

N°30 NOUVELLE SÉRIE 17<sup>e</sup> ANNÉE

HAUTE FIDÉLITÉ PLUS!

## NAGUERE

Le phonographe



**CLASSIQUE :**  
LES GRANDS DISQUES DE  
CES DEUX DERNIERS MOIS



**JAZZ :**  
L'INFINIE DIVERSITÉ DU JAZZ

M 2569 - 90 - 58,00 F.-R)



### ● MONTAGES A TUBES

LA TRIODE DU SIECLE  
UTILISATION OPTIMALE DE  
LA TRIODE 300 B

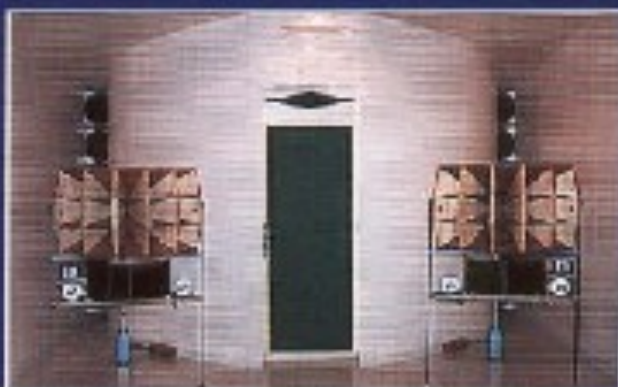
● **THEORIES :**  
CHRONIQUE D'UNE OPTIMISATION  
SOUS CONTRAINTES (4<sup>e</sup> PARTIE)

● **POINT DE VUE**  
DISTORSION THERMIQUE,  
MEMOIRE DES ISOLANTS ET  
LA VOIE THERMIQUE

● **SON CINEMA**  
L'AVENIR DU SON NUMERIQUE  
AU CINEMA

## AUDITORIUM

UNE INSTALLATION EXEMPLAIRE



**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**

## UNE INSTALLATION EXEMPLAIRE

Marcel Roggero



*es descriptions dans la presse et ouvrages spécialisés*

*L'Audiophile, La Revue du Son, les revues japonaises, les livres de M. Jean Hiraga, parmi d'autres de grands auditoriums privés, comme des performances de telles réalisations, ont fait l'objet de notre attention passionnée.*

*Audiophiles "inconditionnels" depuis toujours, ayant acquis sans prétention aucune une bonne expérience, nous rêvions depuis des années de parvenir un jour à nous lancer dans l'élaboration, à tous les niveaux, d'une salle construite à des fins exclusivement audiophiles.*

Parmi les systèmes de référence décrits, les capacités des installations intégrales à pavillons (y compris pour la voie grave) nous avaient impressionnés. Nous précisons plus loin nos critères de choix en faveur d'une telle solution, pourtant lourde à tous points de vue.

Au fil du temps, nous avons intensément réfléchi aux multiples problèmes - souvent emmêlés et contradictoires - inhérents à la faisabilité d'une pareille entreprise. Ce travail patient débute par un long processus de documentation,

de compilation de données fournies par la bibliographie, par les articles techniques, les ouvrages de référence, les conseils précieux de techniciens éclairés..., avant d'en arriver aux premières esquisses du projet, que l'on affine ensuite pas à pas.

Dès le départ comme en cours de route, il faut trancher et opérer des choix déterminants. Notamment, en fonction des dimensions (donc du volume) réalisables, non seulement "quel système" mais aussi quelles adaptations à ce système implique-

t-on logiquement ? Nous l'avons vu, notre préférence en faveur des pavillons était acquise ; les dimensions de salle auxquelles nous arrivions nous ont confirmés dans notre détermination. Cet auditorium devait au surplus être construit de "A à Z", raison majeure supplémentaire à entreprendre de grands pavillons de grave/extrême-grave intégrés à la construction de tout l'ensemble.

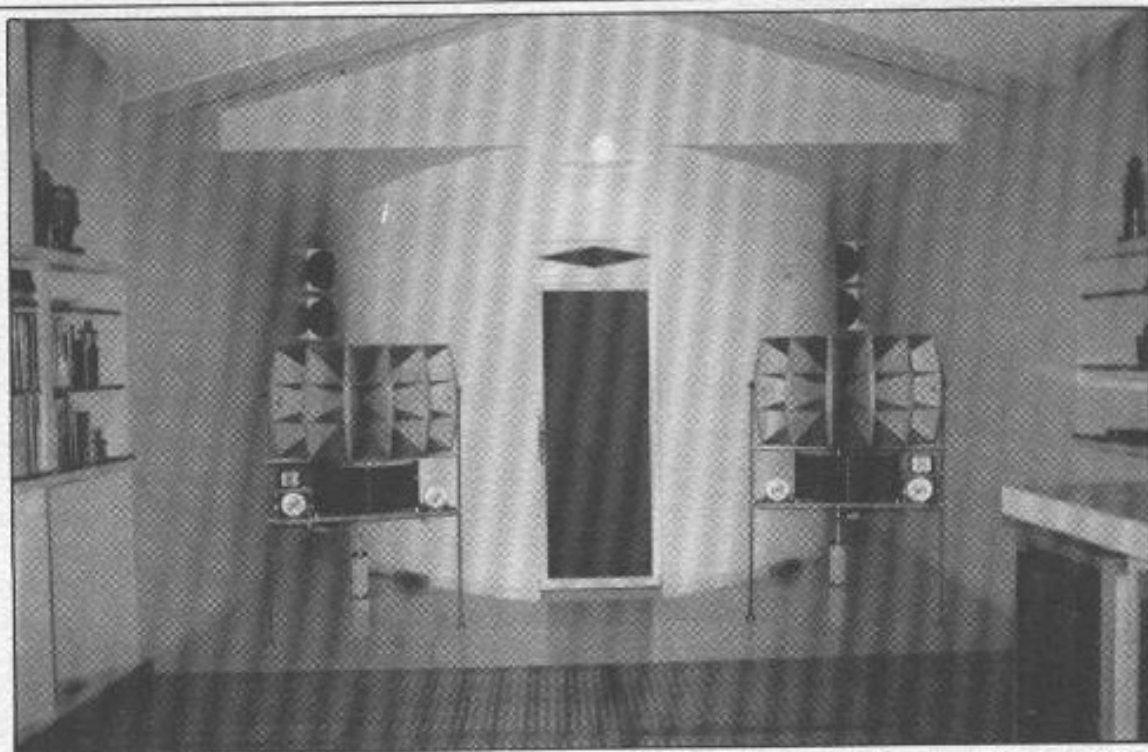
Dans ce qui suit, nous n'allons pas nous apesantir sur les problèmes techniques liés à la construction, à la résistance des

## A propos de cette installation

Jean Hiraga

*Les différents maillons composant une installation haute-fidélité ont fait l'objet d'améliorations considérables au cours de ce siècle. La poursuite de performances de plus en plus poussées dans ce domaine est à l'origine d'une génération de maillons baptisés haut de gamme qui sont le reflet d'une technologie avancée, de recherches qui se sont parfois étendues sur plusieurs années sans impératifs de prix. Or, comme on le sait, il ne suffit pas d'associer les meilleurs d'entre eux pour se constituer la "meilleure chaîne du monde". Encore faut-il y ajouter une expérience, un savoir-faire indispensables à la réussite d'une association donnée d'éléments. Cependant, tous les vrais "mordus" de l'audio savent que les meilleures électroniques ne peuvent donner leur pleine mesure qu'à partir d'un système de haut-parleurs extrêmement performants associés à une acoustique quasi-idéale. Ces installations existent. Elles sont rares, parfois remarquablement bien optimisées et font de temps à autre l'objet de descriptions dans les revues spécialisées. Elles impliquent, à de rares exceptions près, la réalisation complète de l'auditorium à partir de données acoustiques précises. De ce fait, elles peuvent exclure toute considération d'ordre esthétique. Le sol en marbre, l'immense baie vitrée avec vue sur la mer peuvent être autant d'éléments qui mettront en valeur sur le plan esthétique une superbe paire d'enceintes de haut de gamme mais qui n'auront pour ainsi dire aucune chance de participer à l'élaboration de conditions acoustiques quasi-idéales. Les utilisateurs concernés en sont le plus souvent conscients mais trouveront, exception faite de rares puristes comme M. Marcel Roggéro, mille et une raisons les empêchant de s'engager aussi loin pour, tous comptes faits, "ne remuer que de l'air".*

*Le système de M. Marcel Roggéro est sans doute le plus évolué de tous les systèmes de reproduction sonore haute-fidélité que l'on puisse trouver en France, du moins pour ce qui concerne la philosophie de conception du couple indissociable haut-parleurs-auditorium. Il y a près de 30 ans, entre janvier et octobre 1966, Marcel Roggéro avait déjà dévoilé son étonnant savoir-faire en présentant dans la Revue du Son une série d'articles concernant l'étude d'une chaîne haute-fidélité stéréophonique. Elle atteignait déjà un niveau de perfection pratiquement inconnu à cette époque. Cette longue expérience couvrant tous les aspects relatifs à l'optimisation d'un système très perfectionné a servi en quelque sorte de tremplin à ce passionné incondicional de l'audio pour élaborer, moyennant près de trois années d'efforts, un système hors du commun. Le souci de perfection de chaque petit détail au sein d'un cahier des charges imposant en fait une installation dont la description pourrait s'étendre sur plusieurs centaines de pages. Nous remercions vivement M. Marcel Roggéro pour avoir bien voulu nous la présenter sous une forme condensée.*



*Vue générale du système 4 voies à haut rendement de M. Roggéro. Dans le grave, 6 haut-parleurs de 38 cm alignés verticalement chargent un pavillon parfaitement couplé à la pièce. Au sol, une zone absorbante élimine les réflexions primaires.*



matériaux, ou à l'architecture... Il suffit de savoir qu'en cette matière nous avons veillé à ce que tout soit parfait. Nous soulignerons cependant les points importants liés à l'acoustique.

Par contre, nous tenterons de décrire au mieux la genèse du projet considéré sous l'angle purement audiophile, avec quelques détails annexes pouvant faciliter la compréhension de certaines de nos décisions.

## Contingences - Situation - Premiers critères de choix

Habitant en zone rurale (arrière-pays, Provence-Côte d'Azur), nous bénéficions ici d'un environnement calme. Nous nous trouvons de ce point de vue avantageés par rapport aux situations urbaines que nous avons connues auparavant.

Le terrain de la propriété est "pentu", disposé en espaliers (on dit ici : restanques) successifs. La construction envisagée pouvait se réaliser sur l'un des espaliers, complètement indépendante du restant de la propriété.

La forme de cette parcelle de terrain ne nous imposait pas de limite en longueur ; mais des raisons de commodité ou de sécurité ne nous permettaient pas de dépasser les 7 m environ hors-tout, en largeur. La hauteur ne posait pas de problème, hormis celui d'obtenir un aspect extérieur sobre, discret, bien incorporé dans le site, conforme au caractère de ce qui existait déjà (maison, annexes).

D'emblée, devaient donc être écartées les solutions menant à un aspect extérieur insolite.

Une telle salle doit être suffisamment grande mais ni trop ni pas assez à notre sens. Elle doit présenter d'excellentes conditions de confort : isolation phonique poussée par rapport à l'extérieur, chauffage bien conçu, commodités, ambiance agréable et reposante à l'œil (très important), impression de sé-



*La propriété bénéficie d'un environnement calme. Le terrain se présente sous la forme d'espaliers dits "restanques". L'auditorium est disposé dans le sens de la largeur et son aspect extérieur est bien incorporé au site.*

renité... Tout cela doit être bien entendu coordonné au mieux par rapport aux contingences imposées par les systèmes et le traitement acoustique, élaboré, à implanter.

## Dimensions, proportions

Afin d'éviter au mieux les phénomènes liés aux ondes stationnaires, il est indispensable de veiller, dès le départ, à ce que certaines proportions liant la longueur, la largeur et la hauteur (moyennées) du local soient respectées.

Il existe en cette matière divers rapports de dimensions, calculés ou expérimentés, recommandés par les acousticiens et que l'on appelle parfois les "nombres d'or acoustiques", lesquels n'ont pas de rapport avec leur homologue géométrique.

Parmi ceux-ci, la configuration du terrain nous a fait opter pour la proportion  $1 \times 1,56 \times 2,88$  : elle privilégie plus opportunément que nous souhaitons cette longueur suffisamment proche de la demi-longueur d'onde acoustique de la plus basse fréquence "audible". Nous désirions en effet que le système descende bien dans l'infra-grave,

sans effondrement sensible du rendement vers les 20 Hz. Les lois physiques étant incontournables, nous avons considéré cette question de longueur comme primordiale pour la bonne restitution de la partie inférieure du spectre. Il faut penser qu'à la fréquence 16 Hz, la demi-longueur d'onde est de l'ordre de 10,70 m. Nous verrons plus loin qu'en pratique, certaines astuces de construction permettent de pondérer quelque peu la longueur, donc aussi d'autres cotes, sans nuire à l'extrême-grave.

Partant d'un premier ordre de grandeur et de proportions définies, nous avons ensuite vérifié que le volume de l'auditorium ne tombait pas dans l'excès et se situait dans la moyenne de ce qui s'était déjà réalisé. En ce qui concerne la distance séparant le point d'écoute des sources, il ne faut guère dépasser les 6 m, au-delà desquels l'on constate le phénomène "d'éloignement". En comptant derrière ce recul de 6 m suffisamment "d'aération" et de confort, nous avons estimé nous trouver dans une fourchette convenable en optant pour environ 9 m, auxquels il faut ajouter 1 m d'amortissement ar-

rière, plus les astuces permettant d'allonger acoustiquement le local et d'avoisiner le "Nirvâna" recherché : les 10,50/11 m acoustiques en définitive.

Nous avons donc évité de donner dans "l'immensité" : outre les contingences matérielles, même pour un auditorium sans compromis, une très grande salle multiplie à notre sens les problèmes de correction acoustique.

Les autres dimensions moyennées découlent du rapport choisi : hauteur de l'ordre de 3,40 m (1), largeur de l'ordre de 5,45 m. Nous atteignons pour le local d'écoute un volume de l'ordre de 160 m<sup>3</sup>, moins les corrections acoustiques qui font perdre un peu de place, plus environ 18 m<sup>3</sup> d'amortissement arrière, plus le volume des grands pavillons avoisinant les 12/13 m<sup>3</sup>.

