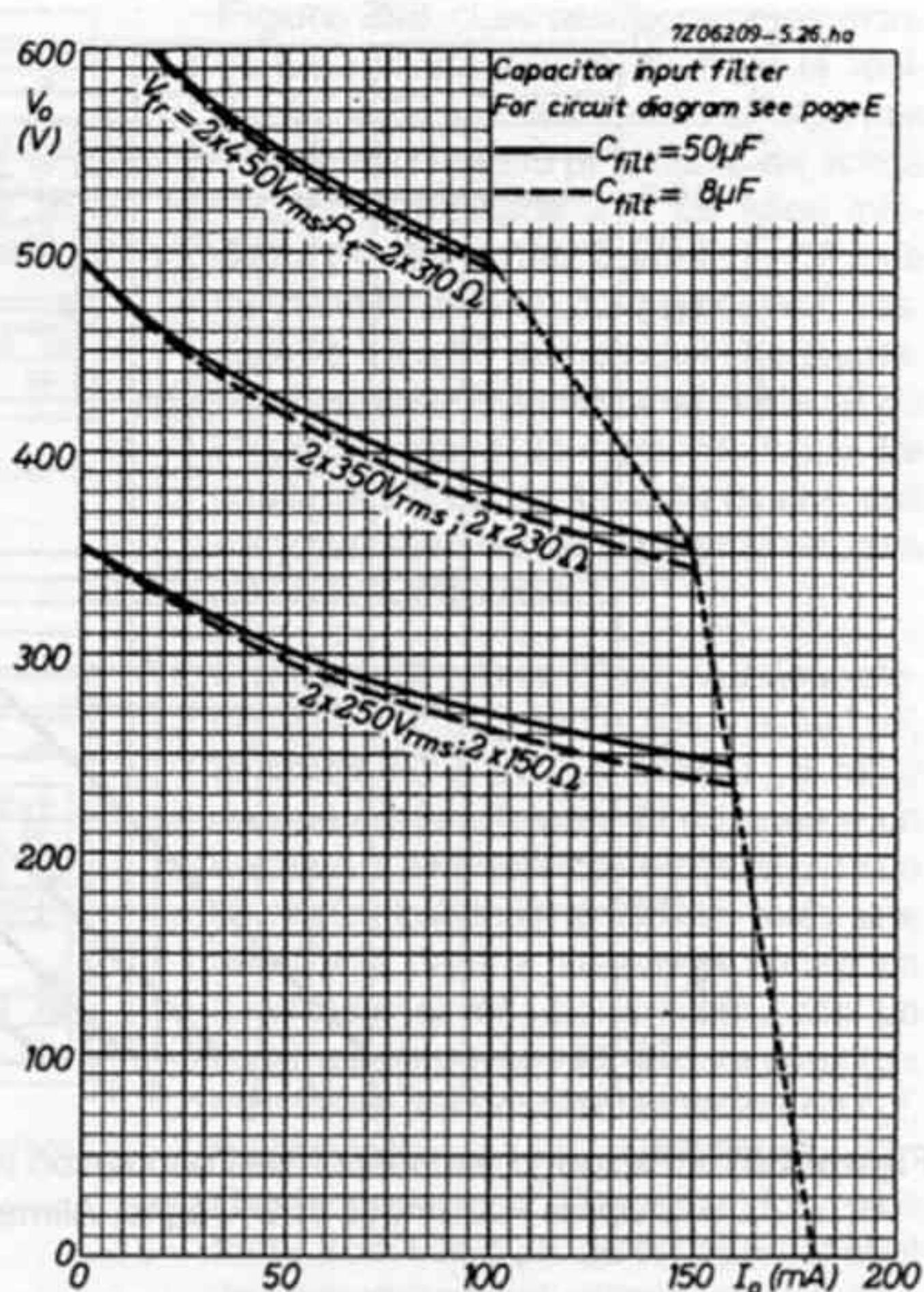
Figure 302 - Le diagramme de gauche donne la résistance série minimale nécessaire pour un fonctionnement sûr de la valve EZ81. R_a est la résistance interne de chaque plaque de la valve. La valeur maximale du condensateur de tête de filtre est de $50 \mu F$. Le diagramme de droite donne en ordonnée la tension conti-

La troisième cellule, située dans l'ampli, avec 220Ω et $100 \mu F$ présente une atténuation de 12 également, soit $3,5 \mu V$ d'ondulation sur la capacité qui alimente le deuxième étage SRPP. La tension de sortie maxi de cet étage étant de $300 V$ crête à crête, soit $106 V_{rms}$, le rapport signal sur bruit théorique s'établit à $-149,6 dB$!

En pratique, pour $1 W$ en sortie, le bruit de fond de cet étage est situé vers $-136 dB$.

Une dernière cellule R-C avec $25 k\Omega$ et $50 \mu F$ alimente le premier étage sous $256 V$, procurant une atténuation supérieure à 600, l'ondulation devenant inférieure à $6 nV$ en théorie. La réalité est moins flatteuse, les bruits induits et les chutes de tension dans les condensateurs de découplage, lorsqu'un courant modulé les traverse, ainsi que le bruit thermique des tubes et résistances, faisant remonter le bruit de fond de manière notable, vers $-112 dB$.

Pour un deuxième étage alimenté sous $560/570 V$ environ, la haute tension redressée est donc choisie près de $590/600 V$. Ce sont alors $30 V$ qui sont perdus par les circuits de filtrage, ce qui représente avec un



nue en sortie en fonction du courant continu consommé par le circuit, en abscisse, pour 3 valeurs de la tension secondaire alternative. Les valeurs de résistance totale effective de plaque sont notées à côté des tensions efficaces.

(Doc. Philips 1970)

courant consommé de $30 mA$, une puissance dissipée $P = U \cdot I = 30 \times 0,03 = 0,9 W$ seulement. Il est évident que l'alimentation par valve d'un étage de puissance tirant $200 mA$ se traduit par des chutes de tension plus élevées et une puissance dissipée nettement supérieure. Les résistances des réseaux R-C doivent être largement dimensionnées, à environ 2 à 3 fois la puissance réellement dissipée. Elles seront choisies du type bobinée vitrifiée, l'inductance parasite étant alors un avantage du point de vue de l'élimination des parasites haute fréquence.

En ce qui concerne les choix de valves redresseuses, quelques modèles se sont taillé une réputation enviable auprès des audiophiles. Il semblerait que les diodes à vapeur de mercure, produisant de nombreux parasites haute fréquence, au point qu'elles sont inutilisables sur les récepteurs radio, et de résistance interne faible, soient à éviter pour des montages de haute qualité. Les valves en brochage octal, de la série 5XX sont nettement préférables, et là encore les fabrications anciennes, en versions militaires, présentent une durée de vie et une fiabilité irréprochables.

Les sonorités obtenues sont variables, car la plupart des circuits sont sensibles à l'impédance de leur alimentation autant qu'aux parasites qu'elle produit. Les valves à résistance interne élevée sont subjectivement préférables, mais seul un essai comparatif permet de faire un choix.

Parmi les modèles recommandés, en brochage octal :

- Western Electric WE 274 B, chauffage 5 V/2 A, plaques 500 V/175 mA maxi, très rare.
- 5U4G, GB, 5931, chauffage 5 V/3 A, plaque 550 V/250 mA, en Sylvania, RCA, Néotron, très musicale.
- 5R4 GY, WGY, chauffage 5 V/2 A, plaque 1 000 V/150 mA, en Chatham, Haltron, Transelecronic, la seule pour des tensions supérieures à 600 V.

Pour des circuits consommant un courant plus faible :

- 5Y3 GB, 5Z4, chauffage 5 V/2 A, plaque 350 V/125 mA
- 5W4, chauffage 5 V/1,5 A, plaque 350 V/100 mA

Et en brochage noval, pour alimentation de préampli ou filtre actif :

- EZ80/6V4, chauffage 6,3 V/0,7 A, plaque 350 V/90 mA.
- EZ81/6CA4, chauffage 6,3 V/0,7 A, plaque 350 V/150 mA, très musicale.

Également utilisables :

- EZ90/6X4, chauffage 6,3 V/0,6 A, plaque 325 V/70 mA, préamplis Audio-Note.
- 6X5, mêmes caractéristiques, en brochage octal.

Toutes ces valves peuvent atteindre une durée de vie supérieure à 3 000 h, c'est-à-dire plus de 5 ans en utilisation normale quasi quotidienne. C'est à l'allumage que la valve vieillit le plus, et le fait d'éteindre et de rallumer l'appareil plusieurs fois par jour réduit notablement cette durée de vie. Une temporisation à la mise sous tension réduit le courant d'appel et améliore la fiabilité, tandis qu'une remise en route juste après l'extinction, donc avec tubes chauds, risque d'être fatale à la valve. Une défaillance du condensateur de tête de filtre, se traduisant par un courant de fuite excessif lorsque la température augmente, fatigue inutilement la valve. Pour ce condensateur, une tension de service de 20 à 25 % supérieure à la tension continue apporte une marge de sécurité très utile.

9.7 Monotriode mais... multiamplication

DES COUPLES INSÉPARABLES

La tentation est grande pour beaucoup d'amateurs de se lancer dans la réalisation d'amplificateurs à lampes monotriodes. Les éloges entendus sont motivants, mais la cohérence du système risque d'en faire les frais. Ces appareils ne s'adressent pas à toutes les enceintes, et ne peuvent s'intégrer que dans des systèmes multi-amplifiés.

Je rappelle que les systèmes de sensibilité inférieure à 95 dB/1 W ont besoin de plusieurs centaines de watts et n'entrent pas dans le cadre de la recherche de réalisme sonore.

Les systèmes mono-amplifiés, utilisant obligatoirement un filtrage passif, ont besoin selon la sensibilité des haut-parleurs, d'une puissance de 30 W à 60 W. Quoi qu'en disent certains audiophiles, un monotriode de 10 W est très insuffisant en large bande... Les attaques seront écrêtées gentiment et la dynamique adoucie !

Avec une sensibilité de 95 à 98 dB/1 W un ampli à transistors en pure classe A ou AB, double push-pull de 50 W, ou bien un ampli à lampes avec simple push-pull de tubes 6550 ou EL34 en classe AB et montage ultra-linéaire semble le choix le plus cohérent.

Avec une sensibilité plus élevée, un simple push-pull de transistors classe A de 30 W, ou de tubes en pure classe A cette fois, suffit amplement.

Les systèmes bi-amplifiés sont beaucoup moins gourmands en watts à sensibilité égale, car avec deux amplis de 25 W par exemple, l'un pour la voie grave et l'autre pour la voie médium-aiguë, en bi-amplification, les pressions acoustiques des deux voies s'additionnent en donnant un niveau résultant de +6 dB, correspondant à une puissance quadruplée. Il faudrait donc 100 W en mono-amplification pour obtenir la même dynamique. On peut considérer que ce sont les tensions de sortie des amplis qui s'additionnent en multi-amplification.

La voie grave de sensibilité 95 à 98 dB/1 W se contente alors de 25 ou 30 W à simple push-pull en pure classe A, soit de transistors, soit de tubes.

La voie médium-aigu peut fonctionner avec un monotransistor de 15 à 20 W, ou un push-pull de triodes, ou pseudo-triodes en classe A.

Si la sensibilité est supérieure à 105 dB/1 W, ce qui est souvent le cas avec les pavillons médium et les tweeters à compression, un monotriode de 10 W suffit.

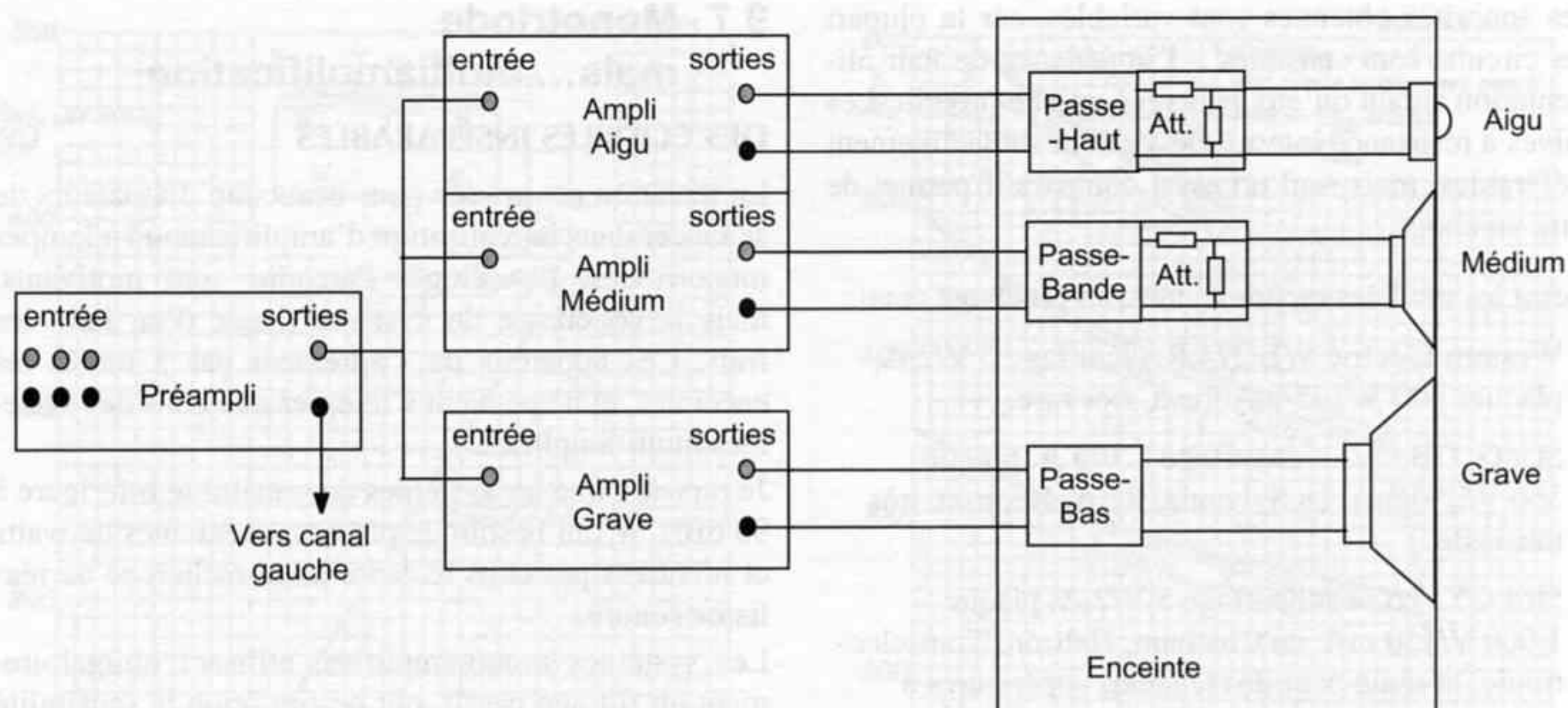


Figure 303 - Multi-amplification passive. Le filtre passif de l'enceinte est conservé, avec nécessairement séparation des masses si cette disposition n'est pas prévue d'origine par le fabricant. Les puissances maxi-

males des trois amplificateurs utilisés doivent être identiques, ainsi que leur gain, à moins qu'ils ne disposent d'un réglage de sensibilité d'entrée (voir également figure 112 à 116, page 139, ainsi que l'annexe 2).

Les systèmes tri ou quadri-amplifiés, et au-delà, dont la sensibilité est supérieure à 103 dB/1 W peuvent fonctionner avec peu de puissance. La voie grave équipée de deux H-P de 38 cm se contente de 20 W en pure classe A avec un simple push-pull de tubes triodes ou pseudo-triodes, ou de transistors, ou bien un monotransistor de 20 W, sans transformateur de sortie évidemment.

Si une correction de l'extrême-grave est appliquée, la puissance crête nécessaire peut être triplée. De même si l'impédance de charge est très basse. Un double push-pull de transistors classe A jusqu'à 50 W ou AB au-delà est mieux adapté dans ce dernier cas.

La voie de bas-médium s'associe bien avec un monotriode de 15 à 20 W, avec tube 211 ou 845, GM70, SV572 ou 6550 en pseudo-triode, ou un monotransistor.

La voie de médium à pavillon s'harmonise avec un monotriode de 5 à 10 W, avec tube 300B par exemple.

La voie aiguë se contente d'un monotriode de 5 W avec tube R120, VT52, 300B entre autres.

Quelques règles non figées assurent une certaine cohérence :

- Classe AB pour la voie grave et A pour les autres voies, et non l'inverse.
- Push-pull pour la voie grave et simple étage pour les autres voies, et non l'inverse.
- Contre-réaction globale pour la voie grave et pas de C-R pour les autres voies, et non l'inverse.

- Amplis sans transfos de sortie pour la voie grave et avec transfos de sortie pour les autres voies, et non l'inverse.
- Filtrage actif à circuit intégré pour la voie grave, et passif pour les autres voies, et non l'inverse.
- Puissances décroissantes du grave à l'aigu.
- Qualités subjectives (finesse et légèreté du trait) croissantes du grave à l'aigu.
- Simplicité du schéma idem.
- Qualité des composants idem.
- Dimensionnement des alimentations décroissant du grave à l'aigu.

Les ronflements basse fréquence sont beaucoup plus gênants sur un ampli de grave, alors que les parasites, crépitements, interférences... de fréquences élevées sont inadmissibles sur un ampli d'aigu.

À propos de systèmes multi-amplifiés, quelques principes importants, permettant de tirer le meilleur parti de cette pratique, doivent être rappelés.

MULTI-AMPLIFICATION

L'utilisation d'un unique amplificateur, relié aux haut-parleurs par l'intermédiaire d'un filtre séparateur passif, présente plusieurs inconvénients :

- La présence du filtre passif introduit une impédance en série avec le haut-parleur. Cette impédance "relâche" le couplage ampli-enceinte, en créant un désamortissement de ce dernier, d'où une réponse temporelle dégradée, avec en particulier un traînage important suivant la réponse impulsionnelle.

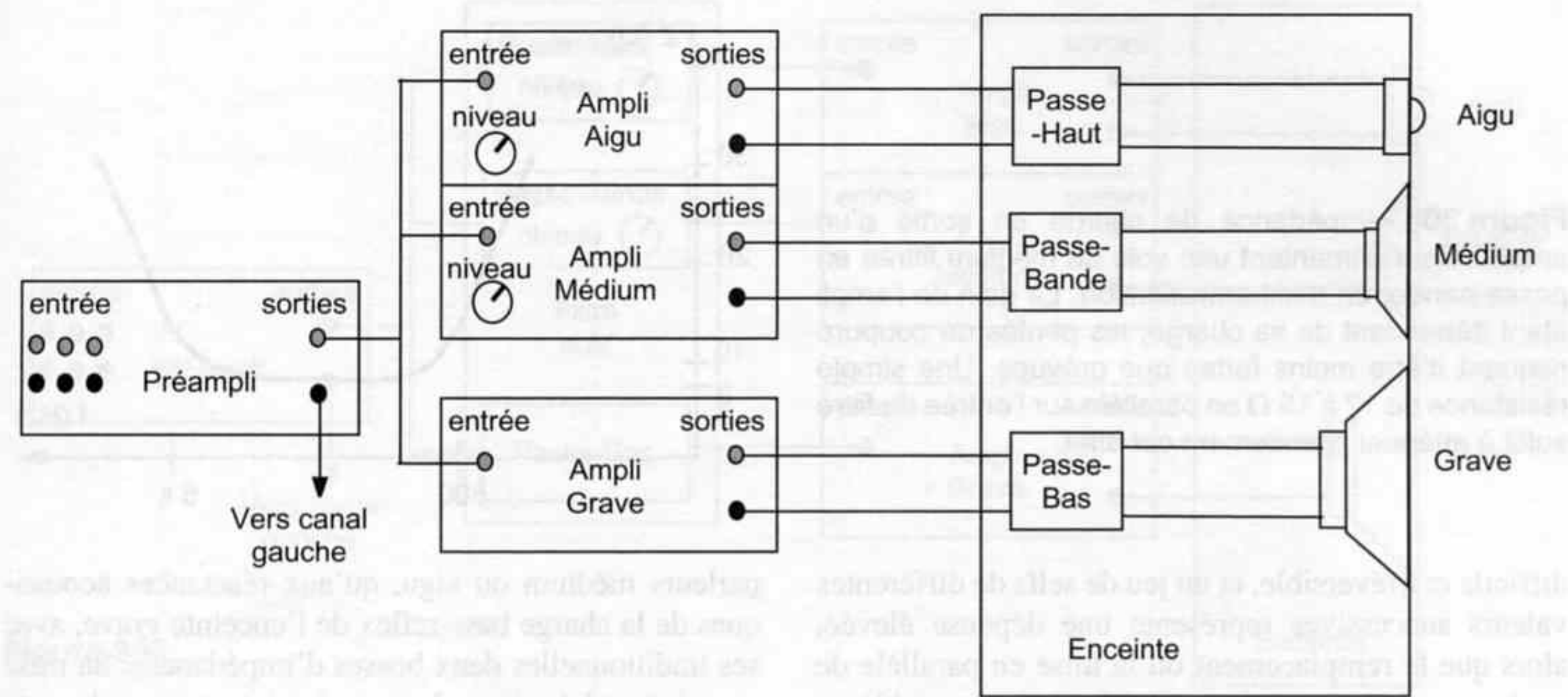


Figure 304 - Autre disposition de multi-amplification passive, apportant une plus grande souplesse d'utilisation par des réglages des niveaux relatifs non figés. L'ajustage précis est parfois dépendant du réglage de

volume, lorsque les sensibilités des différents H-P sont trop éloignées, de plus de 3 à 4 dB, ce qui est très fréquent.

- L'amplificateur est appelé à travailler sur une plage de fréquence très large, en débitant des courants forts aux basses fréquences en même temps que des signaux très faibles aux fréquences élevées. Une intermodulation sévère entre ces différents signaux a lieu dans l'étage de sortie et dans les circuits d'alimentation.
- Le besoin d'une puissance de sortie assez élevée pour la voie grave impose l'utilisation d'une structure push-pull, souvent à base de transistors car sans transformateur de sortie. Cette structure n'est pas idéale pour les voies de médium et d'aigu, comme expliqué précédemment.
- Le réglage des niveaux relatifs des différentes voies est la plupart du temps figé.
- La mise en phase exacte nécessaire à la cohérence temporelle est difficilement réalisable.

La multi-amplification permet de contourner aisément ces différentes limitations. Dans le cas le plus simple, le seul fait de séparer l'amplification en plusieurs éléments supprime les effets de l'intermodulation des signaux, et permet à chaque ampli de travailler sur une plage de fréquence étroite. Le choix de chacun des différents amplis peut alors être effectué de manière optimale en fonction de la voie qu'il alimente, en s'inspirant des conseils donnés ci-dessus.

Dans cette configuration de multi-amplification passive, figure 303, le filtrage reste celui intégré à l'enceinte, les cellules de filtrage de chacun des haut-parleurs devant toutefois être entièrement séparées, ce qui amène à séparer les masses, éventuellement en cou-

pant les pistes concernées et en re-câblant le filtre avec des borniers séparés. Ce point a été détaillé au chapitre 7 "Optimisation", avec un exemple figures 109 et 110. Seuls les réglages de niveau des différentes voies peuvent être supprimés, et remplacés par le réglage de gain des amplis concernés.

La suppression des atténuations dans chacune des cellules de filtrage va évidemment dans le sens d'un meilleur contrôle des déplacements des membranes, grâce à un meilleur amortissement des haut-parleurs. Cette disposition, représentée à la figure 304, n'est possible que si les amplis des voies médium et aiguë disposent d'un réglage de niveau. Un simple atténuateur d'entrée suffit, car la sensibilité de ces voies est très généralement supérieure à celle de la voie grave.

La suppression des réseaux résistifs peut modifier quelque peu les caractéristiques des filtres, qui devront si nécessaire être corrigés de manière empirique en s'aidant de mesures de courbes de réponse dans l'axe en proximité, avec une seule voie en service. Une première mesure avec l'atténuation d'origine, puis une seconde sans le réseau atténuateur, permettront de constater, par comparaison des courbes obtenues, les éventuels changements dans les fréquences de coupure ou les pentes du filtre.

Le seul matériel nécessaire est un sonomètre linéaire et un disque de fréquences pures en tiers d'octave. Si des corrections doivent être apportées pour retrouver les coupures d'origine, il est beaucoup plus simple et économique de les effectuer sur les condensateurs des cellules de filtrage. La modification d'une self est

Figure 305 - Impédance de charge en sortie d'un amplificateur alimentant une voie de médium filtrée en passe-bande, en multi-amplification. Le gain de l'ampli étant dépendant de sa charge, les pentes de coupure risquent d'être moins fortes que prévues. Une simple résistance de 12 à 15 Ω en parallèle sur l'entrée du filtre suffit à atténuer grandement cet effet.

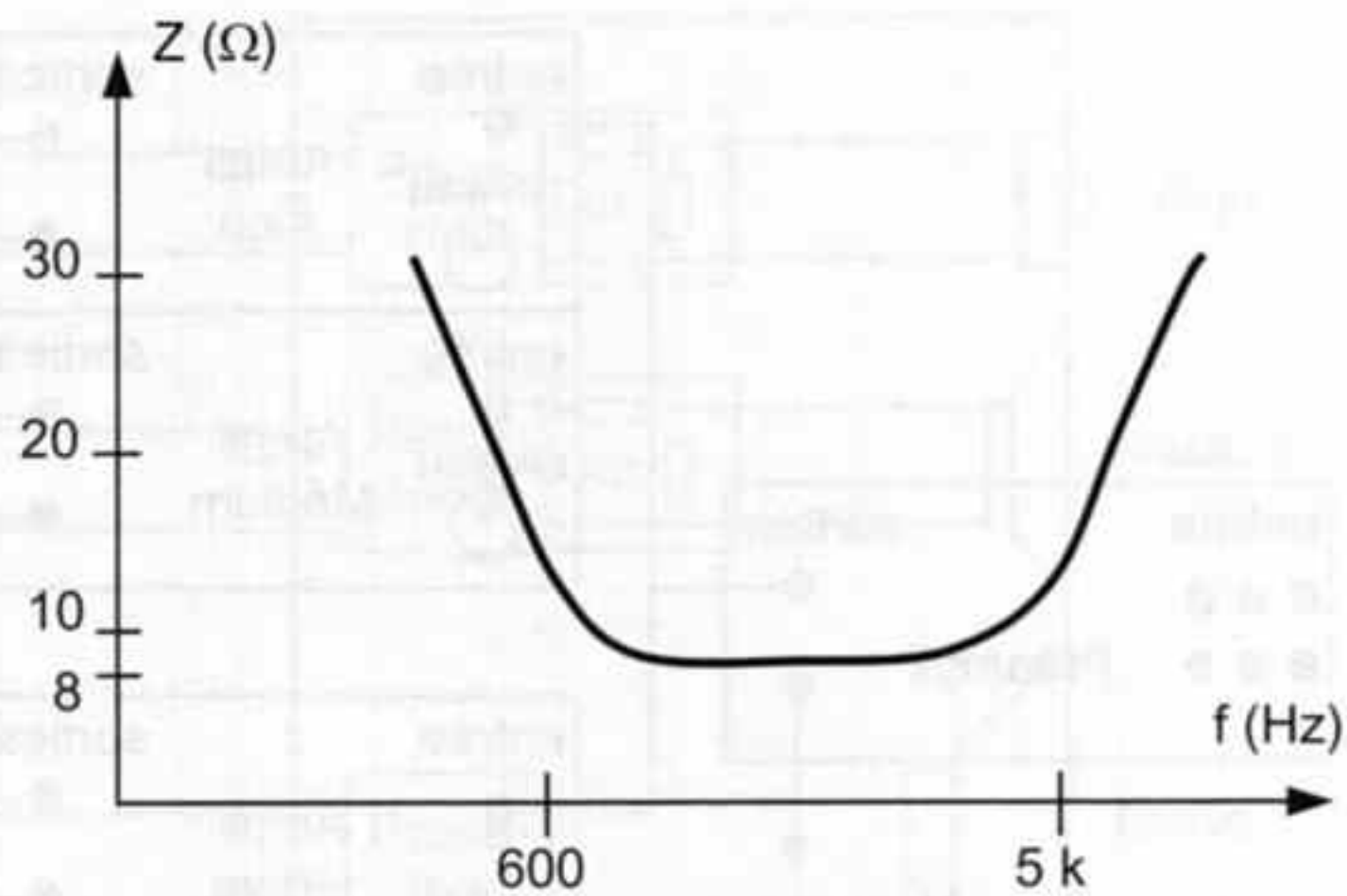
difficile et irréversible, et un jeu de selfs de différentes valeurs successives représente une dépense élevée, alors que le remplacement ou la mise en parallèle de quelques condensateurs permet de régler le problème aisément.

Cette disposition présente un autre inconvénient, très peu documenté dans la littérature, si les voies médium et aiguë sont alimentées par des amplis à lampes sans contre-réaction. La charge présentée à la sortie des amplis, est alors constituée d'une seule cellule de filtrage, au lieu d'une combinaison de cellules complémentaires, comme c'est le cas en mono-amplification. Cette unique cellule présente une impédance qui remonte aux limites de la bande passante du filtre. Par exemple, une cellule passe-bande filtrant la bande 600 Hz–5 kHz reliée à un H-P d'impédance 8 Ω , présente une impédance de la forme représentée en figure 305.

Le gain en tension de ce type d'ampli sans contre-réaction dépend étroitement de son impédance de charge, aussi les pentes d'atténuation réellement obtenues sont-elles souvent moins élevées que prévues, le gain de l'ampli ayant tendance à augmenter lorsque l'impédance augmente, comme expliqué figures 292 à 295, en-dessous de 600 Hz ou au dessus de 5 kHz dans l'exemple cité.

À moins d'ajouter à chacune des cellules du filtre passif une cellule complémentaire destinée à rendre son impédance constante, la multi-amplification passive ne devrait pas faire usage d'ampli sans contre-réaction, ces derniers étant en revanche tout à fait adaptés à la multi-amplification active, dont il va être question maintenant.

Le filtre passif, indispensable à la séparation des fréquences, prend place habituellement à l'intérieur de l'enceinte. Il travaille alors sur des courants forts, et pas seulement sur des signaux de tensions, et son impédance de charge est très tourmentée, avec des réactions inductives ou capacitatives selon la fréquence, dues autant à l'inductance des bobines mobiles des haut-



parleurs médium ou aigu, qu'aux réactances acoustiques de la charge bass-reflex de l'enceinte grave, avec ses traditionnelles deux bosses d'impédances. Sa mise au point est laborieuse à cause des interactions de cette charge avec la cellule de filtrage.

Sa présence introduit dans la liaison ampli-enceinte une impédance série, parfois sous la forme d'un composant parasite, tel la résistance du fil constituant une self de cellule passé-bas, parfois sous la forme d'une résistance réelle dont le rôle est de diminuer le niveau du signal appliqué à une des voies.

Dans tous les cas cette résistance s'ajoute à celle de la bobine mobile et à celle de la sortie de l'amplificateur, créant une séparation entre ces deux éléments. Du point de vue du rendement, la résistance en série constitue avec l'impédance de la bobine un pont diviseur, dont le rapport n'est pas constant mais évolue en suivant les variations d'impédance du haut-parleur avec la fréquence. Les résonances du haut-parleur, pour lesquelles son impédance augmente, sont moins atténuées que d'autre bandes de fréquence.

Du point de vue de l'amortissement, la bobine mobile n'est plus attaquée par une source de tension d'impédance très faible (l'étage de sortie de l'ampli) mais par une source présentant une impédance de sortie égale à la résistance série du filtre passif. Cette résistance s'ajoute à la valeur de R_{dc} du haut-parleur, et diminue notablement les coefficients Q_e et Q_{ts} , comme cela a été expliqué au chapitre 8.

La suppression du filtre passif de la voie grave apporte incontestablement une amélioration nette, souvent décisive, de la réponse temporelle et dynamique du haut-parleur. Sa réponse fréquentielle est la plupart du temps dégradée, car l'amortissement supérieur obtenu produit inmanquablement une coupure basse plus rapide.

En effet, la diminution du terme Q_{ts} modifie sensiblement l'accord de la charge bass-reflex. En particulier le coefficient d'alignement n augmente, produisant

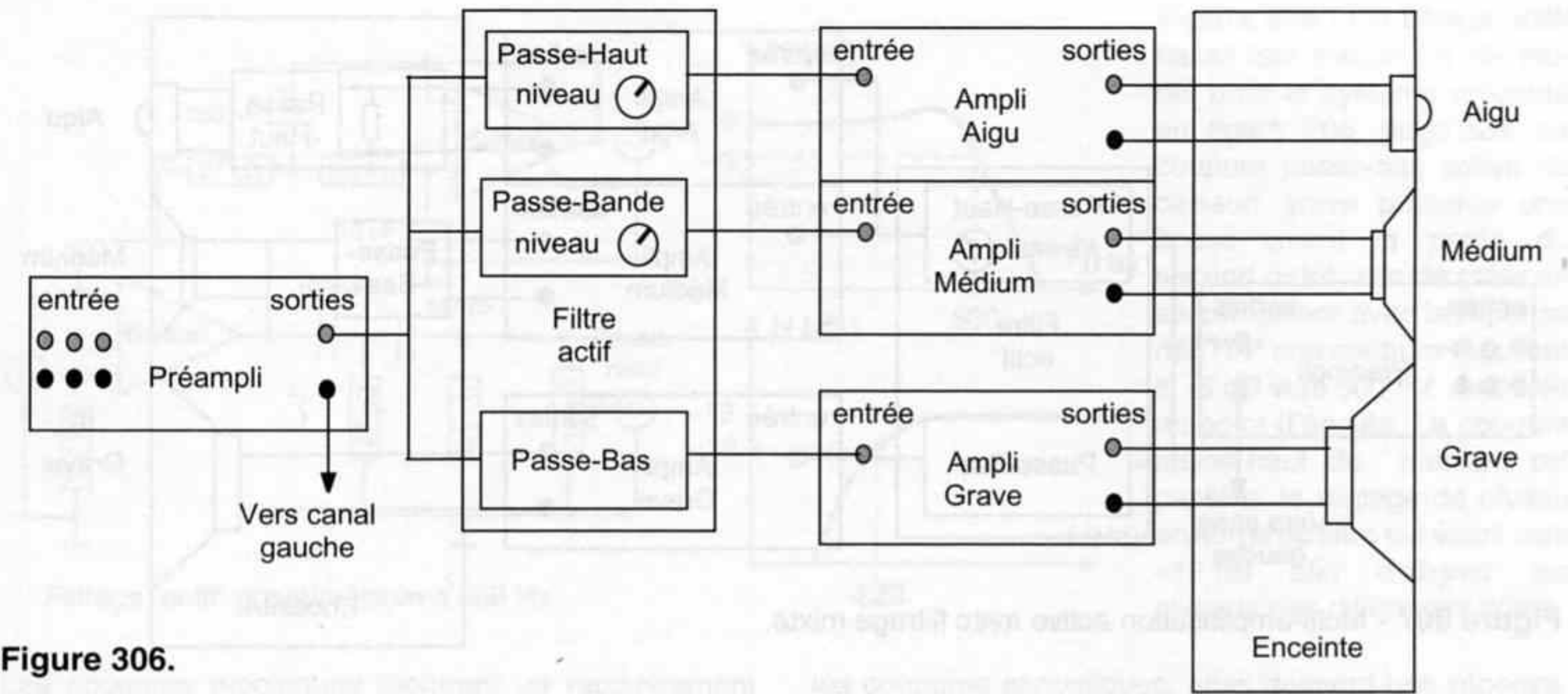


Figure 306.

une réponse fréquentielle avec une bosse marquée juste au-dessus de la fréquence de coupure, et une pente de coupure plus forte que prévue.

La suppression de la self en série avec le haut-parleur de grave doit par conséquent s'accompagner d'un calcul du nouveau volume de charge de la voie grave.

Par exemple, avec un H-P de Ø30 cm présentant les paramètres suivants :

- Résistance en continu $R_{dc} = 5 \, \Omega$,
- Fréquence de résonance à l'air libre $f_s = 40 \, \text{Hz}$,
- $Z_{max} = 200 \, \Omega$, d'où $r_0 = 40$ et $\Delta f = 20$ (relevé sur la courbe d'impédance),
- $Q_{ms} = 12,65$,
- $Q_{es} = 0,3243$,
- $Q_{ts} = 0,3155$,
- $V_{as} = 200 \, \text{dm}^3$.

La self série du filtre passif présente une résistance $R_s = 0,5 \, \Omega$, ce qui fait passer la résistance série à $R'_{dc} = 5,5 \, \Omega$.

D'où $r_0' = 36,3636$, $Q_{ms}' = 12,06$, et $Q_{es}' = 0,341$.