## Forme de la salle

Nous avons parlé de dimensions moyennées car il n'était pas question de réaliser, dès le gros-œuvre de base, des parois parallèles.

Le plafond suit la double inclinaison symétrique par rapport à la faitière : il se présente donc en dièdre, de pente 28% dans le sens de la largeur du bâtiment. C'est une bonne disposition acoustique, bien que certains réalisateurs aient pu concevoir des plafonds inclinés : plus bas du côté des sources, plus haut au fond. Avec un plafond sous dalle continue de toiture, cette dernière alternative est trop téméraire.

Les deux parois latérales au galandage interne font un angle de 3° chacune par rapport à l'axe, d'où un évasement de la salle de 6° ; plus étroit aux sources, plus large au fond.

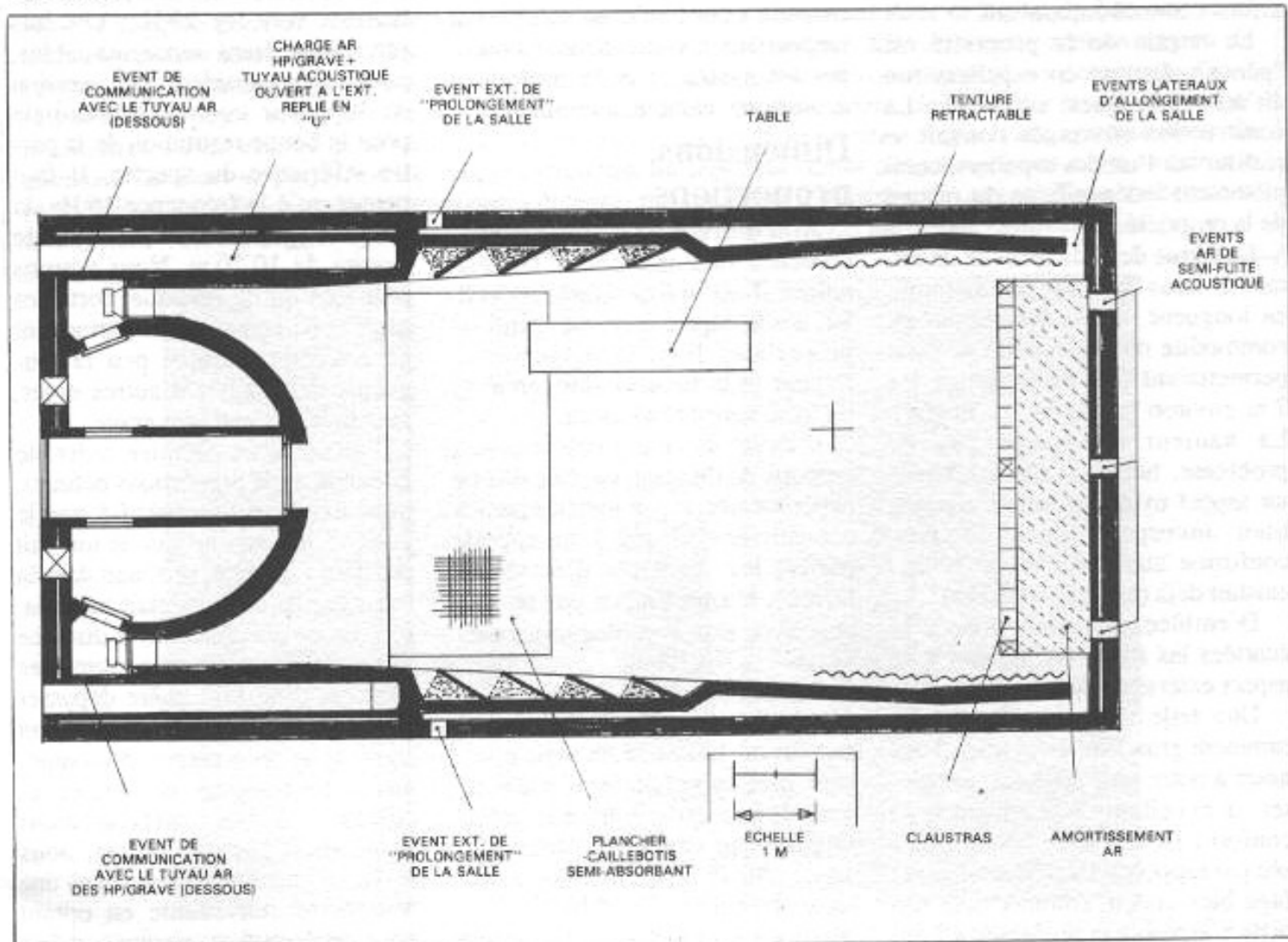
Dans la zone des grands pavillons, le sol réalisé en grands carreaux lisses, est incliné de 5%. Il devient ensuite horizontal pour les 4/5ème suivants de la salle et est raccordé à un plancher en chêne, avec quelques particularités dont il sera question plus loin.

L'évasement apparent modéré des parois de base est ensuite amélioré par les éléments du traitement acoustique, dont la hauteur diminue au fur et à mesure que l'on se rapproche du fond. Nous verrons cette question plus loin.

## Le fond de la salle

Nous traiterons tout d'abord de la forme de la salle, puis du fond de celle-ci avant d'aborder les autres sujets.

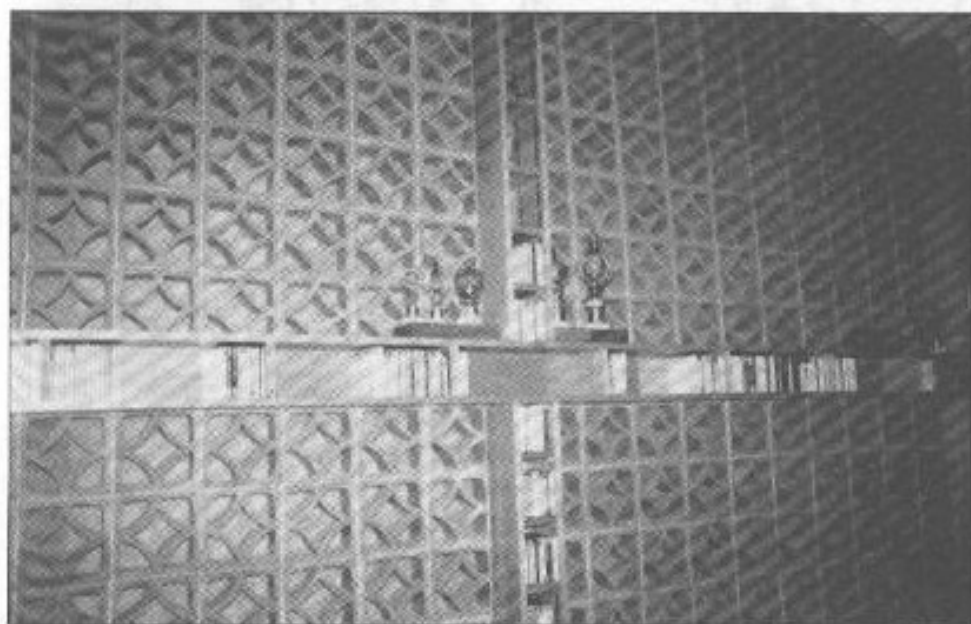
Beaucoup de réalisations pèchent par insuffisance d'amortis-



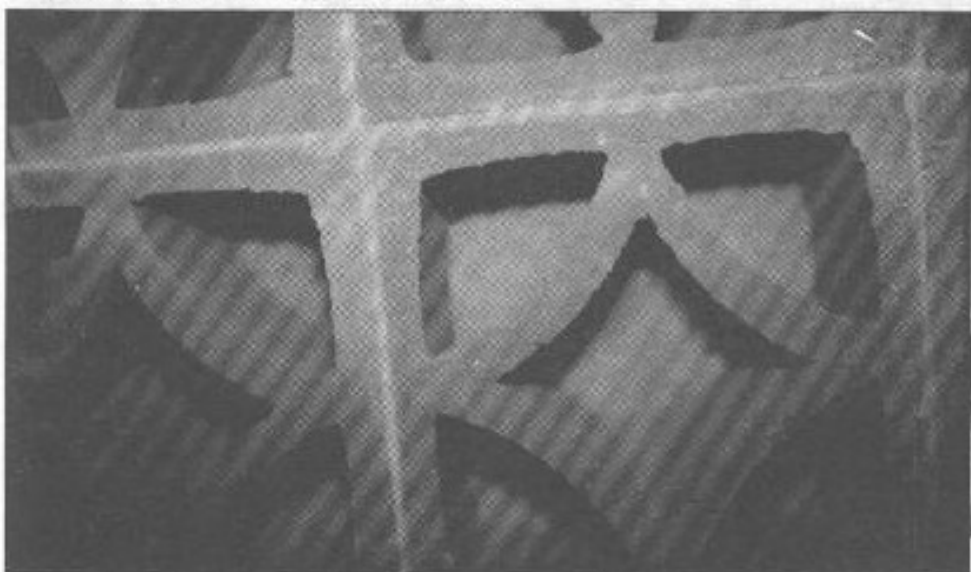
Plan de l'auditorium (dessin de M. Roggéro).



*Fond de la salle fortement absorbant masqué par une paroi acoustiquement transparente.*



*Paroi (claustra) en briques ajourées.*



*Détail d'une brique ajourée laissant entrevoir l'absorbant.*

sement arrière. Plus on descend vers le bas du spectre, plus redoutable devient le retour de l'onde arrière. Les pavillons accentuent ce problème.

Théoriquement, dans l'infra-grave, un amortissement correct requiert un bon nombre de mètres d'épaisseur d'absorbants, ces derniers pouvant être disposés en tranches successives séparées de murs semi-ajourés... Impensable.

Il faut donc tenter de tourner la difficulté par un compromis raisonnable; nous avons "fermé" (visuellement) l'arrière de notre auditorium par un mur intermédiaire de "claustras" (briques ajourées décoratives) fort esthétiques, transparent du point de vue acoustique, monté 0,90 m devant le mur-pignon arrière. Du sol au plafond, ces 0,90 m sont remplis de laine de verre de différentes consistances pour un volume de l'ordre de 15 m<sup>3</sup> de ces matériaux. Il est nécessaire de maintenir cet énorme "paquet" derrière les claustras et latéralement, par de la toile "verrane" type moustiquaire afin d'éviter à la fois poussières, défaut d'esthétique, manque de tenue... tout en maintenant la transparence acoustique.

Le mur-pignon arrière n'est pas étanche, mais percé de quelques événements afin de créer une semi-fuite acoustique vers l'extérieur après traversée de la couche amortissante.

A gauche et à droite, symétriquement, le bloc claustras/absorbants ne rejoint pas les parois latérales, mais laisse un espace de 0,45 m de part et d'autre et du sol au plafond, dans un double but :

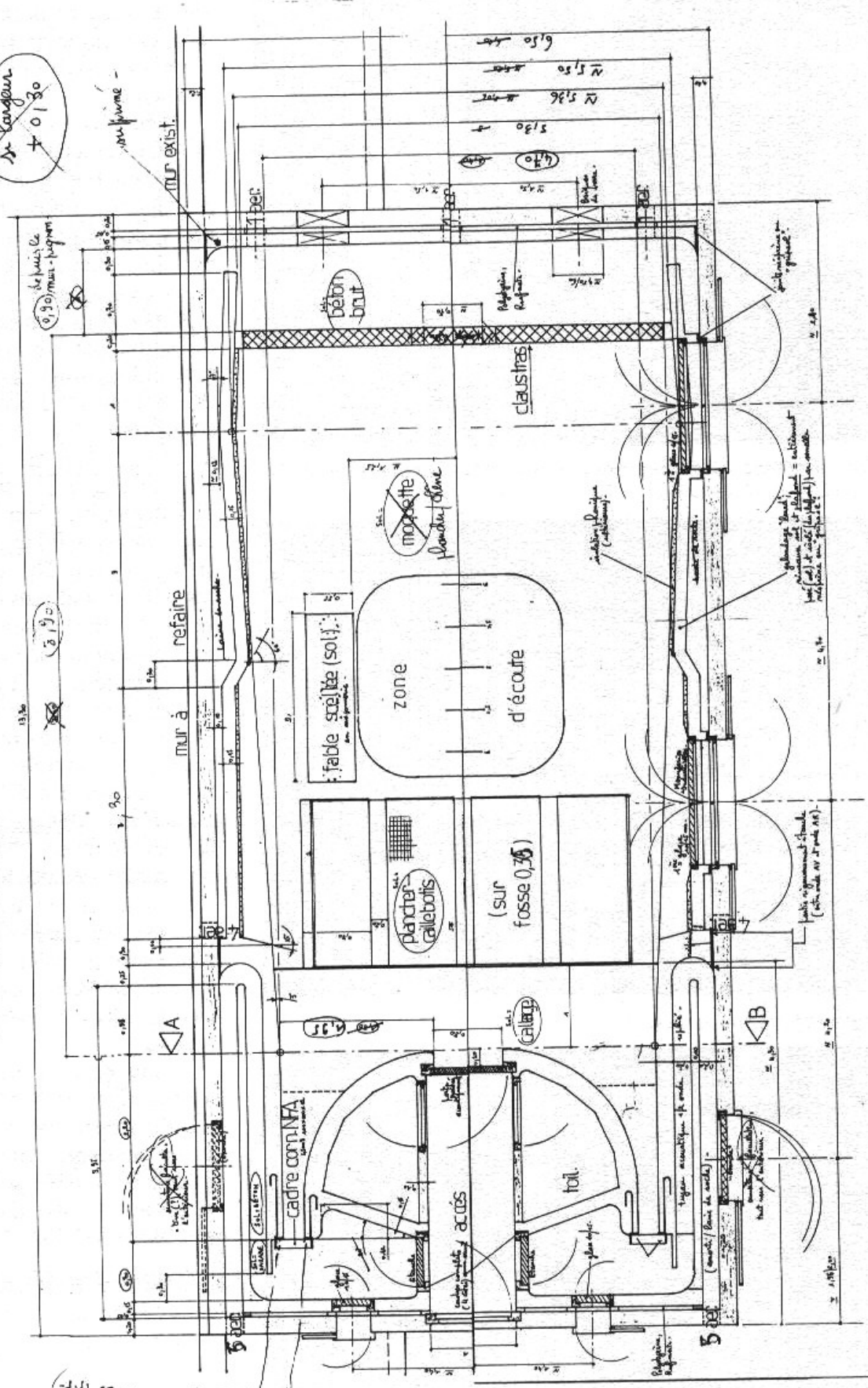
1°) Permettre l'escamotage des tentures latérales arrière de la salle.

2°) Et surtout : à l'aplomb de ces vides latéraux, les lourds galandages déterminant la forme générale (l'évasement) dans le sens longitudinal ne rejoignent pas non plus le mur-pignon du fond. Ils ménagent par rapport à ce dernier, en-

ECHELLE 1/25

de longueur  
+ 0,30

Surface actuelle = 104,47 (+ annexe 48,10) = 152,57 m<sup>2</sup>  
 Surface affectée actuellement = 40,14 m<sup>2</sup>  
 Surface affectée à l'usage = 112,43 m<sup>2</sup>  
 Surface actuelle = 104,47 m<sup>2</sup> (sur plan de l'annexe)  
 Surface actuelle = 112,43 m<sup>2</sup> (sur plan de l'annexe)  
 Surface actuelle = 112,43 m<sup>2</sup> (sur plan de l'annexe)  
 Surface actuelle = 112,43 m<sup>2</sup> (sur plan de l'annexe)



gorge = raincure  
 raincure = raincure  
 raincure = raincure  
 raincure = raincure

MUR EXIST.

P. pour non destinés -

= dalle traditionnelle, clautras =  
 plancher, s. pour...

= dalle "accoustique" (poliquin) - Matériau Sound =  
 dalle (10 cm épaisseur) - Surface plane - Revêtement  
 dalle (10 cm épaisseur) - Revêtement (au sol) - Matériau  
 dalle (10 cm épaisseur) - Revêtement (au sol) - Matériau

Un des plans de la salle (dessin de M. Roggéro).

core du sol au plafond, un évent de 0,30 m à gauche et à droite. L'onde arrière retourne par ces évents dans l'espace (amorti) entre galandage et "boîte" externe, pour ressortir vers l'extérieur par des ouvertures prévues le plus loin possible dans les murs externes de la bâtisse. Cela revient, après une "semi-fuite" créée volontairement dans le mur-pignon après l'absorbant arrière, à créer une sorte de tuyau acoustique rallongeant quelque peu la salle. C'est ce qui permet la relative pondération dont nous avons parlée, dans nos cotes.

## Construction, faisabilité

Parmi les premiers facteurs à considérer pour ce bâtiment, c'est l'isolation phonique par rapport à l'extérieur qui prime, suivie de près par l'isolation thermique, et par les autres éléments de confort.

La toiture (point éminemment sensible) est construite selon la technique de la dalle continue lourde à double pente symétrique, en hourdis creux, longrines précontraintes, et dalle armée. Sur cette dalle est posée une double couche de 2x4 cm de "Roofemate", produit léger, excellent isolant phonique/thermique, et semi-souple. Par-dessus est coulée une deuxième dalle armée et asphaltée, laquelle supporte les tuiles bâties du dessus. Il est ainsi intéressant d'obtenir un "sandwich" constitué de deux dalles lourdes indépendantes séparées par un produit de densité très différente. Le plafond de l'auditorium est donc immédiatement au-dessous de cette structure, au travers de laquelle tout une série de tiges filetées en acier inoxydable a été scellée avant coulage de la dalle principale afin de prévoir la fixation future des corrections acoustiques en plafond.

Notre auditorium est constitué de deux sortes de "boîtes" imbriquées l'une dans l'autre. La première, extérieure, est rectangulaire,

en matériaux traditionnels, et incorpore la structure-support (piliers et poutres en dièdre, murs-pignons extrêmes) de la toiture. La seconde délimite la salle proprement dite, elle est bien plus lourde que la première, parce qu'en majorité construite en pierre de béton pleines de 15 cm jointoyées au mortier, extrêmement denses et granuleuses. Avec les enduits plus le traitement acoustique ultérieur, l'on obtient effectivement un ensemble d'une rigidité à toute épreuve, sans résonances ni vibrations. Il s'agit donc là du "lourd galandage" dont nous avons parlé un peu plus haut.

Pour les parois jugées sensibles (pavillons et annexes), nous avons eu recours à une solution connue : les agglomérés standards creux, en majorité d'épaisseur 20 cm, mais tous montés à l'envers, bourrés de sable fin bien tassé, jointoyés entre eux au mortier, disposés en quinconce assise par assise. Sur des hauteurs de 3,50 m au plus, on obtient des parois absolument inertes même à très haut niveau sonore. Il faut éviter absolument, à ces endroits, le béton armé, trop élastique, quelle que soit son épaisseur.

Et le plancher ? Il doit supporter un poids considérable évidemment. Il est établi sur vide sanitaire (sur les conseils de l'ingénieur du béton), les fondations étant du type "semelles filantes". La base est constituée de hourdis préfabriqués, longrines précontraintes, dalle armée, le tout renforcé et prévu pour charges "industrielles". Sur sa dalle a été coulée une couche d'environ 7 cm de vermiculite (matériau isolant semi-mou). Au-dessus prend place une contre-dallemette armée supportant le réseau de chauffage électrique par le sol. Encore au-dessus, autre dalle supportant carrelage ou plancher en chêne. Tout cet ensemble incorpore aussi les gaines de passage des câbles aux haut-parleurs.

## Correction acoustique au niveau du plancher

Compte tenu des expériences vécues, il faut redouter les réflexions primaires (première réflexion de l'onde provenant des sources contre les parois, interférant avec l'onde directe), qu'il faut absorber dans le sens latéral et vertical entre haut-parleurs et point d'écoute.

Au niveau des parois latérales et du plafond, nous parlerons plus loin des systèmes permettant cette absorption, qui sont communs au système de polarisation de la salle. Ils sont établis en sorte qu'il n'existe pratiquement plus dans cette salle aucune paroi parallèle à une autre.

Par contre, au niveau du sol, il faut concevoir le système dès le début du projet, lors du calcul du plancher. Nous absorbons donc les réflexions au sol au moyen d'une fosse de 35 cm de profondeur sur toute la largeur du local, immédiatement après la zone des pavillons, et sur une longueur de 2 m. Cette cavité est pleine de matériaux absorbants, elle est recouverte d'un plancher/chêne en "caillebotis" semi-transparent du point de vue acoustique, servant de solution de continuité entre le carrelage/pavillons et le plancher en chêne "plein" (voir photographies). Il a donc fallu prévoir à cet endroit un décrochement lors de la construction du plancher préfabriqué de base.

## Le système

Le terme "grand système" quelquefois utilisé s'entend pour la partie grave/extrême-grave, car le volume occupé par de tels pavillons croît vertigineusement en vertu des lois physiques.

Notre choix en faveur des pavillons est motivé par les raisons (bien connues) suivantes :

- Rendement exceptionnel pour du matériel professionnel (ou) parfaitement étudié : en théorie 50%,

en pratique au moins 25% (à comparer avec les autres systèmes ne dépassant jamais les 5%).

- Grand naturel, absence de coloration, directivité parfaitement définie.

- Indépendance des dispositifs entre eux, possibilité de déplacements individuels de sources aux fins de recherche de profondeur des plans ou de réglages de phase.

- Adoption du bas-médium à l'aigu d'amplificateurs de puissances limitées, entre autres mono-triodes.

- Pour le bas du spectre : grave "rapide", sans inertie ni "empatement" de boîte, ample, restitué en majeure partie en fondamentale et non par reconstitution d'harmoniques.

Ce plaidoyer en faveur des pavillons ne nous fait toutefois pas perdre de vue les qualités d'autres systèmes (par exemple électrostatiques). Lesquels pourraient tenir lieu de canaux adjacents en cas de restitution multi-canaux : il faut penser à l'avenir en faisant en sorte qu'un auditorium puisse être modulable, évolutif, versatile dans le temps, dans toute la mesure du possible.

## Les grands pavillons "grave/extrême-grave"

A notre avis, le problème crucial pour de tels pavillons (aussi important que l'étude de leur expansion) est leur raccordement aussi "parfait" que possible à la salle. Cette salle doit "prolonger" l'expansion... En cette matière nous nous trouvons d'emblée en situation de compromis, l'on ne peut que "tenter" d'approcher un idéal inaccessible.

Il faut signaler qu'en réalité, si la réalisation globale est réussie à la suite d'une très sérieuse étude, c'est toujours le couple indissociable **pavillon+salle** qu'il faudra considérer. Les pavillons eux-mêmes constituant le départ - délicat - de l'expansion.



*Plancher avec zone semi-absorbante. Il élimine les réflexions primaires provenant du sol.*



*Détail de la zone semi-absorbante. Une fosse de 40 cm de profondeur remplie d'absorbant est masquée par le plancher ajouré.*

Ce départ délicat est avant tout formé par la zone à haute pression acoustique située entre la gorge et les deux premiers tiers, pratiquement, de la longueur du pavillon proprement dit. Il faut travailler avec grande précision à cet endroit, en fonction de la formule d'expansion choisie.

Nous avons écarté les solutions de pavillons longs (10 m...) amenant le grave inconvénient du

"traînage", au profit de pavillons plus courts, dont l'insuffisance théorique de longueur est compensée par une très grande surface de gorge, d'où découle un périmètre de bouche (ou de surface de bouche) encore réalisable.

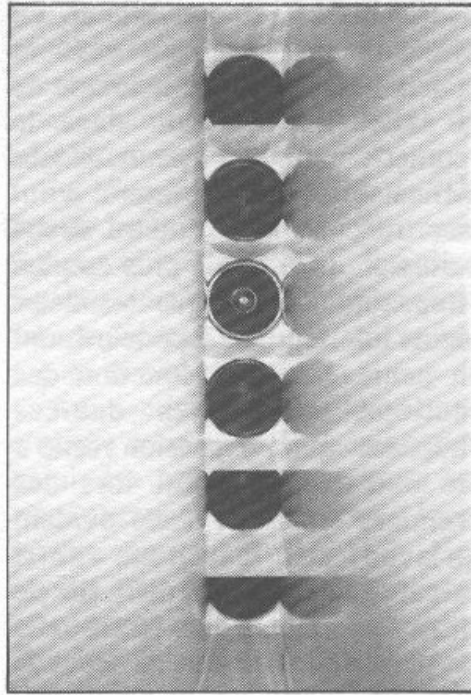
La solution des pavillons verticaux en plafond, en forme de trémie, est excellente. Dans notre cas il aurait fallu construire une sorte de "tour" inesthétique ou bien un

étage sur rez-de-chaussée. Sans compter les coffrages complexes et précis à monter. Il est difficile de dépasser dans ce cas une surface de gorge représentée par 4 H.P. de 38 cm en quadrilatère (c'est le cas du célèbre système de M. Tamaru à Tokyo - NDLR). Nous avons renoncé à cette option.

Finalement, nous avons choisi une alternative "simple" et répondant à ce que nous recherchions : 6 haut-parleurs de 38 cm montés en colonne verticale face à la salle ; parois latérales verticales dissymétriques, l'intérieur est courbe et donne pratiquement l'expansion, l'extérieur est presque rectiligne et prolonge les flancs latéraux de l'auditorium; la paroi inférieure est constituée par le sol, incliné dans cette zone de 5%. La paroi supérieure est une dalle lourde en béton avec 15 cm de sable au-dessus, son inclinaison est de 16,82%. Elle est rectiligne. Pourquoi une pente de 16,82% ? Parce que le calcul de l'expansion nous l'impose. Nous ne pouvions pas dépasser une largeur d'ouverture perpendiculaire à l'axe de la salle de 1,95 m par pavillon. La porte d'entrée se trouve entre les deux pavillons et les sépare.

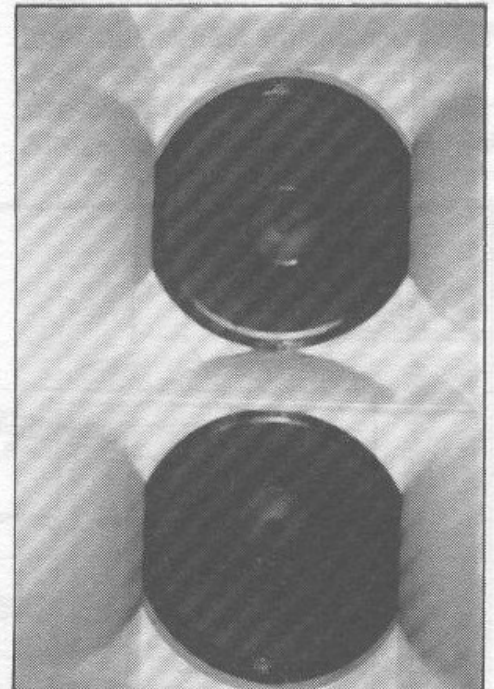
Nous avons déjà décrit la réalisation de parois verticales. Les finitions de surface interne ont été exécutées avec un enduit au mortier riche en sable extra-fin, avec couches successives de mastic poncé, et finition en peinture-laque. La précision a été garantie par un gabarit que nous avons fabriqué. Il a servi symétriquement, par retournement, aux deux pavillons.

A partir de la surface de gorge (plaque en inox, rabotée et fraisée, supportant les H.P.), nous avons fait en sorte que la largeur de gorge (304 mm) masque légèrement les diaphragmes des H.P. en vue d'augmenter le rendement. Sur les premiers 33 cm, l'expansion est obtenue par les 5 séparateurs horizontaux des 6 H.P.