On aboutit finalement à $Q_{ts}' = 0,3317$, soit une variation de +5,13 %.

Un alignement grave avec $n = 6$ donnerait un volume de boîte :

$$V_b = n \cdot V_{as} \cdot Q_{ts}'^2 = 6 \times 200 \times 0,3317^2 = 132 \, \text{dm}^3.$$

La self série supprimée, le terme Q_{ts} reprend la valeur de 0,3155 du H-P seul, et ce même volume de charge donne alors un coefficient d'alignement différent :

$$n' = V_b / (V_{as} \cdot Q_{ts}^2) = 132 / (200 \times 0,3155^2) = 6,63,$$

soit une erreur de 10,5 %.

Si l'on souhaite conserver le même alignement avec $n = 6$, le nouveau volume de charge doit passer à :

$V_b' = n \cdot V_{as} \cdot Q_{ts}^2 = 6 \times 200 \times 0,3155^2 = 119,5 \, \text{dm}^3$, soit une diminution de 12,5 dm³ environ du volume de la caisse. Cette réduction du volume est réalisée simplement en remplissant l'intérieur de l'enceinte avec un sac de sable ou quelques briques. Dans de nombreux cas, les variations des coefficients Q du haut-parleur sont plus importantes que dans cet exemple, car la résistance série de la self est souvent de l'ordre de 1 Ω ou plus.

La nouvelle enceinte obtenue, avec un volume plus faible, procure une fréquence de coupure basse plus élevée qu'auparavant, mais aussi une réponse impulsionnelle plus rapide grâce à un amortissement légèrement supérieur, avec moins de traînage. La légèreté du registre grave y gagne quelque peu, au détriment de l'extension dans l'extrême-grave.

Ce phénomène de désamortissement du haut-parleur par la résistance-série de sa cellule de filtrage est également sensible pour les voies de médium et d'aigu, car leur sensibilité généralement supérieure à celle de la voie grave oblige à insérer une atténuation du niveau par réseau R1/R2.

Le passage à la multi-amplification avec filtrage actif situé en amont des amplificateurs, figure 306, fait disparaître ce défaut.

Le filtre est disposé en amont des amplificateurs, alors reliés directement aux haut-parleurs de chaque voie, leur assurant un amortissement, et par suite une réponse dynamique et temporelle, optimaux.

Le filtre est appelé "actif" bien que sa réalisation ne fasse pas obligatoirement appel à des composants actifs. En effet, ces derniers demandent une ou plusieurs alimentations, qui à moins d'être réalisées par batteries rechargeables, sont reliées au secteur, ajoutant boucles de masse et bruits supplémentaires.

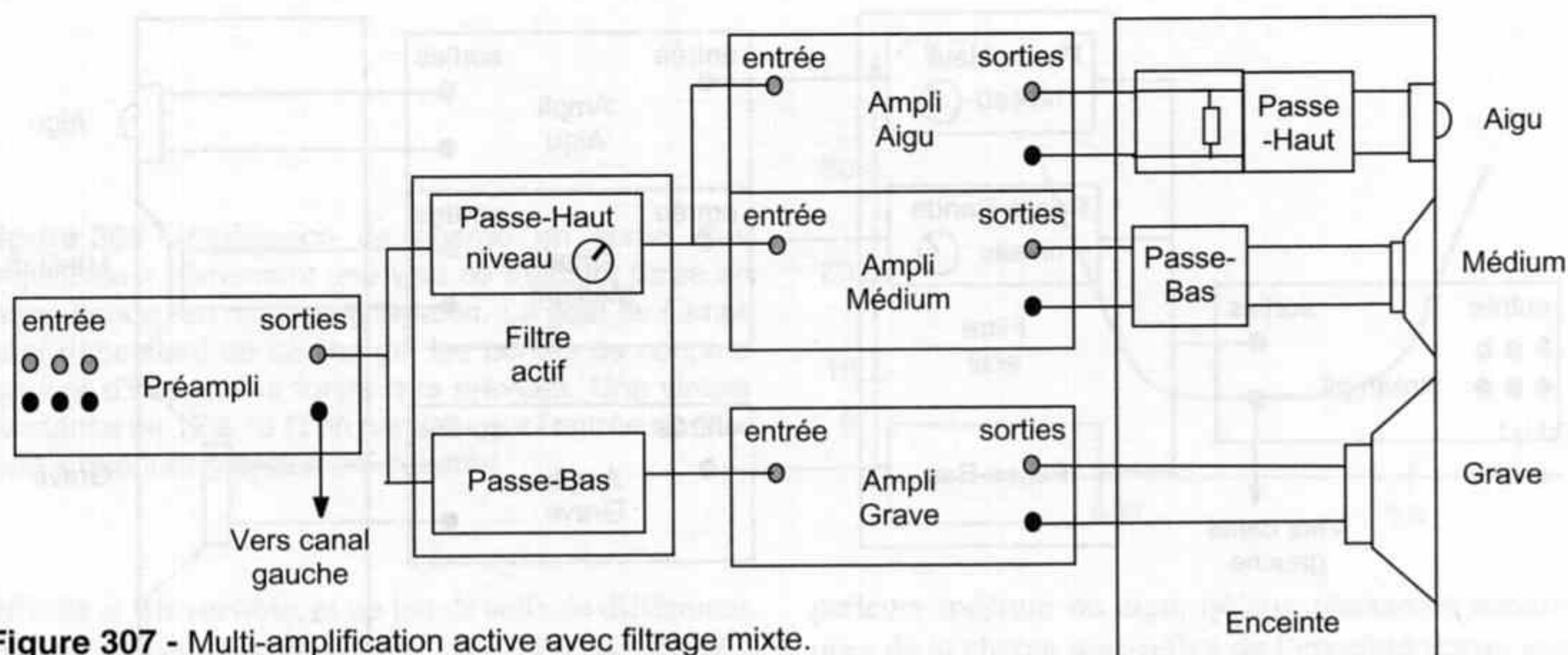


Figure 307 - Multi-amplification active avec filtrage mixte.

Il est tout à fait possible de constituer des cellules de filtrage à l'aide de réseau L-C passifs, à condition que la mise en parallèle des différentes cellules ne présente pas une impédance trop basse à la sortie du préampli. D'autre part, les réglages de niveau en sortie du filtre font varier légèrement, selon la position des potentiomètres, l'impédance de charge de chaque cellule, modifiant sa fréquence et sa pente de coupure.

Cette solution du filtre actif "passif" présente donc des avantages de faible bruit et de transparence, mais aussi des inconvénients d'imprécision et un manque de souplesse des réglages.

L'amateur doit par conséquent se rabattre sur une solution réellement active, basée soit sur un filtre du commerce, tel le Yamaha D2040 dont il a déjà été question dans ces pages, soit sur un filtre réalisé sur mesure. Cette dernière option n'est envisageable que pour l'amateur possédant les moyens informatiques, matériels et logiciels, permettant la synthèse des circuits actifs à partir d'amplificateur-opérationnels, mais aussi l'acquisition de données de mesure, en particulier de réponses niveau-fréquence. Un logiciel d'optimisation de filtre est indispensable pour synthétiser un circuit qui, combiné à la réponse acoustique des H-P, donne la réponse souhaitée.

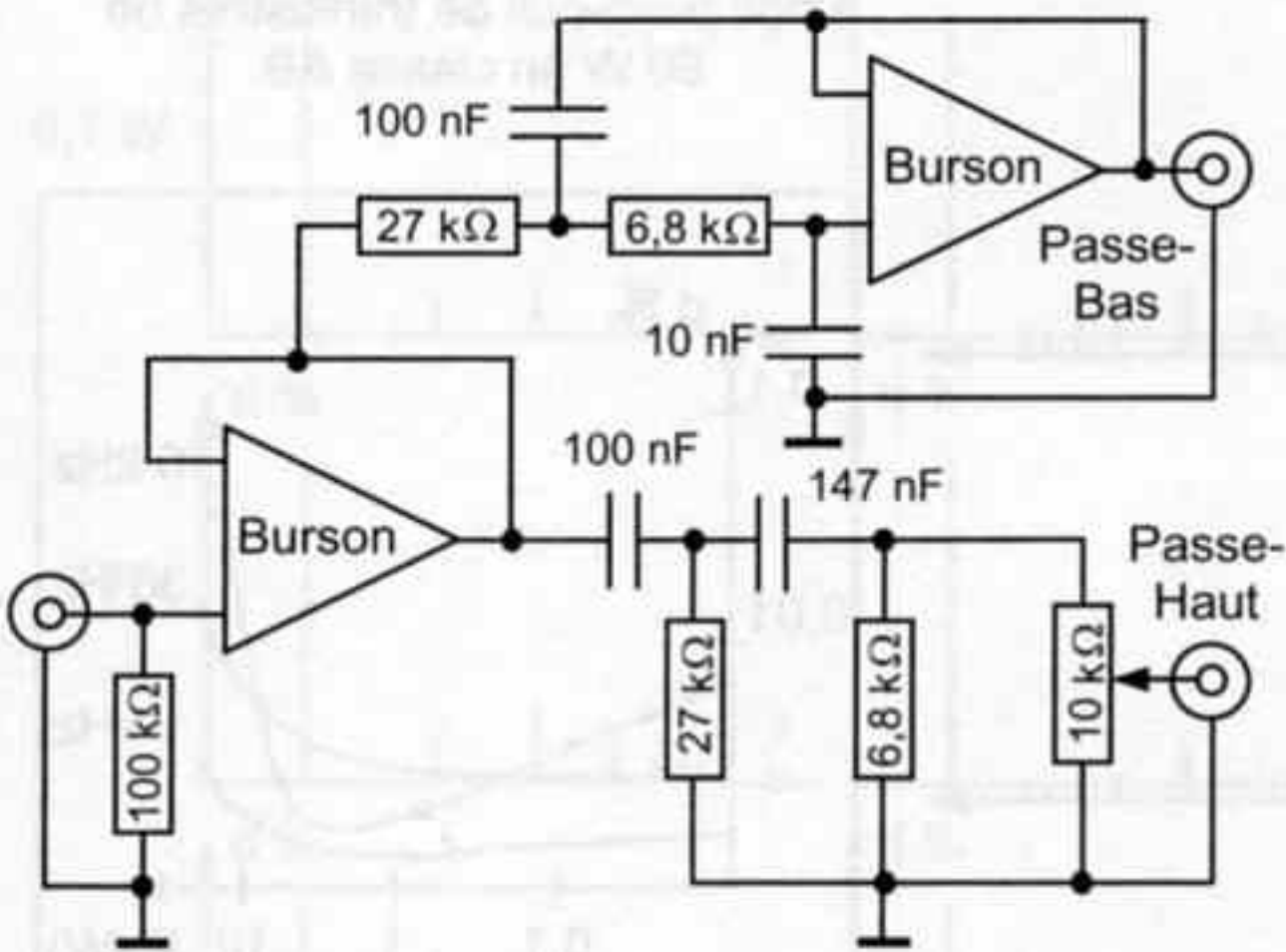
La tentation est grande dans ce cas de réaliser des filtres très complexes, autorisant toutes sortes de corrections fréquentielles, afin de compenser les non-linéarités des H-P. l'expérience montre que cette pratique nuit gravement au réalisme de la restitution, les réponses temporelle et dynamique des circuits complexes étant souvent déplorables. Les filtres les plus simples donnent généralement les meilleurs résultats en terme de naturel, et il est rare qu'une cellule du deuxième ordre, dont le coefficient de surtension sera optimisé en fonction du haut-parleur utilisé, ne soit pas suffisante.

Cela limite le déphasage à une valeur assez faible pour qu'un décalage des H-P soit possible afin de réaliser l'alignement temporel. Un seul élément actif est nécessaire pour réaliser une telle cellule du deuxième ordre, et l'ampli-op utilisé alimente directement le potentiomètre de sortie.

Une disposition très rarement rencontrée, et pourtant fort intéressante, est d'implanter les étages de filtrage actif dans le préampli, en réalisant autant d'étages ligne qu'il y a de voies dans le système. Chaque étage ligne est alors précédé d'une cellule de filtrage et d'un réglage de niveau. On économise alors un appareil avec son alimentation secteur, et une paire de cordons, ce qui supprime une boucle de masse et des bruits parasites. Cependant les réglages de délai des voies ne sont pas dans ce cas aussi aisés qu'avec un filtre actif paramétrable.

Certains amateurs préfèrent une solution mixte, avec filtrage amont pour la voie grave, et filtrage passif aval pour les voies médium et aiguë, combinant habilement les avantages de chacune des deux solutions. Cette disposition apparaît figure 307, avec un exemple pratique qui montre que les filtres électriques obtenus ne répondent pas aux équations habituelles, étant combinés aux réponses acoustiques :

Dans la configuration de la figure 307, la séparation grave-médium, située généralement vers 250 à 600 Hz selon les systèmes, est confiée à un filtre actif. La cellule passe-bas d'ordre 2 est active, autour d'un ampli-op monté en structure de Sallen et Key, ce qui permet de régler facilement la fréquence de coupure et la surtension du filtre en changeant un minimum de composants. Les performances assez limitées d'un ampli-op ne sont pas critiques dans cette bande de fréquence, les plus exigeants pouvant utiliser un montage de type Kanéda à transistor.



Filtrage "actif" grave/médium à 500 Hz

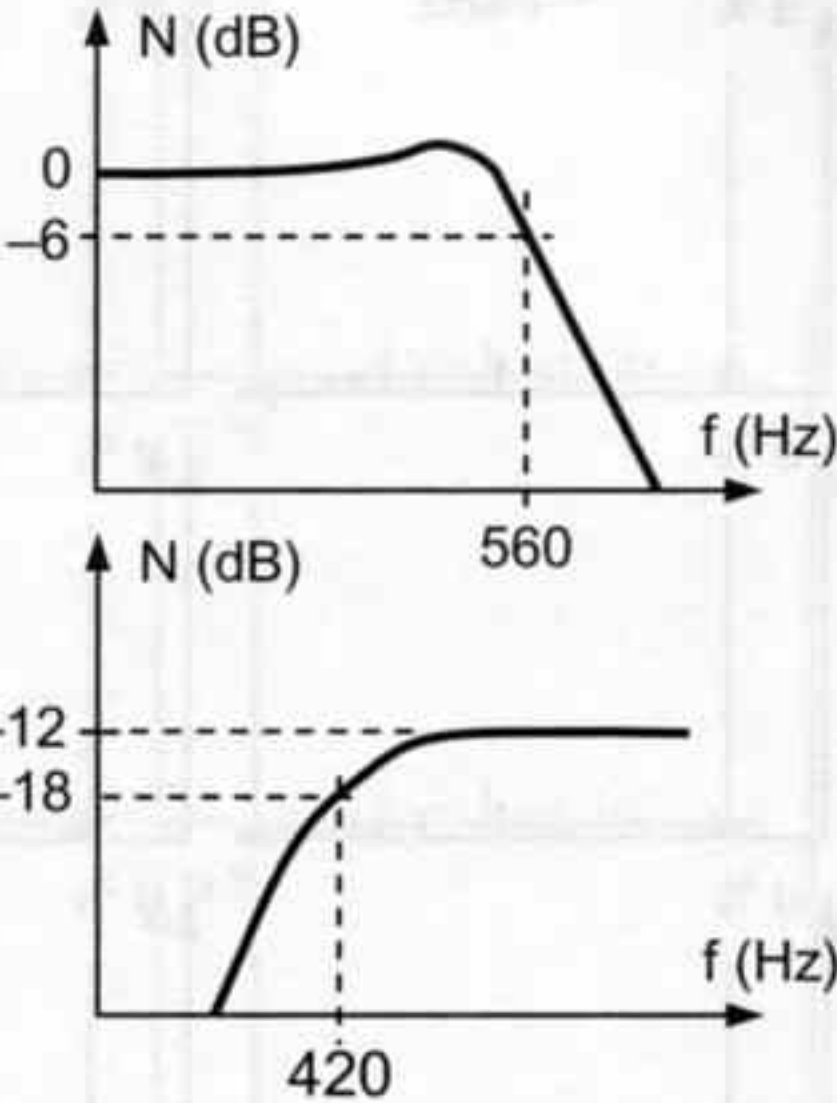
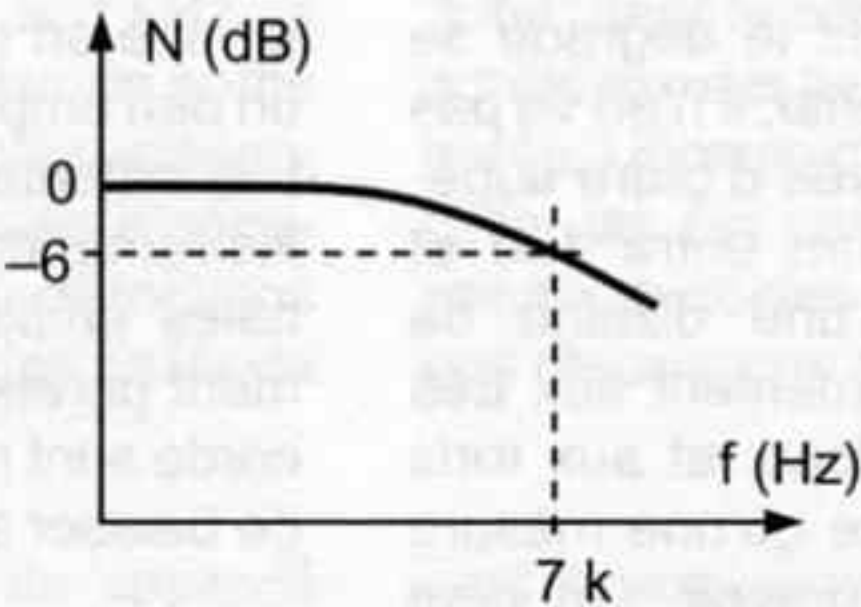
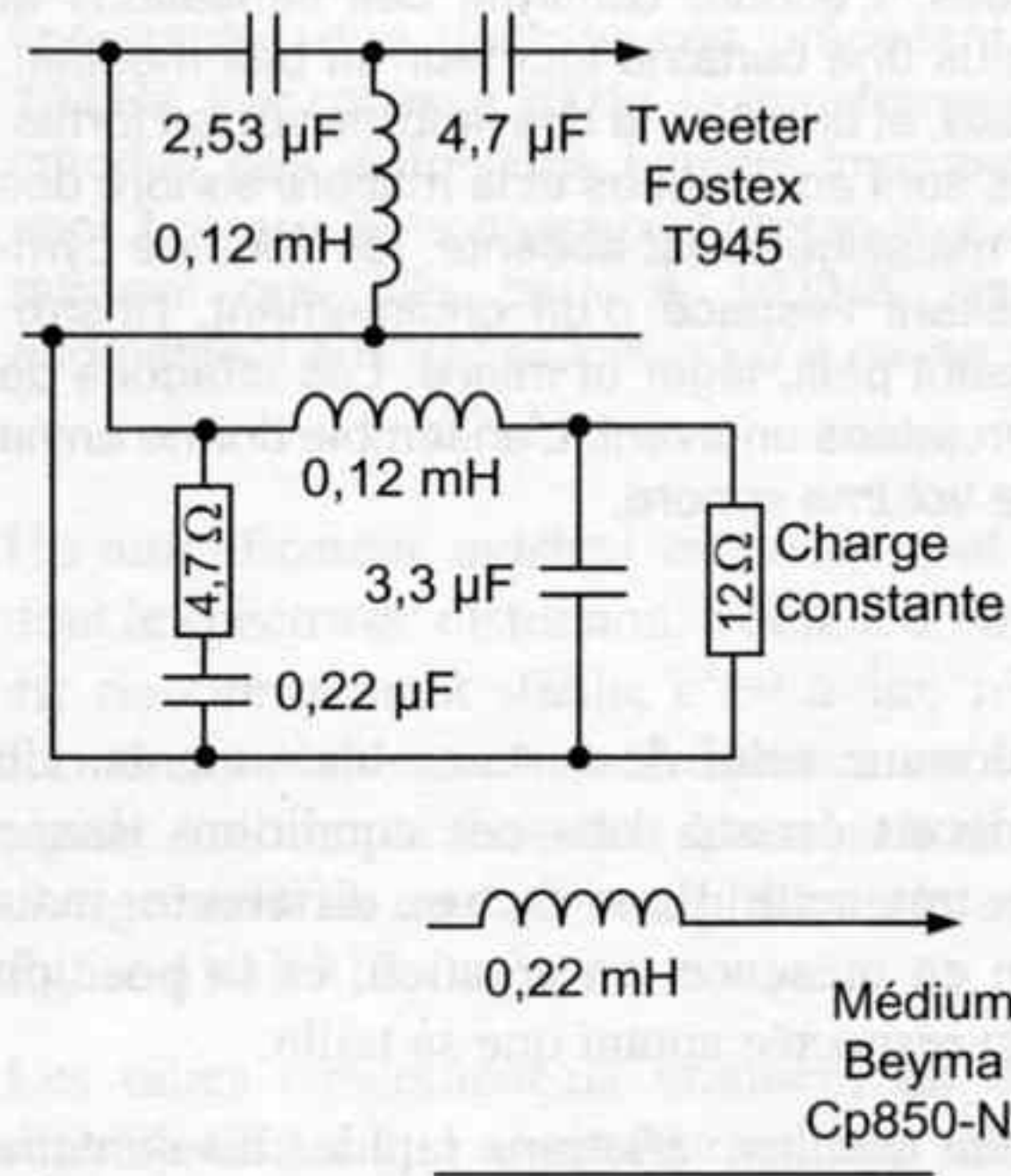


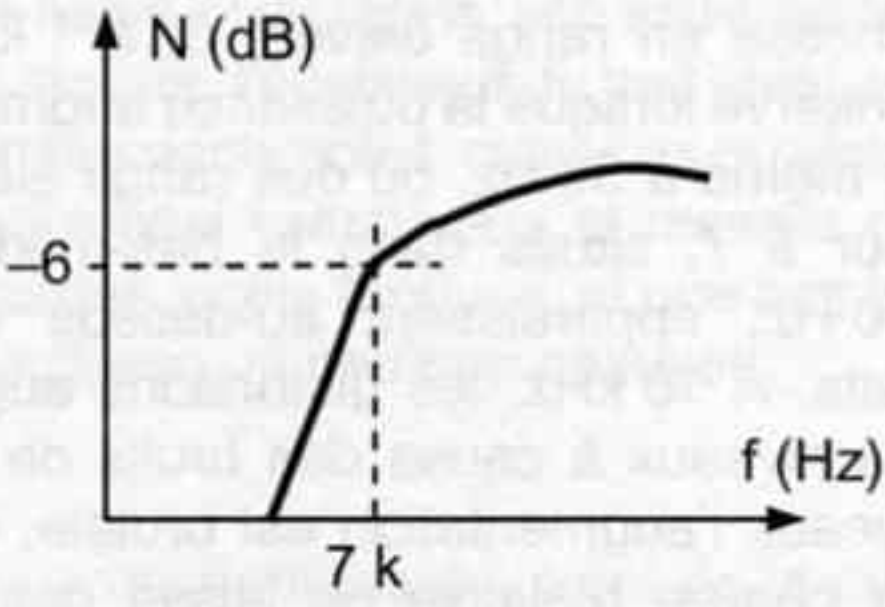
Figure 308 - Un filtrage actif/passif "sur mesure" a été étudié pour le système présenté en figure 208, page 228. La coupure passe-bas active du caisson grave présente une bosse avant la pente du second ordre, afin de créer en se combinant avec la réponse des H-P une coupure régulière à -6 dB vers 500 Hz, mesurée au point d'écoute. La coupure passe-haut du médium est passive, le réglage de niveau en sortie du filtre est établi vers -12 dB afin d'aligner les niveaux des différentes voies.

Les coupures électriques montrent un recouvrement des bandes de fréquences, mais en se combinant avec

les coupures acoustiques, elles donnent une réponse globale linéaire.



Filtrage passif passe-bas 7 kHz



Filtrage passif passe-haut 7 kHz

Figure 309 - La séparation médium/aigu est passive vers 7 kHz. Là encore les filtres électriques se combinent aux réponses acoustiques pour donner un raccordement correct à -6 dB. Noter la cellule supplémentaire en parallèle sur le passe-haut, servant à linéariser l'impédance de charge vue par l'ampli de la voie aiguë - dépourvu de contre-réaction - afin de rendre son gain plus constant.

La cellule passe-haut peut par contre être passive, constituée de réseaux R-C successifs, ce qui élimine les bruits et distorsions introduits par les circuits actifs, particulièrement gênants dans les bandes médium et aiguë. Le gain plus élevé des amplis et la sensibilité supérieure des voies médium et aiguë imposant une atténuation, un réglage de niveau des voies supérieures est obtenu par un atténuateur en sortie de ce filtre. La séparation entre médium et aigu est réalisée de manière passive par un filtrage en aval des amplis. La réponse électrique des filtres se combine avec la réponse acoustique des H-P pour donner une atténuation de la forme souhaitée. Les composants mis en œuvre pour cette séparation à fréquence assez élevée

sont de valeurs relativement faibles, ce qui permet de les choisir de la plus haute qualité. Un exemple est donné par les figures 308 et 309.

RESPECT DES TIMBRES

La comparaison instantanée (ou presque...) de différentes typologies d'amplificateurs, mis en œuvre dans un système à haut rendement capable de mettre en évidence les particularités de chacun d'eux, laisse les auditeurs relativement perplexes, étonnés de percevoir les mêmes sons, avec pourtant des impressions subjectives différentes. Ce sont bien les sensations de matière sonore et de son grain, d'aération de l'espace, de viva-

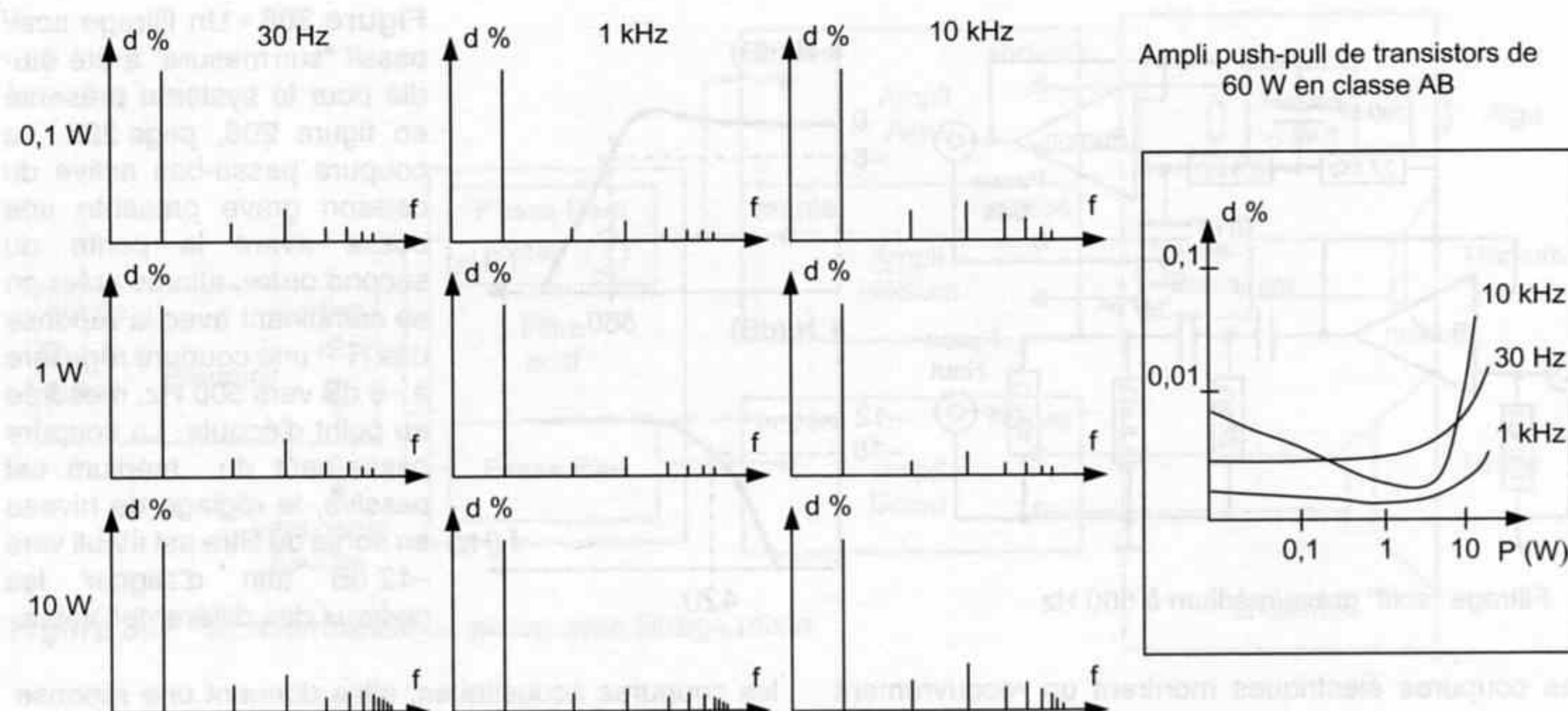


Figure 310 - Le dégradé harmonique pour cet appareil montre une prédominance des rangs impairs, ce qui est habituel au montage push-pull, et une certaine richesse en rangs élevés. Si à 1 kHz le dégradé se conserve lorsque la puissance augmente, il n'en va pas de même à 30 Hz, où des rangs élevés d'ordre supérieur à 7, situés dans le bas-médium entre 180 et 400 Hz, apparaissent au-dessus d'une dizaine de watts. À 10 kHz, les distorsions augmentent aux très bas niveaux à cause des bruits de fond, et aux forts niveaux l'augmentation est brutale, ce qu'une mesure sur charge résistive ne laisse pas prévoir. On peut

s'attendre à un enrichissement du timbre en hautes fréquences lors des crêtes des attaques, à des extinctions un peu voilées. L'écoute confirme ces sensations et montre en plus une certaine lourdeur du bas-médium, un peu empâté, et une dureté des timbres sur les fortes. Les sifflantes sont accentuées et la matière sonore des instruments métalliques est absente, les sons de cymbales emplissant l'espace d'un chuintement, l'instrument paraissant petit, léger et mince. Les attaques de corde sont projetées en avant. L'ensemble donne envie de baisser le volume sonore.

cité du trait, qui sont différentes, et qu'une écoute attentive des fins de notes, de leur extinction, rayonnant dans un volume d'air, avec une certaine réverbération située en arrière-plan, révèle très facilement sur un enregistrement d'instrument solo.

Avec certains amplis, la texture de l'instrument paraît être différente entre l'attaque et l'extinction de la note, parfois plus raide et sèche sur l'attaque et plus douce et molle voire sourde sur l'extinction, comme si la tension des cordes ou de la table changeait constamment au cours du temps. Parfois c'est l'inverse avec un instrument qui paraît doux sur les attaques et métallique ensuite.

La taille, la masse et l'énergie du mouvement paraissent également fluctuer rapidement, et le volume apparent occupé par la source semble se dilater ou se réduire étrangement au cours de l'évolution temporelle de la note.

L'inconstance de ces sensations nuit énormément au réalisme, alors qu'une sensation stable mais erronée n'est absolument pas détectable, un taux de distorsion très élevé, de plusieurs %, procurant dans certains cas une impression de timbres très doux et chauds, ronds

et amples, comme celui de certains instruments. Un piano de concert écouté dans ces conditions donne l'impression très nette d'une facture différente, mais ne perd rien en présence, en aération, et sa position apparente est respectée autant que sa taille.

Il semble bien que les variations rapides du contenu harmonique des signaux soient responsables de cette impression d'inconstance, en produisant des modifications de timbre que le système auditif perçoit comme incohérentes lors de l'identification et de la localisation des sources sonores. Cette incohérence fait immédiatement ressentir le son perçu comme artificiel. Par exemple si l'instrument est enregistré d'assez loin, les sons aigus s'atténuent plus rapidement, ce qui renseigne le système auditif sur la distance apparente de la source. Aussi un enrichissement même très léger du timbre, par addition de raies spectrales de rangs élevés, pendant l'extinction de la note, donnera l'impression que la source sonore est moins loin que la première impression ne l'avait laissé croire. Cependant la réverbération perçue confirme la distance importante, ce qui est incohérent. L'impression que "l'instrument est là" est perdue, la perception de l'espace également.

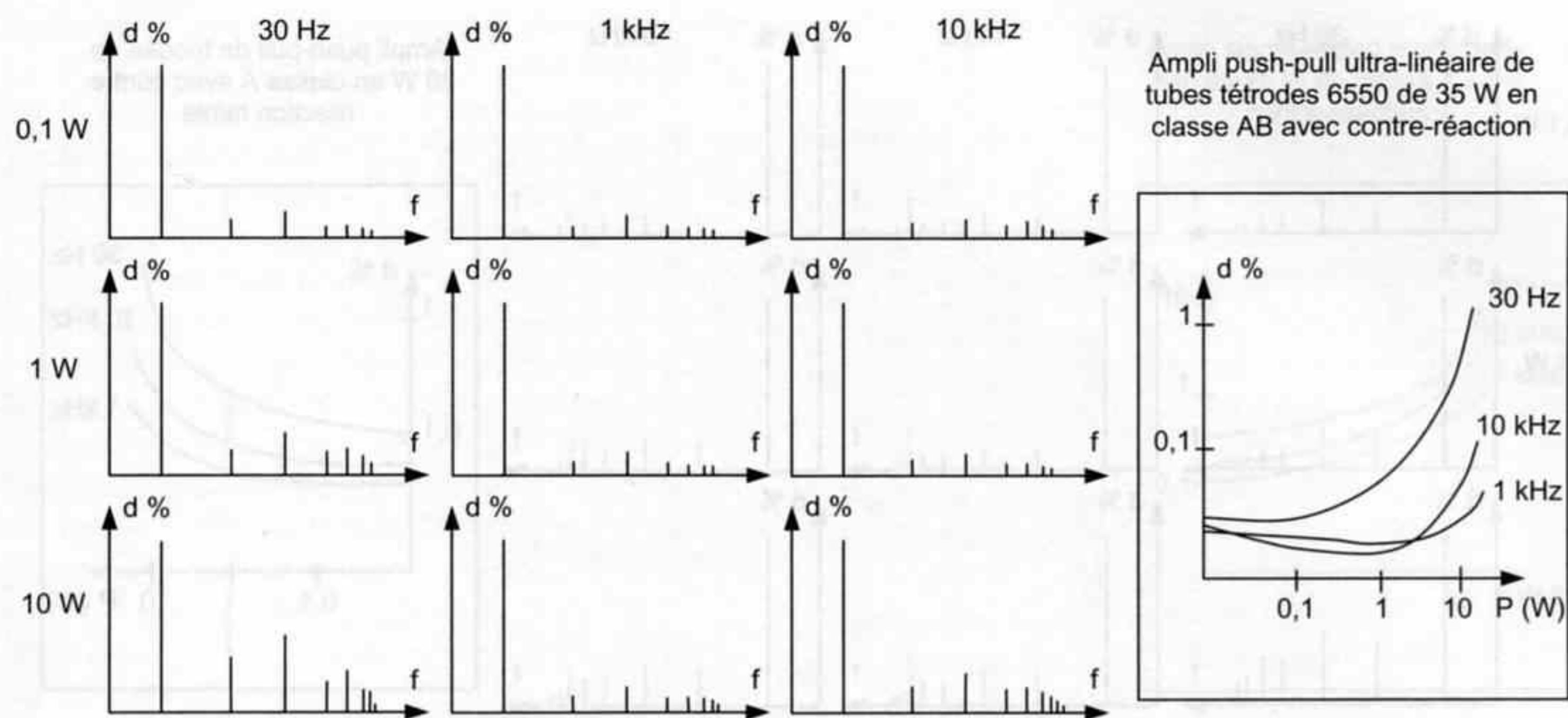


Figure 311 - Un autre push-pull, qui montre évidemment le même type de dégradé impair. Les modifications du spectre avec la puissance sont moins importantes que dans le cas précédent à 1 kHz et 10 kHz. Par contre à 30 Hz, le transformateur de sortie introduit des distorsions impaires importantes, dépassant 1 % aux forts niveaux. Les rangs élevés n'apparaissent que très peu. À 10 kHz, les distorsions augmentent aux très bas niveaux à cause des bruits de

fond. Le bas-médium est artificiellement enrichi par les distorsions du registre grave aux forts niveaux, donnant un son ample et plus chaud que nature. C'est le son "tube" dans le sens habituel du terme, son extrêmement agréable mais peu réaliste, l'épaisseur du trait étant exagérée. L'écoute d'instruments solos, clavecins ou violoncelle, les fait paraître plus volumineux et massifs que nature, avec des cordes moins tendues, et une ampleur des résonances de caisse un peu trop appuyée.

Un amplificateur musical est avant tout un appareil dont le spectre de distorsion, à défaut d'être inexistant, est rigoureusement stable, c'est-à-dire régulier et de forme invariable avec la fréquence ou le niveau du signal. La comparaison des spectres de distorsions sur charge réelle de quelques amplificateurs est éloquente, figure 310 à 313.

Les tubes concernent-ils vraiment un dernier carré d'irréductibles ? La mode actuelle n'est-elle que l'expression d'un certain désir de "luxe" que le prix élevé des réalisations à lampes entretient savamment, ou au contraire est-elle révélatrice que beaucoup d'auditeurs cherchent quelque chose d'autre, quelque chose de plus, au-delà des sons si purs du CD ?

L'arrivée du SACD montre que la spatialisation du son est au cœur des préoccupations, apportant la preuve que la perception du lieu, de sa sonorité propre, de sa réverbération, de son volume, ainsi que la localisation spatiale manquent sérieusement dans la plupart des systèmes de reproduction. Cela dénote un besoin de passer à une profondeur d'écoute supérieure, de se projeter ailleurs dans l'espace et le temps.

Les amplificateurs à tubes ouvrent un accès à cette profondeur d'écoute et vont même au-delà, mais à plusieurs conditions. L'espace du lieu de l'événement ne

peut se superposer acoustiquement à celui de la pièce d'écoute, ce que le multicanal essaye pourtant de faire en donnant une illusion d'un espace différent. Hélas, la sensation d'espace n'est pas liée à la localisation précise de sources dispersées, mais au respect du silence entre les sources et entre les notes. Par conséquent, le respect des dimensions dynamique et temporelle est une condition de la recreation de cet espace, le haut-rendement des transducteurs et les tubes en sont deux composantes incontournables.

Lorsque l'espace est correctement rendu, sans illusion répétitive, sans artifice numérique, les tubes triodes apportent en plus, en cadeau inestimable, la matière sonore et le mouvement.

Dans ces conditions et seulement dans ces conditions, le SACD multicanal apporte une meilleure localisation, plus tridimensionnelle, une aération supplémentaire assez nette. Les prises de sons multicanal effectuées par Lyrinx font usage de matériel à tubes en montage SRPP et ce n'est pas par hasard. Les démonstrations de reproduction en multicanal sont réalisées à partir de haut-parleurs de grand diamètre et de rendement correct, capables de rayonner une puissance acoustique très élevée, et ce n'est pas par hasard. Ce n'est pas par hasard non plus que ces démonstrations

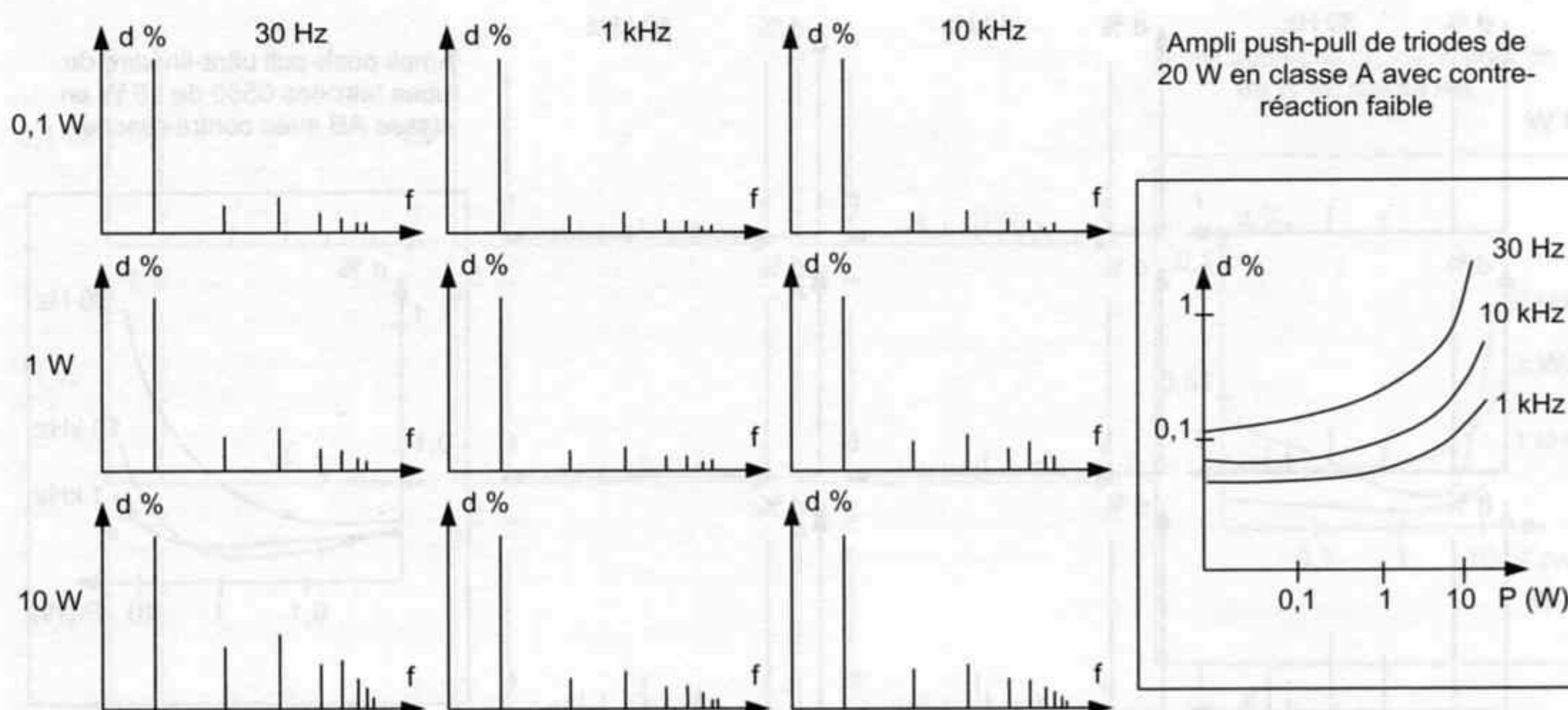


Figure 312 - Un dégradé harmonique un peu plus régulier pour ce push-pull triodes, les rangs 2 et 4 étant cependant encore un peu trop bas. Les étages d'entrée à triodes ré-équilibrent un peu le spectre, dont la forme se conserve à peu près lorsque la fréquence ou la puissance augmentent. À 30 Hz la distorsion croît assez vite avec la puissance, pour dépasser 2,5 % à la puissance maxi, ce qui n'est pas si mal. Contrairement aux exemples précédents, la distorsion à 10 kHz suit la même évolution que celle à 1 kHz. Ce n'est qu'à l'approche de l'écrêtage que des rangs élevés apparaissent. Là aussi le bas-médium semble légèrement

enrichi, mais avec aération, sans lourdeur. Les timbres sont très homogènes et constants, avec un mélange de douceur et de piqué, la matière sonore montrant à la fois des aspects métalliques avec légèreté, naturel et finesse, et des aspects plus ronds et chauds, de résonance de bois. Les sons de cymbale révèlent un instrument de taille, de masse et d'épaisseur plausibles. L'ensemble procure un réalisme convaincant, et un retour aux appareils précédents devient assez difficile. L'écoute d'appareil de ce type constitue une expérience importante pour tout amateur.

prennent place dans des salles à l'acoustique corrigée, afin de ne pas noyer dans une réverbération envahissante les effets multicanaux, d'aération en particulier, voulus par le preneur de son.

Croire que de nouvelles technologies peuvent repousser les limites imposées par les principes physiques est une erreur propre à notre époque. Elles permettent en revanche d'atteindre les limites de ce qu'il est possible de faire en respectant ces principes physiques.

9.8 Tubes à tous les étages

NOS TUBES SONT-ILS N.O.S. ?

N.O.S., ou New from Old Stocks, désigne les tubes neufs fabriqués par le passé et stockés depuis sans jamais avoir été utilisés, ni même déballés. S'ils portent des traces de branchement, c'est parce qu'ils ont été contrôlés en sortie de chaîne de fabrication, ou par le revendeur qui les a appareillés et ne peut se permettre de les garantir sans les avoir testés et vérifiés.

Cette appellation NOS s'oppose à celle de "tube récent", qui désigne des lampes fabriquées depuis les années 80 environ, uniquement pour le marché de l'audio, musique ou Hi-Fi. Ces fabrications ont été

perpétuées ou relancées, en Europe de l'Est, en Chine, ex-Yougoslavie, ex-URSS, par des sociétés basées pour certaines aux USA, et ayant racheté les noms et les droits de marques disparues très réputées, et qui utilisent leurs anciens labels (légalement...).

Les qualités de fabrication d'un tube sont encore une fois liées aux caractéristiques mécaniques, celles des matériaux employés, mais aussi les réglages des procédés de fabrication et leur suivi, permettant de minimiser les dispersions. La précision d'assemblage est capitale, et un examen à l'œil nu révèle sans hésitation un positionnement douteux des éléments internes. De même des déformations visibles des micas, des plaques, ou de leur supports dénoncent le peu de précautions prises lors de la fabrication. Le pesage réserve parfois des surprises, certains tubes plus légers montrant une économie de matériaux et un verre plus mince.

Les tubes mal fabriqués sont décelables à l'écoute par leur sensibilité microphonique plus élevée que la normale. Un tube est microphonique quoi qu'il arrive, mais il ne doit pas montrer une sensibilité plus élevée à une fréquence particulière car cela signifie qu'un élément interne entre en résonance, par la faute d'une

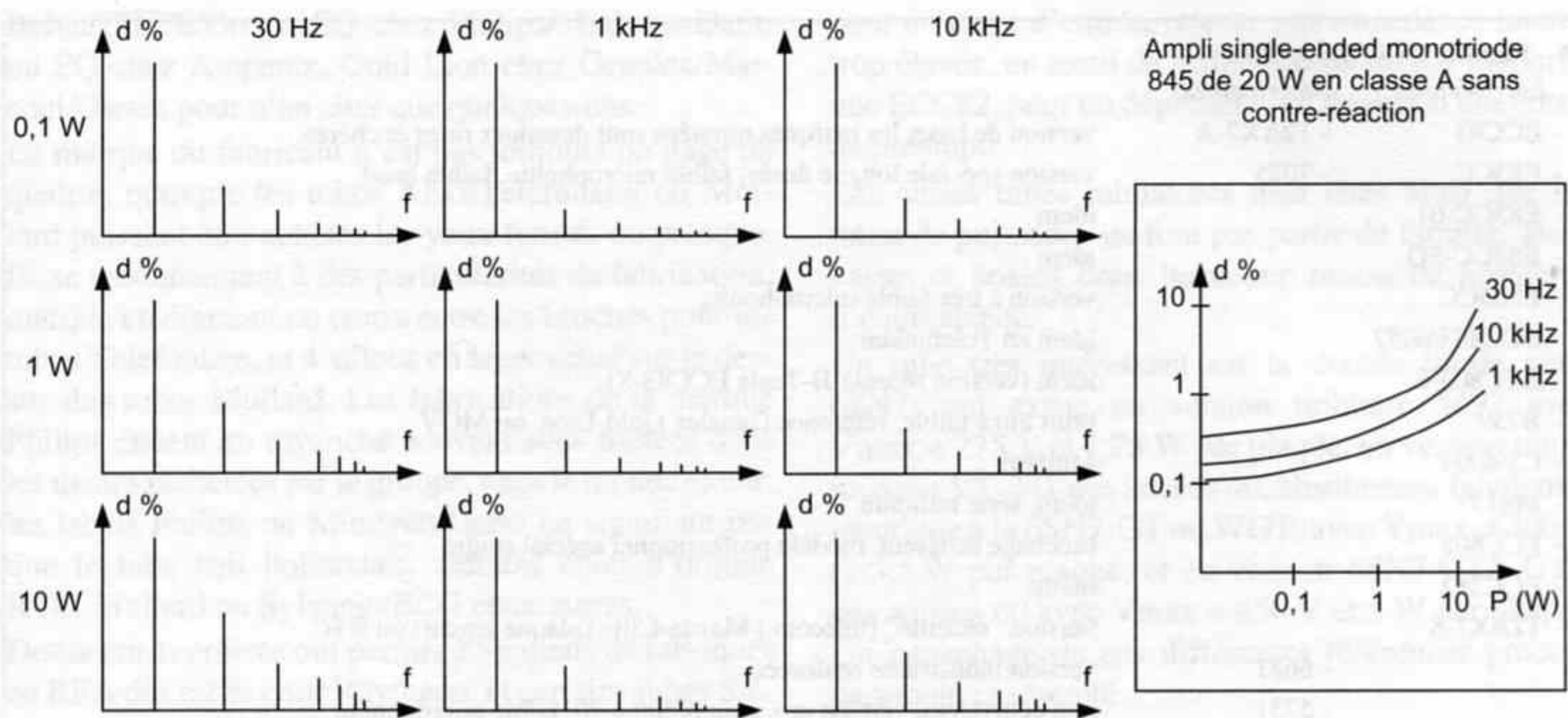


Figure 313 - Un dégradé harmonique très régulier, typique des triodes à chauffage direct, est obtenu avec l'ampli montré en exemple un peu plus haut. Le rang 3 est même parfois un peu bas. Les étages d'entrée à triode en SRPP favorisent sans doute un peu trop les harmoniques paires, bien que les deux premiers étages soient censés se compenser. La forme du spectre est conservée à toute fréquence et à toute puissance. Les taux mesurés ne sont pas fameux, avec 0,5 % à 30 Hz et 0,1 W et jusqu'à 5 % à 20 W. Curieusement l'écoute n'appelle aucune remarque particulière, et c'est le retour aux appareils précédents qui fait tout à coup comprendre que quelque chose d'essentiel est alors perdu, l'ampli à transistor paraissant même en panne ! Une deuxième écoute de cet appareil à triodes procure alors une satisfaction intense d'avoir retrouvé ce quelque chose, indéfinissable, qui rend la restitution indéniablement plus authentique. La distorsion élevée

passé totalement inaperçue à l'écoute. L'impression d'air emplissant un espace d'une stabilité totale, la sensation de masse de l'instrument, parfaitement fixe dans cet espace, sont surprenantes mais on s'y habitue en quelques secondes. La constance de taille n'empêche pas de sentir de grandes variations dans l'énergie rayonnée, mettant en valeur le mouvement et l'expression de l'artiste. Il devient très difficile de qualifier les registres séparément, tant la cohérence est grande. Seul l'extrême aigu paraît atténué, ce que les mesures confirment. Le transformateur de sortie en est sans doute la cause, mais son isolement élevé à 2,5 kV impose des séparateurs entre couches d'enroulement, ce qui augmente la self de fuite. Son utilisation en bas-médium et médium est recommandée, entre 250 Hz et 12 kHz. Les amplis utilisant la triode 300B sont encore plus naturels, mais de puissance très limitée (8 W).

rigidité de fixation insuffisante, due à un jeu excessif entraîné par des dispersions trop élevées sur les dimensions de certaines pièces supports.

La durée de vie d'un tube est liée également à la qualité de fabrication, mais ne peut être connue qu'après essais. Seule la réputation d'un modèle et le sérieux du revendeur constituent une certaine assurance. D'une manière générale, les tubes anciens de stocks militaires ou industriels, les fabrications spéciales pour appareils de mesure, médical, avionique, aérospatiale et télécommunications ou studio de radiodiffusion, ont été réalisées sous contrôle sérieux, voire continu, avec des tolérances serrées et des particularités de construction leur conférant une résistance mécanique élevée, une rigidité très supérieure des supports, une durée de vie supérieure due à un vide très poussé, conservé par un getter doté d'une grande réserve, et des broches assurant un excellent contact, parfois dorées.

L'épaisseur du verre et des micas, leur nombre, sont visibles à l'œil nu, mais l'étanchéité des scellements des broches, l'exactitude des positions relatives cathode/grille et le pas de cette dernière qui influe directement sur les caractéristiques électriques, ne sont décelables qu'avec un traceur de courbes. L'appareillage par un revendeur compétent assure que ces points sont vérifiés, et que les caractéristiques sont conformes aux données de la fiche technique, ce qui assure que le circuit fonctionne comme prévu.

Les tubes militaires et professionnels portent des références spécifiques, soit particulières à la série, comme les VT américains ou les CV et M anglais, ainsi que toutes les références américaines à 4 chiffres. Les séries spéciales portent des suffixes, W, WA, WB, Command, indiquant des versions renforcées, ou simplement T pour "tested" ou bien les préfixes JAN (Joint Army Navy) et CTL (Contract Tung-soL) qui

● Famille ECC83/12AX7 :		
<i>Européennes</i>	<i>Américaines</i>	
- ECC83	- 12AX7-A	version de base, les marques réputées sont devenues rares et chères.
- E83CC	- 7025	version spéciale longue durée, faible microphonie, faible bruit.
- E83CC-01		idem
- E83CC-SQ		idem
- E803CC		version à très faible microphonie.
- ECC803/6057		idem en Telefunken
- ECC803-S		idem (version récente JJ-Tesla ECC83-S)
- B759		bruit ultra-faible, référence Genalex Gold-Lion, ou MOV
- CV4004		Mullard
- M8137		idem, série militaire
- ECC808		brochage différent, modèle professionnel spécial studio
- ECC283		idem
- 12AX7-S		version "sécurité" (télécom.) Mazda-Cifte (plaque argent) ou RTC
	- 6681	version industrielle renforcée
	- 5751	non équivalent, version pro. gain réduit à 70, faible microphonie
	- JG 12AX7	version militaire, transmission
	- JAN 12AX7	idem (CV492)
	- JHS 12AX7	idem
	- 12AX7 WA	idem
	- 12AX7 LPS	Sovtek à filament helicoïdal pour chauffage alternatif, et longue plaque

● Famille ECC82/12AU7 :		
<i>Européennes</i>	<i>Américaines</i>	
- ECC82	- 12AU7	version de base
- E82CC	- 12AU7-A	version spéciale longue durée, faible microphonie.
- E82CC-01		idem
- E82CC-SQ		idem
- ECC802S	- 6189	version à très faible microphonie
- 6007		idem
- B749		bruit ultra-faible, référence Marconi -Osram-Valves
- ECC186	- 7316	filament différent
- CV4003		Mullard
- M8136		idem, série militaire
	- 6680	version industrielle renforcée
	- 5814	version professionnelle
	- 5814 GB	Gold Brand, série spéciale Sylvania
	- 12AU7W, WA	version renforcée

● Famille ECC88/6DJ8 :		
<i>Européennes</i>	<i>Américaines</i>	
- ECC88	- 6DJ8	version de base, Va = 130 Vmax
- E88CC	- 6922	version renforcée professionnelle et militaire, filament différent
- E88CC-SQ	- 6922	idem
- E88CC-01		idem
- Cca		idem en Siemens ou Telefunken
- CV2492/93		Mullard
- CV5358		Ediswan, faible bruit
- E188CC	- 7308	version renforcée de précision, triodes appairées
- CV4108		idem en Mullard

Figure 314.

indiquent des tests poussés pour utilisation par l'aéronavale. Bien que la référence de base soit conservée, indiquant des caractéristiques électriques identiques, la structure interne peut être complètement différente. Ces tubes particulièrement bien construits ne sonnent pas forcément mieux, au moins l'utilisateur est-il assuré qu'il n'aura pas de mauvaise surprise.

Les versions publics et professionnelles des tubes européens sont également faciles à distinguer, l'appellation ECC82 par exemple devenant en version professionnelle E82CC, E82CC-01 ou E82CC-SQ. Les fabrications en séries à hautes performances se distinguent par des labels, Gold Brand chez Sylvania, Five Stars chez General Electric, 5 étoiles chez Mazda-

Belvu/CIFTE/Orega, SQ chez Philips/Miniwatt-Dario ou PQ chez Amperex, Gold Lion chez Genalex/Marconi/Osram pour n'en citer que quelques-uns.

La marque du fabricant n'est pas toujours un gage de qualité, quoique les tubes AEG/Telefunken ou Mullard puissent être achetés les yeux fermés ou presque. Ils se reconnaissent à des particularités de fabrication, marque en diamant en creux entre les broches pour les tubes Telefunken, et 4 sillons en léger relief sur le dessus des tubes Mullard. Les fabrications de la marque Philips étaient en revanche souvent sous-traitées dans les usines rachetées par le groupe, dans le monde entier, les labels Philips ou Miniwatt/Dario ne signifiant pas que le tube soit hollandais, certains étant d'origine RTC, Mullard ou Sylvania/ECG entre autres.

Des accords croisés ont permis à Siemens de fabriquer en RFA des tubes pour Raytheon, et certains tubes Siemens étaient fabriqués aux USA. Bref, il est difficile pour l'amateur de s'y retrouver, et bien que certains tubes possèdent un code gravé près de la base aidant à identifier leur origine, beaucoup d'autres sont impossibles à authentifier.

D'une manière générale, un circuit de fabrication artisanale sera équipé de tubes récents économiques pour sa mise au point, puis de tubes anciens de haute qualité une fois qu'il est fiabilisé. Un appareil du commerce gagne à recevoir des tubes de qualité, ceux d'origine n'étant pas toujours parmi les meilleurs pour des raisons d'approvisionnement en grandes quantités. En effet, les stocks de tubes anciens sont dispersés, et il est difficile d'en trouver quelques centaines issus d'un même lot chez un seul fournisseur. La fabrication en série exigeant plusieurs centaines ou milliers de tubes de même provenance pour éviter des dispersions de performances ou de fonctionnement, le fabricant est contraint de se tourner vers les tubes récents, disponibles par quantité directement auprès du fabricant ou de l'importateur.

Les conseils d'un revendeur compétent sont indispensables avant tout approvisionnement.

Afin d'aider les amateurs à se repérer dans ce dédale, voici quelques indications concernant les tubes les plus souvent utilisés aujourd'hui en audio et présentant de nombreux équivalents, figure 314.

Certaines versions ont un filament légèrement différent, demandant un courant de chauffage plus faible, ce qui est sans effet si la tension est stabilisée, le courant s'adaptant automatiquement. Dans le cas contraire, une adaptation de l'alimentation filament est nécessaire, le simple changement d'une résistance en série suffit en général.

Je ne fais pas figurer dans cette liste la famille ECC81 qui ne me paraît pas adaptée à une utilisation audio, car pas assez linéaire et avec moins de gain qu'une ECC83

pour un étage d'entrée, et avec une impédance interne trop élevée, un recul de grille trop faible par rapport à une ECC82, pour un déphaseur, un driver ou une sortie de préampli.

Les autres tubes miniatures déjà cités ainsi que les tubes de puissance ne font pas partie de familles aussi vastes et posent donc beaucoup moins de problème d'équivalence.

Un tube très intéressant est la double triode octal 6SN7, qui existe en version militaire 5692 avec $V_{max} = 275$ V et 1,75 W par plaque, en version transmission VT-231 des années 40, absolument fabuleuse, identique à la 6SN7-GT ou WGT, avec $V_{max} = 300$ V et 3,5 W par plaque, et en version 6SN7-GTA-GTB des années 60 avec $V_{max} = 450$ V et 5 W par plaque. Un panachage de ces différentes références procure harmonie et sérénité.

Pour terminer sur les choix de tubes, la figure 315 montre un extrait de la fiche technique du tube 6900 Bendix utilisé en avionique, et qui fait à mon sens un étage de sortie de préampli ou un driver d'une dynamique stupéfiante. Cet exemple permet de lister et de présenter tous les points importants de la qualité de fabrication d'un tube. Si tous les tubes étaient construits comme celui-ci, nos amplis seraient plus... lourds !

ADAPTATEURS D'IMPÉDANCE

Quelques étages d'électronique sont encore nécessaires, malgré le haut niveau de sortie des sources actuelles. En sortie de lecteur CD, ou plus exactement de convertisseur numérique-analogique, en sortie de préampli bien évidemment, et également dans l'éventuel filtre actif, pour lequel les cellules de filtrage sont calculées pour une impédance de source faible ou nulle, chacune d'elle devant être précédée d'un adaptateur d'impédance à gain unitaire.

La plupart du temps, un amplificateur opérationnel intégré remplit cette fonction, rarement un circuit en éléments discrets, reprenant malheureusement la structure des circuits intégrés, exceptionnellement un circuit de type Kanéda, à faible contre-réaction et construit selon les orientations discutées précédemment.

Les "ampli-op" classiques et leur gain énorme en boucle ouverte, imposant des taux de contre-réaction élevés, surtout pour un étage à gain unitaire ou réduit, présentent des défauts déjà exposés, que je rappelle brièvement :

- Spectre de distorsion riche en fréquences élevées, au dégradé irrégulier.
- Impédance de sortie variant avec la fréquence, de forme plutôt inductive.
- Réponse temporelle irrégulière car les fréquences de coupure des différents étages ne sont pas "alignées".

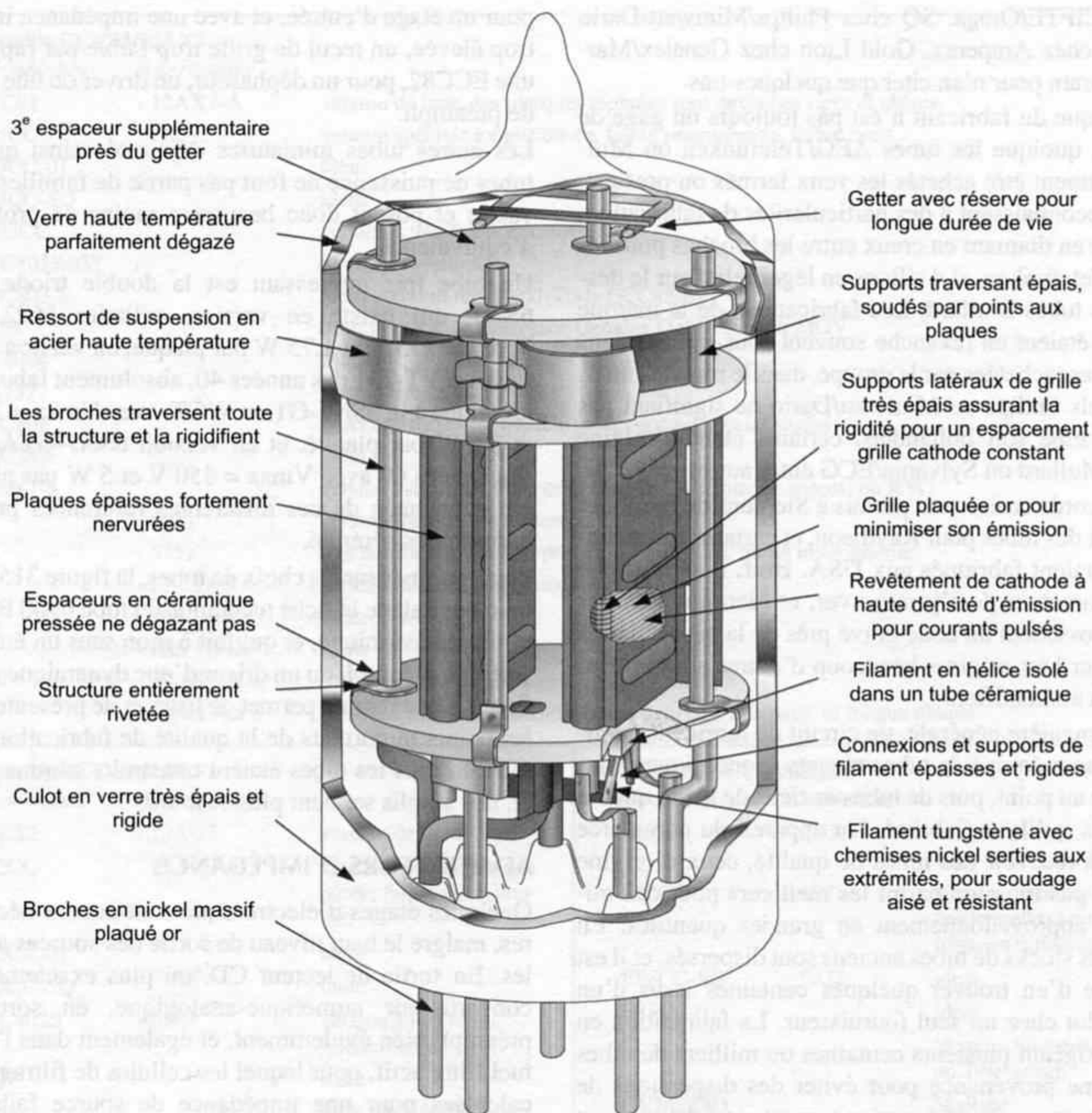


Figure 315 - Tube double-triode Noval 6900 (doc. Bendix) : Au-delà de la résistance aux chocs (on peut marcher dessus !) aux vibrations, aux températures extrêmes, caractéristiques peu utiles en audio, c'est sa quasi-absence de microphonie, la linéarité et la régularité de ses courbes, et surtout ses capacités en courant pulsé, avec 4,5 A en crête (il ne s'agit plus de mA !), qui

lui assurent dans un étage de sortie de préampli, une vivacité, une légèreté et une maîtrise du trait musical qu'aucun semi-conducteur quel qu'il soit n'a encore jamais approché. Equivalents (?) ou tubes proches moins rares : 5687 WA ou GB-Sylvania, 7044 G-E, 7119/E182CC Philips-Mullard, ECC99 avec brochage différent (fabrication récente de JJ-Tesla, Slovaquie).

- Étage de sortie en classe AB présentant une impédance de sortie variable avec les réactions de la charge extérieure.
- Courant transitoire de sortie très limité.
- Alimentation unique de tous les étages, d'où impédance commune entre l'étage de sortie débitant des courants dans la charge et les étages d'entrée.
- Capacités parasites d'entrée, entre gate des FET d'entrée et substrat, variable avec le niveau du signal (fréquence de coupure haute modulée au rythme du signal).

- Courants de polarisation d'entrée des transistors bipolaires créant des dérives continues en circulant dans les résistances de source (celles vues par les entrées).
- Gain du premier étage élevé, amenant le deuxième étage à saturation transitoire quand le signal d'erreur est "grand", sur charge réactive ou capacitive en sortie, comme un câble audio par exemple.
- Stabilité parfois difficile à maîtriser.

Un tel ampli n'a d'opérationnel que... le nom !

Après en avoir écouté des dizaines, qui emplissent mes tiroirs, je n'en retiens que très peu qui donnent des résultats satisfaisants dans certaines conditions. Les grands classiques NE5534, AD711, OP27/37, SSM2131 et d'autres, sont maintenant dépassés, sur tous les plans, seule la version NE5534AP de Texas Instrument ayant donné des résultats honorables (on la trouve encore dans certains matériels dits "très haut de gamme"...).

La nouvelle génération, intégrant des FET isolés en entrée, avec par exemple la technologie DIFET, Dielectrically Isolated FET, et montrant une réponse temporelle optimisée ainsi qu'une aptitude à driver des charges capacitives, est nettement plus intéressante.

En revanche les ampli-op à contre-réaction de courant ne sont pas utilisables ici, et les modèles bipolaires étudiés pour la vidéo posent le problème des courants de polarisation d'entrée très élevés.

Burr-Brown propose deux références intéressantes : OPA 604 (ou 2604 en version double), OPA 627.

La version OPA 637 n'est pas stable au gain unitaire et ne permet pas de construire un adaptateur d'impédance, mais convient pour un étage avec gain supérieur à 5. Analog-Devices propose les modèles AD797 et AD825.

Tous ces circuits intégrés demandent des alimentations très soignées, à base de stabilisateurs rapides sans contre-réaction (voir figure 239) avec des découplages étudiés et un routage de masse optimisé. Un exemple de circuit imprimé est donné figure 241. Des alimentations sur batteries (12 V + 6 V/6 Ah en série, avec stabilisateurs ± 15 V) permettent d'en tirer la quintessence, et leur qualités subjectives dépassent alors celles de beaucoup de circuits en éléments discrets.

Un seul ampli-op intégré, sans doute développé spécialement pour les applications audio, permet d'aller plus loin en terme de naturel et d'ouverture : Le module DACT référence CT-101, étage ligne configurable pour un gain de 0, 6 ou 12 dB, comporte deux voies, chacune équipée d'un ampli-op dont les références ont été effacées, et de deux stabilisateurs de tension découplés par condensateurs Elna. Un étage ligne l'utilisant prouve sans hésitation que son prix semble entièrement justifié.

Cela ne constitue pas un choix très large, et le point faible de l'électronique audio est bien là. La solution du préampli passif n'est pas viable, la sonorité obtenue étant retenue, freinée, introvertie. La sortie sur le curseur du potentiomètre, en procurant un suramortissement par la résistance en série, est responsable de ce voile terne posé sur la restitution. Quelle que soit la configuration du système, le passage d'un préampli passif à un préampli actif, simplement en ajoutant un étage ligne tout prêt comme le DACT CT-101 dans l'appareil, procure immédiatement une ouverture et

une transparence de l'espace, une netteté des grains de la matière sonore, une vivacité du trait. Les arguments qui défendent le préampli passif en avançant qu'un étage ligne ne saurait être plus transparent que l'absence d'étage, ne tiennent pas, face à l'expérimentation. L'absence d'étage est illusoire, car le potentiomètre de volume, précédé et suivi des câbles de liaison, est bel et bien un étage, et pas des plus transparents !

La cohérence du système est loin d'être obtenue, avec des amplificateurs à tubes à une extrémité et des ampli-op de l'autre. Il est possible de construire des étages de préamplification à lampes très simples et très performants, utilisables en tampon adaptateurs d'impédance dans les filtres actifs, en sortie de lecteur ou de préampli. Les seules contraintes concernent les alimentations, au nombre de deux au minimum, chauffage filament régulé et haute tension stabilisée, et leurs découplages corrects.

L'étage adaptateur d'impédance est réalisé avec un simple cathode-follower, étage à anode commune, figure 316.

Cet étage n'est évidemment pas à couplage direct, ce qui n'est pas gênant dans les cellules de filtrage passe-haut d'un filtre actif, mais peut le devenir à d'autres emplacements. Les condensateurs de liaison sont au papier huilé et feuille de cuivre ou bien polypropylène feuille d'étain. Deux liaisons par capacités de plus dans le système, cela n'est pas idéal, aussi une liaison par transformateur en sortie de préampli est bienvenue. Une sortie en simple-étage triode est également très simple, figure 317, et procure une musicalité exceptionnelle.

Dans la plupart des schémas présentés jusqu'ici, il n'est pas fait usage de tensions de polarisation négatives sur les grilles des tubes, ni de tensions d'alimentation négatives sur les cathodes, qui pourraient pourtant permettre un couplage direct de certains circuits. De telles alimentations ne suivent jamais de manière symétrique les fluctuations de la haute tension, et des dérives inévitables apparaissent en sortie ce qui interdit la suppression du condensateur de liaison. La stabilité du point de repos est moins bonne également. La polarisation automatique par résistance de cathode assure un point de repos auto-stabilisé malgré les variations de température ou le vieillissement des tubes. La contre-réaction série procurée par cette résistance ne constitue pas une boucle et n'introduit pas de risque d'instabilité. Elle réduit un peu le gain, augmente la linéarité de transfert du tube, et un peu l'impédance de sortie. Son découplage par condensateurs de forte valeur, de qualité audio, n'est pas toujours indispensable, apportant une très légère dégradation audible en terme de transparence de l'espace.