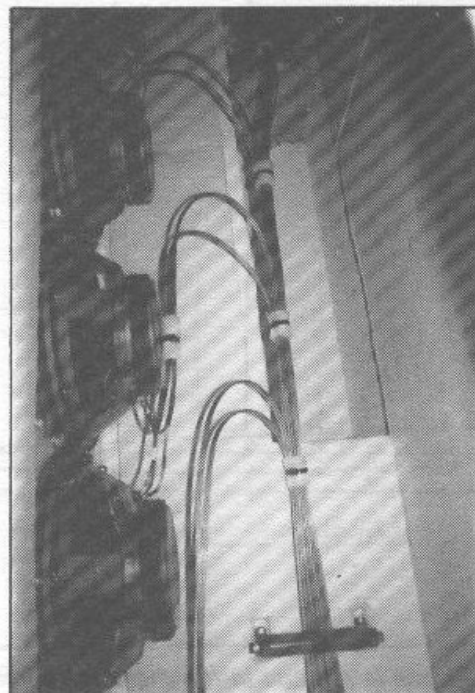


*Les 6 haut-parleurs 38 cm alignés verticalement permettent de réduire très sensiblement la longueur du pavillon et d'éviter ainsi des problèmes de traînage dus aux pavillons trop longs. Les parois latérales forment en plus une continuité avec les murs ainsi qu'avec le pavillon de la voie opposée.*

*Détail des haut-parleurs (les ombres arrondies sur les côtés sont des reflets). Dans le sens vertical, des séparateurs sont disposés entre les haut-parleurs. Les 6 haut-parleurs alignés verticalement forment ainsi une gorge de section rectangulaire.*



*Vue arrière des haut-parleurs montés sur plaque en inox fraisée. La charge arrière communique avec des événements laminaires qui assurent une extension de la réponse en fréquence jusqu'à 20 Hz, sans perte de rendement ni distorsion.*



(duralumin), les deux parois verticales demeurant dans cette zone de parois parallèles constituées de joues métalliques (inox). Cet ensemble est boulonné/soudé/scellé dans la maçonnerie : inébranlable. L'expansion est ensuite poursuivie par les 4 parois s'ouvrant soit en courbe, soit de façon rectiligne et inclinée comme cela a été expliqué. Après finition, il n'est plus possible d'apercevoir de problème de continuité quelconque. Tout est lisse, uniforme, beau...

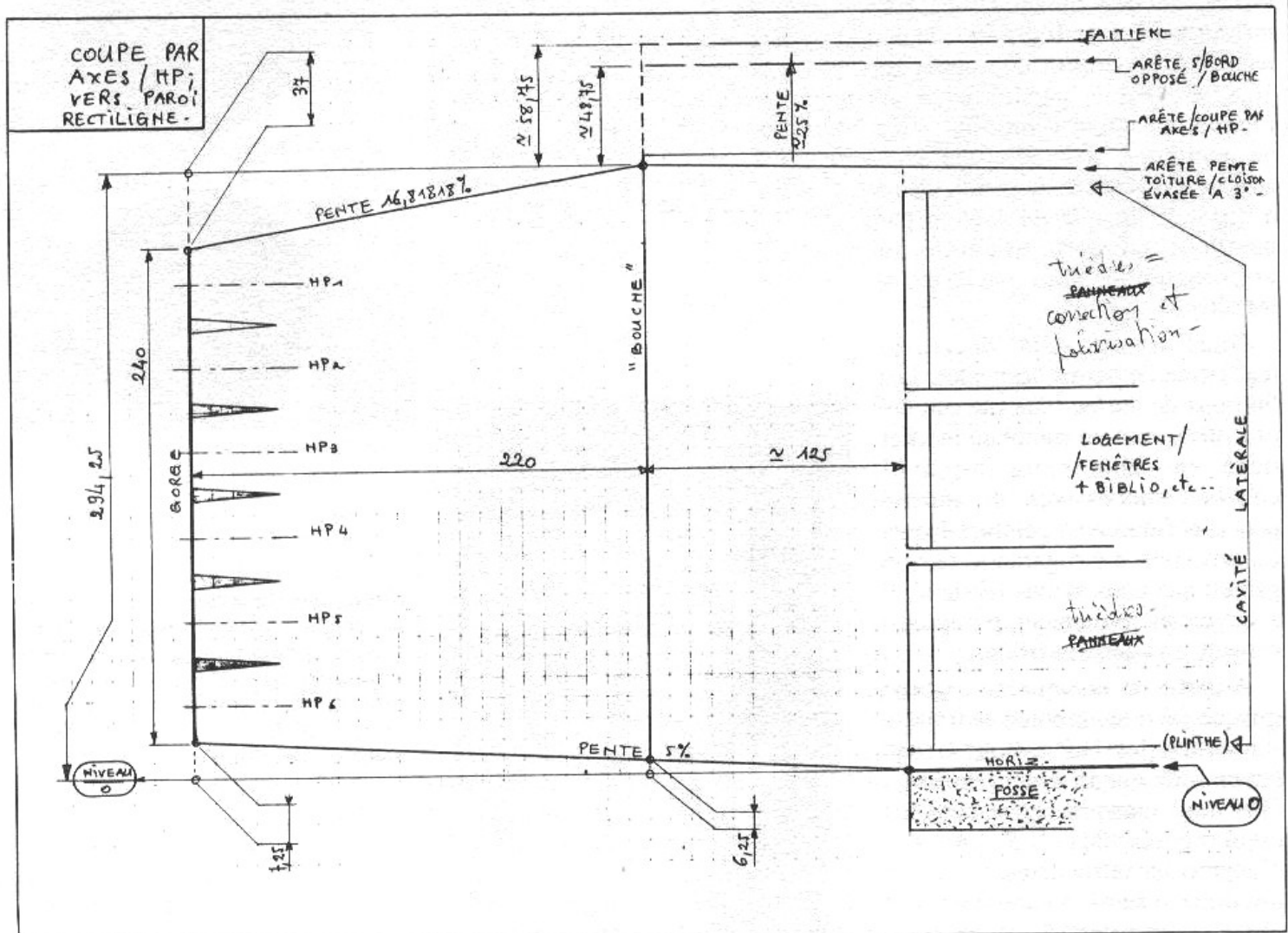
La formule d'expansion est hyperbolique, en raison de la pointe de montée d'impédance acoustique à la fréquence de coupure, avant effondrement du rendement. Pour une telle forme de pavillons dissymétriques, les "plans" d'onde sont en fait pseudo-cylindriques, ils

s'infléchissent et convergent, en avançant de la gorge vers la bouche, vers la partie médiane de la salle. En avançant dans le "cornet", au fur et à mesure de leur inclinaison, ces "plans" vont inscrire dans le périmètre des 4 parois une section de plus en plus "trapézoïdale" puisque les deux parois inférieure et supérieure sont en pente. C'est en fonction des sections successives de ces "trapèzes" que l'expansion réelle a été calculée. En fait, lors des premiers essais, il a été évident qu'avec ces pavillons ainsi calculés, il est très difficile de situer leur embouchure réelle : elle est placée quelque part au début de la salle et ne correspond évidemment à rien sur un plan géométrique bien dessiné. Nous pensons que le périmètre de ces

embouchures réelles doit avoisiner les 13/14 m chacune. Au niveau de la gorge, nous avons  $0,304 \times 2,40 = 0,73 \text{ m}^2$  moins la surface de départ des 5 séparateurs ( $0,106 \text{ m}^2$ ), soit  $0,62 \text{ m}^2$ .

Les H.P. sont des 38 cm Altec 515 "E" : diaphragme léger et rigide avec suspension à petits plis, spécial pour charges à pavillon. Cette version n'est normalement plus fabriquée, elle est dépendante du stock restant de membranes. Nous avons pu les obtenir grâce aux efforts de M. W. Walther, de la Maison de l'Audiophile.

Les six haut-parleurs équipant chaque pavillon de grave ont leurs bobines mobiles en version  $16 \Omega$ , parce que tous montés en parallèle (impédance résultante,  $2,67 \Omega$ ) dans le but d'abaisser encore leur fréquence de résonance. Il faut les



Vue en coupe de la salle, verticalement et dans le sens de la longueur (manuscrit de M. Roggéro).



“rôder” consciencieusement avant de les monter. Le montage est délicat et doit être fait lentement, à la clé dynamométrique. Les bobines mobiles passant dans un entrefer très étroit, il est indispensable de garantir un serrage uniforme.

Nous aurions pu “charger” l’arrière de ces haut-parleurs par un local clos et amorti. C’est ce que l’on fait généralement. Cela aurait été bien dommage.

A l’aplomb des pavillons, vu la forme évasée de la salle, le galandage lourd et la paroi verticale “externe” des pavillons se trouvent à environ 0,50 m du mur de la “boîte” externe de la bâtisse, avec une hauteur libre de l’ordre de 2,80 m : de quoi construire un superbe tuyau acoustique replié en “U” dans le sens vertical, ouvert sur l’extérieur à l’air libre au

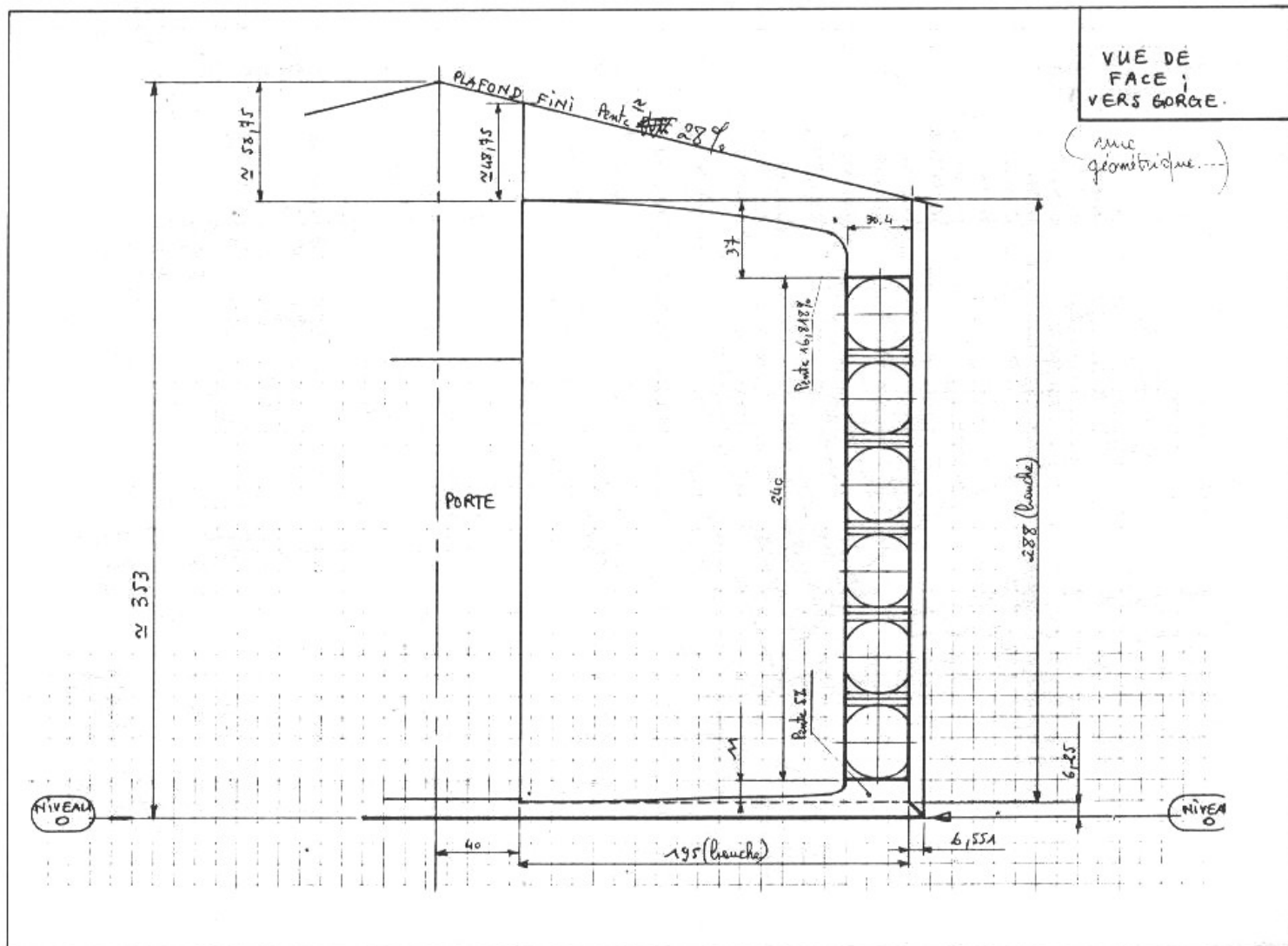
moyen d’un assez grand évent dûment protégé, et avec amortissement progressif : faible du côté/HP, conséquent (mais non tassé) du côté/évent extérieur.

La longueur de ce tuyau en “U” atteint les 9 m plus le local consacré aux H.P. Elle se complète d’un amortissement. La cloison horizontale de séparation du “U” est en béton de 15 cm sablé.

Au rendement des pavillons s’ajoute donc dans l’extrême-grave celui des tuyaux acoustiques arrière, eux-mêmes couplés au local arrière contenant les H.P. Ces tuyaux sont extrêmement efficaces et commencent à agir au-dessous des 40/45Hz. Au-dessus, il ne se passe rien. Au-dessous, la courbe est très amortie et culmine à 18/20 Hz. A 16 Hz, le rendement baisse évidemment, mais demeure

élevé... Les tests sont faciles à faire avec un générateur BF et un simple papier “pelure” à l’aplomb des événements externes.

L’ensemble complet “tuyaux AR+pavillons+salle” descend vraiment très bas dans l’infra-grave, sans qu’il soit possible dans la salle de discerner nettement une fréquence de coupure... Les très basses fréquences sont du reste perçues “musculairement” plus qu’auditivement, même à bon niveau. Nous avons fait des essais de résonance à l’aplomb des événements de retour d’onde AR de la salle, et nous avons été surpris de trouver 15 Hz : la courbe est toujours très amortie et, tout de même à ce poste, l’onde est considérablement atténuée : preuve que l’espace ménagé entre galandages et boîte externe (étroit ici, et haut), plus les



Vue de face d’une voie grave (dessin de M. Roggéro).

évents dans le mur-pignon/AR, jouent un rôle de "frein" très amorti. Enfin aux très basses fréquences, lorsqu'on se déplace dans la salle, on ne perçoit un renforcement relatif de la puissance sonore qu'au fond, sans plus : ce qui est normal.

Enfin, toujours dans le grave/infra-grave, il est intéressant d'observer les diaphragmes des H.P. chargés par l'ensemble et d'augmenter le niveau : l'excursion de ces diaphragmes ne dépasse jamais les 2,5/3 mm à 2x300 W vers 20 Hz. A niveau normal, on ne voit rien : preuve que ces H.P. sont bien chargés. Signalons que le seuil de fatigue auditive (F=100 à 200 Hz) est perçu avec ce système, vers 2x12 W.