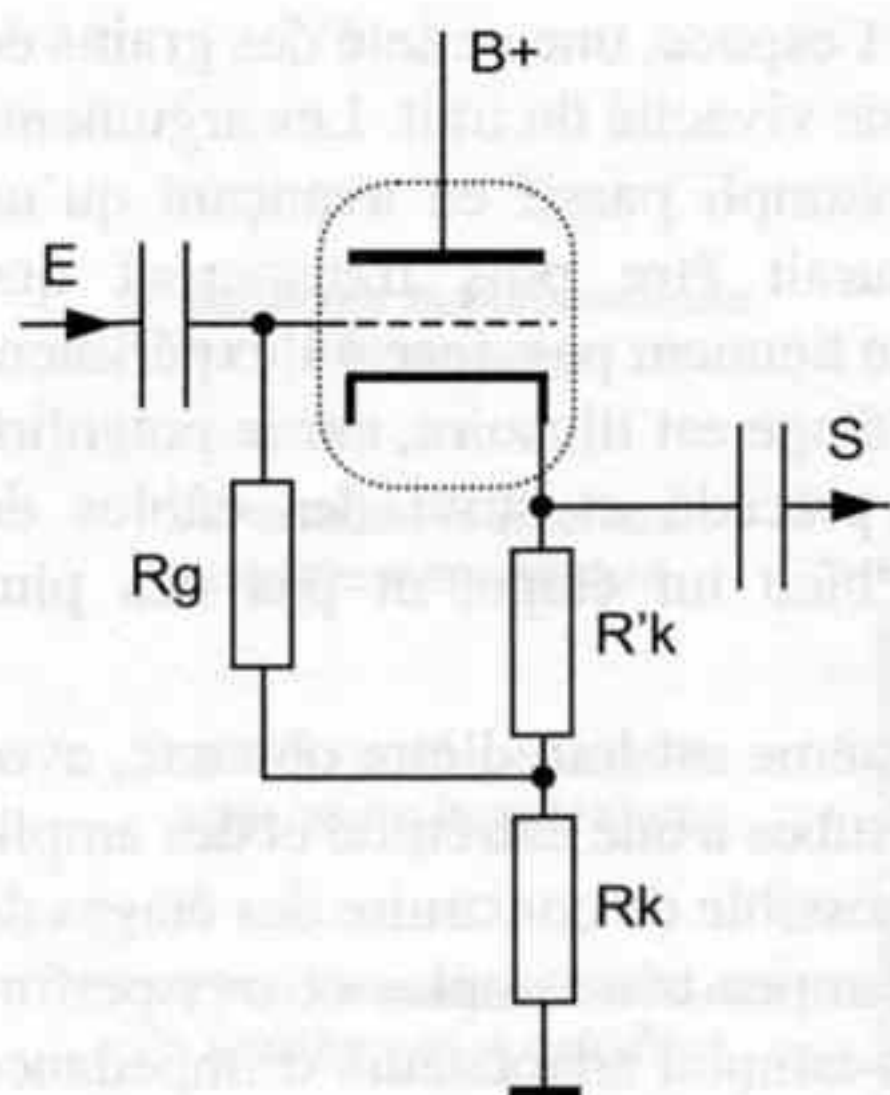


Figure 316 - Difficile de faire plus simple : 1 tube, 3 résistances, 2 condensateurs de liaison. Parfois critiqué, on lui reproche un son retenu. Ces remarques sont souvent justifiées, la très faible impédance de sortie procurant un amortissement élevé du circuit aval, révélant les manques de l'ensemble du système. Un mauvais choix du point de fonctionnement apporte également un manque de transparence, ainsi que le partage de l'alimentation Haute Tension avec l'étage précédent, hélas souvent observé. Les tubes utilisés sont à forte pente, par exemple la ECC88, ou mieux la 7308, avec un courant de repos élevé, de 5 à 6 mA, et une charge R_k assez élevée, de l'ordre de 25 k Ω . La cathode se trouve alors à un potentiel de 125 V, et avec une tension plaque de 75 V la haute tension $B+$ est donc de 200 V environ. $R'k$ est calculée de manière à produire sous le courant de repos une chute de tension égale à la polarisation grille souhaitée, de -2 à -3 V, soit $R'k = 390$ à 470 Ω . L'impédance de sortie est inférieure à 100 Ω , et les possibilités de courant transitoire en sortie sont surprenantes.

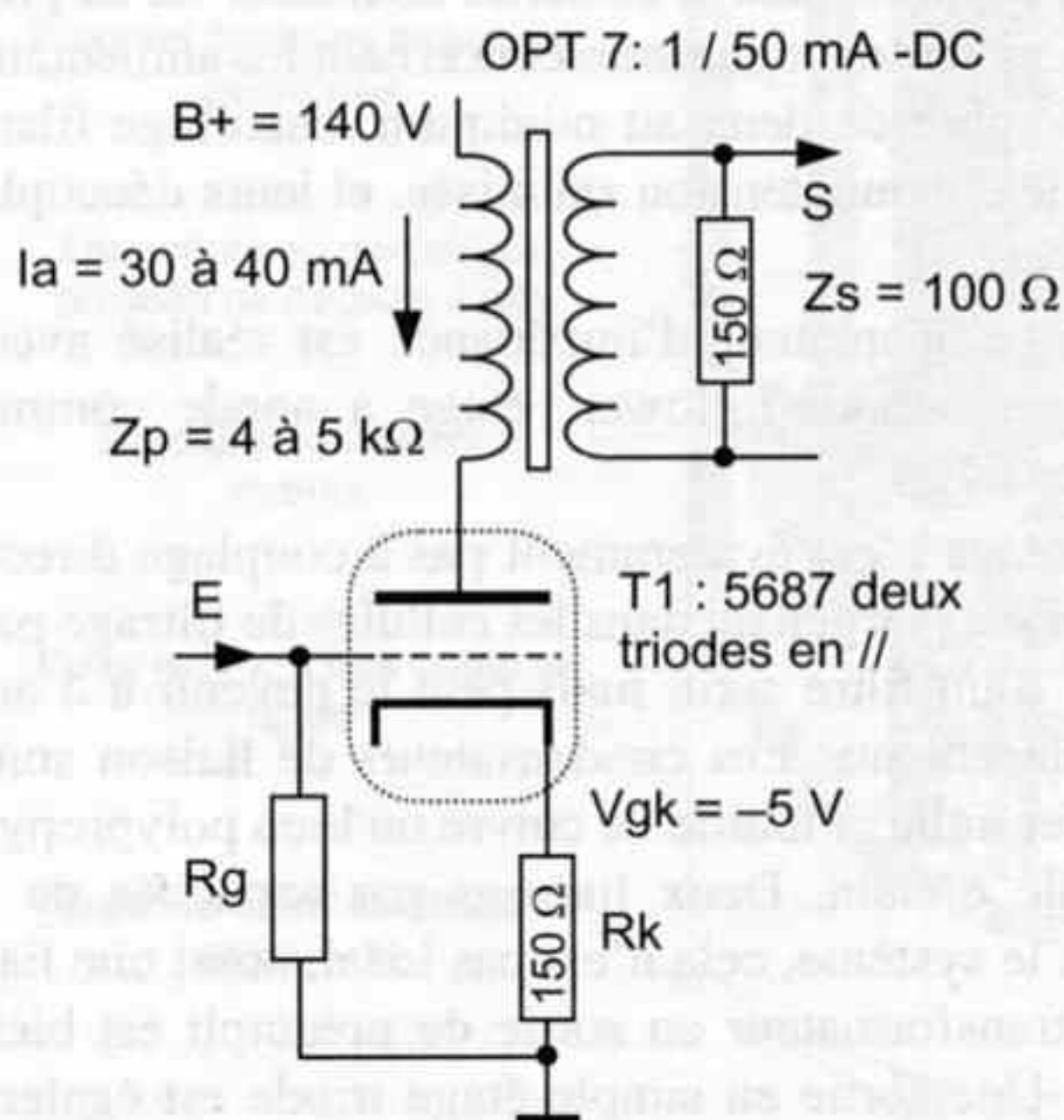


Figure 317 - Difficile de faire plus dépouillé : 1 tube, 3 résistances, 1 transformateur de sortie pour préampli, avec entrefer. Cette fois il n'y a aucun condensateur de liaison, le continu est éliminé par le transformateur, avec les avantages déjà signalés. Un tube double triode à μ moyen, de 15 à 30, avec les deux éléments en parallèle, pour un courant de repos de 25 à 50 mA, associé à un transformateur de rapport $n = 4$ à 10 au maximum, procure peu de gain, 0 à 6 dB s'il est bien calculé, et présente une impédance de sortie de l'ordre de 100 Ω . R_k peut être découplée pour augmenter le gain et diminuer l'impédance de sortie. On peut aussi remplacer R_k par une LED donnant la tension de polarisation souhaitée, bleue pour -3 V par exemple, découplée par un condensateur polypropylène. Les tubes les plus adaptés à ce montage sont : 5687, 6900, ou avec courants différents 7044, 7119/E182CC, ECC82, 6SN7, ECC99. Le transformateur est réalisé sur commande (Lundahl, Bartolucci...).

UNE ALIMENTATION DISTRIBUÉE

L'alimentation haute tension repérée $B+$ sur les schémas mérite un filtrage très soigné, commençant par un redressement par valve, EZ81 ou 6X4, suivie d'un π avec self de forte valeur, 10 à 20 H, suivie de deux cellules R-C successives au minimum. La chute de tension produite par les résistances n'est pas sévère vu le faible courant consommé, et les condensateurs sont choisis également électrolytiques de qualité audio ou polypropylène.

Les différentes alimentations régulées haute tension construites sur le principe habituel des régulateurs, c'est-à-dire avec une contre-réaction élevée mais diminuant avec la fréquence, ne donnent que de piètres résultats, en comparaison avec les alimentations passives. Les défauts sont ceux déjà signalés, dus à l'impédance irrégulière, mais encore plus apparents ici, les transistors ballasts haute tension ayant un gain en courant faible, souvent inférieur à 15, et les diodes Zener haute tension présentant une impédance dynamique très élevée. Cette impédance élevée produit une mau-

vaise stabilisation de la tension de référence, qui se trouve bruitée par la moindre variation de courant dans la Zener, et intervient également dans l'impédance de sortie, qui se révèle trop élevée.

Certains préamplis de très haut de gamme utilisent pourtant des régulateurs de structure classique, des modèles américains allant jusqu'à faire usage d'un régulateur pour chaque tube ou étage, sans aucun découplage par condensateur. Tous ces régulateurs puisent leurs courants de sortie dans le même condensateur réservoir qui constitue alors une impédance commune, de même que la piste de masse de retour. Bien sûr des mesures de bruit et de stabilité des tensions régulées ne font apparaître aucun problème au repos, mais l'intermodulation existe néanmoins et les audiophiles qui ont osé ajouter, juste pour voir, des découplages de 10 à 100 μ F à chaque étage, n'ont jamais regretté !

Chaque régulateur considéré indépendamment fonctionne correctement, quoique à base d'ampli-op, mais il me semble qu'il manquait une vision d'ensemble du

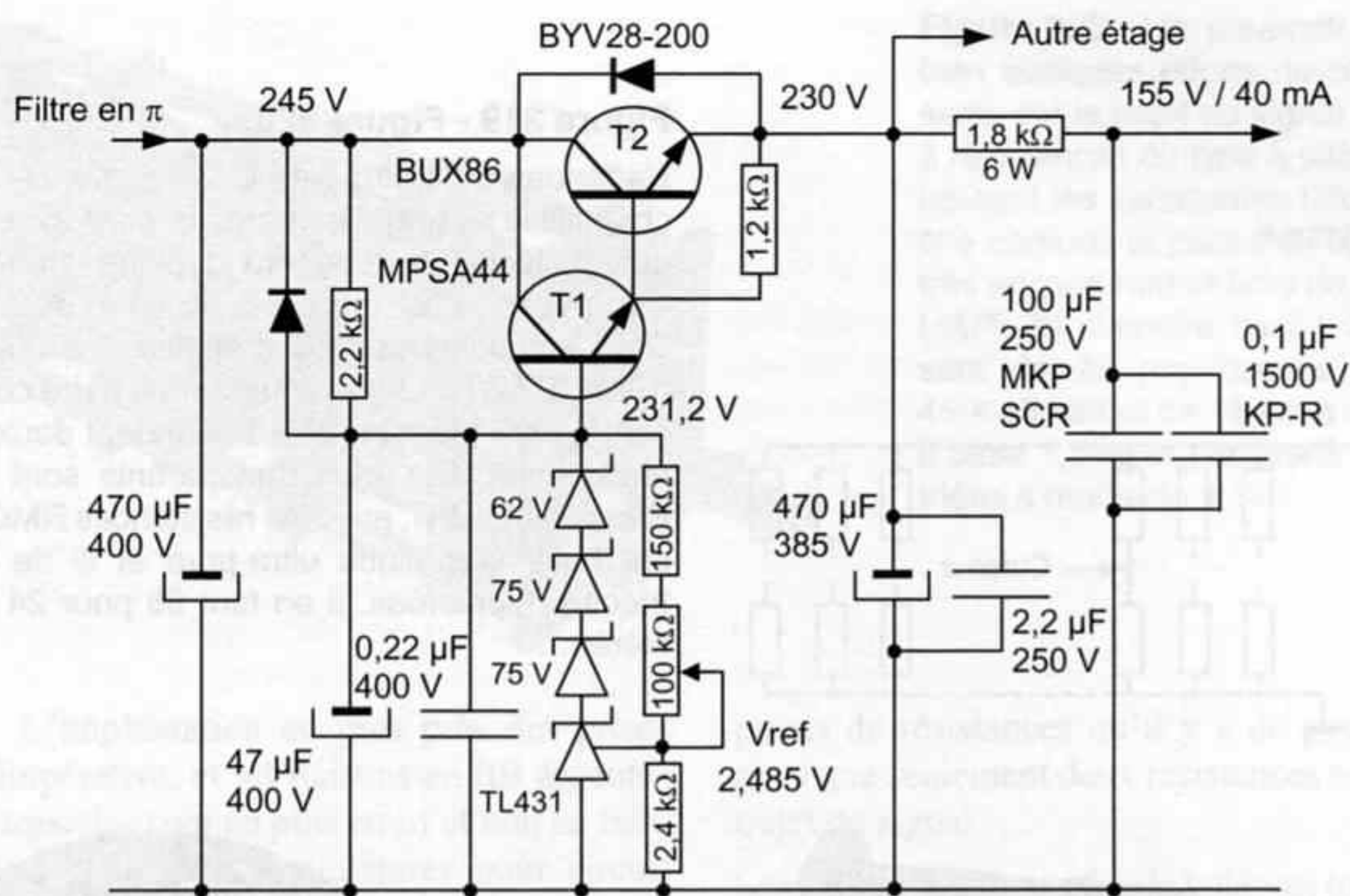


Figure 318 - Stabilisateur haute tension sans contre-réaction, avec très faible bruit en sortie et impédance

résistive de 2 Ω environ, montée en tension progressive.

fonctionnement de l'appareil, prenant en compte les interactions. Bien sûr la haute tension doit être parfaitement stable, ce qui signifie qu'elle doit être stabilisée et ne sous-entend aucunement qu'elle doit être régulée. Bien sûr chaque étage d'un préampli doit être alimenté indépendamment, ce qui signifie qu'il ne doit pas partager d'impédance commune et doit par conséquent posséder son propre condensateur de découplage avec une piste de masse indépendante, et ne sous-entend aucunement qu'il doit posséder son propre régulateur, surtout si ce dernier puise son courant dans une impédance commune !

Une approche globale plus rationnelle conduit à implanter un stabilisateur pour chaque sous-ensemble, étage RIAA, étage Pré-pré, étage ligne, étage de correction s'il existe, et en sortie de ce stabilisateur plusieurs réseaux R-C distincts pour chacun des tubes de l'étage. Les courants modulés se referment par le condensateur local d'assez forte valeur, 100 μF au minimum de qualité audio, et seul le courant continu de repos se referme par le stabilisateur, qui fournit en sortie un courant très peu variable.

Un régulateur classique peut dans ce cas être utilisé avec de bons résultats, mais un stabilisateur du type présenté figure 239, et adapté aux tensions élevées, apporte une qualité subjective exceptionnelle. Un schéma est donné figure 318.

Le régulateur shunt TL431 est encore ici mis à contribution, mais il englobe dans sa boucle de régulation quelques diodes Zener en série. L'impédance de cet

ensemble de diodes est divisée par le taux de contre-réaction élevé (et constant) de cette boucle, et la tension de 231,2 V présente à la base du transistor T1 est fournie sous une impédance assez basse, de l'ordre de 50 Ω seulement. Les diodes Zener seules présenteraient une impédance totale de l'ordre de 500 Ω, s'ajoutant à la résistance d'entrée de T1. La boucle de régulation ne sert ici qu'à générer la tension de référence, et n'englobe pas le transistor de sortie. Cette petite boucle n'est reliée ni à l'entrée ni à la sortie du stabilisateur, et ses caractéristiques fréquentielles n'interviennent pas sur celles de la sortie. Les éventuelles variations de courant de base de T1 sont absorbées par les condensateurs de découplage de sa base, la tension de référence découplée étant d'une stabilité inconditionnelle.

T1 et T2 sont montés en Darlington et présentent ainsi un gain en courant H_{21} supérieur à 1 000. Le potentiomètre de 100 kΩ permet le réglage de la tension de sortie à partir de 155 V environ. L'ensemble tension de référence et pont diviseur est alimenté avec 5 à 6 mA par la cellule R-C avec 2,2 kΩ et 47 μF, qui alimente également la base de T1. Des diodes rapides protègent les transistors, et le courant de court-circuit est limité par les résistances amont.

L'ensemble du stabilisateur prend place en sortie du filtrage en π à plusieurs cellules, dont le condensateur de 470 μF apparaît à gauche. La sortie, dont l'impédance est de 2 Ω au plus et diminue lorsque le courant augmente, charge un condensateur réservoir à tension constante. Des cellules R-C alimentent chacun des

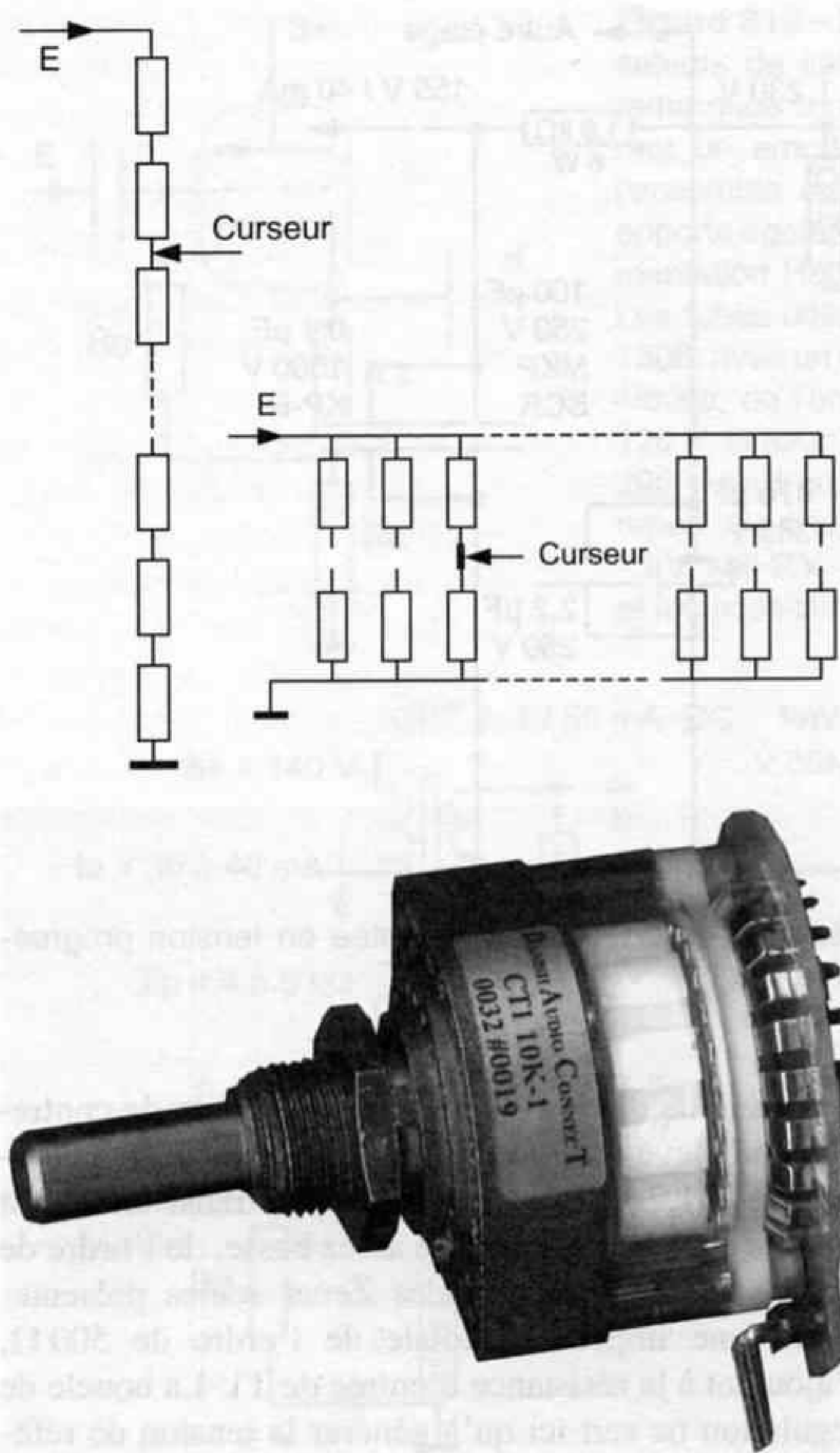


Figure 319 - Figure 320.

L'atténuateur le plus simple à échelle, ci-contre à gauche, utilise un grand nombre de résistances en série, ce qui multiplie la sonorité typique des résistances employées. Les modèles utilisant des composants CMS à couche métallique épaisse sont très appréciés (Elma, DACT). Les atténuateurs à paire commutées ci-contre sont plus rares et demandent deux fois plus de résistances. Les plus transparents sont réalisés par Riken, série UAT, avec les résistances RMG au carbone sur base céramique ultra-pure et fil de cuivre doré, triées et appairées. Il en faut 96 pour 24 positions en stéréo...

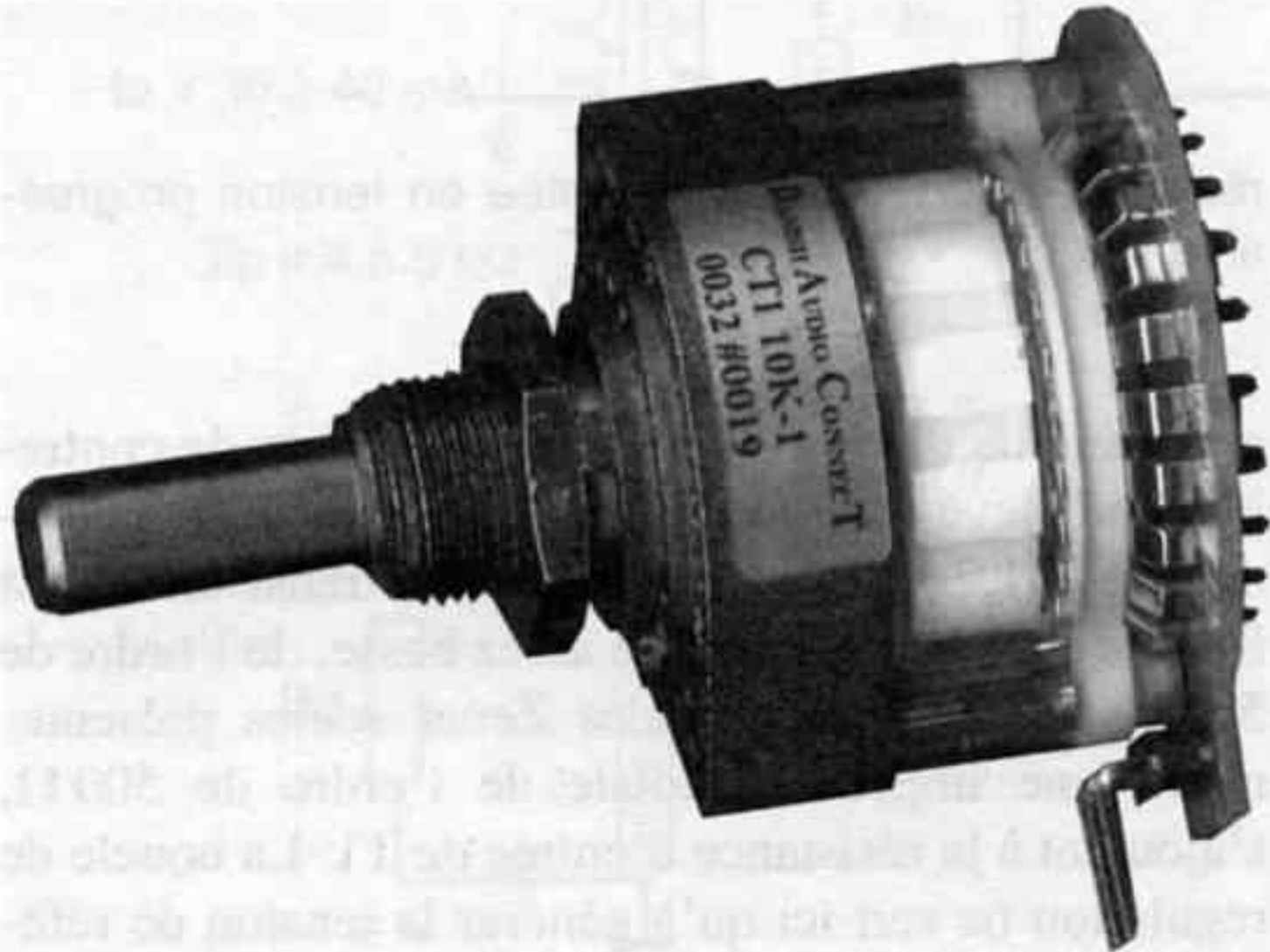
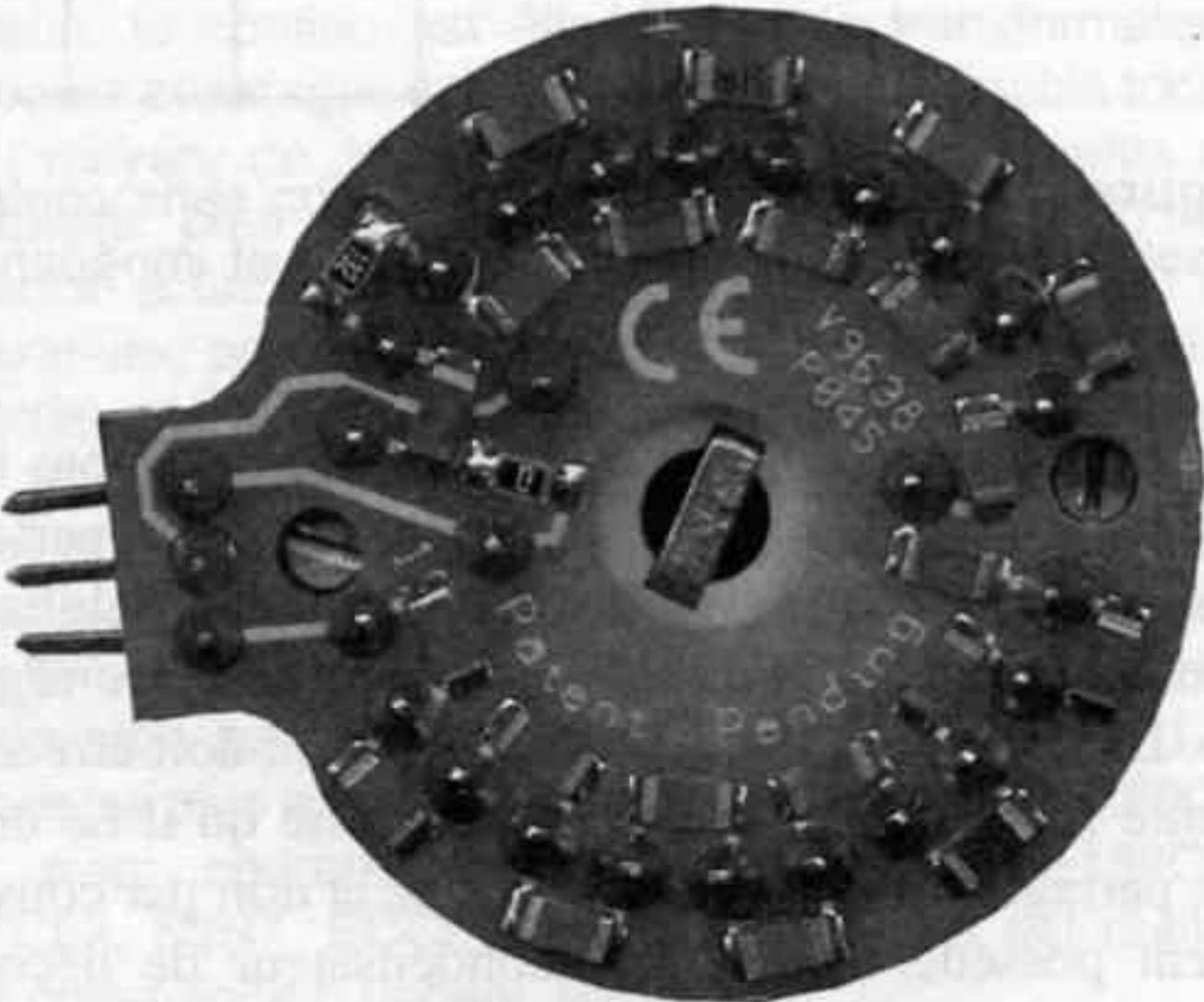


Figure 321 - Sur bases de sélecteurs Elma à 24 positions et contacts or 3 µm, DACT construits des atténuateurs calibrés munis de 23 résistances CMS à couche

tubes. Celle qui est représentée fournit 155 V/40 mA à un étage de sortie à transformateur et tube 5687, d'autres cellules non représentées portent le courant total à 100 mA. La dissipation de T2 s'élève donc à $P = (245 - 230) \times 0,1 = 1,5 \text{ W}$, ce qui impose son montage sur un petit radiateur genre KL205 de 7 °C/W. Un transistor TIP50 peut remplacer le BUX 86 pour des courants supérieurs.

UN PEU DE TECHNOLOGIE

Pour terminer sur le sujet de la conception des électroniques audio, on peut remarquer que de nombreux préamplis font usage de potentiomètres, de sélecteurs et de connectiques assez moyennes. L'influence de ces contacts sur les qualités subjectives est démontrée, et l'amateur peut aisément remplacer la plupart de ces éléments.



métallique de haute précision. Ici la version 10 kΩ mono. D'autres modèles à 2, 4 ou 6 voies ainsi que des commutateurs d'entrée sont disponibles.

Les prises d'entrée sont en cuivre massif plaqué or 3 µm, ou argentées, isolant PTFE. Les laiton avec dorure mince sont médiocres et vieillissent mal. L'isolation par rapport au châssis est indispensable, et s'il est vrai que le châssis doit être relié à la masse, c'est parce que cette dernière est reliée à la terre. Faire passer les courants de fuite de l'alimentation secteur par la masse de référence des signaux entrants (très faibles) avant de les évacuer à la terre est insensé ! Le châssis doit donc être relié à la terre près de la prise secteur et non à la prise d'entrée. Le point central de masse est éventuellement relié à la terre, à moins que cela ne génère une boucle. Revoir le chapitre 7 à ce sujet.

Le sélecteur d'entrée est à contacts massifs argentés, ou dorés, non court-circuitant, et si possible commutant le point chaud et la masse en même temps. DACT, Elma, Shallco, Ko-On entre autres en fabriquent

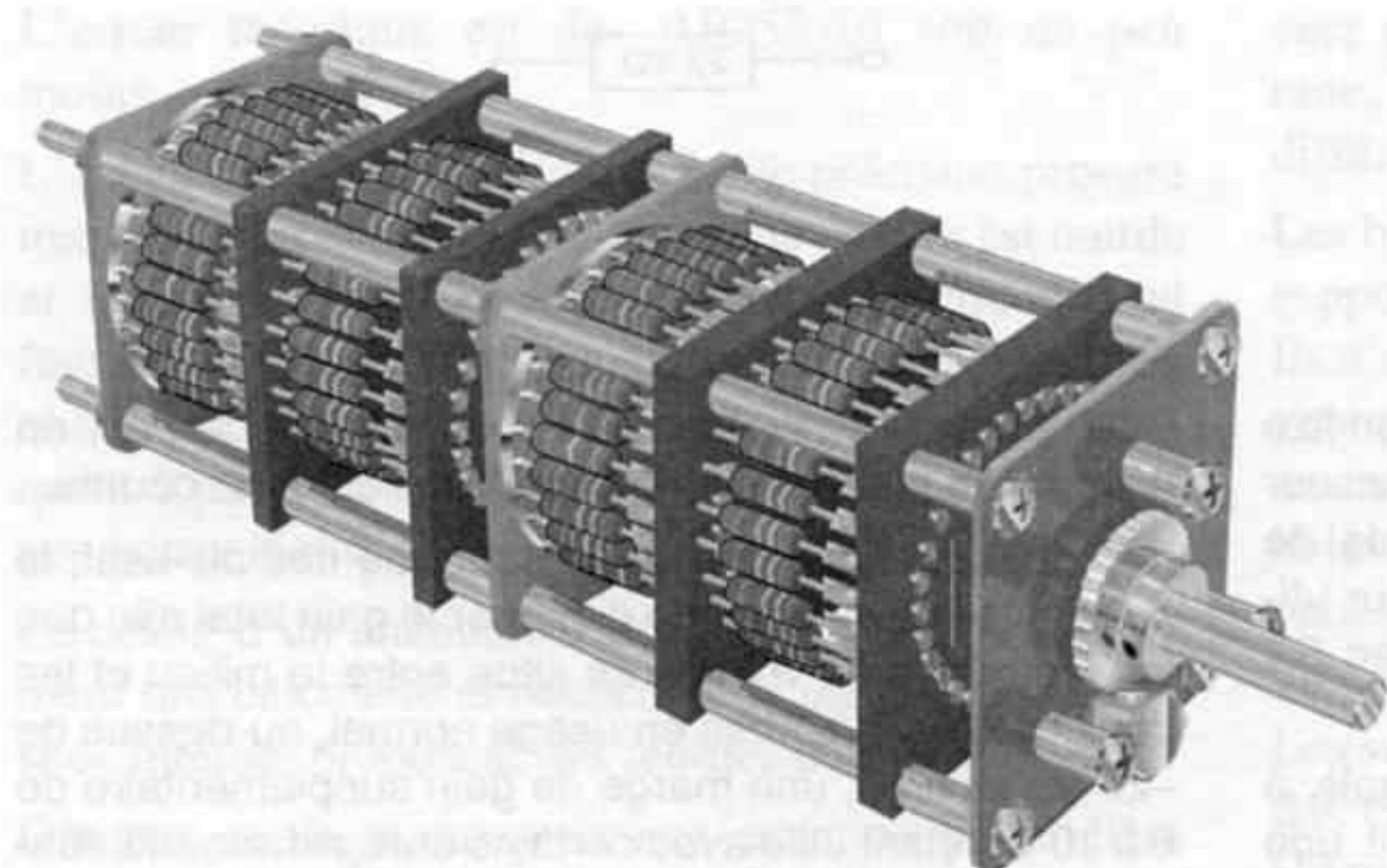


Figure 322 - Un préampli à tubes mérite bien quelques efforts du côté des composants sur le trajet du signal. Un atténuateur à résistances du type à paires commutées, utilisant les excellentes Riken RMG à couche carbone et pattes en cuivre dorées est très encombrant et hors de prix. Le modèle UATS-30 ci-contre de $2 \times 30 \text{ k}\Omega$ et disposant de 25 pas occupe un volume de $45 \times 45 \text{ mm}$ et de 160 mm de long environ. Il pèse 1,5 kg et nécessite 100 résistances triées à moins de 1 %.

d'excellents. L'implantation au plus près des prises d'entrée est impérative, et les liaisons en fils argentés isolés PTFE torsadés sont au plus court et non en faisceau. L'utilisation de relais miniatures pour circuit imprimé est possible à condition d'utiliser des modèles avec contacts dorés à fourche, avec une force de contact élevée garantissant une résistance de contact minimale, inférieure à $25 \text{ m}\Omega$. La plupart des relais "petits signaux" présentent une résistance de l'ordre de $100 \text{ m}\Omega$, variable avec le niveau du signal. Les contacts or/nickel ou or/argent sont les mieux adaptés, alors que ceux contenant cadmium ou étain sont à proscrire. Les relais de la série DS2E-S de NAIS-Matsushita sont de très bons exemples de relais utilisables en commutation d'entrée, avec un relais par prise, un contact pour la masse et l'autre pour le signal. Ils seront implantés sur une carte verticale disposée au fond de l'appareil au plus près des prises.

Le réglage de volume mérite également un peu mieux que le classique potentiomètre à piste plastique, et un modèle professionnel à piste carbone tel les références ALPS, est déjà un peu plus équilibré et transparent à l'écoute. Cependant, l'appairage des pistes et des phénomènes parasites liés aux contacts curseur/piste, aux rivetages des pattes sur la piste, sont responsables d'une sonorité un peu voilée, terne et parfois bouchée, selon les modèles, ceci d'autant plus que la position du curseur est proche du début de course.

Une amélioration nette de la transparence des registres médium et aigu, et de la légèreté du bas-médium est immédiatement constatée lorsque le potentiomètre est remplacé par un atténuateur calibré à résistances. Cet atténuateur est construit autour d'un sélecteur à 24 positions au minimum, contacts court-circuitant, et deux voies. Il en existe deux types, à échelle de résistances et à paires commutées, figures 319 à 322. Les premiers sont constitués d'une série de résistances, le curseur se positionnant alors aux différents points communs, alors que les seconds contiennent autant de

paires de résistances qu'il y a de positions, assurant ainsi que seulement deux résistances se trouvent sur le trajet du signal.