Un dernier mot au sujet de l'expansion, qu'il convient d'exagérer quelque peu par rapport à la for-

mule rigoureuse, vers le **dernier tiers** de la longueur au voisinage de la bouche : la salle ne se raccorde jamais idéalement avec les pavillons ; leur section finale est légèrement freinée par les autres systèmes montés coaxialement à l'intérieur de ceux-ci ; il subsiste, quoi que l'on fasse quelques obstacles au niveau de l'embouchure : impondérables de construction, système de correction acoustique et anti-réflexions primaires.

## Le traitement acoustique

Nous souhaitons une salle bien corrigée mais "vivante", conservant une relative brillance : absorbants placés aux bons endroits, mais pas de débauche en la matière, pas de "chambre sourde".

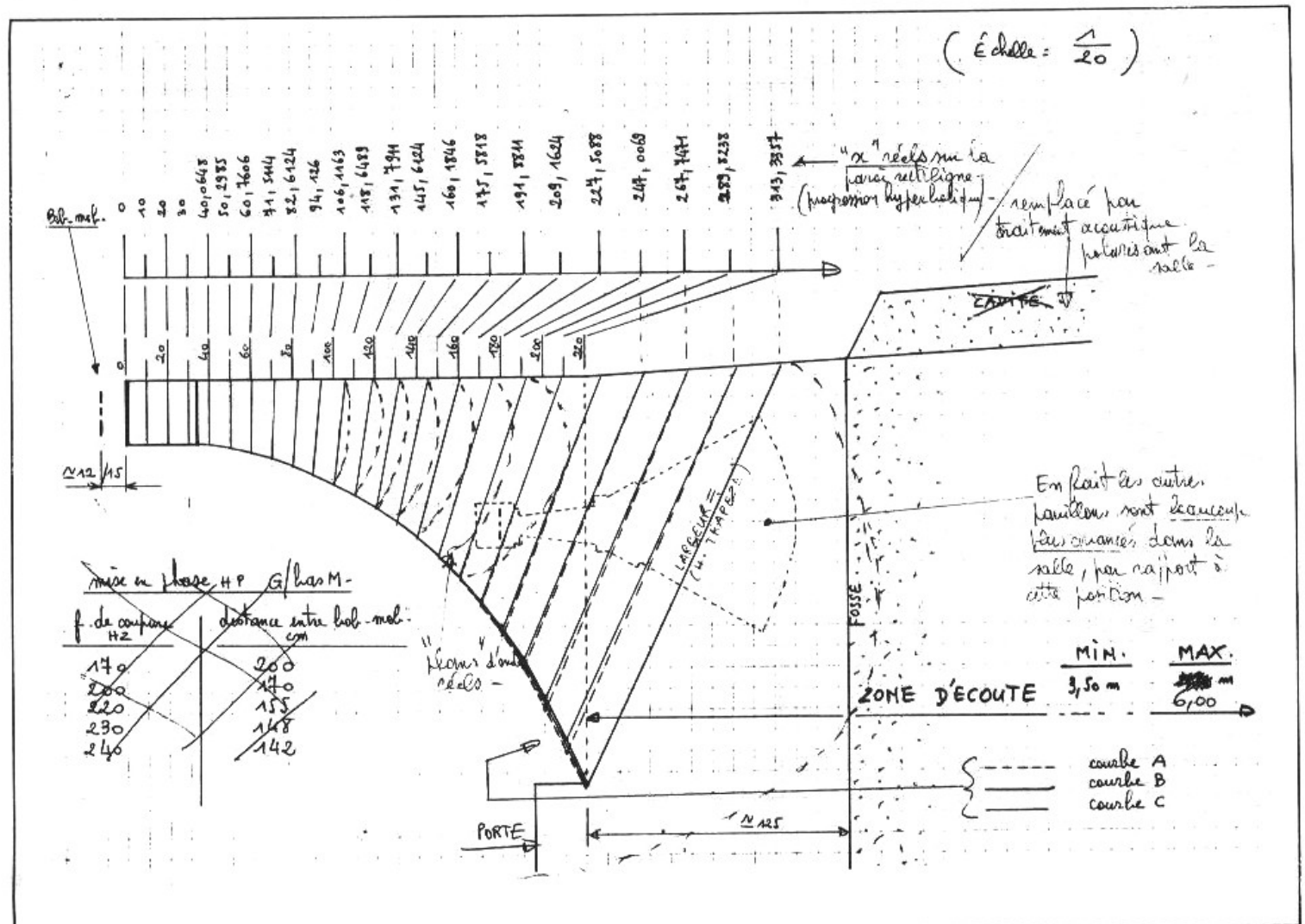
Par ailleurs, nous étions intéres-

sés de pouvoir "polariser" la salle : la propagation des sons est favorisée dans le sens SOURCES vers FOND.

Nous avons finalement construit un système ayant quelques points communs au procédé "LEDE" (Live End/Dead End : une extrémité vive, l'autre amortie), sans lui être comparable.

Les deux parois latérales ainsi que le plafond, pour une partie majeure de leur surface, se présentent en "redons", ou plus exactement TRIEDRES. Ces éléments sont fabriqués en matériau iporex en latéral, ou en contreplaqué CTXB de 19 mm renforcé pour le plafond. Ces trièdres sont entièrement remplis d'absorbant.

Les petites faces de ces trièdres orientées vers les sources sont transparentes acoustiquement : tissu tendu latéralement - isorel très



Etude de l'expansion du pavillon grave (manuscrit de M. Roggéro).

ajouré au plafond. En conséquence, par ces faces "transparentes", l'absorbant contenu dans ces volumes agit pleinement. Autrement dit : toutes les parois que "voient" les H.P. depuis leur emplacement et regardant le fond du local, est absorbant.

Les plus grandes contre-faces des trièdres orientées vers le fond de la salle sont réfléchissantes : Siporex enduit et peint pour les côtés latéraux - contreplaqué CTXB de 19 mm renforcé, plein et peint pour le plafond : tout ce que voit un auditeur placé au fond de l'auditorium et faisant face au H.P. est réfléchissant.

La hauteur de ces éléments diminue graduellement au fur et à mesure que l'on se rapproche du fond de l'auditorium, jusqu'à zéro.

Sur les trois derniers mètres en latéral, au fond gauche et droite, sont disposées des tentures sur tringle, réglables ou rétractables dans les deux cavités alissées par l'amortissement/AR (voir plus haut).

Les premiers trièdres avoisinant les sources font également office d'absorbant anti-réflexions primaires en ce qui concerne les côtés latéraux et le plafond. Ils complètent le système dont nous avons déjà parlé au niveau du plancher.

Il ne reste en définitive aucune surface parallèle ou peu s'en faut, toutes les dimensions sont non multiples entre elles et "aléatoires".

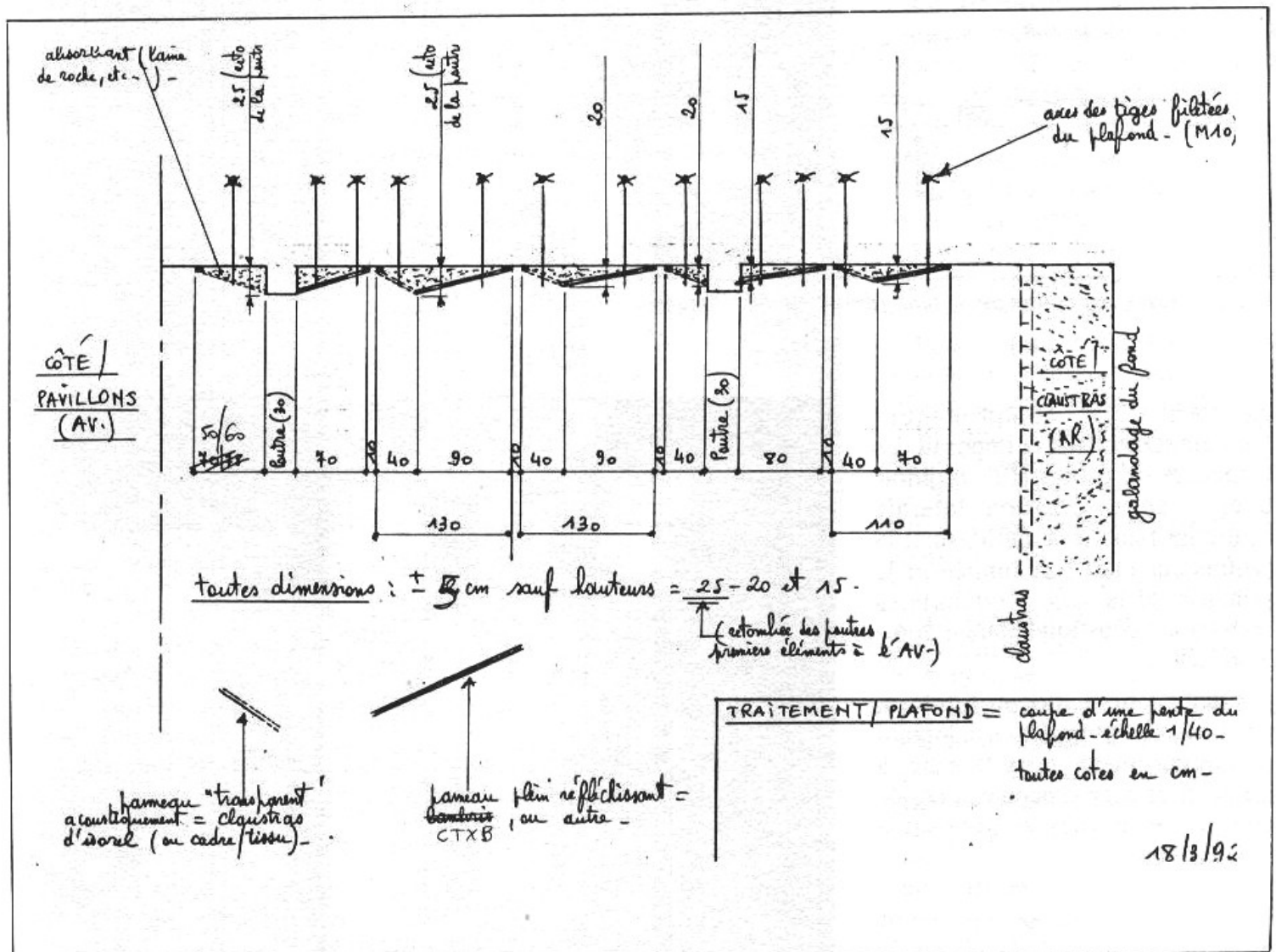
Nous n'avons pas eu besoin de poser un tapis au sol. Il devenait inutile. Cette éventualité pourrait toutefois concourir à régler le

temps de réverbération.

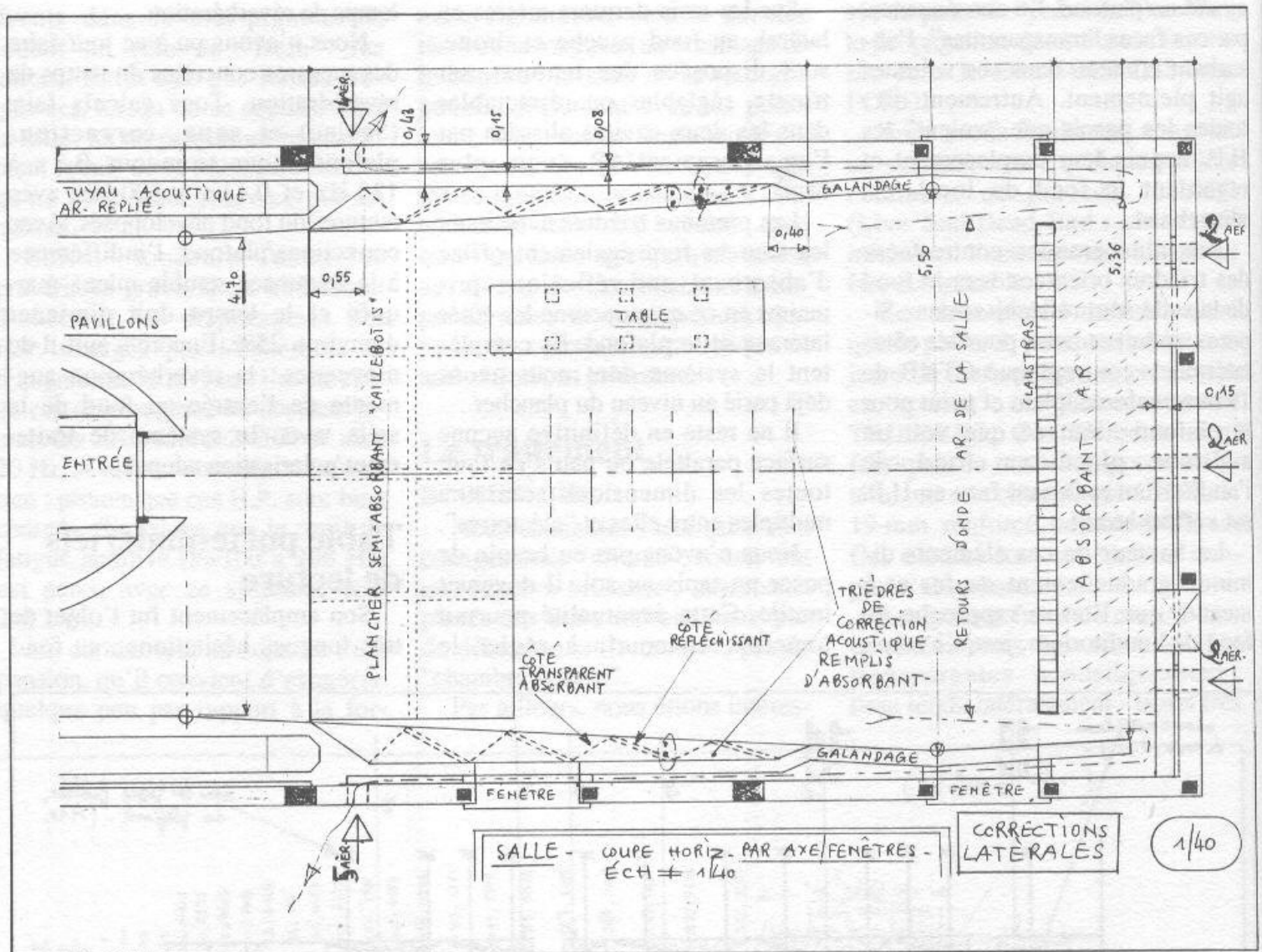
Nous n'avons pu à ce jour faire des mesures concrètes du temps de réverbération. Tous calculs faits (Sabine) et sans correction/plafond, nous trouvons 0,5 s à 125 Hz et 0,41 s à 500 Hz, avec tentures du fond développées. Avec corrections/plafond, l'indifférence à la fréquence semble mieux marquée et le temps doit diminuer d'environ 25%. Encore s'agit-il de moyennes : la réverbération augmente de l'entrée au fond de la salle, avec le système de traitement/polarisation adopté.