Les diverses commandes de balance, tonalité, filtres de toutes sortes, sont autant de contacts néfastes sur le trajet du signal, et corrigeant seulement dans le domaine fréquentiel. Elles entraînent des dégradations dans les domaines temporel et dynamique, et leur nécessité révèle les carences du système. Un ensemble bien pensé et bien mis en œuvre, homogène et harmonieux, cohérent et transparent n'en a absolument pas besoin. Elles n'apportent aucune contribution au réalisme de la restitution, et leur suppression apporte un gain de transparence souvent appréciable.

Ces atténuateurs doivent disposer d'au moins 24 positions pour apporter une souplesse d'utilisation suffisante. Sur les systèmes présentant un gain total trop élevé, ce qui est le cas lorsque le préamplificateur comporte un étage ligne conventionnel de gain 10 à 20 dB, la commande de volume est souvent située en début de course, dans le premier quart. En plus d'une dégradation du rapport signal/bruit effectif et d'un tassement de la dynamique, l'égalité des niveaux droit et gauche n'est pas assurée avec un potentiomètre classique, dont les pistes ne peuvent être appairées en début de course.

Le remplacement par un atténuateur à résistances apporte une amélioration très nette de la qualité sonore, en particulier de la perception de l'espace. En contrepartie, le réglage de volume devient problématique, le pas entre deux crans étant de 3 à 5 dB en début de course, selon les modèles. Par exemple le modèle DACT CT1, figure 321, présente en début de course les atténuations suivantes :

$-\infty$, -60 , -50 , -46 , -42 , -38 , -34 , puis des pas de 2 dB jusqu'à 0 dB.

Le premier quart de sa rotation n'apporte donc aucune souplesse, aucune précision de réglage.

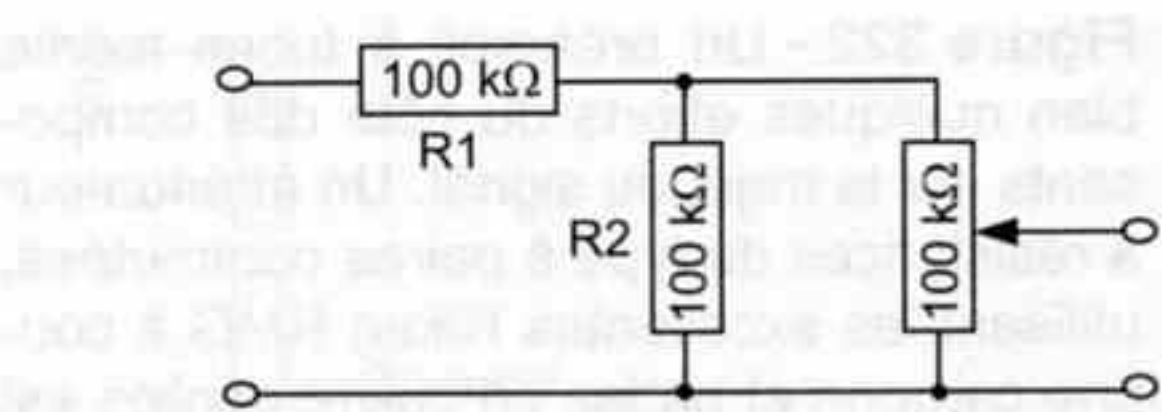
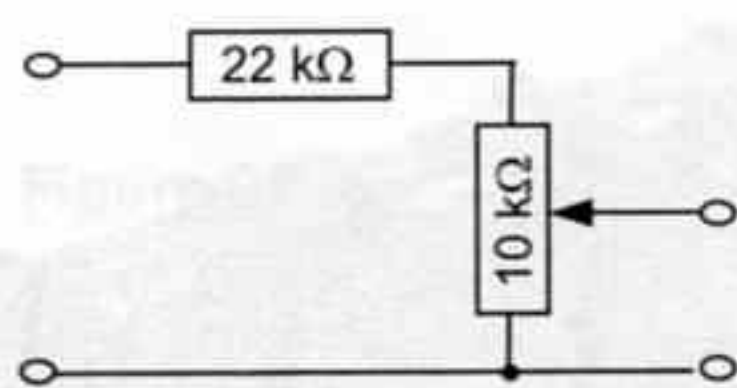


Figure 323 - Ci-dessus à gauche, une atténuation fixe de -10 dB environ est obtenue avec un réseau diviseur de tension $R1/R2$ constitué de deux résistances de même valeur que le potentiomètre ou l'atténuateur utilisé. Une atténuation de -6 dB est réalisée avec $R2$ identique et $R1 = R2 / 2$.

Figure 324 - À droite, une résistance série égale à 2 fois celle du potentiomètre procure également une atténuation de -10 dB, alors qu'une valeur identique à celle du potentiomètre atténue de 6 dB. Cela permet



l'utilisation d'atténuateurs à faible nombre de pas, en décalant la plage d'emploi vers le milieu de la course. Ces deux aménagements ne sont que des pis-aller, la solution correcte étant de diminuer le gain total afin que la commande de volume se situe entre le milieu et les deux tiers de la course en usage normal, au-dessus de -20 dB environ, une marge de gain supplémentaire de 6 à 10 dB étant utile avec certains enregistrements réalisés à très bas niveaux.

14k	825	866	953	1,05k	1,05k	1,15k	1,15k	1,27k	1,33k	1,40k	1,47k
$-\infty$	-11	-10,5	-10	-9,5	-9	-8,5	-8	-7,5	-7	-6,5	-6

1,62k	1,62k	1,78k	1,78k	1,96k	2,15k	2,26k	2,37k	2,49k	2,61k	2,74k	-
-5,5	-5	-4,5	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0

Figure 325.

La solution correcte dans ce cas est de diminuer le gain global, soit en supprimant un étage dans la chaîne d'amplification, soit en réduisant le gain de l'étage ligne du préampli. Cette diminution de gain peut-être aisément effectuée si cet étage utilise une contre-réaction. Le changement du réseau de C-R constitué de deux résistances permet de régler le gain à la valeur souhaitée, à condition que l'étage en question soit stable avec cette valeur de gain (revoir les concepts de la contre-réaction en début de chapitre).

Si cette modification n'est pas possible, il reste à établir une atténuation fixe, de 10 dB environ, soit à l'aide de deux résistances montées en diviseur de tension sur le trajet du signal, figure 323, en acceptant la perte en dynamique que cela induit, soit en installant une résistance en série avec le réglage de volume, figure 324.

L'amateur exigeant peut également recalculer son propre atténuateur en fonction de ses besoins, avec par exemple des pas de 1 dB dans la zone d'utilisation habituelle, généralement entre -10 et -30 dB, et des pas plus espacés de part et d'autre. Il reste alors à trouver des résistances de valeurs adéquates, ce qui n'est possible que dans les séries de composants CMS. Les résistances à couche épaisse étant semble-t-il préférables d'un point de vue subjectif, alors que les composants à couche mince en Nickel-Chrome, de haute précision (0,1 %), ne donnent pas des résultats aussi musicaux. L'achat par lots de 50 est souvent incontour-

nable, ce qui apporte l'avantage d'un tri possible mais fait augmenter le prix de revient, le jeu de 2 fois 25 résistances différentes dépassant alors un coût total de 50 Euros. Le soudage des composants CMS est très délicat et accessible aux seuls amateurs chevronnés.

L'usage de ces atténuateurs à résistances calibrées en sortie de filtre actif (ou passif) pour ajustage des niveaux relatifs des voies n'est pas pratique, car des pas de 2 dB sont beaucoup trop espacés dans ce cas. Même des pas de 1 dB ne conviennent pas, le raccordement entre médium et aigu demandant une précision de 0,5 dB environ. Un atténuateur DACT CT1 recalculé pour fournir un réglage entre 0 et -12 dB est une solution de choix, un décalage par résistance série étant toujours possible. Je donne en figure 325 l'échelle des résistances procurant un tel réglage pour une valeur totale de 50 kΩ, la précision obtenue étant meilleure que $+0,025/-0,06$ dB.

La somme de toutes les résistances en série est $R_t = 49,894$ kΩ. L'atténuation procurée au $n^{\text{ième}}$ pas est calculée par :

$$N(\text{dB}) = 20 \log[(R_1 + R_2 + \dots + R_n) / R_t]$$

À la 5^e position par exemple :

$$\begin{aligned} N &= 20 \log[(14 \text{ k} + 825 + 866 + 953) / 49\,894] \\ &= 20 \log 0,333587 = -9,5358 \text{ dB} \end{aligned}$$

L'erreur théorique est de $-0,0358$ dB soit un peu moins de 0,38 %.

L'usage de résistances de très haute précision procure une précision encore meilleure, mais ce luxe est inutile et néfaste : inutile car l'impédance du circuit aval fausse les valeurs d'atténuation réellement obtenues, et néfaste car les résistances de haute précision fabriquées à partir de couche mince procurent une sonorité peu harmonieuse.

Le calcul d'un atténuateur de ce type demande seulement une calculatrice et beaucoup de patience. Certains sites Internet proposent des feuilles de calcul Excel.

D'autres contacts auxquels une attention particulière doit être portée sont les supports de tubes, pour lesquels l'échauffement produit à la longue des fuites diélectriques, principalement entre les broches d'anode portées à des tensions élevées et les broches adjacentes. Les supports plastique PPS armé ou bakélite finissent par charbonner et bien avant cela leur isolation s'est dégradée, entraînant un courant de fuite néfaste si la connexion de grille en est victime.

Les supports en céramique vitrifiée ou en stéatite H.F apportent un isolement très élevé avec de très faibles fuites, et surtout une fiabilité élevée. Les contacts en nickel dorés ou argentés sont préférables. Le seul inconvénient est la force d'insertion importante qui demande une manipulation précise et délicate des lampes, aussi bien à l'insertion qu'au démontage. (Les tubes octal avec embase bakélite ou métal doivent impérativement être manipulés par l'embase et jamais par le bulbe. Les tubes noval miniatures sans embase entrent et sortent plus facilement de leurs supports en les penchant alternativement de chaque côté, légèrement, afin de ne pas tordre les broches).

Une fixation anti-vibratoire du support, avec suspension sur doubles rondelles caoutchouc est indispensable. Le schéma en a été donné figure 96. Si le tube est monté sur un circuit imprimé, ce qui n'est pas la meilleure des solutions, il n'est pas possible de monter souple son support. C'est l'ensemble de la carte qui doit alors être suspendue, par exemple à l'aide de petits joints en néoprène très souple, qui seront intercalés et collés entre la carte et ses supports. Une goutte de colle cyano-acrylate suffit.

Les tubes d'entrée à grand gain, très sensibles aux effets microphoniques, demandent une protection supplémentaire autour du bulbe. Si un simple morceau de gaine thermo-rétractable suffit parfois, une protection par "chemise" massive en laiton ou "accordéon" métallique entourant le tube avec une pression de contact élevée, est quelquefois nécessaire. Des détails concernant ces protections ont été donnés au chapitre 7. Si toutefois aucun moyen ne s'avère effi-

cace pour éliminer les réactions microphoniques d'un tube, il ne reste qu'à changer le tube pour une version différente, en qualité professionnelle ou militaire.

Les blindages par tubes métalliques verrouillés sur les supports constituent surtout une protection mécanique. Ils n'améliorent que l'immunité haute-fréquence, souvent par le fait qu'ils augmentent les capacités parasites, mais ne protègent absolument pas des ronflements induits à 50 Hz par le chauffage en alternatif, ni des parasites rayonnés par les alimentations. Un montage bien conçu s'en passe avec bonheur...

Les supports PTFE apparus récemment sont un luxe en BF, et imposent un circuit imprimé lui aussi en PTFE. Un montage en l'air sans circuit imprimé, avec câblage Argent isolé PTFE et supports stéatite apporte les mêmes avantages, avec de plus la possibilité de torsader les paires aller/retour, ce qu'aucun circuit imprimé ne permet !

Ces quelques règles permettent d'éviter une déception, mais c'est l'expérience qui assure la réussite d'un projet de préampli ou d'ampli, qu'il soit à lampes ou à transistor. Le débutant aura donc tout intérêt à démarrer par le montage d'un kit fourni par un revendeur spécialisé. L'appareil ainsi réalisé fonctionne presque à coup sûr sauf erreur de montage, et il est possible de le faire évoluer petit à petit, surtout au niveau des alimentations puis des composants passifs. Ces améliorations successives construisent une expérience irremplaçable, souvent suffisante pour que la conception complète d'un appareil simple soit à la portée de l'amateur. Ce n'est qu'après plusieurs montages simples réussis que la construction d'un ampli monotriode personnalisé peut être entreprise. La conception d'un préampli à tubes ou d'un filtre actif n'est envisageable qu'après quelques années d'expérience.

POUR FAIRE BONNE MESURE

Chauffage à tous les étages

Un multimètre numérique de qualité professionnelle, du type "efficace vrai" ou "true RMS" pour les anglicistes, est indispensable à la vérification des points de fonctionnement des différents étages. L'appareil nouvellement construit, modifié ou remis en état, est tout d'abord mis en service sans que la haute tension soit enclenchée. Si l'appareil ne dispose pas d'un interrupteur pour couper la haute tension, le circuit est ouvert en dessoudant le fil de sortie de cette alimentation haute tension. Ainsi seules les tensions de chauffage des filaments sont présentes, de même que les éventuelles tensions de polarisation négatives. Les tensions de chauffage sont vérifiées directement sur les supports de lampes, après quoi les lampes peuvent être mises en place, hors tension évidemment.



ATTENTION : Les hautes tensions continues présentes dans les appareils à lampes sont extrêmement **dangereuses**, et parfois **mortelles**. Le câblage pour ce type de contrôle doit être soudé et non réalisé avec pinces crocodiles ou grip-fils. Le multimètre est relié par des cordons de sécurité, isolés au **silicone** prévus pour supporter **1 kV** (au minimum) munis de grip-fils à verrouillage. Ce multimètre ne doit pas être manipulé pendant les mesures, et si un cordon de mesure doit être déplacé, la manipulation est faite **d'une seule main**, l'autre main restant dans le dos, afin d'éviter un passage du courant à travers le corps. Ainsi en cas de contact fortuit, seuls la main et le poignet subiront une décharge, violente mais sans conséquence. Une zone de travail dégagée et un travail sans aucune précipitation sont de rigueur. Les condensateurs haute tension restant chargés pendant de longues minutes après la coupure de l'alimentation secteur, la décharge à l'aide d'une résistance en parallèle est impérative (22 k Ω /10 W), suivie d'un contrôle de la tension résiduelle, avant toute manipulation ou intervention sur les circuits.

La tension de chauffage des tubes, souvent de 6,3 V ou 12,6 V doit en effet être respectée à ± 1 % près si l'on souhaite que la durée de vie des tubes soit prolongée. Des écarts de ± 5 % sur cette tension de chauffage, s'il sont tolérables d'après les fiches de caractéristiques et sans conséquences sur le fonctionnement du tube, écourtent sérieusement sa longévité, soit par usure du filament en cas de tension supérieure (6,6 V au lieu de 6,3 V), soit par pollution de sa cathode en cas de sous-chauffage. Un réglage précis est nécessaire dès la première mise sous tension, avec les tubes en place, puis une retouche à chaud après stabilisation de toutes les alimentations.

Baisse de tension ?

Si les chauffages filament sont corrects, les alimentations haute tension peuvent également être contrôlées avant leur raccordement au circuit, afin d'éviter toute mauvaise surprise. Il est donc nécessaire de brancher à la sortie de l'alimentation à vérifier une résistance de forte puissance, supportant la tension de sortie, et calculée de manière à ce que l'alimentation fournisse un courant continu à peu près identique à celui consommé par le circuit de l'ampli. Par exemple, l'alimentation 580 V/35 mA de l'ampli monotriode (étages d'entrées à tube 6SN7) des figures 279 à 281, sera chargée par une résistance de :

$$R_{ch} = U / I = 580 / 35 \cdot 10^{-3} = 16\,571 \, \Omega$$

Une résistance RCH25 bobinée pour châssis de 15 k Ω /25 W fera tout à fait l'affaire, elle dissipera environ 18 W et sera donc montée sur un radiateur, simple plaque d'aluminium de 10 cm de côté.

On peut lors de cet essai contrôler la tension alternative au secondaire du transformateur, la tension redressée en sortie de la valve ou des diodes redresseuses, et la tension continue en sortie de la self de filtrage. Il n'est pas rare de trouver des valeurs éloignées de 10 % de celles prévues par le calcul. Les raisons possibles

sont nombreuses, depuis le réseau du secteur dont la tension varie autour des 230 V habituels (de 218 V à 242 V typiquement), en passant par la résistance de plaque de la valve, variable avec la température, le vieillissement et la qualité de fabrication, jusqu'à la résistance en continu de la self. Un bobinage primaire prévu avec différentes prises, pour 220, 230, 240, et 250 V, permet par un branchement adéquat de retrouver des tensions continues correctes, si ces dernières sont trop différentes de celles prévues par le calcul. Par exemple le branchement du secteur 230 V sur la prise 220 V amène une augmentation de 4,5 % environ de la tension continue en sortie de l'alimentation, avec une très légère baisse du rendement du transformateur, sans conséquences. Un écart de moins de 5 % par rapport aux prévisions est généralement sans effet sur le fonctionnement de l'appareil, à moins que ce dernier n'exploite les lampes aux limites de leurs possibilités, ce qui n'est absolument pas conseillé vu leur prix de vente...

Points de fonctionnement

Les chauffages filaments étant corrects et les hautes tensions également, le raccordement des alimentations au circuit est alors effectué, hors tension bien évidemment. L'appareil est alors remis sous tension, et les points de fonctionnement des différents tubes peuvent être contrôlés. On commence par le relevé des hautes tensions en différents points du circuit, à chacun des étages. On procède ensuite étage par étage, avec un relevé de la tension continue sur l'anode, qui indique si le tube débite le courant prévu, puis de la tension entre cathode et grille, qui indique si la polarisation négative $-V_{gk}$ est respectée. Dans le cas d'une pentode, la tension sur la grille écran est également mesurée, et le courant d'écran calculé à partir d'un relevé de la tension aux bornes de la résistance d'écran. Un courant d'écran trop élevé indique un mauvais alignement

des grilles lors de l'assemblage du tube, qui doit être changé pour une référence plus sérieuse ou mieux appairée.

Après ¼ h, puis ½ h et enfin 1 h de fonctionnement, ces points sont revérifiés et les réglages retouchés s'il y a lieu. Les tubes neufs dérivent et ne trouvent leur point de fonctionnement définitif qu'après 2 à 10 h de chauffage. Dans le cas où les hautes tensions d'alimentation des différents étages ne sont pas respectées, il peut être nécessaire de changer une ou plusieurs résistances des cellules R-C successives dans le circuit d'alimentation. Une certaine souplesse dans ces mises au point est obtenue si la tension redressée a été prévue assez haute, avec une dizaine de volts de réserve.

L'utilisation d'un voltmètre efficace vrai, doté d'une bonne résolution sur le calibre tension alternative, meilleure que 1 mV si possible, permet de mesurer l'amplitude des ondulations sur les tensions redressées et filtrées. On peut ainsi vérifier que le niveau des perturbations sur les lignes d'alimentation est suffisamment faible. Si ce n'est pas le cas, les capacités de filtrage peuvent être augmentées dans les limites de la place disponible. La capacité de tête de filtre, dite de lissage, ne devrait pas être augmentée sous peine de fatiguer la valve ou de saturer transitoirement le transformateur.

Mesure des bruits de fond

Une estimation des bruits de fond est également possible si le multimètre dispose d'un calibre millivolt en tension alternative, ou d'une sensibilité et d'une résolution suffisante, inférieure à 0,1 mV. La bande passante de l'appareil doit être assez large, faute de quoi seules les composantes basses fréquences seront prises en compte. Un appareil couvrant 50 Hz–20 kHz est idéal. Une mesure du bruit résiduel en sortie, avec l'entrée court-circuitée, donne souvent des valeurs inférieures à 0,5 mV. Il est nécessaire de retrancher le bruit de la mesure, induit sur les cordons et le multimètre lui-même, ce qui demande d'effectuer une lecture en court-circuitant les deux cordons. Le bruit réel apporté par l'ampli est la différence entre la tension efficace mesurée en sortie d'ampli sans signal, et la tension de bruit en court-circuit de l'appareil de mesure.

Par exemple, avec un multimètre Fluke FLK 87 disposant d'un mode 4 ½ digits et d'un calibre Vac 400 mV, la résolution minimale est de 0,01 mV. Les deux pointes de mesure étant en contact franc, l'afficheur indique après stabilisation 2,68 mV. C'est la tension efficace vraie du bruit induit sur le système de mesure.

En déplaçant le moins possible les cordons de mesure, afin de les brancher sur les sorties (bornes H-P) de l'ampli en essai, on procède à une mesure de la tension

de bruit en sortie. Par exemple $V_n = 2,76$ mV. La bande passante de ce multimètre est 50 Hz – 20 kHz, la mesure prend donc en compte tout le spectre audible.

On peut alors estimer le rapport signal/bruit de l'ampli en essai, si l'on connaît sa puissance de sortie ou à défaut la tension efficace maximale de sortie.

Dans l'exemple précédent, l'ampli testé peut fournir 60 W sur charge de 8 Ω, soit une tension de sortie efficace maximale de :

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{60 \cdot 8} = \sqrt{480} = 21,9 \text{ V}$$

La tension de bruit en sortie de cet ampli est : $U_n = 2,76 - 2,68 \text{ mV} = 0,08 \text{ mV}$.

Et son rapport signal/bruit (Signal to Noise Ratio) :

$$\text{SNR} = 20 \log(U_n / U_{\text{eff}}) = 20 \log(0,08 \cdot 10^{-3} / 21,9) = -108,75 \text{ dB}$$

Toute valeur dépassant la barre des -100 dB révèle une perturbation qui risque de polluer le signal audio. Le chapitre 7 donne des moyens de rechercher les causes de cette perturbation, qui se situe souvent dans les boucles de masse et les circuits de masse. Les valeurs meilleures que -110 dB montrent au contraire une excellente étude des circuits et de l'implantation des composants. La mesure devient très difficile aux niveaux de bruit inférieurs.

Le chauffage en alternatif des tubes, en particulier des triodes à chauffage direct, fait remonter le plancher de bruit autour des -85 dB, parfois plus. Une mesure du bruit de fond en sortie juste après avoir coupé l'alimentation secteur donne une idée précise du bruit de fond intrinsèque du circuit, sans le ronflement induit. Un gain de 20 dB n'est pas rare, et peut être obtenu avec un chauffage en continu **stabilisé** avec un "régulateur" tel que celui montré figure 239.

Une autre mesure de bruit de fond avec l'entrée fermée sur 10 kΩ montre si des boucles de masse existent à l'intérieur de l'appareil, et si les circuits d'alimentation induisent des ronflements dans le circuit amplificateur. Si les règles de câblage sont respectées, avec masses ponctuelles (voir figures 240 à 242) et paires torsadées, le bruit de fond ne doit pas remonter de plus de 10 dB dans ces conditions. Une alimentation en châssis séparé, un châssis en matériau amagnétique, aluminium ou Inox, ainsi qu'une visserie Inox, des selfs blindées, des tubes triés, des transfos d'isolement en entrée, sont autant de moyens pour glaner les derniers décibels de bruit de fond.

Réponse aux signaux carrés

Les mesures suivantes demandent un matériel plus sophistiqué, générateur basse fréquence ou à défaut disque de fréquences pures, et oscilloscope à deux voies. Le signal est prélevé par une sonde atténuatrice

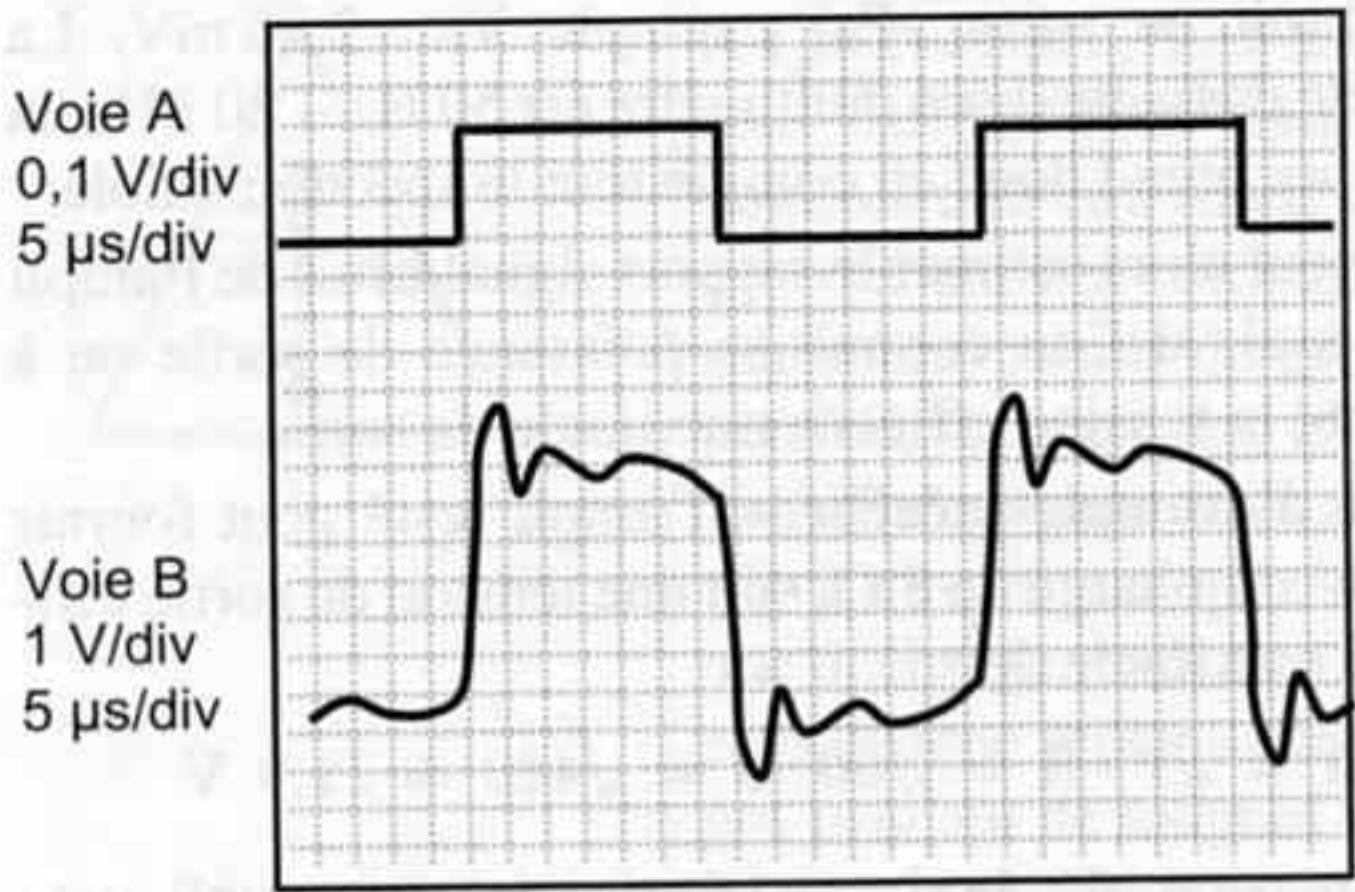
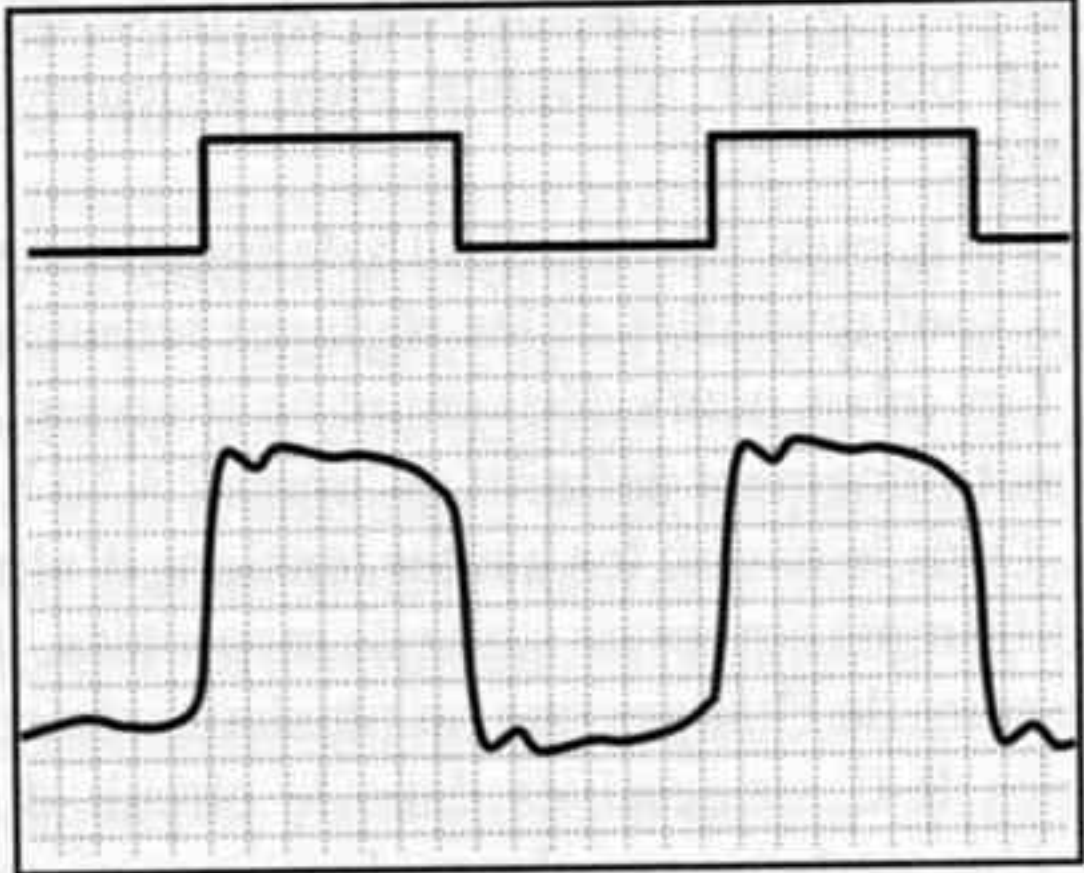


Figure 326 - Figure 327.

Les schémas ci-dessus montrent des relevés d'oscillogrammes réalisés en sortie d'un amplificateur mono-triode de 5 W équipé d'un tube KT66 et d'un transformateur de sortie de primaire 2,5 k Ω , chargé par une voie médium à pavillon. Le secondaire du transfo dispose de prises à 4, 8 et 16 Ω . Lorsque la sortie 8 Ω est utilisée, une partie du secondaire est en l'air, et la réponse aux signaux carrés, à gauche, présente des irrégularités : pics de dépassement sur les fronts, ondulations sur les plateaux. Lorsque la portion non-utilisée du secondaire est chargée par un réseau R-C, déterminé par essais successifs, ici avec R = 27 Ω et C = 1,5 μ F, la réponse obtenue est nettement plus satisfaisante. Il est possible de la lisser encore plus, mais la

1/10, car son amplitude atteint facilement plus de 100 V en sortie de l'ampli de tension, et plus de 500 V au primaire du transformateur de sortie. Le gain de chaque étage est aisément contrôlé en visualisant sur une voie le signal en entrée, et sur l'autre le signal en sortie. La bande passante des étages amplificateurs de tension et déphaseurs ne pose pratiquement jamais de problème. C'est au niveau de l'étage de sortie, et en particulier du transformateur de sortie, que les coupures de bande se font sentir, tant en basse fréquence si l'inductance primaire est trop faible, qu'en haute fréquence, où la qualité de réalisation intervient. Plutôt qu'une mesure de courbe de réponse, une analyse de la



vivacité du trait musical est alors amoindrie, ce que l'on peut attribuer à un temps de montée plus lent. La qualité du condensateur utilisé est primordiale, les meilleurs résultats ont été obtenus avec un modèle Audyn-Cap au polypropylène et feuilles d'étain, type KP/SN, après plusieurs essais. Si les fronts ne sont pas rectilignes, mais en escalier ou bien avec un point d'inflexion, cela révèle une mauvaise conception du circuit magnétique, ou un très mauvais couplage primaire/secondaire. La seule amélioration consiste à changer le transformateur de sortie pour un modèle plus sérieusement construit.

Voie A : signal d'entrée 15 kHz/0,3 V crête, voie B : signal de sortie 8 V crête soit 1 Watt sur 8 Ω .

réponse aux signaux carrés à 100 Hz, 1 kHz, puis 10 kHz, sur charge réelle, est plus intéressante car elle révèle les oscillations et l'amortissement de l'ensemble tube/enroulement primaire chargé par l'impédance réactive du haut-parleur, figure 326 et 327.

L'adaptation optimale peut être réalisée soit en ajoutant une petite capacité en parallèle sur le primaire (1 nF/ 1 kV), soit en ajoutant un réseau R-C au secondaire, chargeant l'ensemble des enroulements, y compris les portions non-utilisées. (Un enroulement "en l'air" produit une suroscillation marquée sur les fronts montants).

10. INSTANTS MAGIQUES

« La vraie fonction de l'art est la critique sociale. »

Karl Marx

Inutile d'espérer trouver une part de réalisme sonore dans notre univers mathématisé, informatisé, industrialisé. Il ne s'y plait pas. Le réalisme sonore tient du naturel, notre univers tient plutôt du synthétique, appelé parfois virtuel pour faire oublier qu'il est avant tout artificiel.

C'est en cela que l'activité de l'audiophile constitue une critique de notre société de consommation. La quête du naturel sonore demande des moyens matériels, mais aussi du temps et de la patience, tous deux si peu disponibles aujourd'hui. Elle demande des choix difficiles, à établir autant qu'à assumer. Elle amène à remettre en question des pratiques industrielles se pliant à un marché qui ne doit rien à l'art. Au premier rang de ces remises en cause figure le disque.

Cette recherche constitue une forme d'activité artistique, car seules la qualité et la vérité des sensations perçues importent, et la créativité de chacun s'y exprime à travers tous les "réalismes possibles" de la reproduction sonore, jusqu'à retrouver une partie de l'expression artistique.

C'est en contournant des limites, en franchissant des frontières, en passant dans une sorte d'univers décalé, marginal au point de paraître à certains ésotérique, que la quête du réalisme sonore devient possible.

Le désir de chercher une sonorité nouvelle, l'envie de faire une découverte et de réussir quelque chose, et la peur de ne pas trouver ce qu'il faudrait trouver, la crainte de passer à côté, de se tromper et de douter, ne sont d'aucune utilité, d'aucune aide dans cette recherche.

Seules la curiosité et l'acceptation sont requises. Curiosité d'aller voir ce qu'il y a au-delà du cadre institué, jusqu'à un horizon attirant, puis encore au-delà, vers ce qu'on ne soupçonne même pas.

Acceptation de ce qui est trouvé en chemin, des obstacles comme des trouvailles, des effets comme des causes.

Curiosité qui pousse à creuser plus profondément, à chercher des éléments d'explication, à ne pas se contenter d'un outil conceptuel inadapté, et acceptation de ses propres limites à la compréhension et à la connaissance.

Le domaine de cette quête est si vaste que les quelques points de repères établis laissent encore beaucoup de place à l'expression de la créativité de chacun, selon son inspiration, assurant une incroyable diversité de systèmes. Cependant les points communs qui s'en dégagent montrent bien les passages obligés, les voies incontournables, qu'un rapide coup d'œil en arrière, sur le chemin parcouru depuis le début de cet ouvrage, remet en perspective.

Nous sommes maintenant assez loin des repères habituels. En osant franchir une première barrière imposée par le local, un pas décisif a été fait hors des frontières établies, faisant entrer dans une catégorie à part. Ce premier pas est sans doute le plus difficile, tant il est peu naturel de se démarquer aussi nettement, d'aller à contre-courant des systèmes, des tendances, établis par une industrie qu'on croit fondée sur les sciences et techniques, et qu'on suppose très performante, et engagée dans la seule direction possible.

Beaucoup seront tentés de progresser sans faire ce premier pas, trouvant tous les arguments nécessaires pour justifier et valider une démarche de laquelle ce point de départ est absent.

Fuite illusoire. Refus de voir le problème tel qu'il se présente physiquement : L'espace de la salle d'écoute doit se taire, doit rétablir le silence, matériau de base de la construction du son. Après quoi seulement l'espace de l'événement musical peut occuper la place, lui seul, et non s'y superposer dans un brouhaha confus.

C'est quand la salle de séjour devient un "salon de musique", agencé par et pour le respect des ondes sonores, vecteurs de l'expression musicale, que l'intention prend forme. Il reste à admettre cette vérité simple, que sans cet engagement, le reste des pratiques audiophiles n'est que bricolage... Aveu difficile !