## Table porte-matériels de lecture

Son emplacement fut l'objet de très longues hésitations : au fond



Vue de dessus en coupe d'une paroi latérale avec profil en épi participant à la polarisation acoustique de la salle (dessin de M. Roggéro).

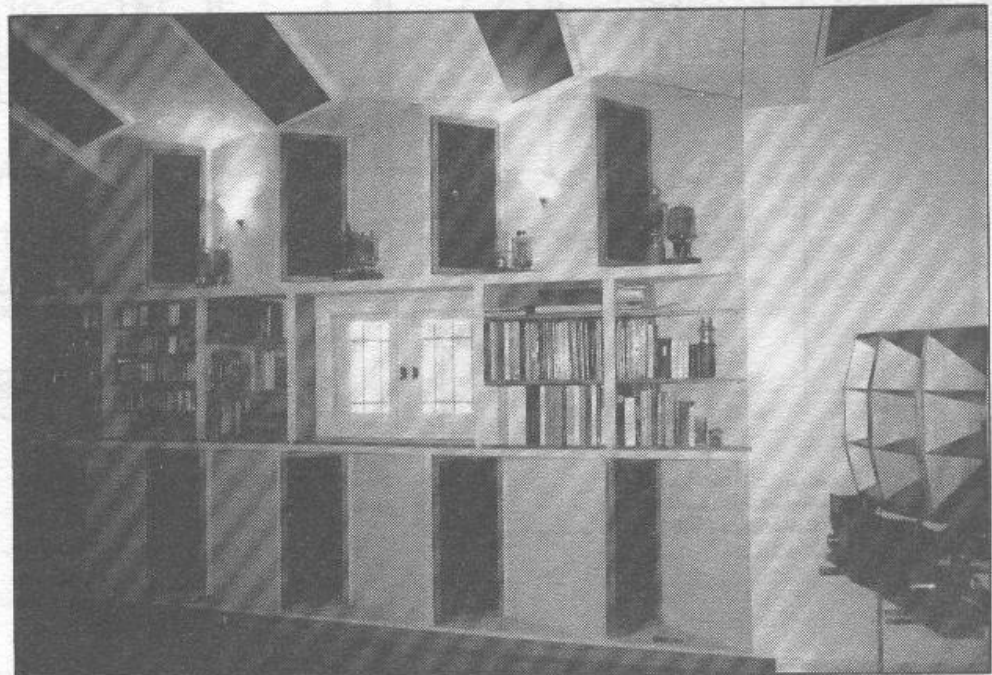


Vue de dessus, en coupe de la salle (dessin de M. Roggéro).

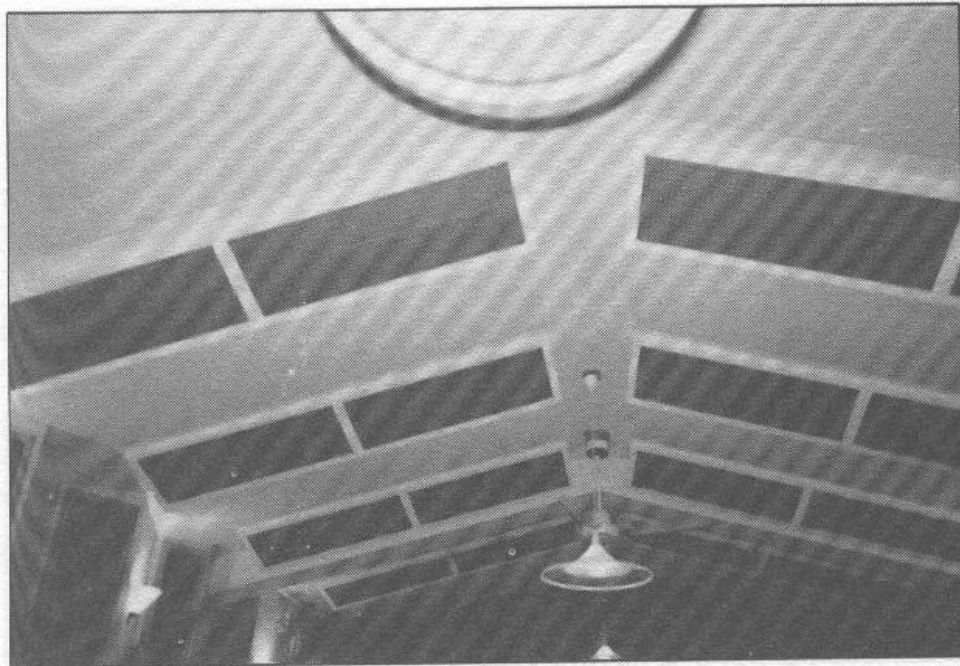
du local, elle compromettait l'amortissement/AR et imposait des longueurs de câbles/H.P. prohibitives... en disposition latérale contre un flanc de l'auditorium, la profondeur était fort limitée et la symétrie de la salle y compris sa correction acoustique étaient compromises...

Finalement, à tort ou à raison, nous avons "plongé" en adoptant un emplacement dans la salle, à droite de la zone d'écoute, à portée de main (et de vue), en disposition longitudinale.

Cette table est relativement haute, car elle englobe au-dessous les quatre armoires "Minirack" (2) contenant l'électronique. Elle est construite en maçonnerie, très



Aspect d'un mur latéral, vu depuis les haut-parleurs (photo de M. Roggéro).



Plafond avec polarisation acoustique, vu depuis les haut-parleurs.



L'ensemble des électroniques est regroupé sur un rack massif et acoustiquement inerte.

lourde, ses piliers sont ancrés directement au sol, dans une semelle de fondation indépendante. Sa surface supérieure, très lisse et parfaitement nivelée, supporte le matériel de lecture, le préampli, les autres sources éventuelles.

Nous étions inquiets lors des premiers essais, mais nous avons eu le bonheur de constater qu'acoustiquement, cet ensemble s'est présenté vis-à-vis des systèmes de H.P. un peu comme

une "lame de couteau" dans le sens longitudinal

## Annexes

Un sas d'entrée disposé entre la porte (blindée) du bâtiment et la porte de l'auditorium, qui sépare les deux pavillons de grave.

Toutes les portes sont du type "Placal" et données pour un affaiblissement acoustique de 35 dBA. Elles ferment sur joint/néoprène. La porte de l'auditorium comporte

un doublage supplémentaire sur une de ses faces, rempli de sciure, ainsi qu'une moquette collée sur l'autre face.

De part et d'autre du sas : deux petits locaux annexes dans les "creux" des parois courbes des grands pavillons : commodités, débarras... Ils conduisent aux volumes/AR contenant les H.P./graves, fermés par des portes sur joints/caoutchouc en multiplis/hêtre de 50 mm.

Au-dessus du sas : mini-grenier.

Nous passons sur des nombreux détails, la place manque...

## Le système des haut-parleurs

Nous ne revenons pas sur le canal grave/extrême-grave déjà décrit.

Le bas-médium est confié à une paire de chambres de compression Onken 255 ES "Esprit" associées à leurs pavillons MS 200 "Wood" multicellulaires, à 15 cellules sablés (un ensemble par voie).

Le médium/haut-médium est confié à une paire de chambres de compression Onken OM 455 "Esprit" associées à leur pavillon en bois sablé (un par voie).

Pour l'aigu, il y a pour chaque voie deux tweeters Onken 5000-T "Esprit" connectés en parallèle.

Et pour l'extrême-aigu : une paire de tweeters à ruban Pioneer PT-R7-III (un par voie). Ces tweeters à ruban "montent" théoriquement à 150 kHz à -20 dB... 100 kHz à -10 dB et 50 kHz à -6 dB d'après la documentation/constructeur. Leur sensibilité est de 97,5 dB/W/m.

Tout cet ensemble est posé sur des trépiéds construits en fers pleins de 16 mm. Le tout est conçu pour une relative mobilité des systèmes les uns par rapport aux autres.

## Phase, réglages

Ces différents réglages ne sont pas encore terminés, mais avancés.

Un ami nous ayant prêté un analyseur en temps réel, nous avons eu en mains un excellent moyen de contrôle.

La salle elle-même ne présente pas de défauts. Le mur-claustra de l'amortissement AR entre toutefois en résonance par sa propre masse, exactement entre 18,4 et 18,6 Hz, mais seulement au-dessus d'une puissance d'au moins  $2 \times 200$  W... Au-dessous il ne se passe rien, et avec quelque  $2 \times 20$  W sur la totalité du système, on se trouve au seuil de la fatigue auditive.

La phase du canal bas-médium par rapport au grave est peu critique, virtuellement sans conséquence quel que soit l'emplacement du système par rapport aux pavillons/graves : cela provient du fait que la bouche réelle du grave n'est pas vraiment définie et laisse une énorme marge pour le calage.

Le réglage de phase du haut-médium par rapport au bas-médium est un peu plus perceptible que précédemment. Il joue sur 2 à 3 dB au grand maximum, près de la fréquence de coupure.

Quant à la phase de l'aigu par rapport au médium, elle est difficile à trouver du fait de la présence de deux tweeters par canal. C'est une question de millimètres de déplacement et le gain ne dépasse pas les 3 dB maximum.

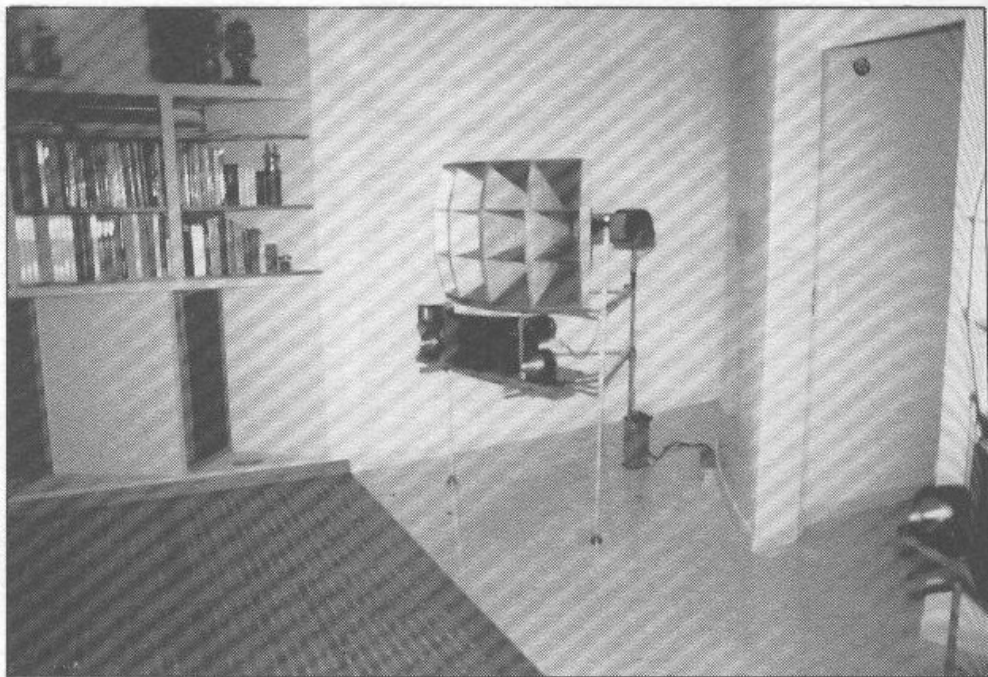
Il est pratiquement impossible de régler la phase de l'hyper-aigu.

Il faudrait maintenant avoir la possibilité d'effectuer des mesures en régime impulsionnel.

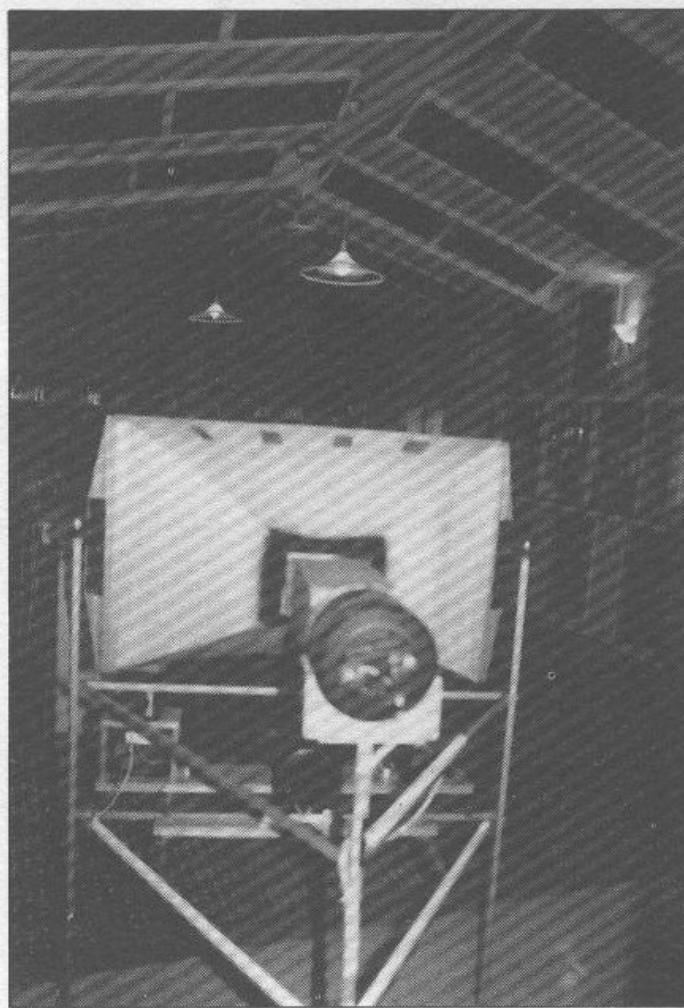
## L'électronique

### Amplificateurs

Nous employons pour le grave/extrême-grave un ampli Mac Intosh MC-2600, c'est le seul élément transistorisé de cette chaîne multi-amplifiée. En effet, pour de si grands pavillons incorporant 6 H.P. de 38 cm chacun, il est a priori nécessaire d'avoir une grande réserve de puissance. Après