La mise en œuvre optimale d'un système simple, de budget limité, dans une salle bien aménagée et avec des supports convenables, des accessoires adaptés – câbles et filtres secteur – donne plus de satisfaction que l'empilement incohérent de maillons luxueux, que l'étalage ruineux des dernières technologies.

Une fois sorti de cette ornière, la progression est plus facile. Les découvertes sont nombreuses mais l'errance est un risque en l'absence de repère.

En passant l'obstacle du haut-parleur, on arrive sur un terrain plus dégagé où les chemins possibles sont un peu mieux visibles. Là encore, un effort est nécessaire pour admettre que les arguments commerciaux, défendant des enceintes miniatures, des haut-parleurs de petit diamètre à longue (!) course, des caissons de grave de 10 litres, sous prétexte d'optimisation par de puissants moyens informatiques, ne doivent pas être acceptés. Le progrès ne permettra jamais de contourner les principes physiques, de passer outre.

Les exemples de caissons grave et de pavillons donnés au chapitre 8 montrent quelques possibilités parmi tant d'autres. Ils sont de simples échantillons, illustrant la mise en application des principes physiques avec l'objectif de l'expressivité artistique, et non celui des performances techniques.

Il serait dommage de se contenter de les reproduire. Seule la démarche mérite peut-être qu'on la copie.

Quelques-uns de ces chemins sont des impasses et d'autres mènent aux pieds des sommets, en passant par les lampes.

De la même manière, les schémas présentés et la réalisation donnée en exemple au chapitre 9 devraient donner des idées et non en imposer une. Il ne faudrait pas conclure de cette étude des amplificateurs que seul le monotriode est digne de l'audiophile. Il ne constitue qu'une possibilité d'association harmonieuse avec les voies médium à pavillon, et il serait malvenu de le mettre à toutes les sauces, ou de le construire sans s'imprégner auparavant de la philosophie de conception monotriode.

Construire des amplificateurs à lampes triodes avec étages d'entrée à circuits intégrés, ou encore avec un enroulement de compensation sur le primaire du transformateur de sortie, tout ceci afin de diminuer ses distorsions ou d'étendre sa bande passante en supprimant l'entrefer, pour l'utiliser avec des enceintes de taille moyenne, révèle une totale incompréhension du rôle de la triode et des avantages qu'elle procure.

Un monotriode ne fonctionne pas systématiquement mieux qu'un push-pull, les lampes ne sont pas systématiquement plus musicales que les transistors. L'harmonie et l'équilibre obtenus tiennent plus de la pureté de la démarche, de la clarté de l'objectif du concep-

teur, que d'une quelconque technologie. La cohérence du système considéré dans son ensemble ne devrait pas être perdue de vue, et c'est le rendement et le type de haut-parleurs utilisés qui orientera le choix de l'amplificateur, et non un simple désir ou une mode passagère.

La qualité des alimentations et de leur distribution sur les divers étages, ainsi que la réalisation pratique des lignes d'alimentation et de masse, sont bien plus importantes que le sempiternel débat tubes/transistors.

UN PEU DE MUSIQUE, BIEN ENTENDU !

On peut s'arrêter là, à la fin de ce tome 1, et contempler un paysage sonore riche, varié et étendu.

Quel que soit la distance parcourue vers le réalisme sonore, simple promenade de quelques pas ou excursion jusqu'au bout d'un chemin, l'écoute de musique reste l'objectif premier. Le temps consacré à l'audition attentive, concentrée, et à l'accueil des sensations et des émotions qu'elle procure est la seule et unique justification de cette quête sans fin. Car il n'y a pas de ligne d'arrivée... La seule chose à gagner sont ces quelques instants magiques glanés au long du parcours.

La curiosité, qui fera choisir un disque hors des genres musicaux préférés, simplement pour ses qualités techniques et artistiques, amène parfois des surprises inespérées, des découvertes décisives. La discothèque de l'amateur constitue le seul moteur de sa créativité.

Quelques-uns ont envie de remonter jusqu'à la source ? Avec un matériel de mesure et des connaissances techniques de haute volée, la tentative est possible.

Qu'y trouvera-t-on de plus ?

Plus de grands changements, seulement quelques améliorations dans les directions déjà explorées, et surtout le plaisir des solitudes inaccessibles, et celui d'un paysage fait d'obstacles surmontés. Être au-dessus de ce qui est déjà au-dessus... Difficile d'être accompagné, ou simplement de raconter l'aventure.

Le lecteur qui après lecture du tome 2 entreprend la construction d'une platine 33 tours, d'un préampli phono à lampes ou d'un convertisseur numérique/analogique le fait par lui-même et pour lui-même.

La réponse temporelle de l'ensemble de son système sera encore plus précise, sa dynamique encore plus vive, et la reproduction de l'événement musical encore plus expressive, plus vivante, plus présente. Mais il sera sans doute le seul à s'en rendre compte et à en tirer une satisfaction. Le partage avec un autre passionné, impliqué dans son propre système et habitué à son écoute, n'est possible qu'exceptionnellement.

J'avais cinq ans lorsque mon père prit sur le buffet de la cuisine, la déjà vieille radio à lampes qui s'était mise à crépiter furieusement, et la posa sur la table. Il la tourna pour en démonter le dos, fait d'isorel dur perforé et couvert de signes étranges, et me montra les entrailles métalliques encore chaudes de l'appareil.

Pendant plusieurs soirs je fus privé du plaisir habituel et simple de m'endormir dans la pièce voisine avec le son atténué de la radio, qui jouait dans la cuisine des airs de Brel ou des Beatles, pendant que mes parents discutaient.

Mon père revint un soir de l'usine, une semaine plus tard, et sortit de sa poche de veste un petit carton jaune d'où il extrait une petite lampe, qui fut bientôt installée dans l'appareil. Je la vis rougeoyer, puis une légère lueur bleutée apparut près du dessus tandis qu'un faible ronflement se faisait entendre.

La musique sortit alors, d'abord timidement puis plus fort, d'une étrange soucoupe ovale, en carton, et qui vibrat au rythme des sons... Instant décisif.

De temps à autre, il m'arrive de remettre en marche, près de quarante ans plus tard, cette radio qui ne reçoit plus beaucoup de stations, juste pour écouter un peu de... musique ! En laissant faire le hasard...

Sa technologie semble obsolète : monophonie, colorations et fortes distorsions, haut parleur large bande elliptique à haut rendement et aimant Ticonal, et étage de sortie à lampe unique.

Son expressivité musicale ne laisse aucun doute.

DES CD À NE PAS CÉDER !

Les disques qui vous serviront de références ou de points de repères, ce sont d'abord ceux que vous aimez. Peu importe la raison... Je n'ajouterai pas : peu importe la qualité technique, car bien que l'expressivité des artistes puisse être conservée malgré des limitations évidentes dans la prise de son, certains défauts empêchent la perception de l'espace, de la matière, du mouvement (compression, effets artificiels).

Disons alors : peu important la bande passante et l'équilibre tonal. Et ajoutons que ce qui importe, c'est la dynamique, la transparence, la présence et la profondeur, bref... tout ce qui touche à la présentation de la scène stéréophonique. Ce ne sont pas les sons, mais l'événement.

Mes préférés selon ces critères seraient:

- Eugen M. DOMBOIS "The baroque lute" SBK 60372 Sony classical (naturel et aération),
- Radu LUPU, SCHUBERT "Moments musicaux" DECCA Ovation 417 785-2,

- HORREAUX-TREHARD, Enrique GRANADOS "Duo de guitares" Calliope cal-9204 (matière sonore),
- Michel PETRUCCIANI "Au théâtre des Champs-Élysées" FDM 36570-2, avec une version de Caravan...
- John McLAUGHLIN "Live at the Royal festival Hall" JMT 834 436-2 (espace et ambiance, dynamique),
- Daniel HUMAIR "quatre fois trois" LBLC 6619/20, avec un CD-extra (à lire sur PC) visite du studio,
- PORTAL-KENT-CINELU "Burundi" JICD-1 PAO Records (contact direct avec matière sonore primitive),
- Gonzalo RUBALCABA "Images" Somethin'else TOCJ-5540 (version live instrumentale de "Imagine"),
- Trio MACHADO "Kah ! Pob ! Wah !" Blue Line VB 050 CD (page 4 : contrebasse solo...),
- RabiH-Abou KHALIL "Odd times" ENJA Enj-93302 (page 3 "Elephant hips" : espace, aération, présence...).

Pour effectuer des réglages, des tests, des démonstrations :

- Chesky Records JD37 "Sample and Audiophile test CD, vol.1" : page 10, position droite/gauche sur 7 points,
- Chesky Records JD68 "Sample and Audiophile test CD, vol.2" : page 14-15, batterie à 2 m, studio mat. page 43, dynamic drum test (55 à 115 dB).

Ces deux derniers tests extrêmement sévères montrent sans équivoque que les prises de son habituelles présentent une dynamique (très) réduite, fort heureusement pour les haut-parleurs !

Toutes les enceintes du commerce, sans aucune considération de prix, atteignent ici leur limite. Seuls de rares modèles moniteur de studio, ou des systèmes audiophiles à pavillons, permettent d'écouter ces plages au volume sonore réel, sans saturation ni dureté, ni lourdeur. Attention... la punition est au bout, ne jouez pas trop avec !

Au-delà de la dynamique immense, c'est le réalisme de la matière sonore, sur les cymbales en particulier, ainsi que le positionnement précis des différents éléments du set de batterie, qui doit être considéré comme gage de qualité.

Cette liste est loin d'être exhaustive, et faire un choix et un tri parmi les dizaines de disques que je pourrais conseiller n'est pas une mince affaire. Après m'être longuement questionné à propos des critères de sélection,

tion, la vraie question a fini par émerger : Lequel sortirait vainqueur si je devais n'en conserver qu'un seul ?

Maurice OHANA :
“Llanto por Ignacio Sanchez Mejias”
Direction Roland Hayrabedian
Ensemble Musicatreize
Calliope cal-9877

La prise de son effectuée dans la salle de l’Arsenal de Metz (architecte Ricardo Bofill) date de 1991. Cette salle entièrement couverte de boiseries procure une sonorité inimitable, à la fois claire et chaude.

L’œuvre, poème de Federico Garcia Lorca mis en musique, rassemble tous les parfums de l’Espagne. Christine Prost, dans le livret, la qualifie : à la fois opulente et austère, mystique et sensuelle, violente et noble.

La prise de son est exceptionnelle, entre la présence palpable et très proche des voix masculines, récitant et baryton, de chaque côté de la scène, le clavecin centré un peu en retrait, et le petit ensemble au second plan, l’espace reste d’une transparence totale, et la réverbération naturelle. La dynamique déchirante rend parfaitement perceptible la force “...incantatoire et tragique” qui se dégage de l’oeuvre.

Je n’étends pas plus loin ce chapitre, car s’il était possible de rendre avec des mots tout ce que la musique exprime, il ne serait plus nécessaire de la jouer.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

PSYCHOACOUSTIQUE ET PHYSIOLOGIE DE L'AUDITION :

- 1) C. Bailblé : "De l'oreille en plus", l'Audiophile n°6 et n°7 NS, novembre 1989,
"Le pouvoir des sons", l'Audiophile n°8 NS, janvier 1990,
- 2) S. McAdams : "Les formes du plaisir musical", Science et Vie HS "Les cinq sens", mars 1987,
- 3) P. McLeod : "La suppléance sensorielle", Science et Vie HS "Les cinq sens", mars 1987,
- 4) P. Loyez : "Écoute HI-FI, quel niveau, quels réglages ?", l'Audiophile n°15 Nouvelle Série avril 1991 et n°17 NS, octobre 1991,
- 5) C. Bailblé : "La musique sur un triangle", l'Audiophile : n°16 NS, juin 1991,
n°18 NS, décembre 1991,
n°19 NS, février 1992,
n°21 NS, juin 1992,
n°23 NS, février 1993,
- 6) M. Merleau-Ponty : "Phénoménologie de la perception", Gallimard, 1945.

ACOUSTIQUE GÉNÉRALE ET ARCHITECTURALE :

- 7) M. Val : "Aide-mémoire. Acoustique appliquée", l'Usine Nouvelle, Dunod, 2002,
- 8) L. Beranek : "Acoustics", McGraw-Hill 1954, Acoustical Society of America, 1986,
- 9) N. Tsingos : "Simulations des champs sonores de haute qualité pour des applications graphiques interactives", thèse de doctorat, université J. Fourier - Grenoble, décembre 1998,
- 10) J.-Y. Palheire : "Confort acoustique", cours de sciences et techniques industrielles et technologie de construction bâtiment, 2002
<http://www.ac-amiens.fr>,
- 11) G. Augspurger : "JBL Professional, Sound System Design Reference Manual", JBL, 1999,
- 12) ENSET - Paris VI : "Travaux pratiques de vibrations", 1982,
- 13) J.-L. Dubois : "On ne vainc la nature qu'en lui obéissant", l'Audiophile n°30, novembre 1983,
- 14) G. Alcuri : "Les résonateurs : conception et construction", l'Audiophile n°7 NS, novembre 1989,
- 15) C. Bailblé : "Musique et Architecture", l'Audiophile n°10 NS, mai 1990, et n°12 NS, octobre 1990,
"L'imparfait du dispositif", l'Audiophile n°31 NS, janvier 1995,
- 16) R. Allison : "L'énergie sonore dans un local domestique", l'Audiophile n°11 NS, juillet 1990,
"Comment améliorer la pièce d'écoute", l'Audiophile n°12 NS, octobre 1990,
"Comment disposer les enceintes acoustiques", l'Audiophile n°13 NS, décembre 1990,
- 17) J. Hiraga : "Salle d'écoute. Correction passive et active", l'Audiophile n°19, février 1992,
- 18) P. David : "Le système de correction d'environnement acoustique Sightech AEC 1000", l'Audiophile n°25, juillet/août 1993,
- 19) Collectif d'auteurs : "Techniques de l'Ingénieur - Électronique", 1972,
"Acoustique - Electro-acoustique",
"Propagation du son",
"Perception du son",
"Introduction à l'acoustique interne des salles",
"Tableaux numériques",
- 20) Obersound : panneaux décoratifs bois acoustiques, documentation 1997,
- 21) Aliécor : isolation liège, documentation 2003,

22) Sempatap : traitement acoustique des locaux réverbérants, documentation 2003,

23) ABV : panneaux Akustik kalm, documentation 2002.

PARASITES ET PERTURBATIONS, CEM, ALIMENTATIONS ET CÂBLAGE :

24) A. Charoy : "Parasites et perturbations des électro-
niques", tome 2 : "Terres, masses, câblages",
tome 3 : "Blindages, filtres, câbles blindés", Dunod, 1992,

25) J.-P. Den Hartog (M.I.T.) : "Vibrations mécani-
ques", Mc Graw-Hill, traduit par H.-L. Supper et
H. Aberdam, Dunod, 1960,

26) Philips data Handbook : "Electrolytic capacitors",
Philips, 1991,

27) R. Damaye, C. Gagne : "Alimentations électroni-
ques", Dunod, 1991,

28) Analog Devices :
"Applications reference manual", AD 1993,
"Amplifiers reference manual", AD 1992,

29) P. Johannet : "Le son des câbles", l'Audiophile
n°9 NS, mars 1990,
"Le câble coaxial cet inconnu", l'Audiophile n°12
NS, octobre 1990,
"À la poursuite du 300B", l'Audiophile n°16 NS,
juin 1991,

"Les câbles, la fin du mystère", l'Audiophile n°23
NS, février 1993,

"Les câbles, les condensateurs et la mémoire des
isolants", l'Audiophile n°25 NS, juillet/août 1993,

"Pour en finir avec le câble", l'Audiophile n°27
NS, janvier 1994,

30) Dossier spécial La Nouvelle Revue du Son :
"24 câbles de référence", n°228, mars 1990,

31) M.-O. Mizier : "Sonomètres, la légalité n'implique
pas l'égalité", magazine Mesures n°630, décembre
1990,

32) J.-C. Tornior : "Le potentiel zéro", l'Audiophile
n°13 NS, décembre 1990.

ÉLECTRO-ACOUSTIQUE, HAUT-PARLEURS ET ENCEINTES :

33) J. Hiraga : "Les haut-parleurs", Éditions Fréquen-
ces, 1981,

34) J. D'Appolito : "Le haut-parleur, manipulations et
mesures électro-acoustiques", Publitronic Elektor,
septembre 1999,

35) P. Loyez : "Technique des haut-parleurs et encein-
tes acoustiques", Emap-Alpha, diffusion Eyrolles,
1996,

36) V. Dickason : "Enceintes acoustiques et haut-
parleurs", Publitronic Elektor, 1996,

37) A.N. Thiele : "Loudspeakers in vented box", Jour-
nal de l'AES vol. 19, 1971,

38) G.A Briggs : "Haut-parleurs", Édition Radio, 1961,

39) R.H. Small : "Direct Radiation Loudspeaker Sys-
tem Analysis", Journal de l'AES vol. 20, 1972,
"Vented-Box Loudspeaker Systems", Journal de
l'AES, 1973,

40) H.D. Hardwood : "Motional Feedback in Louds-
peakers", Wireless World, 1974,

41) D.B. Keele : "Sensitivity of Thiele's Vented
Loudspeakers Enclosure Alignments to Param-
eters, Variations", Journal de l'AES, 1973,

42) W.M. Leach : "Loudspeaker Driver Phase
Response : The Neglected Factor in Crossover
Design", Journal de l'AES, 1980,

43) R.C. Heyser : "Loudspeaker Phase Characteristics
and Time Delay Distorsion", Journal de l'AES
1969,

44) K. Satoh : "Sound Reproduction Devices and Sys-
tems",

45) H. Schurer, P. Annema, H.E. de Bree, C.H.
Slump, O.E. Herrmann : "Comparison of Two
Methods, for Measurement of Horn Input Impe-
dance", University of Twente, Dept. Of Electrical
Eng., Enschede, Hollande,

46) C. Pereira : "Constant Directivity Sound Reinfor-
cement Horns", Studio-Systems, novembre-
décembre 1998,

- 47) Audax : "Tweeter and Woofer line 1994",
- 48) J. Mahul : "Prédétermination des courbes de réponse de systèmes à évent accordé du 4^e ordre", l'Audiophile n°13, décembre 1979,
- 49) Elektor, C. Bruennlein : "Impédancemètre pour haut-parleur", Elektor n°137, novembre 1989,
- 50) Elektor : "Sonomètre Linéaire", Elektor n°179, mai 1993,
- 51) Fiches techniques : Altec, Audax, Beyma, BMS, Davis, Electro-Voice, Fane, Focal, Fostex, Gauss, JBL, Monacor, PHL-Audio, PHY-HP, Radian, RCF, Supravox, TAD, etc.

ÉLECTRONIQUE À TRANSISTORS :

- 52) J.-P. Oemichen : "Emploi rationnel des transistors", Éditions Radio, 1989,
"Emploi rationnel des circuits intégrés", Éditions Radio, 1986,
- 53) M. Mounic : "Amplification - Méthodes graphiques, procédés de calcul, contre-réaction", Foucher, 1967,
- 54) J.-C. Marchais : "Structures élémentaires des filtres actifs", Masson, 1979,
- 55) S. Valkov : "Electronique analogique - cours avec problèmes résolus - IUT-BTS-CNAM", collection A. Capliez - Educavivre, 1994,
- 56) J. Mornand : "Schémas d'électronique", Tomes 1 et 2, Dunod, 1967,
- 57) Elektor : "L'audio et les condensateurs", Elektor n°165, mars 1992,
- 58) Elektor : "En savoir plus sur les transfos", Elektor n°196, octobre 1994,
- 59) Datasheets : Burr-brown, Texas Instruments, Analog Devices, Philips, Lundhal, Sowter, ON Semiconductor, National Semiconductor.

ÉLECTRONIQUE À TUBES :

- 60) J. Mornand : "Schémas d'électronique", Tomes 1 et 2, Dunod, 1967,
- 61) M. Mounic : "Amplification - Méthodes graphiques, procédés de calcul, contre-réaction", Foucher, 1967,
- 62) J. Hiraga : "Initiation aux amplis à tubes", Éditions Fréquences, diffusion Eyrolles, 1991,
- 63) M. Van der Veen : "Amplificateurs à tubes de 10 W à 100 W à transformateurs de sortie toriques", Publitrone Elektor, 1999,
- 64) E. Aisberg, L. Gaudillat, R. Deschepper : "Radio tubes", SECF Éditions radio, 1981,
- 65) D. Givord : "Les Matériaux Magnétiques", laboratoire L. néel, CNRS Grenoble, 1998,
- 66) AEG Telefunken : "Taschenbuch - Röhren - Halbleiter - Bauteile", 1969,
- 67) P. Millet : "RCA Electron Tube Handbook, tube manual HB3", 1971,
- 68) Tube CAD journal, Glass ware, 2002,
- 69) Documentation "Soft Magnetics Application Guide", Arnold Magnetics, 2003,
- 70) Documentation "Alliages Magnétiques", Technicome, 2003,
- 71) Documentation "Nanoperm", Magnetec GmbH, 2004,
- 72) Documentation "Metglass", Honeywell Metglass-Hitachi Metals, 2000,
- 73) Documentation "Amos Amorphous Cores", Amotech, Corée, 2003,
- 74) Datasheets : Amperex, Bendix, General-Electric, JJ-Tesla, Marconi-Osram-Valves, Mullard, Philips-Miniwatt, Raytheon, RCA, Siemens, Svetlana, Sylvania, Telefunken, Tungsol.

COMPLEMENT BIBLIOGRAPHIQUE

- E. Zwicker et R. Feldtkeller : "Psychoacoustique", Masson, 1981,
- E. Leipp : "La qualité acoustique des lieux d'écoute", Université de Paris VI, 1978,
- M. Rossi : "Électro-Acoustique", Dunod, 1986,
- C. Hugonnet et P. Walder : "Théorie et pratique de la prise de son stéréophonique", Eyrolles, 1994,
- F. Alton Everest : "The master handbook of acoustics", TAB book - McGraw-Hill, 1994,
- P.J.T. Filippi : "Acoustique générale", Les éditions de physique, 1994,
- P. Flandrin : "Temps-Fréquence", Hermès, 1993,
- G. Dutheil : "Amplificateurs à tubes pour guitare et Hi-Fi", Publitronic, 1995.
- F. Ibre : "Tout ce que avez toujours voulu savoir sur les TUBES AUDIO ANCIENS & RÉCENTS", Elektor-Publitronic, 2007.

FOURNISSEURS

La qualité du service, depuis l'accueil jusqu'aux précautions prises à l'emballage, en passant par la rapidité, le sérieux et les conseils avisés, sont autant de points communs aux fournisseurs ci-dessous :

- **I.C.P.** 63 rue de Coulommès, 77680 Quincy-Voisis :
Tubes NOS, américains et européens, supports, transformateurs sur mesure, connecteurs, composants passifs, condensateurs papier huilé (<http://icp-fr.com>),
- **Triode et compagnie**, 23 boulevard de l'Yser 75017 Paris :
Composants Audio-Note : câbles, transformateurs, condensateurs papier huilé cuivre ou argent, résistances tantale, HP, kits, etc. Condensateurs Black-Gate, Elna, JJ-Tesla. Tubes NOS et récents JJ ou Sovtek, embases, connecteurs et sélecteurs,
- **Audiophile-Concept**, 17 rue des couteliers 31000 Toulouse :
Transformateurs Audio-Note, Tamura, Tango, Magnétic. Tubes NOS professionnels, supports, atténuateurs DACT et Riken, composants passifs Riken, Kiwame, Audio-Note, Jensen, condensateurs à bain d'huile, Eurofarad, Audyn-cap, Black-Gate, JJ-Tesla etc. HP à haut rendement et pavillons, platines analogiques Micro-Seiki, cellules Benz-Micro, Denon, Ikeda, Koetsu, etc. (<http://quarkconcept.free.fr>),
- **Madotec**, 17 avenue de Saxe 75007 Paris :
Transformateurs Sowter, Magnequest, Tribute, atténuateurs à transformateur, tubes NOS et récents, commutateurs Shallco et Elma, etc.,
- **Radiospares**, BP453 - 60031 Beauvais cedex :
Composants électroniques actifs et passifs professionnels, outillage, matériaux etc.,
- **Selectronic**, BP513 - 59022 Lille cedex :
Composants électroniques actifs et passifs, outillage, matériaux, HP Fostex, condensateurs Black-gate et Elna, etc.,
- **La Maison de l'Audiophile**, LDA, 11-17 rue de la chine 75020 Paris :

Kits et composants, tubes WE, transistors japonais triés et appairés,

- **HP Systèmes**, 35 rue Guy Moquet 75017 Paris :
Haut-parleurs toutes marques, kits, composants et accessoires pour enceintes, amplis à tubes en kit, condensateurs SCR,
- **La Maison du Haut-Parleur**,
138, avenue Parmentier 75011 Paris
46, rue J. Récamier 69006 Lyon
8, rue Ozenne 31000 Toulouse
Haut-parleurs toutes marques, kits, composants et accessoires pour enceintes,
- **CICE industrie**, 79 rue d'Amsterdam 75008 Paris :
HP professionnels Radian, Selenium, Electro-Voice. Réparation et pièces détachées TAD, JBL, Altec, Fostex, etc., Pavillons bois massif.
- **Le Monde de l'Acoustique**, 68 rue A. Briand 78130 Les Mureaux :
Étude acoustique, mesures, diffuseurs et diffracteurs, tissus, mousses et plafonds.

- **Sté Industrielle OBER**, division panneaux décoratifs OBERFLEX, 55014 Bar-le-Duc cedex :

Panneaux absorbants perforés et rainurés OBER-SOUND, diverses finitions, accessoires de pose.

- **Bour et Thielen**, 19 rue des drapiers, actipôle Borny 57070 Metz :

Bois, panneaux et dérivés, multipli de hêtre, découpes sur mesure, panneaux oversound.

- **Lundahl transformers**, tibeliusgatan 7 SE-761 50 Norrtälje, Sweden,

- **Distributeur Lundahl** pour la France :

CERES Electronique, M. Ch. Bubendorf, 1 rue Fernand Thorel, 27110 Iville,

- **Triode VT Components**, Everdonk 36, Breda 4824 CB, Netherlands :

Transformateurs Tribute à noyaux amorphes, Bartolucci à noyaux double-C, tubes et supports, résistances tantale VTC, Kiwame, Riken, condensateurs, etc.

TUBES DATA SUR INTERNET

Les sites des fournisseurs ci-dessus contiennent souvent des liens utiles, parmi lesquels de nombreux sites de revendeurs américains, dont les appréciations sont parfois partiales, et les prix quelquefois délirants. Les données qui y sont fournies sont à considérer avec circonspection. Quelques sites parmi tant d'autres ont retenu mon attention, et se sont avérés fiables et de bon conseil. Les caractéristiques des tubes y figurent :

<http://www.tubedata.org>

site de Franck Philippe avec nombreux datasheets officiels au format pdf)

<http://www.tubeworld.com>

(tubes d'époques, comparatifs, équivalents, conseils, etc.)

<http://www.drtube.com>

<http://www.watfordvalves.com>

(fournisseur des pros, essais comparatifs par les clients)

<http://www.audiotube.com>

<http://www.jj-electronic.sk>

(site de l'un des plus sérieux fabricants actuels de tubes).

ANNEXES

A.1 CORRECTION ACTIVE

Comme on l'aura compris au vu des figures 55 à 58 (pages 90 et 91), l'élimination au point d'écoute des ondes réfléchies, par envoi d'une onde correctrice, aboutit en pratique à la formation d'un champ d'interférence, dans lequel certains points – dont celui où était placé le micro pendant la phase d'étalonnage – bénéficient pleinement de la correction, tandis que d'autres voient l'onde correctrice et l'onde réfléchie s'additionner !

La plus courte distance existant entre un point d'annulation – point B des figures 57 et 58 – et un point d'addition – point A des mêmes figures – est de l'ordre de la moitié de la longueur d'onde concernée.

Autrement dit, si on s'éloigne du point d'annulation de plus du quart de la longueur d'onde, on ne perçoit plus l'effet de la correction, et on risque d'avoir un niveau acoustique encore plus élevé que sans cette correction !

Si on souhaite obtenir une zone d'écoute assez étendue pour que deux personnes puisse écouter avec des conditions acoustiques identiques, en profitant de la correction active, alors cette correction doit être efficace sur un rayon d'au moins 1 m, à mon avis.

Cette distance devant être inférieure au quart de la longueur d'onde, par conséquent la longueur d'onde minimale qui peut être corrigée par ce principe est de 4 m. Cela correspond à une fréquence de 86 Hz. En pratique, la correction active est utilisable jusqu'à une centaine de hertz environ, au-delà on perçoit nettement les bosses et creux de niveau en déplaçant la tête.

Malheureusement, en-dessous de 100 Hz l'acoustique du local n'est pas régie essentiellement par les réflexions, mais par les résonances produites par les ondes stationnaires. Ces résonances produisent des zones de fortes pressions acoustique (ventres) et des zones de pression très faibles (nœuds), dont les positions dépendent des dimensions du local et de ses modes de résonance, comme cela a été expliqué au chapitre 6.

La correction active ne pourra venir à bout de résonances marquées, qui se produisent lorsque des modes vibratoires de la salle se combinent, dans une bande de fréquence étroite.

Son action étant limitée à l'extrême-grave, elle ne pourra pas non plus éliminer les réverbérations dans le médium, et en particulier le flutter-echo si désagréable.

Il est donc important de noter que la correction active vient en complément des traitements acoustiques, et ne saurait les remplacer. Elle permettra d'éliminer certaines résonances graves, ce qui se traduira par la disparition de toniques répétitives. Le registre grave gagnera en légèreté, en articulation, et en aération.

Mais on ne profitera de ces effets que si la salle a été préalablement traitée, avec une absorption bien répartie sur toute la gamme des fréquences, ainsi qu'une diffusion des réflexions primaires.

L'amateur qui souhaite se lancer dans le traitement acoustique trouvera une aide précieuse sur le site <http://www.rpg-europe.co.uk>

Distributeur pour le Royaume-Uni et l'Europe des produits RPG-diffusor-systems, Inc.

Le site de la maison mère, <http://www.rpginc.com> propose des logiciels d'étude acoustique, Room Optimizer et Room Sizer.

Parmi les produits les plus intéressants pour le particulier, retenons :

- Bad Panel, panneaux perforés en fibre de verre, avec parement en tissu, réalisant une absorption basse fréquence grâce à leurs perforations, réparties selon une séquence particulière afin d'obtenir une diffusion homogène.
- Absorbor, panneau absorbant en tissu acoustiquement transparent tendu sur cadre avec laine acoustique, proposé en diverses finitions.
- Modex, panneau absorbant très efficacement les basses fréquences, assez épais cependant, 178 ou 305 mm, selon les versions. Il existe un modèle pour encoignure.
- Modex Broadband, panneau perforé souple absorbant large bande entre 50 Hz et 5 kHz, finition laqué blanc.
- Modex Plate, panneau souple absorbant basse fréquence de faible épaisseur, 100 mm, finition laqué blanc.
- Toutes sortes de diffuseurs construits sur le modèle du diffuseur de Schröder, dimensions et finitions variées.

A.2 BI-AMPLIFICATION PASSIVE

Ce mode de biamplification où le filtre passif de l'enceinte est conservé, apporte des avantages mais aussi des inconvénients, et demande quelques précautions pour une mise en œuvre satisfaisante.

INCONVÉNIENTS DE LA MONOAMPLIFICATION

En monoamplification les forts signaux dans le registre grave sollicitent fortement les circuits d'alimentation de l'ampli, provoquant des fluctuations des tensions d'alimentation.

Ces variations – qui suivent les modulations musicales – sont réinjectées par les rails d'alimentation dans tous les étages de l'ampli, produisant plusieurs effets néfastes :

- tout étage non-symétrique amplifie les variations de ses tensions d'alimentation : on retrouve directement ces modulations en sortie !
- un étage symétrique ou différentiel rejette bien les variations lentes de ses tensions d'alimentation, on ne retrouve donc pas ces modulations en sortie, mais en revanche, des variations rapides et dissymétriques des tensions d'alimentation seront transmises en sortie, d'autant plus que le point de fonctionnement réel est éloigné de la symétrie parfaite. (C'est le facteur de réjection de mode commun de l'étage, qui doit être considéré. Ce facteur est maximal lorsque l'étage fonctionne de manière exactement symétrique.)
- déplacement des points de fonctionnement de certains étages, ce qui a pour effet de modifier leur spectre de distorsion. On sait qu'une distorsion élevée mais stable est "filtrée" par l'audition, alors qu'une distorsion changeante attire l'attention et fatigue rapidement.

De nombreux amplis du commerce, pourtant excellents aux mesures, montrent sur modulation musicale des sonorités à la fois empâtées dans le bas-médium et un peu dures, brillantes et chuintantes dans l'aigu. Ce sont des signes qui révèlent une intermodulation importante, provoquée la plupart du temps par les modulations des tensions d'alimentation.

AVANTAGES DE LA BIAMPLIFICATION

En passant à la biamplification, on attribue au registre grave un ampli dédié, et aux registres médium et aigu un autre ampli. L'utilisation d'amplificateurs indépendants oblige à séparer également les câblages entre amplis et enceintes, la biamplification apporte donc les mêmes avantages que le bi-câblage, avec en plus des avantages liés à la séparation des amplis : celui chargé des voies médium-aigu sera peu sollicité, la modula-

tion donc la puissance nécessaire étant nettement plus faible dans ces bandes de fréquences.

L'ampli de grave sera toujours fortement sollicité dans ce registre, mais ne traitera plus le médium et l'aigu, ce qui éliminera toute interférence. Les sonorités obtenues paraîtront plus claires, plus aérées, avec une meilleure articulation et un grave un peu mieux tenu. C'est surtout dans le médium-aigu que l'amélioration sera sensible.

En contrepartie, la biamplification passive a surtout pour inconvénient de faire travailler les amplis de manière déséquilibrée : chaque ampli reçoit un signal d'entrée à large bande, contenant donc la totalité du spectre à reproduire, mais il n'est chargé que sur une bande de fréquence limitée.

L'ampli de grave reçoit ainsi toute la modulation mais ne débite du courant dans le haut-parleur de grave que sur une plage de fréquence définie par le filtre passif, par exemple jusqu'à 500 Hz. L'ampli est donc chargé par une impédance de 8 Ω jusqu'à environ 500 Hz, mais il n'est pas chargé au-delà.

Si le circuit fait usage d'une contre-réaction qui fixe son gain, cette absence de charge n'a pas de conséquence audible. Cependant, les étages de sortie n'apprécient pas de travailler sans charge, surtout en haute fréquence, c'est pourquoi je conseille de câbler en sortie de l'ampli de grave un circuit RC série, afin de lui procurer une charge la plus constante possible.

La résistance sera choisie de même valeur que l'impédance nominale du haut-parleur de grave, et le condensateur sera calculé pour présenter une impédance de même valeur à la fréquence de coupure grave-médium.

Ainsi, pour un raccordement à 500 Hz, avec des haut-parleurs de 8 Ω , le condensateur sera de :

$$C = \frac{1}{2\pi R F_c} = \frac{1}{2\pi \times 8 \times 500} \approx 40 \mu\text{F}$$

C'est évidemment une valeur de départ, qu'il convient d'affiner ensuite par écoutes successives. Dans plusieurs cas, un réseau RC avec 8 Ω et 22 μF polypropylène a donné de bons résultats, le grave étant plus ouvert et articulé qu'en l'absence de réseau.

Pour ce qui est de l'ampli dédié aux voies de médium et d'aigu, l'absence de charge à basse fréquence est plutôt bénéfique, quoique là encore une amélioration soit parfois possible. Dans ce cas, elle consiste à filtrer le signal en entrée de l'ampli, afin de couper les basses fréquences dès l'entrée, aux environs de 100 à 150 Hz. Ce filtrage est assez bas pour ne pas interférer avec le filtre de l'enceinte, situé généralement entre 300 Hz et 1 kHz, et il permet d'éliminer les plus forts signaux dès l'entrée.

Un simple condensateur de liaison en entrée de l'ampli suffit pour cela. Sa qualité doit être irréprochable, un

modèle au papier huilé et feuille de cuivre est idéal. Sa valeur est déterminée à partir de la résistance d'entrée de l'ampli. Avec une résistance de 100 k Ω :

$$C = \frac{1}{2\pi R F_c} = \frac{1}{2\pi \times 100 \times 10^3 \times 100} \approx 16 \text{ nF}$$

En pratique, une valeur de 22 à 47 nF a donné de bons résultats, quoique dans de nombreux cas ce filtrage n'était pas nécessaire et parfois même néfaste.

AMPLIFICATEURS IDENTIQUES ?

Il y a deux réponses possibles à cette question, selon que les voies médium et aiguës sont atténuées ou non dans le filtre passif de l'enceinte, et selon que l'on conserve ou non cette atténuation passive.