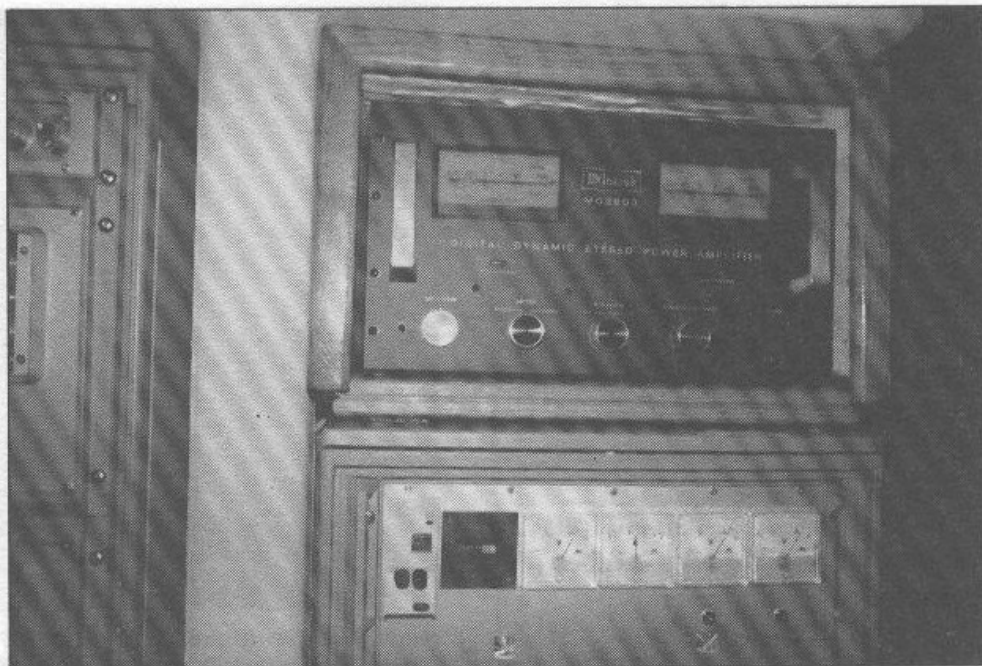


*Vue de proximité des voies de bas-médium, de médium et d'aigu. Elles sont positionnées à une hauteur idéale et ne masquent pratiquement pas l'embouchure de la voie grave (photo de M. Roggéro).*



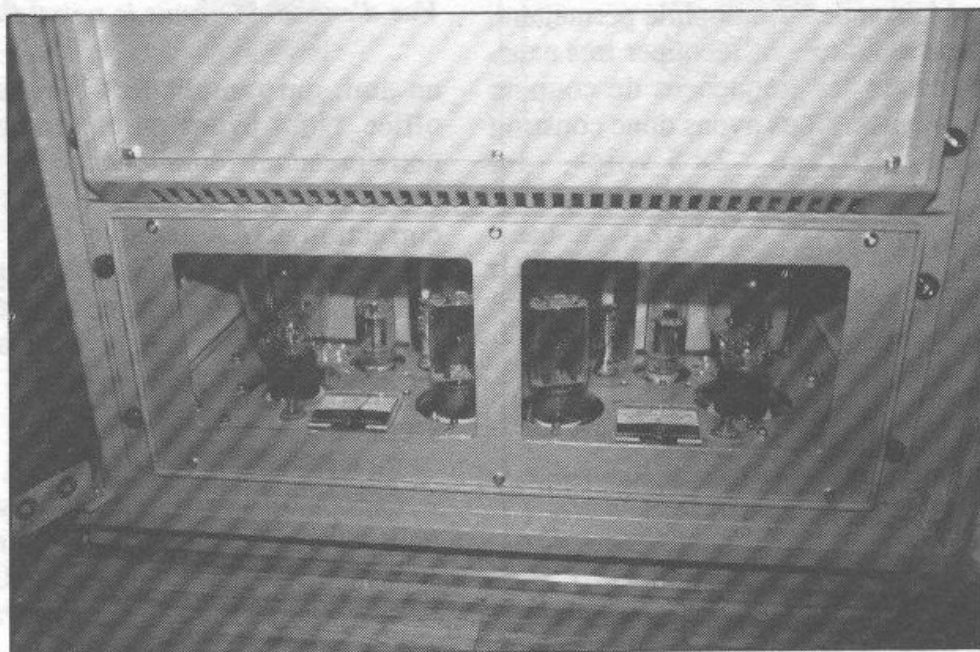
*Vue de dos des voies du bas-médium, de médium et d'aigu (photo de M. Roggéro).*

Détail du rack d'électronique, avec amplificateur Mac Intosh MC-2600 confié à la voie grave (photo de M. Roggéro). Au-dessus, dispositif de mise en marche "douce" par "variacs" et servo-moteurs (photo de M. Roggéro).



Amplificateur monotriode 845 précédé du tube driver 300B. Il est réservé à la voie de bas-médium (photo de M. Roggéro).

Amplificateur monotriode NL-50 (extrême-aigu), avec tubes 6 EW7 et valve 5R4 GY/S (photo de M. Roggéro).



essais des grands pavillons avec leurs systèmes associés (charges AR), nous nous sommes aperçus que leur rendement était tel qu'un ampli de  $2 \times 600 \text{ W}$  était "surabondant"... Compte tenu de la très basse impédance des H.P. (six bobines mobiles de  $16 \Omega$  en parallèle, soit  $2,67 \Omega$ ) cet ampli est extrêmement intéressant. Il utilise des transformateurs de sortie multi-impédances d'adaptation, ce qui élimine tous problèmes de disparité de ces impédances.

Nous avons construit tous les autres amplis, du type à tubes monotriodes.

Pour le bas-médium : 310-A suivi de 300-B puis de 845 (transfos de sortie Tango X105).

Pour le médium : 310A et 300B.

Pour l'aigu : idem.

Et pour l'hyper-aigu : entrée double triode 6E7 en cascade, le deuxième élément de ce tube dissymétrique étant "de puissance" (puissance 10 W), faiblement chargé, avec tubes de sortie NL-50.

Tous les transformateurs de sortie, du médium à l'hyper-aigu, sont d'origine Partridge.

### Filtrage d'entrée des amplificateurs

Ce sont des filtres entièrement passifs à inductances-capacités de 12 dB/octave. Les inductances toroïdales de précision fournies par la Maison de l'Audiophile permettent, entre autres, de recouper très exactement les fréquences de coupure prévues. Nous avons donc construit ce filtrage  $2 \times 5$  voies, les fréquences de coupure étant :

grave : "0" à 200 Hz passe-bas ;

bas-médium : 200 à 1.350 Hz passe-bande ;

médium/haut-médium :

1.350 Hz à 7 kHz passe-bande ;

aigu : 7 kHz à "l'infini" (!!)

passe-haut ;

hyper-aigu : 8/9 kHz à "l'infini"

(!!) passe-haut.

### Préamplification

Nous fonctionnons actuellement avec un préampli Kanéda prêté par



Rack d'électroniques. Au-dessus, table de lecture Verdier. Plusieurs maillons vont y être ajoutés (photo de M. Roggéro).



Vue d'ensemble depuis le point d'écoute (photo de M. Roggéro).

un ami, qui remplit fort bien son office. Nous avons en ce moment notre préampli "double-Kanéda" en construction, l'un actif l'autre à correction RIAA passive dans le même coffret sous double blindage, avec alimentation élaborée séparée, mais nous ne pouvons qu'y travailler lentement ces derniers temps.

### Lecture

En CD : lecteur Studer A-730.

Une platine Verdier sera utilisée pour les disques analogiques. Bras SME long et tête Denon DL-103. Pré-préampli à transformateurs Partridge.

### Aménagements

Sous la table et le bloc de "miniracks" contenant l'électronique, une fosse est aménagée. Tout une série de gaines plastique de 40 mm y convergent pour les câbles des H.P. l'avenir a été considéré : des gaines sont prévues pour d'éventuelles voies latérales arrière, avant/médiane.

Cette fosse contient également l'arrivée du réseau EDF : les trois phases plus le neutre, avec filtrage secteur et transformateur d'isolement de 1,5 kW (Millerioux, ce nous a également réalisé tous n



transfos et inductances d'alimentation).

Tout ce réseau est encastré dans le sol.

Les amplis étant montés en "rack" et en armoires métalliques, nous avons réalisé tous les châssis internes (portant la totalité des montages) sur supports isolants, de façon à ramener toutes les masses en étoile en un seul point. La terre générale du bâtiment aboutit à ce point.

## Conclusion

Ce fut long et laborieux, mais passionnant. Depuis que cet auditorium est devenu fonctionnel, alors que nous devrions travailler (pour le temps dont nous disposons) aux dernières finitions et à l'électronique non encore achevée, nous nous laissons entraîner à faire de l'écoute... Les heures passent ainsi, c'est irrésistible.

La mise au point de cet ensemble complexe n'est pas aisée, il faut être outillé et assez bien équipé en mesures, ce qui est prévu.

D'ores et déjà nous retirons de cette installation de grandes satisfactions. Nous pensons avec le temps, encore affiner les résultats, corriger de nouveau quelques petites imperfections, faire encore d'autres expérimentations de montages.

Cette chaîne ne pardonne rien... Il est curieux d'écouter certains enregistrements très bien cotés par la presse critique et d'y déceler divers défauts plus ou moins flagrants.

A tous les passionnés qui voudraient se lancer dans ce genre de réalisation, nous souhaitons bonne chance et espérons qu'ils parviendront à des résultats meilleurs encore.

(1) rehaussée pour tenir compte de la correction acoustique.

(2) Fabrication Schroff.

**Page non  
disponible**



## A la pointe du progrès

**P**

*armi les accessoires disponibles sur le marché de l'audio, les pointes semblent être ceux qui bénéficient du flou le plus complet sur leur mode de fonctionnement. Les arguments avancés en leur faveur sont le plus souvent du type : "L'essayer, c'est l'adopter !", "Transfigurez votre système !", "Mettez-les, ça marche !" avec, de temps en temps, une tentative d'explication : "Les vibrations s'écoulent dans le sens de la pointe" et surtout des constatations comme : "Des sons aux contours plus nets, un grave mieux tenu, un médium mieux charpenté, un aigu plus vrai", etc. Il nous est donc demandé de croire les distributeurs sur paroles, ce qui est dur, très dur à digérer.*

*Cette courte étude a pour objet d'essayer de faire comprendre le mode de fonctionnement de ces petits systèmes, à l'aide de démonstrations les plus simples possibles.*

### I. Pointes ou cônes ?

Nous utiliserons la dénomination "pointe" pour éviter toute confusion par la suite.

1. Qu'est-ce ? Une pointe est un objet pointu de diverses dimensions et présentations. On peut en trouver de parfaitement coniques, en forme de vis dont l'extrémité est effilée, avec divers systèmes de fixation, en diverses matières, de différents poids, de différents prix. Il n'est pas interdit de les fabriquer soi-même, mais les modèles vendus dans le commerce sont le plus souvent de présentation impeccable.

Elles sont livrées avec divers accessoires, fixations, crapaudines, dont nous étudierons l'influence.

2. L'objet mécanique : On peut assimiler une pointe à un système triangulé à trois dimensions - à quatre si l'objet est durable - dont une extrémité est plane et l'autre est un point.

Ce système sera, dans cet article, au centre de phénomènes vibratoires, mais de par sa forme de section triangulaire, et par mesure de simplification, nous considérerons qu'il est indéformable.

### II. Systèmes à une pointe

Soit une pointe en contact avec deux ensembles A et B à ses deux extrémités. Nous limiterons le nombre de cas possibles à des cas rencontrés dans la pratique.

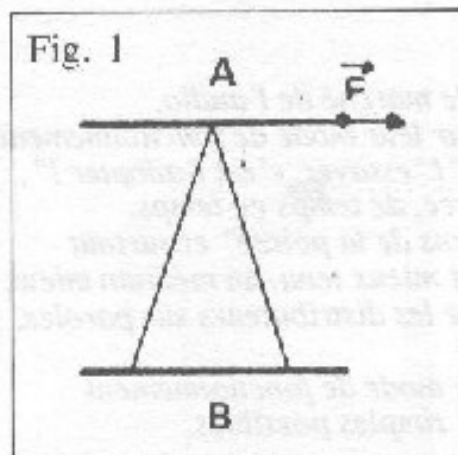
Les deux ensembles A et B ont chacun une fonction particulière. Soit un ensemble A soumis à des forces et vibrations d'origines diverses, internes ou externes. Soit un ensemble B réputé stable dans sa forme, difficilement résonnant et de grande inertie, une énergie

importante y étant appliquée ne modifiant pas sensiblement son état.

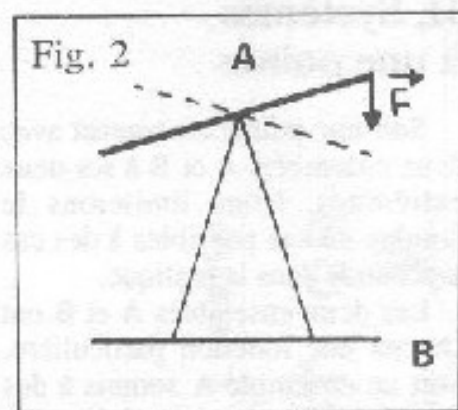
**N.B. :** Nous pressentons dès maintenant que tout éloignement par rapport à ces conditions aura pour effet d'amoin-drir la validité des résultats.

### 1. Premier cas : pointe dirigée de B vers A (figure 1)

La surface plane de la pointe est en contact avec B, nous avons une position du point de contact avec A stable par rapport à B. Si nous exerçons une force  $\vec{F}$  sur A dans la direction indiquée, nous n'avons aucune liberté de mouvement de A tant que la pointe reste en contact avec le même point de A. Le couplage est ici statiquement parfait.

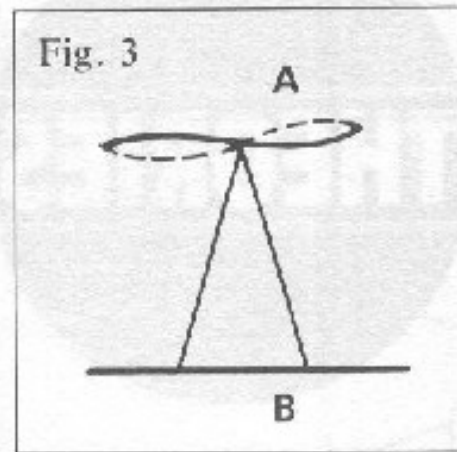


Il existe ici une grande liberté de position de A par rapport à B (figure 2).