Enceinte avec atténuation passive des voies supérieures

C'est un cas très courant car les sensibilités des haut-parleurs de médium et d'aigu sont très généralement supérieures à celles des haut-parleurs de grave. En particulier les enceintes modernes de type bibliothèque ou colonne très fine, équipées de petits haut-parleurs de grave de diamètre 10 à 15 cm, montrent des sensibilités "brutes" de l'ordre de 82-88 dB / 1 W pour la voie grave contre 88-96 dB / 1 W pour les voies supérieures selon le tweeter utilisé.

Une atténuation des voies supérieures, de 2-3 dB au moins, et jusqu'à parfois 10 dB, prend donc place dans le filtre passif, sous forme d'un réseau résistif R1-R2. Le concepteur a donc aligné la sensibilité globale de l'ensemble sur celle du haut-parleur ayant le rendement le plus faible.

Dans ce cas toutes les voies doivent être attaquées sous le même niveau de modulation pour obtenir une réponse en fréquence linéaire.

Les amplis utilisés devront donc fournir la même puissance de sortie maximum, et présenter exactement le même gain en tension.

Si, comme on le voit parfois, l'un des deux amplificateurs – celui de médium-aigu – présente une puissance maxi plus faible, il arrivera à l'écrtage le premier, mettant en danger les haut-parleurs auxquels il est branché.

En effet, bien que la puissance réellement envoyée aux voies supérieures soit plutôt faible, rarement plus d'une dizaine de watts, n'oublions pas que l'ampli reçoit en entrée toute la plage de fréquence, y compris les forts signaux du registre grave !

Ces signaux peuvent amener à l'écrtage son étage de sortie, qui ne débite pourtant aucun courant à ces fréquences graves, mais doit quand même traiter la modulation de la tension.

Un écrtage produit un spectre de distorsion très riche en hautes fréquences, ce que le tweeter n'apprécie pas longtemps...

Il est donc fortement recommandé dans ce cas d'utiliser **deux amplis identiques**, dont la puissance sera choisie en fonction de la sensibilité globale des enceintes (voir chapitre 8).

Remarque : si les haut-parleurs choisis pour les différentes voies ont tous la même sensibilité, il est évident que les amplis devront tous avoir la même puissance maxi.

Atténuation supprimée sur les voies supérieures

C'est un cas particulier qui concerne les audiophiles bricoleurs, capables de démonter un filtre passif pour y repérer les résistances d'atténuation, et de modifier le câblage.

On obtient alors une enceinte dont la sensibilité peut-être fort différente entre la voie de grave et celles de médium et d'aigu. De bons exemples de ce type d'enceinte sont les modèles colonne Klipsch équipés d'un pavillon de médium-aigu et de deux boomers de 20 à 25 cm pour le grave.

La sensibilité dans le grave est de l'ordre de 92 à 96 dB / 1 W selon les haut-parleurs utilisés, alors qu'elle dépasse les 105 dB / 1 W pour le pavillon.

Une atténuation de l'ordre de 10 dB est donc établie dans le filtre séparateur.

Une fois cette atténuation supprimée, le pavillon ne demandera que quelques watts de puissance crête pour procurer un niveau très élevé. Une puissance électrique de l'ordre de 5 à 10 W est généralement suffisante. La voie de grave quant à elle demande environ 10 fois plus !

Il est donc naturel de penser à l'utilisation de deux amplis différents : un ampli à transistor puissant pour la voie grave et un ampli à lampes, pourquoi pas triode simple-étage, pour le pavillon.

Cela n'est possible que si un réglage des niveaux relatifs est établi en amont des amplis, comme cela est présenté figure 114, page 138.

Il faut donc faire appel à deux préamplis et deux amplis pour une configuration correcte.

Par exemple dans le cas des enceintes Klipsch précitées, avec leur filtre modifié, **sans atténuateur passif**, le second préampli (placé en amont de l'ampli de médium-aigu) sera chargé d'atténuer le signal de 10 dB.

L'ampli de médium-aigu recevra donc une modulation atténuée, et ne risquera pas d'être amené à l'écrtage. Sa puissance maxi peut dans ce cas être choisie

nettement plus faible que celle de l'ampli de grave : une atténuation de 10 dB correspond à une puissance 10 fois plus faible !

Conclusion

Si un seul préampli est utilisé, avec seulement un réglage du volume général, alors les deux amplis utilisés devront être identiques, ou tout au moins de même puissance maxi et de gain (sensibilité d'entrée) identique.

Si deux préamplis sont utilisés, le second servant à régler le niveau relatif des voies supérieures, alors chacun des amplis sera choisi en fonction de la sensibilité apparente (vue des bornes de l'enceinte, donc tenant compte des éventuels atténuateurs) des haut-parleurs qu'il alimente.

Si ces divers haut-parleurs ont des sensibilités égales, on retombe sur le cas des amplis identiques !

A.3 ENCORE LA MÉCANIQUE...

Approche énergétique du haut-parleur

Le meilleur moyen de faire apparaître les différences de comportement entre deux haut-parleurs de diamètres différents, est de les analyser sous un point de vue énergétique : l'énergie électrique apportée à la bobine mobile est transformée partiellement en chaleur et pour une faible part en énergie mécanique, dont seulement une portion est rayonnée sous forme d'ondes sonores, le reste étant dissipé de différentes manières après avoir été stocké sous forme d'énergie cinétique dans les masses en mouvement.

Energie mécanique emmagasinée dans l'équipage mobile

Il s'agit d'une énergie cinétique, liée au mouvement de la masse mobile. En régime sinusoïdal, cette énergie est stockée alternativement dans la masse – vitesse maximale au milieu de la course – ou dans le ressort (suspensions) – vitesse nulle en fin de course.

La quantité d'énergie ainsi stockée est :

$$E = \frac{1}{2}(M_{ms} \cdot V^2)$$

Elle est variable au cours du temps car la vitesse instantanée est variable !

Si on compare deux haut-parleurs, le premier de diamètre 20 cm avec membrane de masse $M_{ms1} = 20$ g, et le second de diamètre 40 cm avec membrane de masse $M_{ms2} = 80$ g, donc de même masse surfacique que le petit haut-parleur, on peut constater qu'à niveau sonore identique :

- le plus petit, ayant une surface active quatre fois plus faible, devra avoir des excursions de membrane quatre fois plus grandes, pour produire le même niveau sonore. Par exemple, d'après l'abaque page 149, figure 122, pour produire 100 dB à 1 m à la fréquence de 63 Hz, le grand haut-parleur de 40 cm aura environ 1 mm d'excursion, tandis que le petit devra déplacer sa membrane de 4 mm.

- La vitesse de déplacement sera également quatre fois plus forte pour le plus petit haut-parleur.

L'énergie stockée pour le petit haut-parleur peut s'écrire :

$$Ec_1 = \frac{1}{2}(M_{ms1} \cdot V_1^2)$$

Et pour le grand haut-parleur, avec $M_{ms2} = 4 \cdot M_{ms1}$ et $V_2 = \frac{V_1}{4}$

$$\begin{aligned} Ec_2 &= \frac{1}{2}(M_{ms2} \cdot V_2^2) = \frac{1}{2}(4 \cdot M_{ms1}) \cdot \left(\frac{V_1}{4}\right)^2 \\ &= \frac{1}{8}(M_{ms1} \cdot V_1^2) \end{aligned}$$

$$\text{Soit } Ec_2 = \frac{1}{4}Ec_1$$

La grande membrane stocke donc quatre fois moins d'énergie que la petite !

Lorsque le signal disparaît, le mouvement du haut-parleur doit s'arrêter, l'énergie stockée doit donc être dissipée le plus rapidement possible. Elle devrait être idéalement transmise à la bobine mobile, laquelle est reliée à la sortie de l'amplificateur d'impédance de sortie très faible. La bobine est donc court-circuitée par cette impédance de sortie faible, et tout mouvement de la bobine se trouve par conséquent amorti.

En pratique, il est impossible, même en amortissant parfaitement les mouvements de la bobine, de contrôler les vibrations de la membrane entière, car la liaison entre bobine et membrane se fait sur une très petite surface à l'extrémité du tube support de bobine.

La membrane peut donc continuer à vibrer après que la bobine se soit arrêtée, et dans ce cas l'énergie qu'elle stockait est dissipée mécaniquement par frottements dans le matériau et dans les suspensions.

Il apparaît donc un traînage lors du retour à la position d'équilibre. Ce phénomène parasite est d'autant plus audible que l'énergie stockée est élevée, et l'amortissement faible.

Couplage de la membrane avec l'air

Cette approche énergétique est utile également pour comprendre ce qui se passe à l'interface membrane/air. Lorsqu'une vibration se propage en changeant de milieu, une partie de l'énergie vibratoire est transmise

d'un milieu dans l'autre, et une partie est réfléchiée dans le milieu d'origine, où l'onde repart en sens inverse.

L'exemple le plus clair est celui d'une onde sonore qui se réfléchit contre une paroi dure et massive, et produit un écho, onde sonore réfléchiée revenant vers la source.

Le rapport entre l'énergie transmise et l'énergie réfléchiée dépend des impédances mécaniques des deux milieux, c'est à dire de leur "raideur" apparente.

L'impédance mécanique est donnée par $Z = \rho \cdot C$

Cette impédance mécanique est proportionnelle à la masse volumique ρ du milieu, et à la vitesse C de propagation du son dans ce milieu, autant dire qu'elle est très faible pour l'air – environ $428 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ – alors que celle de la membrane est notablement plus élevée – de l'ordre de $2 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ pour les fibres de cellulose.

Le rapport des impédances des deux milieux étant – c'est le moins qu'on puisse dire – très différent de 1, le couplage n'est pas correct, et une grande partie de l'énergie sera réfléchiée à l'interface et retournera "dans" la membrane, où elle sera dissipée :

- par frottements internes dans les matériaux
- par transformation en énergie électrique dans la bobine du moteur, celui-ci étant réversible. Cette énergie électrique est dissipée en chaleur.

Comme chaque fois qu'une onde est réfléchiée, il se crée des interférences, sous forme d'ondes stationnaires dans la membrane. L'extinction de ces vibrations produit un "traînage" audible.

Pour améliorer le couplage de la membrane avec l'air ambiant, il suffit de rendre son impédance mécanique la plus basse possible, autrement dit de diminuer sa masse surfacique !

Mais cela ne peut se faire sans contrepartie : la membrane légère sera fine et peu rigide, elle supportera des puissances mécaniques faibles.

Cependant, l'expérience montre que les haut-parleurs les plus appréciés ont généralement des masses surfaciques inférieures à $0,1 \text{ g/cm}^2$. Ceci correspond à une masse mobile de 90 g environ pour un haut-parleur de diamètre 38 cm, 53 g pour un 31 cm, 21 g pour un 21 cm.

Il existe bien sûr d'excellents haut-parleur avec des membranes plus massives, qui seront nettement mieux amorties mécaniquement et supporteront des puissances énormes. Les modèles de 38 cm pour sonorisation professionnelle ayant parfois des masses mobiles de plus de 150 g !

Ils pourront produire des niveaux acoustiques très élevés dans le grave, sans distorsion. Mais l'énergie stockée dans la membrane et le moins bon couplage avec l'air seront responsables de traînages et de colo-

rations audibles dans le bas-médium, se traduisant par une sonorité manquant d'articulation, d'impact, d'aération. Ces haut-parleurs spécifiquement adaptés à la reproduction des graves à fort niveau demandent donc à être filtrés assez bas, 150 Hz étant une limite haute à mon avis.

Impédance de rayonnement

Pour étudier le rayonnement d'une membrane dans l'air, on définit son impédance de rayonnement, grandeur qui rend compte de la force qu'il faut exercer sur la membrane pour la déplacer à la vitesse requise. Cette grandeur complexe est constituée d'une partie réelle – qui quantifie la puissance rayonnée – et d'une partie imaginaire (au sens mathématique) qui correspond à l'inertie de l'air mis en mouvement (masse apparente).

Si l'on s'intéresse à la partie réelle, la seule qui rayonne de l'énergie, on établit que l'impédance de rayonnement est, avec R rayon de la membrane :

$$Z_r = 2\pi \cdot \rho \cdot C \cdot R^3$$

Cette impédance est donc proportionnelle à l'impédance caractéristique du milieu (l'air) et au rayon élevé au cube, de la membrane !

Au final, un haut-parleur classique, avec sa membrane de faible surface, atteint des vitesses élevées et sa membrane stocke une énergie cinétique élevée.

La masse surfacique de sa membrane, trop élevée, apporte un mauvais couplage avec l'air, d'où une réflexion importante de l'énergie vibratoire.

Son impédance de rayonnement étant faible, une très petite part de l'énergie reçue est émise sous forme d'ondes sonores.

Par conséquent il rayonne assez peu, mais traîne beaucoup !

En doublant le diamètre, on multiplie par 8 l'énergie rayonnée (on diminue donc aussi l'énergie réfléchiée) et on divise par 4 l'énergie cinétique donc le traînage.

Le choix de l'audiophile

Ces considérations relatives aux impédances mécaniques, à la masse et à la taille des membranes, amènent à mieux comprendre les choix des audiophiles, qui se tournent vers des haut-parleurs grave parfois anciens, vers des modèles professionnels réputés, de grands diamètres, comme les Altec 515 ou 416.

Ces modèles semblent aujourd'hui dépassés, en terme de distorsion mesurée, surtout aux puissances élevées et aux plus basses fréquences, et pourtant ils donnent dans des systèmes audiophiles des résultats extrêmement musicaux !

C'est que l'audiophile demande à sa voie de grave de monter avec clarté, donc sans aucun traînage, jusqu'à 600 voire 800 Hz, fréquence de raccordement utilisable pour une voie de médium à pavillon.

C'est donc plus un haut-parleur de bas-médium qui est requis, plutôt qu'un véritable haut-parleur de grave.

Mais il faut bien admettre que ces modèles ne peuvent produire du niveau dans l'extrême-grave, en-dessous de 50 Hz : l'excursion maximale de l'équipage mobile ne le permet pas, et leur montage avec pavillon avant court, comme dans la célèbre "Voix du théâtre" Altec, ne fait qu'empirer les choses : le rendement est amélioré au-dessus de 200 Hz environ grâce à ce pavillon, mais l'extrême-grave est nettement en retrait !

Il semble bien qu'il ne soit pas possible d'imaginer une voie capable de reproduire à la fois l'extrême-grave avec du niveau et sans distorsion, et le bas-médium jusqu'à plus de 500 Hz sans traînage, avec aération.

C'est pourquoi je crois préférable de séparer le grave en deux voies indépendantes :

- un caisson d'extrême-grave équipé d'un haut-parleur spécifique, supportant de fortes puissances, et capables de très fortes élongations. Son diamètre sera très important, 38 ou 46 cm, sa fréquence de résonance très basse, 20 à 25 Hz. Ce caisson peut être unique, alimenté par la somme des deux voies stéréo. Il pourra supporter une correction électronique et demandera une puissance électrique très élevée.

- Un caisson de grave / bas-médium pour chaque canal droit et gauche, avec un haut-parleur à membrane assez légère, capable de monter proprement. Son diamètre sera de 30 à 38 cm et sa fréquence de résonance de l'ordre de 35 à 50 Hz.

- Le raccordement de ces deux voies sera établi autour de 80 à 120 Hz.

A.4 DIMENSIONNEMENT

La seule grosse difficulté que l'amateur peut rencontrer lors de la réalisation d'un caisson de grave bass-reflex est évidemment le dimensionnement des événements.

Les formules de calcul que l'on trouve habituellement dans la littérature s'appliquent à des événements tubulaires uniques, et les corrections d'extrémités ne sont que très rarement détaillées.

NÉCESSITÉ DE LA CORRECTION D'EXTRÉMITÉS

Le calcul basé sur la théorie du résonateur de Helmholtz donne la longueur "théorique" de l'évent L_v . La masse acoustique totale de l'air en mouvement doit cependant tenir compte du rayonnement de l'évent, et d'une quantité d'air subissant ce mouvement, aux

embouchures de l'évent (tant à l'extérieur qu'à l'intérieur de la boîte) en plus de la masse d'air contenue dans le tuyau.

Le couplage de l'évent avec l'air ambiant dépend de la présence de parois aux bords de l'embouchure : si l'évent débouche dans le baffle (la face avant de l'enceinte), il est couplé à une plus grande masse d'air (l'impédance ramenée à l'embouchure est plus grande) que s'il débouche à l'air libre (comme à l'intérieur de l'enceinte, en général).

Pour tenir compte de cette masse d'air supplémentaire, on calcule la longueur fictive de tuyau L'' qui lui correspond. Cette longueur fictive s'appelle correction d'extrémités (au pluriel car un tuyau a deux bouts, comme disait Monsieur Devos).

L'évent réel sera par conséquent plus court que L_v , afin qu'avec cette masse d'air supplémentaire, il se comporte comme si sa longueur était bien L_v . Autrement dit l'évent réel aura pour longueur $L_v - L''$.

Cette correction de longueur dépend de la masse d'air couplée au volume interne du tuyau, donc de la section S_v de ce tuyau. Un coefficient k permet de calculer L'' .

Pour plus de détails, voir le site :

<http://home.tele2.fr/lambert/>

et le lien ci-dessous, d'après « simple bass-réflex » de W. Marshall Leach, Georgia Institute of Technology, School of Electrical and Computer Engineering :

<http://users.ece.gatech.edu/~mleach/>

Généralement on trouve dans la littérature technique des formules de calcul d'évent dans lesquelles c'est la surface S_v des événements qui est prise en compte. Dans ce cas les coefficients k sont pris dans la colonne de droite du tableau ci-après, et la correction est calculée avec :

$$L'' = k \cdot \sqrt{S_v}$$

avec $k = 0,48$ pour une extrémité bafflée

et $k = 0,345$ pour une extrémité libre.

Dans le cas d'un événement tubulaire monté dans l'enceinte et débouchant sur une face, la correction totale vaut donc :

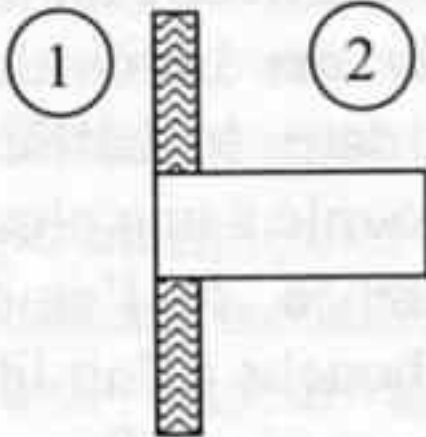
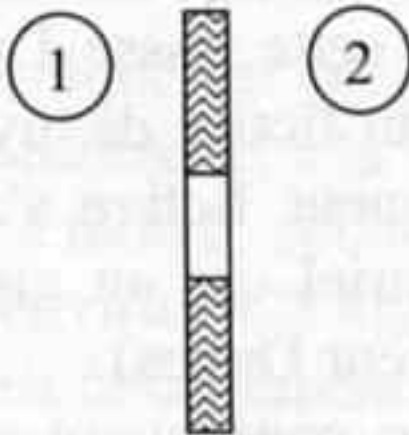
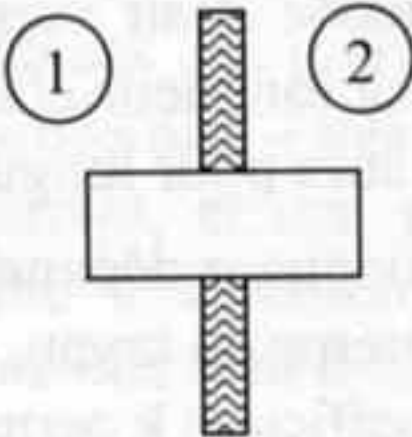
$$L'' = (0,48 + 0,345) \cdot \sqrt{S_v} = 0,825 \cdot \sqrt{S_v}$$

Cette formule est bien connue, mais ne s'applique pas aux autres cas où l'évent n'est pas monté de la même manière.

En particulier, si l'évent est bafflé des deux côtés :

$$L'' = (0,48 + 0,48) \cdot \sqrt{S_v} = 0,96 \cdot \sqrt{S_v}$$

M. Alard dans l'Audiophile n°17 d'octobre 1980 emploie cette formule avec encore plus de précision, avec un coefficient $k = 0,958$.

				COEFFICIENTS			
				k · Rayon	k · Diamètre	k · √Section	
	0,850	0,425	0,480	Extrémité 1			
	0,614	0,307	0,345	Extrémité 2			
	1,464	0,732	0,825	Total			
	0,850	0,425	0,480	Extrémité 1			
	0,850	0,425	0,480	Extrémité 2			
	1,7	0,850	0,960	Total			
	0,614	0,307	0,345	Extrémité 1			
	0,614	0,307	0,345	Extrémité 2			
	1,228	0,614	0,690	Total			

Lorsque l'évent est constitué de plusieurs tuyaux séparés, la distance entre les tuyaux est généralement faible devant les longueurs d'onde rayonnées, au moins jusqu'à plusieurs centaines de hertz. Les tuyaux doivent donc être considérés comme couplés, la correction d'extrémités doit être calculée sur la section totale et non sur chaque tuyau séparément.

Par exemple avec deux événements de section Sv1, de forme tubulaire affleurant la face avant, la correction calculée sur un seul événement serait $L1'' = 0,825 \cdot \sqrt{Sv1}$. Alors que la correction calculée à partir de la section totale (2 · Sv1) est :

$$L2'' = 0,825 \cdot \sqrt{2 \cdot Sv1} = 0,825 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{Sv1} = 1,1667 \cdot \sqrt{Sv1}$$

Cette correction est supérieure à la valeur précédente : $L2'' = \sqrt{2} \cdot L1''$

Cette correction 1,4 fois plus importante aboutira à un événement de longueur réelle plus courte qu'en calculant avec la section Sv1 seule. Cet événement plus court donne un accord plus conforme aux prévisions.

Pour les événements laminaires des caissons Jensen ou Onken, en deux rangées de section rectangulaire, les choses sont différentes :

- les événements débouchent au bord du baffle, et l'embouchure externe n'est donc bafflée que d'un côté.

Dans ce cas le coefficient k peut être interpolé entre les deux valeurs (0,345 et 0,48) données plus haut : $k = 0,4125$

- Ces événements sont accolés à la paroi du côté interne, d'un seul côté. Le rayonnement côté intérieur ne se fait donc que dans un espace deux fois plus petit que pour un événement bafflé. Dans ce cas le coefficient k peut être estimé à 0,615.

Les événements sont disposés en deux rangées éloignées et séparées par les haut-parleurs, ils doivent donc être considérés comme deux événements séparés non couplés. On calculerait donc la correction de longueur en prenant en compte la surface d'une seule rangée d'événements, donc Sv/2.

La correction d'extrémités devrait donc être prise égale à :

$$L'' = (0,4125 + 0,615) \cdot \sqrt{\frac{Sv}{2}} = 0,7266 \cdot \sqrt{Sv}$$

Mais si on se réfère aux études qui ont été faites des charges Jensen ou Onken à événements laminaires :

- Jacques Mahul – directeur du laboratoire recherche et développement de Focal / JM-Lab – a étudié dans le n°26 de l'Audiophile de décembre 82, la petite Onken de E.Koizumi, et a retrouvé à moins de 3% près les résultats obtenus, en se basant sur la formule :

$$Lv' = Lv - \left(1,4 \cdot \sqrt{\frac{Sv}{2\pi}} \right)$$

Cette formule a été établie comme suit :

- On considère que chaque rangée d'évent constitue un unique tuyau de section $S_v/2$

- On calcule le rayon équivalent, celui d'un event circulaire de même section S_v avec :

$$\frac{S_v}{2} = \pi \cdot R^2 \text{ d'où } R = \sqrt{\frac{S_v}{2\pi}}$$

- Ce tuyau est bafflé à une extrémité
- Les coefficients de correction au rayon sont donc 0,85 et 0,614 (voir tableau colonne de gauche)

- La correction

$$L'' = (0,85 + 0,614) \cdot R = 1,464 \cdot \sqrt{\frac{S_v}{2\pi}}$$

On aurait pu tout aussi bien calculer la correction sur la section, et non sur le rayon, en prenant les coefficients dans la colonne de droite, ce qui aboutit à la formule habituelle vue plus haut.

J. Mahul constata que son calcul donnait des events trop long de 3%.

Il calcula ensuite les dimensions de l'enceinte Mini-Onken bien connue, et trouva une longueur d'events de 34,7 cm avec correction, mais là aussi une optimisation aboutit à la réduction de la longueur des events, à 33 cm, soit une réduction de 5%.

- C.H Delaleu dans le n°27 de février 83 reprend la même formule.

- J.Mahul à nouveau dans le n°35 de 85, calcule une charge Onken pour l'Audion-15 et emploie cette formule.

J'ai utilisé dès 84 des caissons mini-Onken, puis à partir de 86 des modifications ont été effectuées, jusqu'à une nouvelle paire en 87, et des caissons sablés en 90.

A chaque fois les events ont été calculés avec cette formule, puis raccourcis pour optimiser. C'est pourquoi je ne me suis pas étendu sur l'usage de cette formule, n'ayant pas pour habitude de critiquer ce que d'autres ont établi.

Finalement, il semble que le calcul fait avec les formules habituelles, donc avec correction d'extrémités $L'' = 0,825 \cdot \sqrt{S_v}$ en prenant pour S_v la surface totale des events, donne des résultats tout à fait exploitables en pratique.

L'exemple de caisson que je décris dans ce livre a été calculé de cette manière, et la fréquence d'accord révélée par la courbe d'impédance montre une excellente corrélation entre les calculs et les mesures obtenues.

Une plus grande précision n'a de sens que si on tient compte du facteur de qualité de la boîte, du couplage des events avec le sol, les murs, et de la réponse de la salle.

A.5 UNE THÉORIE PLUS RÉALISTE

Les filtres séparateurs passifs d'ordre supérieur à 1 introduisent des retards non négligeables sur les signaux de sortie, ce qui se traduit par une mauvaise reconstitution de la forme d'onde du signal.

En particulier, les filtres d'ordre deux très utilisés, produisent un déphasage de 180° entre leurs sorties passe-bas et passe-haut. On pratique souvent une inversion de polarité de la voie supérieure (aigu) pour compenser ce déphasage, mais comme le montrent les figures ci-après, cela ne résout pas le problème ! C'est un décalage temporel qui est nécessaire, obtenu en reculant cette voie d'une distance à calculer.

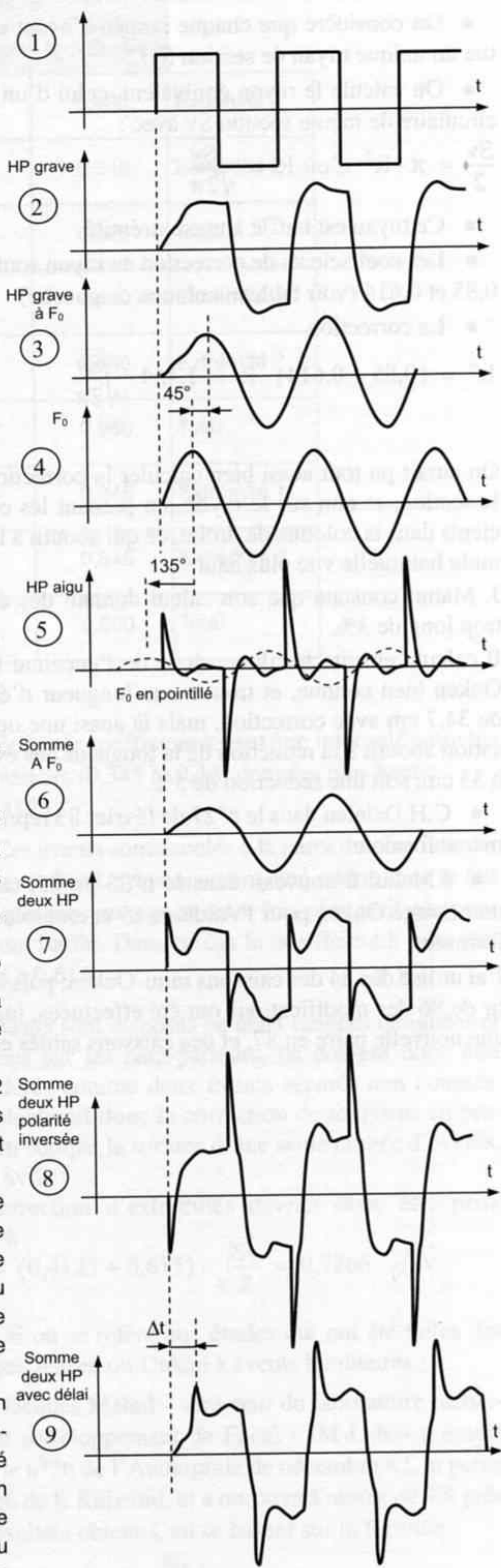


On envoie un signal carré à la fréquence de 500 Hz – trace n°1 – à une enceinte deux voies, avec filtre séparateur d'ordre 2, de type Linkwitz-Riley. Dans l'exemple étudié, la fréquence de raccordement est de 1 kHz. Ce type de filtre est calculé pour un raccordement des voies à -6 dB.

On s'est arrangé pour que la fréquence du carré soit environ la moitié de la fréquence de raccordement du filtre. De cette manière le fondamental est reproduit principalement par le haut-parleur grave, alors que les harmoniques 3, 5 et les suivants sont envoyés principalement au haut-parleur d'aigu.

On constate :

- Le signal reproduit par le HP grave est donné trace n°2, et celui du HP aigu trace n°5.
- Le signal reproduit par le HP grave contient entre autres la fréquence F_0 , trace n°3, qui est déphasée de 45° en retard par rapport au fondamental, rappelé par la trace n°4, du signal d'entrée. Un coup d'œil à la courbe phase-fréquence du filtre montre qu'en effet, à 500 Hz la sortie passe-bas d'un filtre L-R d'ordre 2 calculé à 1 kHz, est en retard de 45° par rapport au signal d'entrée.
- Le signal reproduit par le HP aigu, trace n°5, avec la polarité normale, est constitué de pics traduisant les fronts montants et descendants du carré. Il contient entre autres la fréquence F_0 atténuée (car située dans la bande rejetée par le filtre passe-haut) et qui a été tracée en pointillé, afin de la faire apparaître clairement.
- Cette fréquence F_0 issue du HP aigu est en avance de 135° par rapport au fondamental du signal carré d'entrée.
- A la fréquence F_0 , le déphasage total entre les deux sorties passe-bas et passe-haut est de 180° . C'est vrai quelle que soit la fréquence F_0 du signal carré : le déphasage entre les sorties passe-bas et passe-haut d'un filtre d'ordre deux est constant, de 180° .
- A la fréquence F_0 les deux signaux issus de chacun des deux HP se combinent pour donner la somme montrée par la trace n°6 : la première demi-période est déformée, retardée, et son amplitude est réduite. (C'est pire avec des filtres d'ordre supérieur.)
- La trace n°7 montre la somme globale des deux sorties, traces 2 et 5, sans inversion de polarité, et sans alignement temporel des deux voies. Le carré est très déformé, et le pic du HP aigu est nettement en avance sur la bosse du HP grave.
- La trace n°8 montre la somme des deux sorties avec inversion de polarité, comme cela se pratique (hélas). La forme d'onde montre un départ du tweeter dans le sens négatif, créant une onde de dépression et non une onde de pression. Une mesure du niveau acoustique du HP d'aigu ne renseigne évidemment pas sur le signe de l'onde ! Une mesure du temps de propagation de groupe non plus...
- La dernière trace montre la somme des deux voies branchées en **polarité normale**, après application d'un délai sur la voie passe-haut. Ici le **délai** est d'un peu moins de $\frac{1}{4}$ de la période du carré (de 500 Hz) approximativement $\Delta t = 0,4$ ms, c'est-à-dire en pratique presque la moitié de la période de la fréquence de coupure. La forme d'onde se rapproche un peu plus de celle du carré de départ. Cependant la réponse en fréquence de l'ensemble montre un creux vers 1,5 à 2 kHz (que l'on peut corriger).

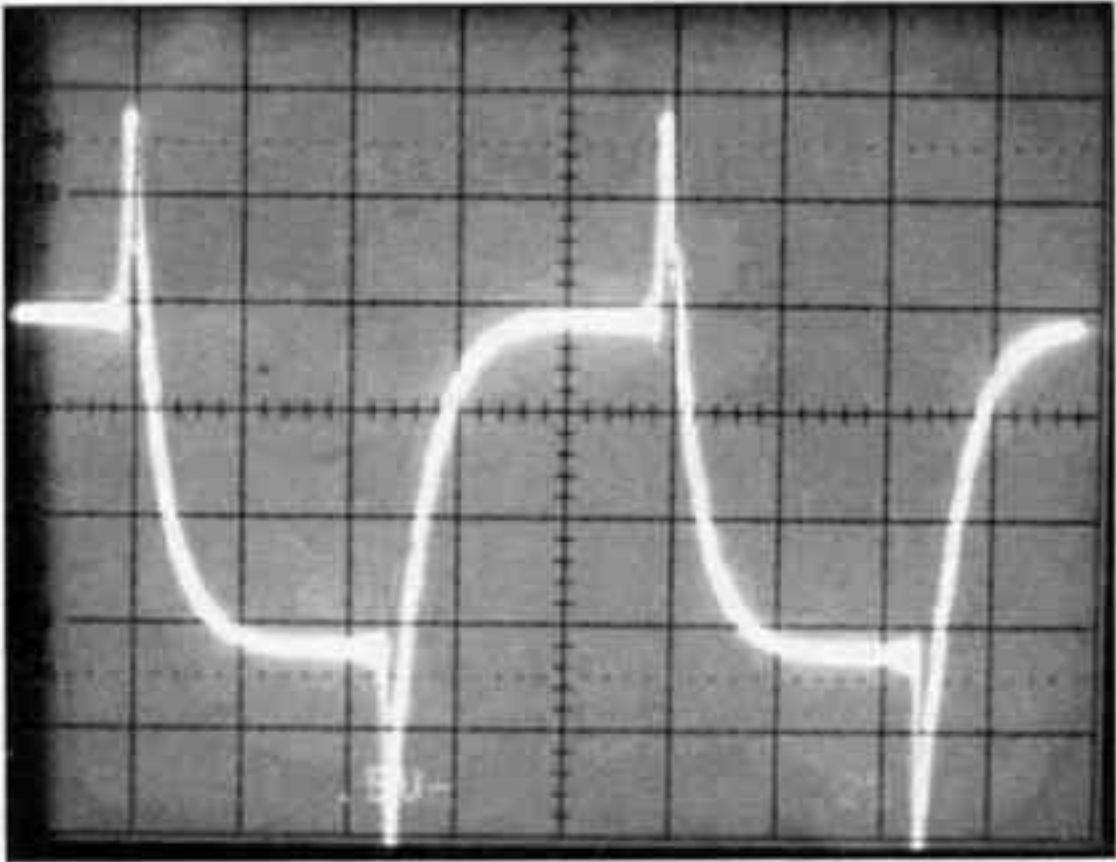


Une autre approche consiste à utiliser un logiciel d'acquisition et de traitement de donnée, capable de calculer le "group delay", temps de propagation de groupe, obtenu sur le signal capté par un micro en sortie des haut-parleurs.

L'objectif est bien sûr d'arriver à un group-delay présentant le moins possible de variations, et les filtres qui permettent cela sont ceux de Butterworth d'ordre trois modifiés, comme ci-dessous.

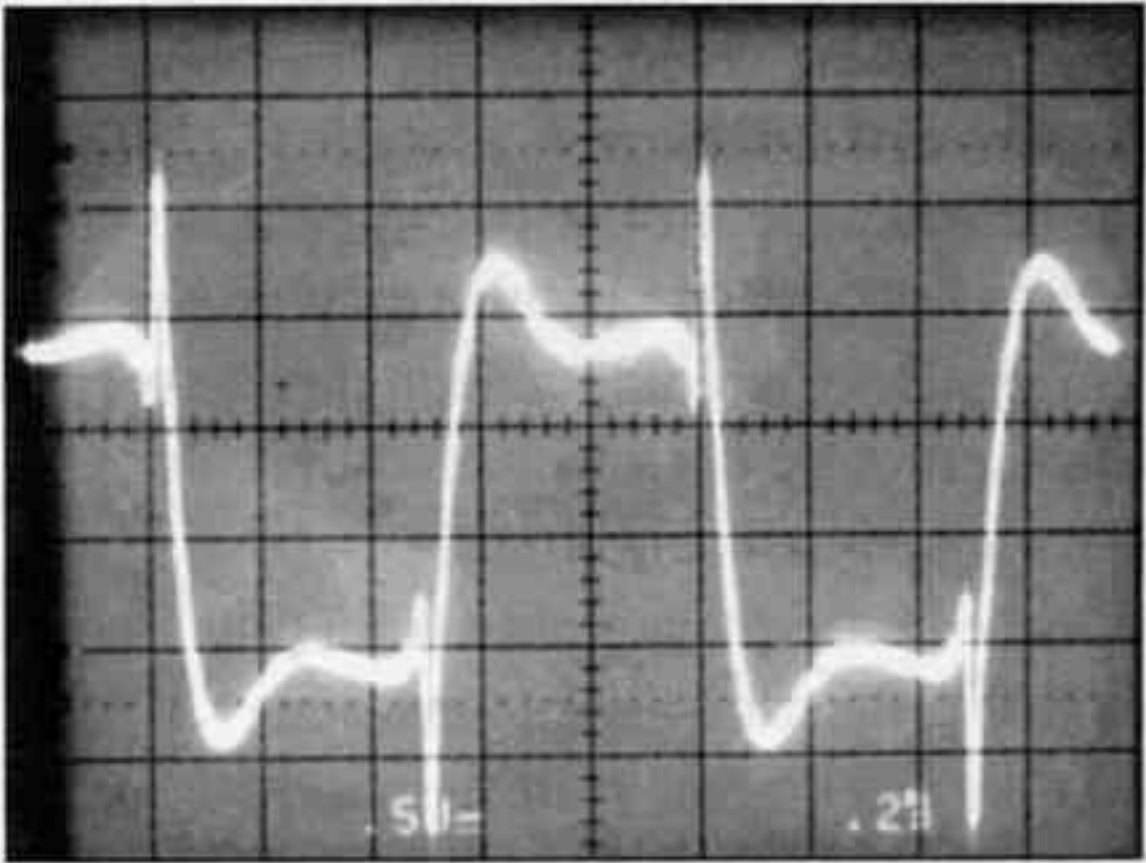
Malheureusement, cette pratique ne prend pas en compte le signe de la pression acoustique captée par le microphone ! Les filtres utilisés demandent une inversion de polarité de la voie supérieure, et la forme d'onde obtenue n'est pas correcte, même si les calculs mathématiques effectués sur le signal indique une variation de phase minimale !

Les images ci-dessous sont reprises du site <http://freerider.dyndns.org/anlage/LeCleach.htm> Elles sont obtenues en envoyant un signal carré (issu d'un lecteur de CD) dans un filtre actif numérique. Le filtre est réglé pour réaliser un filtrage de Butterworth d'ordre 3, à la fréquence de 3 kHz, le raccordement étant à -3 dB.

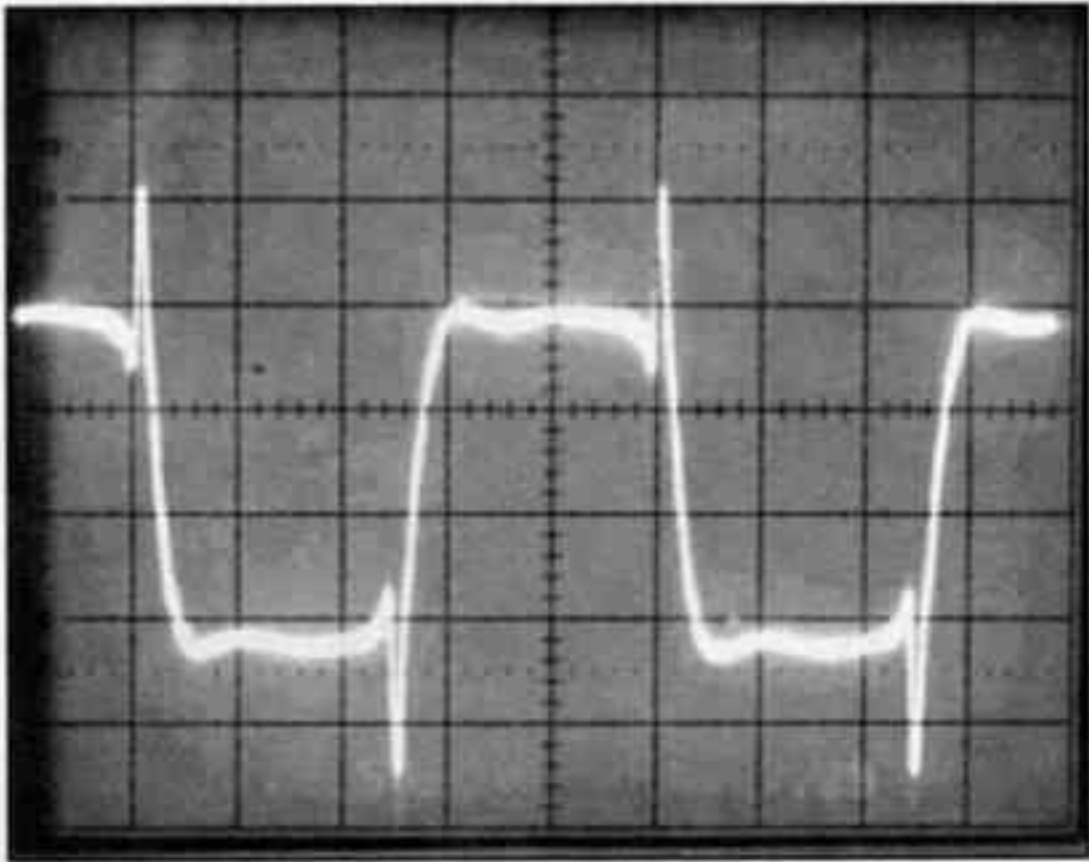


Voici la forme d'onde obtenue lorsque les sorties ont des polarités opposées, ce qu'on obtiendrait en branchant le HP d'aigu avec inversion de polarité.

On y voit un front montant du carré très arrondi et un pic aigu juste avant le front descendant, donc mal placé sur l'axe du temps.



Le filtre actif est ensuite réglé pour obtenir un retard correspondant à un décalage de 24 mm du tweeter, en arrière. Cela correspond à peu près à 1/4 de la longueur d'onde. Comme on pouvait s'y attendre, le pic aigu est alors aligné avec le front descendant du carré, mais le plateau du carré est déformé et montre une ondulation.



Les fréquences de coupure sont ensuite écartées, le passe-bas étant à 2620 Hz et le passe-haut à 3390 Hz (résultat issu d'une feuille de calcul Excel).

Le résultat optimal est montré ci-dessus.

On constate que le pic aigu est toujours sur le front descendant du carré, donc décalé dans le temps d'une demi-période.

La forme d'onde n'est donc pas reproduite correctement.

Personnellement, je cherche à reproduire la forme de l'onde, au-delà des considérations mathématiques, c'est pourquoi je procède différemment.

Je décale le tweeter en arrière, jusqu'à ce que son pic apparaisse aligné avec le front montant du carré.

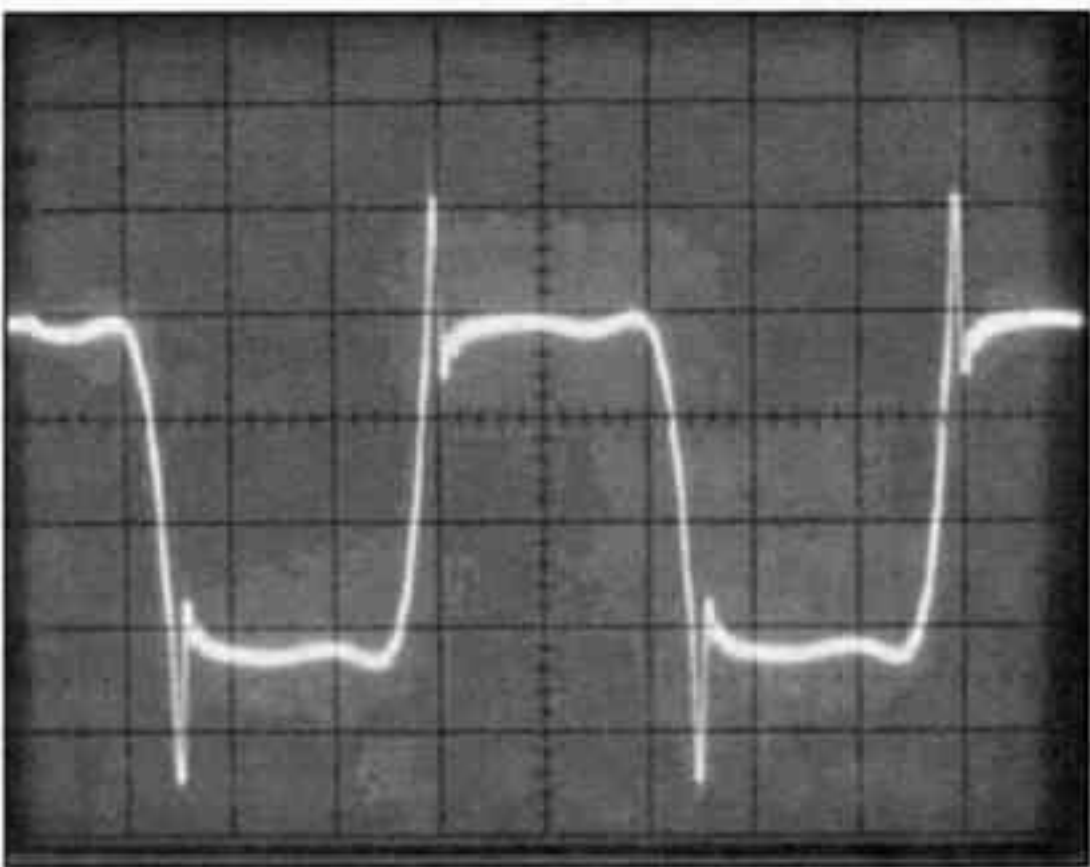
J'utilise des signaux rectangulaires dissymétriques, avec un rapport cyclique de 10% environ, ce qui permet de vérifier la polarité de branchement de chacun des HP.

Je tiens à respecter un branchement en polarité identique pour toutes les voies, afin que les fronts montants soient reproduits fidèlement.

C'est donc uniquement par décalage des voies supérieures vers l'arrière que la mise en phase est faite.

Sur mon système, la comparaison des deux méthodes de filtrage a montré des résultats différents :

- Filtre à group-delay optimisé :
 - réponse en fréquence paraissant plus linéaire
 - aucune projection dans le médium
 - aigu parfois un peu voilé et manquant de piqué
 - scène sonore profonde et stable
 - focalisation des sources manquant un peu de précision.
- Filtre avec calage temporel :
 - réponse en fréquence paraissant un tout petit peu moins régulière
 - aigu parfaitement défini, piqué et aéré à la fois
 - très grande précision de focalisation des sources, très ponctuelles
 - scène sonore semblant moins profonde, mais plus aérée



En utilisant les mêmes pente et fréquence de coupure, mais en reculant le tweeter de $\frac{3}{4}$ de longueur d'onde environ, on constate avec ma manière de faire que le pic aigu est aligné avec le front montant. La forme d'onde est maintenant reproduite correctement.



Index

A

- absorption (coefficient) 12, 80, 81, 82.
- accélération 182, 233.
- acoustique (correction) 12, 16, 64, 73, 78, 81, 82, 83, 84.
- acoustique (de la salle) 12, 71, 78, 89.
- aération 32, 39, 142, 160, 202, 225, 262, 322.
- aigu 20, 38, 114, 158, 182, 204, 230, 268, 287, 310, 334.
- alignement bass-reflex 13, 150, 159, 173, 318.
- alimentation 14, 40, 93, 94, 114, 157, 178, 224, 238, 286, 320.
- Alnico 157, 190, 192, 201, 203.
- amorphe 104, 272, 287, 292, 294, 298.
- amortissement 12, 43, 81, 112, 122, 152, 172, 232, 288, 308.
- amplificateur 11, 14, 22, 61, 92, 115, 132, 218, 308, 337.
- amplificateur opérationnel 106, 107, 236, 255, 327.
- analytique 16, 21, 29, 32.
- ancrage stimulus-réponse 29.
- angle de dispersion 184, 191, 196.
- antivibratoire 122.
- apériodique 246, 311.
- atténuateur 93, 137, 139, 230, 317, 333.

B

- Bessel 206, 211, 215, 217, 221.
- bi-amplification 13, 134, 137, 142, 200, 315.
- bi-câblage 13, 134, 135, 137, 142.
- bidirectionnel 70, 75, 76.
- bilan acoustique 12, 82, 85, 87, 92.
- bitumineux 230.
- blindage 104, 107, 109, 112, 114, 117, 129, 136, 335.
- bobine 114, 131, 136, 144, 147, 155, 162, 197, 203, 208, 232, 245, 301, 308.
- bouclage 44, 93, 97, 259.
- boucle de masse 96, 98, 104, 108, 178, 260, 320.
- bruit de fond 35, 37, 45, 93, 102, 246, 255, 295, 314.
- bruit de transition 54, 55, 162, 234.
- bruits couplés 45, 46, 93, 142.
- bruits dynamiques 45.
- bruits induits 45, 46, 116, 129, 309, 314.
- bruits statiques 45.
- Butterworth 162, 164, 206, 211, 216, 221.

C

- CAAD 167.
- câble haut-parleur 13, 133 à 136, 137, 138, 154, 201.
- cache-noyau 144, 158, 165, 175, 188.

- caisson Onken-Jensen 174.
 - capacité 46, 94, 104, 110, 133, 151, 226, 328, 337.
 - caractéristiques vibratoires 13, 128.
 - cascode 264, 274, 297.
 - cathode 118, 273, 274, 276, 283, 285, 287, 295, 297, 301, 313, 336.
 - cathode-follower 274, 329.
 - champ diffus 25, 32, 56, 78.
 - champ direct 56, 62, 64, 79, 91, 140, 187.
 - champ magnétique 46, 100, 115, 117, 147, 167, 201, 292.
 - champ proche, lointain 176, 180.
 - champ réverbéré 25, 45, 56, 62, 67, 78.
 - châssis 46, 96, 107, 144, 261, 299, 301.
 - chauffage filament 284, 295, 329.
 - Chebyshev 162, 206, 214, 215, 221.
 - CLIO 166, 219.
 - CMRR 97.
 - cohérence temporelle 51, 53, 61, 177, 202, 214, 219, 222, 229, 317.
 - condensateur 46, 95, 103, 117, 225, 227, 336.
 - condensateur classe X 95, 101, 109, 296.
 - cône 25, 32, 56, 130, 197, 233.
 - configuration 41, 188, 208, 230, 243, 280, 329.
 - conique 121, 181, 189.
 - constante de la salle 80.
 - contre-réaction 14, 43, 61, 107, 178, 229, 231, 253, 294, 327.
 - cordons, câbles de liaison audio 13, 45, 93 à 99, 103, 105, 109, 112 à 116.
 - correction 12, 25, 49, 64, 87, 162, 235, 320.
 - correction active 13, 89, 173, 178, 240.
 - corrélations 58.
 - couplage 12, 45, 93, 153, 182, 194, 229, 230, 265, 316.
 - courant de masse 95, 104.
 - courant de polarisation, d'entrée, de base, de grille 241, 252, 254, 259, 262, 263, 271, 276, 298, 328, 329.
 - courant de repos 224, 241, 257, 265, 273, 283, 286, 330.
 - courant écran 280, 281, 336.
 - courant induit, de Foucault 106, 153, 291.
 - courant pulsé, redressé 46, 95, 105, 243 à 252, 256 à 261, 271, 291, 295, 301, 309, 328.
 - courant(s) consommé, continu 46, 95, 100, 157, 246, 294 à 296, 314, 330, 336.
 - courant(s) modulé, de sortie 43, 233 à 264, 271, 275, 306, 331.
 - crête 35, 93, 94, 188, 208, 226, 243, 322, 338.
 - cuivre OFC 112.
- ## D
- dalle 81, 92, 120, 126, 174, 230.
 - décalage 21, 51, 73, 123, 237, 262, 334.

- découplage 13, 242, 244, 255, 274, 296, 307, 329, 331.
 décroissance 25, 53, 78, 87, 141.
 dégradé harmonique 238, 264, 269, 279, 282, 322.
 délai 56, 62, 133, 214, 240, 320.
 densité d'écoute 28, 32.
 déphasage 13, 55, 58, 106, 182, 206, 228, 231, 255, 272, 277, 320.
 déphaseur 14, 273, 276, 279, 293, 327, 338.
 diagonale 64, 70, 140.
 diagramme niveau-fréquence-temps 47, 53, 150, 167, 182.
 diélectrique 106, 109, 117, 227, 248, 267, 271, 335.
 différentiel 94, 96, 102, 237, 262, 306.
 diffusion 23, 31, 72, 87, 129, 182, 186, 198, 242, 272.
 diode 95, 101, 245, 248, 255 à 258, 264, 270, 284, 298, 301, 309 à 314, 331.
 directivité 12, 62, 79, 94, 141, 158, 196, 211.
 distance critique 12, 78, 80, 82, 140, 186, 281.
 Doppler 149.
 double-C 287, 292, 298, 303.
 double-triode ECC82/83/88 326, 327, 330.
 droite de charge 273, 306, 308.
 dynamique 12, 17, 23, 45, 54, 85, 93, 114, 142, 181, 230, 262, 285, 319, 334.
- E**
 échogramme 55, 56, 66, 67.
 effet de masque 52, 59.
 effet de mémoire 45, 106, 111, 124, 201, 227, 263.
 effet Haas 56, 63.
 enceinte 10, 17, 25, 32, 68, 86, 94, 125, 127, 136, 139, 179, 230, 242, 316, 318.
 énergie 12, 25, 32, 40, 47, 58, 78, 117, 140, 143, 184, 226, 245, 325.
 entrefer 105, 144, 153, 268, 277, 330.
 espace 12, 18, 19, 21, 47, 62, 91, 121, 140, 156, 177, 230, 254, 287, 321.
 étage d'entrée 111, 237, 239, 260, 263, 280, 284.
 étage de sortie 95, 105, 133, 224, 231, 261, 278, 294, 317, 328.
 étalement 32, 53, 58, 63, 142, 188, 196, 208.
 Event 173.
 excitation 119, 140, 157.
 excursion 13, 45, 132, 149, 182, 232, 274, 305, 340.
 exponentiel 156, 161, 189, 191, 192, 194, 196.
 Eyring-Millington 80, 81, 86.
- F**
 facteur de force BL 153, 167.
 ferrite 100, 109, 144, 157.
 FET 241, 242, 263, 270, 328.
 feutre 128.
 filtrage en Pi 248, 255, 256, 284, 295, 296, 298, 301, 304, 307, 311.
- filtre (passe-bas, passe-haut) 209, 210, 215, 229, 275, 321.
 filtre actif 94, 101, 139, 178, 214, 219, 229, 258, 320, 334.
 filtre en double-Té 179.
 filtre secteur 13, 97, 98, 100, 108.
 filtres (ordre) 102, 213, 214, 216, 288.
 focalisation 25, 55, 85, 141, 256.
 fonction globale 40, 41.
 fondamental 11, 12, 47, 48, 52, 54, 143.
 formule d'expansion 189, 193.
 fréquence de coupure 13, 143, 151, 158, 159, 162, 183, 237, 262, 320.
 fréquence de résonance 64, 74, 112, 173, 190, 308.
 fréquence de transition 78.
 fréquentielle 12, 25, 47, 49, 59, 142, 176, 288, 320.
 Fresnel 206, 207.
 front 56, 58, 132, 191, 196, 198, 220, 280.
- G**
 gain (boucle ouverte, fermée) 179, 235, 260, 327.
 gain direct 93.
 grave 13, 20, 25, 47, 65, 143, 165, 240, 315, 320.
 grille-écran 280, 285.
- H**
 harmonique 47, 51, 52, 53, 88, 95, 106, 142, 152, 207, 236, 252, 282, 301, 322.
 haute-tension 301.
 hauteur 25, 28, 57, 64, 174, 181, 196.
 haut-parleur 13, 30, 48, 62, 124, 131, 143, 156, 186, 201, 229, 304, 316.
 hyperbolique 192, 194, 199.
 hystérésis 226, 289, 291, 292.
- I**
 identification 29, 38, 55, 276, 294, 322.
 impédance 14, 94, 96, 104, 110, 112, 131, 146, 157, 162, 196, 201, 223, 224, 251, 268, 279, 304, 316, 327, 330, 338.
 impédance commune 14, 46, 133, 134, 242, 243, 295, 328.
 impédancemètre 165.
 impulsion 50, 66, 90, 95, 207, 310.
 inductance primaire 269, 288, 290, 292, 338.
 instabilité 26, 46, 120, 236, 255, 264, 275, 329.
 intention 10, 16, 23, 28, 31, 33, 40, 152, 183, 272, 339.
 interférence 45, 89, 190, 210, 316.
 isolation 23, 67, 73, 82, 94, 301, 332.
 isolement galvanique 13, 100, 104, 106.
- J**
 joint 77, 111, 124, 144, 211, 301, 335.
- K**
 Kanéda 11, 178, 237, 255, 263, 264, 320.
- L**
 laine de verre 172, 181.
 large-bande 135, 183, 200, 202.

- Larsen 44, 93.
 Leq 50.
 liège 83, 86, 92, 121, 128, 172, 199.
 limitations 12, 22, 26, 28, 40, 44, 50, 60, 62, 93, 126, 135, 142, 147, 200, 239, 269, 271, 293, 317.
 linéarité 40, 47, 143, 151, 183, 223, 293, 294, 328.
 Linkwitz-Riley 206, 211, 217, 221.
 lobes de directivité 13, 158, 185, 189, 211.
 localisation 25, 29, 31, 49, 56, 63, 88, 322.
 longueur d'onde 64, 72, 145, 158, 159, 182, 184, 191, 196, 211.
 Louden 71.
M
 masse 13, 25, 31, 38, 57, 61, 73, 95, 142, 146, 243, 258, 329, 332.
 masse d'air 165, 171, 268.
 matériaux de construction 12, 81, 82, 129, 191.
 matériaux de traitement 82, 186.
 matériel 11, 15, 23, 32, 34, 50, 53, 83, 101, 127, 165, 219, 278, 317, 329.
 matière 19, 50, 59, 115, 151, 184, 204, 270, 291, 341.
 matière d'œuvre 40, 42, 242.
 matière sonore 19, 21, 29, 32, 35, 46, 53, 60, 134, 176, 202, 240, 294, 324.
 médium 31, 48, 66, 80, 114, 136, 182, 195, 197, 199, 223, 285, 308, 315.
 mélodique 28, 34, 53, 54, 59.
 mélomane 12, 16, 27, 32, 34, 144.
 membrane 13, 45, 73, 89, 118, 131, 132, 137, 159, 182, 233, 317.
 microphone 50, 54, 91, 107, 131, 176, 219, 231.
 microphonique 13, 44, 51, 93, 115, 131, 132, 142, 206, 271, 335.
 miroir 23, 25, 92.
 miroir de courant 264.
 mode commun 94, 100, 106, 304.
 mode différentiel 94, 100, 109.
 monotriode 14, 294, 298, 302, 315, 316, 336.
 montage souple 82, 84, 117, 123.
 moteur 37, 132, 143, 153, 189, 191, 222, 227, 228, 340.
 motionnelle 132, 235.
 mouvement 12, 21, 33, 34, 42, 119, 231, 322.
 multiplis 121, 128, 172, 199.
 Mumétal 104, 289, 292.
N
 nanocristallin 292.
 néodyme-fer-bore 153.
 niveau sonore SPL 50, 150, 157, 165.
 noyau 95, 102, 104, 144, 153, 158, 226, 272, 287, 289, 290.
O
 Obersound 74, 83.
 objectif 10, 16, 18, 78, 93, 112, 142, 164, 176, 241, 340.
 octave 65, 119, 146, 150, 159, 161, 177, 236, 317.
 onde directe 25, 45, 55, 56, 79, 176.
 ondes stationnaires 12, 64, 72, 140, 171, 181, 219.
 opposition de phase 52, 74, 90, 117, 177, 211, 298, 303.
 optimisation 13, 78, 93, 141, 142, 158, 162, 189, 214, 230, 271, 317.
 oscillation 105, 120, 163, 235, 254, 277, 288, 311, 338.
 ouïe 29, 39, 48.
P
 panneaux 73, 74, 87, 92, 118, 129, 172, 225.
 panneaux perforés 12, 74, 86, 87, 89.
 papier huilé 101, 109, 227, 267, 287, 329.
 paramètre m, t 193, 198.
 parasite 44, 46, 51, 60, 93, 94, 100, 104, 112, 133, 162, 229, 252, 272, 288, 309, 320, 335.
 parois 31, 44, 62, 64, 82, 90, 118, 124, 158, 161, 172, 181, 196, 198.
 Partridge 290.
 pavillon (cellulaire, replié) 143, 159, 199.
 pentode 14, 273, 274, 275, 278, 336.
 perception 12, 15, 16, 22, 23, 45, 115, 200, 276, 294, 323.
 Permalloy 272, 286, 289, 292.
 perméabilité 104, 155, 226, 288, 289, 291, 292, 294.
 perspective 12, 15, 16, 22, 153, 230, 271, 339.
 perturbation 46, 47, 50, 96, 106, 127, 235, 251, 262, 337.
 phase 29, 52, 74, 89, 91, 100, 141, 183, 196, 201, 206, 208, 214, 222, 233, 262, 292, 304, 327.
 philosophie 11, 15, 16, 176, 241, 270, 311, 340.
 piètement 125, 126, 140, 230.
 plafond 63, 70, 71, 81, 82, 89, 140, 161, 173, 308.
 plaque 118, 127, 129, 130, 144, 153, 156, 172, 273, 303, 305, 315, 330.
 plaque de champ 144, 153, 197, 213.
 point de repos 273, 295, 306, 329.
 pointes 120, 123, 126, 130, 252, 310, 337.
 polypropylène 17, 101, 109, 111, 146, 227, 255, 267, 284, 296, 330.
 portes persiennées 83, 140.
 positionnement 13, 75, 139, 140, 230, 324, 341.
 prise de son 17, 20, 53, 78, 107, 142, 256, 341.
 proportions 12, 71, 92, 171, 237, 289.
 proximité 20, 49, 62, 93, 110, 150, 317.
 pseudo-triode 273, 275, 279, 280, 285.
 puissance 18, 33, 45, 101, 143, 147, 192, 223, 258, 276, 316.
 puissance mécanique 144, 150.
 push-pull 14, 240, 243, 265, 272, 273, 283, 310, 315.

- Q**
quadripôle 231, 232, 233.
- R**
rayonnement 65, 80, 90, 106, 140, 158, 165, 171, 177, 184, 200, 260.
réalisme 11, 14, 19, 25, 50, 112, 134, 200, 226, 264, 320.
réaliste 18, 20, 39, 45, 62, 136, 142, 204, 230, 270, 323.
recouvrement 113, 185, 248, 309.
référence 14, 17, 48, 95, 157, 201, 238, 291, 326.
reflet 12, 22, 23, 26, 44, 63, 88, 139, 224.
réflexions 84, 88, 89, 158, 176, 184.
réflexions précoces 56, 62, 67.
réflexions secondaires 63.
régime stable 52, 207.
réglages 19, 41, 138, 166, 200, 203, 221, 317, 337.
régulateur 14, 236, 245, 251, 252, 297, 330.
relief 19, 23, 24, 51, 68, 72, 210, 327.
rendement 13, 45, 122, 138, 143, 145, 160, 202, 232, 246, 268, 278, 308, 321.
renforts 172, 181.
réponse à un échelon 152, 254, 312.
réponse en fréquence 18, 47, 49, 70, 90, 132, 151, 176, 196, 206, 209.
reproduction 12, 15, 20, 22, 31, 41, 59, 78, 95, 141, 147, 199, 323, 339.
résistances 46, 95, 110, 115, 154, 200, 223, 257, 266, 283, 310.
résonance 12, 29, 43, 54, 64, 66, 76, 90, 120, 156, 171, 199, 254, 308, 324.
résonateur de Helmholtz 73, 74.
ressort 66, 112, 119, 120, 124, 127, 130.
réverbération 78, 80, 82, 86, 132, 230, 286, 322.
rideaux 83, 86, 87, 181.
rigidité 13, 112, 119, 121, 129, 130, 146, 156, 171, 227, 325.
Riken 267, 293, 295, 301, 333.
- S**
Sabine W. 80, 81.
samarium-cobalt 153.
saturation 47, 100, 117, 147, 150, 226, 264, 288, 292, 309.
Schroeder (diffuseur) 89.
self 100, 102, 103, 115, 154, 166, 203, 223, 226, 228, 246, 256, 267, 295, 317.
sensibilité 16, 22, 27, 48, 93, 119, 137, 146, 147, 160, 182, 203, 227, 307, 315, 317, 321, 324, 337.
sensorielle 21, 23, 32.
seuil d'audition 25, 35, 48, 78, 79.
silence 12, 26, 28, 31, 33, 46, 59, 93, 286, 301, 323, 339.
simple-étage (single-ended) 14, 280, 287, 294, 308, 329.
Snyder 166, 167.
sol 29, 36, 63, 66, 75, 82, 92, 123, 185.
sonagramme 53, 54, 55.
sonomètre 48, 50, 66, 148, 177, 317.
source 12, 25, 29, 31, 32, 41, 46, 55, 58, 62, 88, 105, 150, 182, 263, 318.
spectre 49, 54, 94, 151, 183, 241, 270, 291, 323.
spider 144.
SPL 177.
SRPP 14, 273, 274, 295, 303, 323.
stabilisateur 256, 260, 295, 301, 329, 331.
stabilité 14, 42, 88, 121, 243, 277, 329.
subjective 11, 21, 32, 44, 49, 69, 161, 225, 262, 321.
support 24, 28, 41, 42, 118, 125, 144, 200, 281, 313, 335.
suspension 46, 119, 120, 121, 144, 149, 157, 232, 335.
symétrique 100, 106, 159, 218, 294, 329.
- T**
tantale 267, 295, 301.
Téflon (PTFE) 17, 111, 113, 117, 228, 278, 294.
temporelle 12, 25, 31, 33, 42, 51, 59, 122, 142, 159, 162, 177, 202, 229, 288, 316.
- temps d'établissement 47, 140, 142, 159, 164, 202.
temps d'intégration 50, 54.
temps de propagation de groupe 220, 221.
temps de réverbération 56, 77, 80, 88, 92.
tension 43, 94, 95, 112, 133, 163, 204, 231, 246, 251, 273, 284, 295, 304, 331, 336.
terre 13, 37, 92, 94, 96, 107, 153, 293, 332.
tétrode à faisceau dirigé 278, 280, 281.
Thiele et Small 157, 162, 165, 167.
Ticonal 153, 341.
traînage 50, 51, 52, 54, 61, 74, 137, 142, 154, 162, 164, 188, 208, 307, 316, 319.
transformateur de liaison 105.
transformateur de sortie 14, 105, 179, 224, 235, 268, 271, 287, 295, 317.
transformateur symétriseur 107, 108, 142.
transistor 14, 94, 136, 223, 237, 253, 262, 325.
transitoire 29, 45, 53, 54, 70, 85, 91, 103, 146, 207, 235, 301.
tri-amplification 200.
tridimensionnel 53, 54, 64, 70, 75, 323.
triode 61, 142, 272, 273, 279, 304, 306.
tubes (NOS) 324.
tweeter 80, 141, 182, 184, 185, 191, 196, 201, 203, 230, 315.
- U**
ultra-linéaire 14, 273, 279, 281, 283, 304, 315.
- V**
valeur ajoutée 41.
valves redresseuses 309, 312, 314.
vibrations (parasites) 112, 118, 120, 126, 142, 171, 201, 219, 227.
vitesse 13, 38, 68, 109, 129, 132, 171, 175, 198, 221, 233, 271, 307.
voie (solide, aérienne) 13, 45, 117, 119, 127, 227.
volume 13, 20, 26, 64, 125, 173, 227, 262, 319, 333.

Traité de paléo-électronique

TOUT CE QUE VOUS AVEZ TOUJOURS VOULU SAVOIR SUR LES

TUBES AUDIO anciens & récents

FRANCIS IBRE

elektor

ELEKTOR | PUBLITRONIC

ISBN 978-2-86661-155-2 - Taille : 128 pages en couleur 17 x 23,5 cm

Informations complémentaires sur www.elektor.fr/NOS

GERMAIN DUTHEIL

RÉPARER, RESTAURER ET AMÉLIORER LES AMPLIFICATEURS à TUBES

PUBLITRONIC

van der Veen

AMPLIFICATEURS à TUBES

de 10 W à 100 W

PUBLITRONIC/ELEKTOR

Peter Dieleman

théorie & pratique des amplificateurs audio à tubes

ELEKTOR

OUVRAGES DISPONIBLES EN
LIBRAIRIE OU CHEZ CERTAINS
REVENDEURS DE COMPOSANTS

WWW.ELEKTOR.FR

EXCELLENCE AUDIO

COMPILATION
ELEKTOR

CIRCUITS ANALOGIQUES & NUMÉRIQUES
à SEMI-CONDUCTEURS & à TUBES

SONO la technique des pros

Michael Ebner

Publitrone

avec CD-ROM offert

B. Grel & W. Sheets

ÉMETTEURS HF DE FAIBLE PUISSANCE

282 pages : Schémas, circuits imprimés,
liste de composants, explications et instructions
détaillées pour le montage & la réglage
d'une vingtaine d'émetteurs

Publitrone

Jim E. Fagan

COMPRENDRE ET UTILISER L'ÉLECTRONIQUE DES HAUTES-FRÉQUENCES

DE LA GÉNÈSE À LA RADIOASTRONOMIE
PRINCIPES ET APPLICATIONS

Benoit Bouchez

comprendre, maîtriser et réaliser soi-même :

éclairage de scène automatisé et commande DMX

Publitrone / Elektor

Applications numériques des DSP

Publitrone

avec CD-ROM offert

bien entendu

itinéraire d'un **audiophile** *francis ibre*

Pour vous faire une idée de ce que vaut votre chaîne haute-fidélité, c'est au concert qu'il faut aller. Un concert acoustique de préférence, sans sono, peu importe le genre de musique, pourvu que ce soient de vrais musiciens. Ecoutez-les bien, ne craignez pas de fermer les yeux, rentrez chez vous et comparez. Puis lisez ce livre.

Ceci est incontestablement un ouvrage technique, mais de la technique pour les oreilles. Car la musique ne se réduit pas à un paquet de bits comprimés jusqu'à la caricature, téléchargé furtivement pour l'écouter ensuite en *surround Dolby* *dolby*.

La musique naît d'une alchimie subtile entre qui la fait et qui l'écoute. Entre eux, neuf cent quatre-vingt-dix neuf fois sur mille, il y a un fossé. Un abîme même. Enjambé par toutes sortes de ponts, que par commodité on appelle **CHAÎNES HAUTE-FIDÉLITÉ**. Souvent des *boulets de basse-infidélité*.

Ce livre enchante. L'auteur, pour commencer, analyse l'acte d'écouter. Il fonde ainsi son approche globale du lieu d'écoute sur une philosophie qui le guidera tout au long de son itinéraire de dix chapitres. A quoi bon s'intéresser au matériel, en effet, si l'on néglige le milieu dans lequel il est sensé faire des merveilles ? C'est au huitième chapitre qu'on aborde les enceintes acoustiques pour elles-mêmes. Une centaine de pages y sont consacrées. Il reste une autre centaine de pages rien que pour l'électronique, à tubes bien sûr. Ce qui vous fait trois livres en un seul.

Présentation du livre par l'auteur

«La première fois que j'ai écouté de près un quartet de jazz en scène, j'ai été surpris et enchanté par la sonorité de la batterie. De retour à la maison, la déception fut énorme : ma chaîne Hi-Fi, que je croyais excellente, était en fait incapable de restituer la force de ces impacts sans en compromettre la légèreté. Du moelleux de la grosse caisse il ne restait que des bourdonnements. De la fulgurance des cymbales, une bouillie chuintante. Ma chaîne n'était pourtant pas en panne... Les sons étaient là, mais comme ramollis. J'avais des sonorités mais pas de musique, des notes mais pas d'expression. Il ne restait presque rien de la vivacité du geste.

Que manquait-il donc ?

Il m'aura fallu plusieurs années d'un itinéraire tourmenté pour glaner quelques éléments de réponse à cette vaste question. Ce cheminement m'a conduit vers les haut-parleurs à pavillons, puis vers les lampes triodes, que je regardais jusqu'alors d'un œil amusé. Je suis devenu audiophile passionné, ni nostalgique, ni rétrograde.

Aux amis qui me demandent un conseil technique, je parle d'abord de philosophie. A celui qui me demande un câble, je propose une enceinte à pavillon. Et pour l'aider à franchir le pas, je lui propose mon aide. A force, j'ai fini par réunir de quoi écrire cet ouvrage, sans autre ambition que susciter la réflexion, et peut-être quelques vocations. »

www.elektor.fr/BienEntendu/

2^e édition

revue & augmentée par l'auteur

ISBN 978-2-86661-161-3