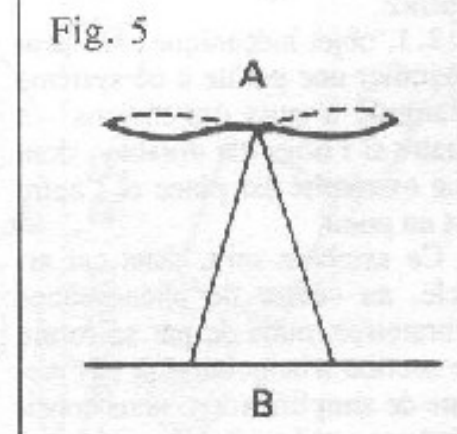
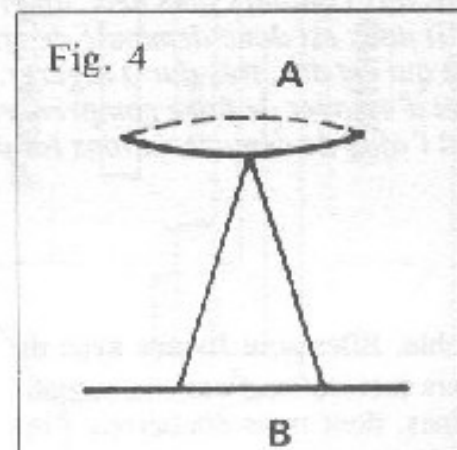


Si le point de contact est situé en un nœud de vibration, l'effet de la présence d'une pointe est nul

sur le comportement vibratoire de A (figure 3).



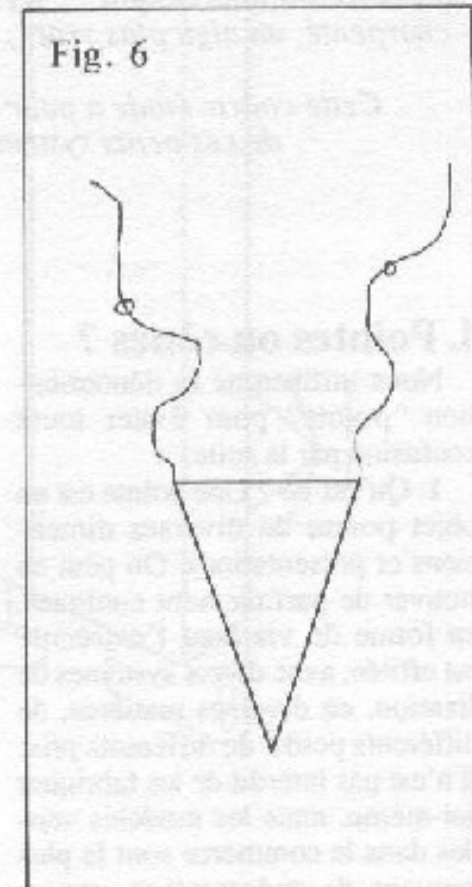
Si le point de contact est situé en un ventre de vibration, il y a perte de contact. Pour que le contact soit établi entre A et la pointe, il faut une modification du comportement vibratoire de A. Qui dit modification dit perte énergétique. Puisque nous avons considéré que la pointe est indéformable, nous pouvons déduire que, selon le principe d'équilibre des bilans énergétiques, la différence d'énergie se retrouve dans B. Il y a donc transfert d'énergie par la pointe de A vers B (figures 4 et 5).



### 2. Deuxième cas : pointe dirigée de A vers B

Ce cas est plus complexe mais plus intéressant comme nous allons le voir. Pour rendre la compréhension des forces mises en jeu plus aisée, nous allons nous aider du montage suivant :

Le cône est réduit à un triangle; P est le point de contact avec B, a1 et a2 sont deux points sur lesquels viennent s'accrocher deux fils f1 et f2. O1 et O2 sont deux œillets dans lesquels couissent f1 et f2 (figure 6). Ce montage représente un cône simplifié dans un système à deux dimensions. A la fin de cette petite démonstration, chacun pourra s'exercer à se représenter mentalement un système équivalent en trois dimensions, ce qui équivaldrait à une pointe quasiment en situation réelle. L'étape suivante, consiste, de tête, à faire varier des forces, aléatoirement selon des modes vectoriels - presque - imprévisibles, comme dans la réalité vibratoire qui nous cerne sans relâche.



### 1. Premier essai :

On suppose que  $O_1$  et  $O_2$  sont alignés avec  $a_1$  et  $a_2$ , comme l'indique la figure 7. Appliquons les forces  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$  sur les fils de façon à équilibrer le système selon la figure 7 :  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$ .

Déplaçons le système de façon à l'équilibrer selon la figure 8a ou 8b. Nous voyons que les forces  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$  sont modifiées par les forces  $\vec{F}'_1$ ,  $\vec{F}'_2$ ,  $\vec{F}''_1$ ,  $\vec{F}''_2$  dont on retrouve l'image sur le point P. La résultante globale de ces forces sur la pointe est  $\vec{F}_p$ , qui est l'effort transmis à la pointe en l'absence de pesanteur. Or, comme le laisse présager le nom de la revue dans laquelle paraît cet article, nous pouvons prévoir un effet dû à la pesanteur non négligeable. Donc, pour replacer cette étude dans un appartement encombré d'appareils lourds et empêtrés de vibrations intolérables, considérons la présence du vecteur force  $\vec{F}_m$ , qui représente l'effet de la masse du montage augmentée de la masse de l'ensemble A (figure 9).

Fig. 7

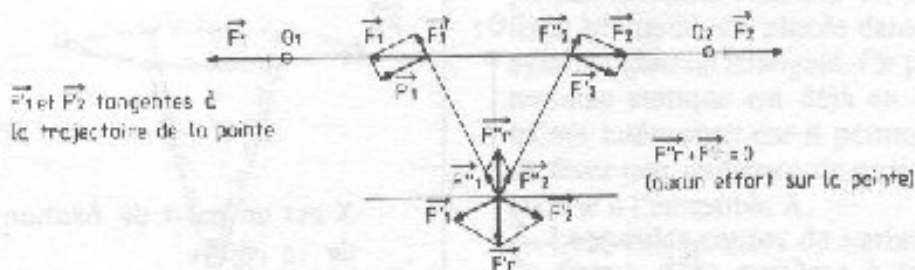


Fig. 8A

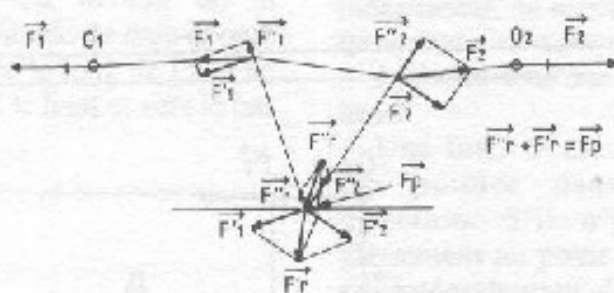


Fig. 8B

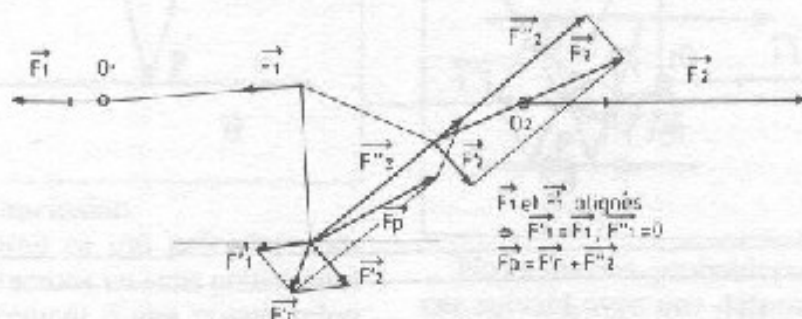
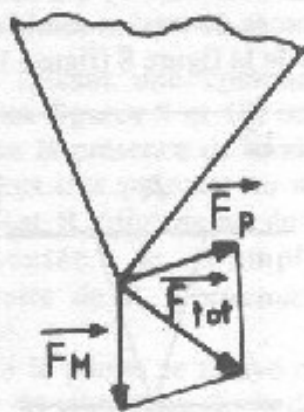


Fig. 9



Dans ce premier essai, nous voyons qu'un changement de position de la pointe produit une variation de la force appliquée au point P. Si ce point reste fixe par rapport à B, c'est-à-dire s'il n'y a aucun glissement, cette force est transmise intégralement en B, qui, de façon à équilibrer l'ensemble du

la pointe en X, de façon à la stabiliser. Nous remarquons une force  $\vec{F}_p$ , perpendiculaire à l'axe de la pointe (quand  $|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2|$  et que la pointe est symétrique). En figure 10b, nous avons supprimé X. Les forces  $\vec{F}'_1$  et  $\vec{F}'_2$ , tangentes à la trajectoire de la pointe, ont tendance à faire ce phénomène de vecteur force dirigé vers le haut, ce qui aura quelques répercussions par la suite.

### 2. Deuxième essai :

En figure 10a, nous avons fixé

système, produit une force correspondante et opposée à  $\vec{F}_{tot}$  (sur les dessins, les forces de réaction n'ont pas été représentées, et d'autres forces négligées de façon à rendre possible une lecture par des non-mécaniciens. Les férus de mécanique pourront, comme exercice, dessiner et faire le bilan de toutes les forces mises en jeu.) pivoter la pointe autour de P. La pointe va basculer, le montage est instable. On constate d'après la figure 10b qu'il n'y a plus d'effort sur le point P.

En figure 11, cas de figure

Fig. 10A

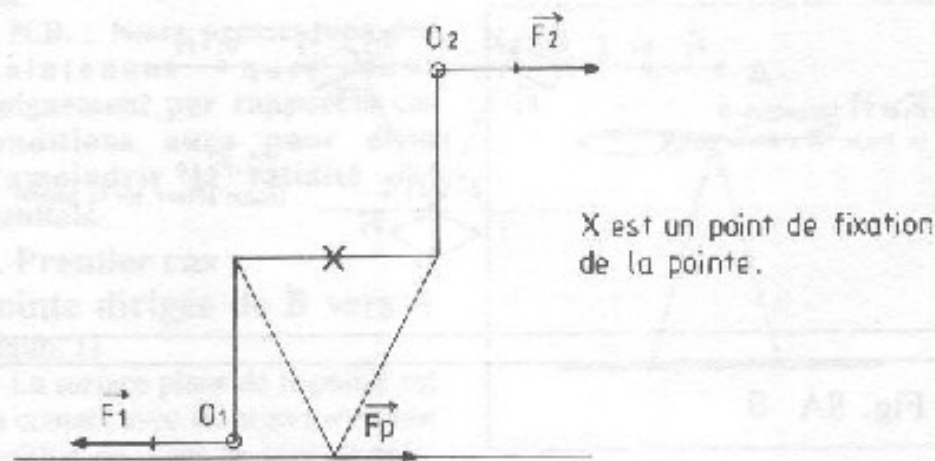


Fig. 10B

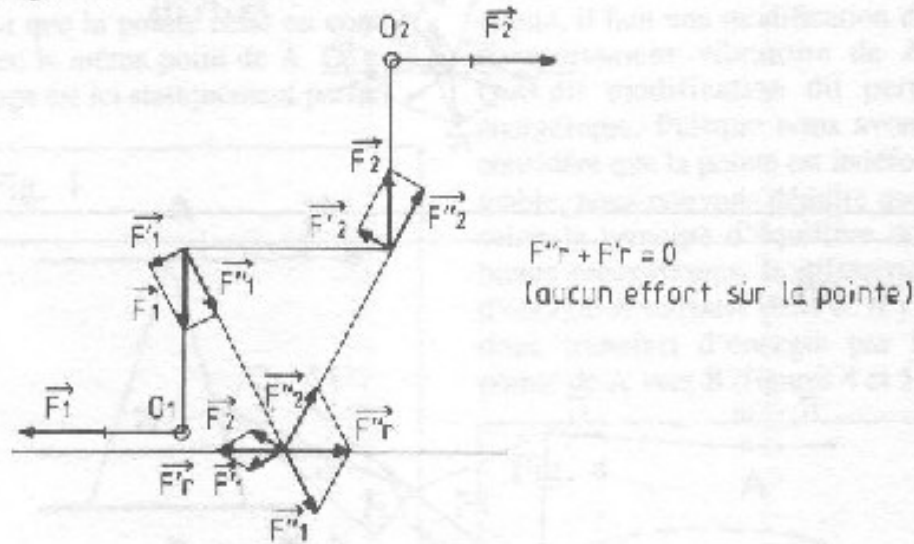
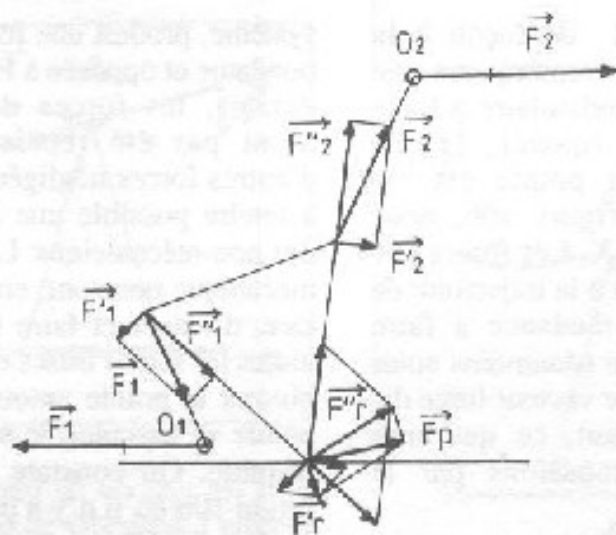


Fig. 11



moins intéressant car probablement jamais visible dans le cadre que nous nous sommes imposé, le système est stable car  $F''2$  a changé de direction et est opposée à  $F''1$ . Il faut considérer que  $|F''1| = |F''2|$  pour l'équilibre.

On note de nouveau que  $F_p$  est dirigée vers le haut et que les forces  $F1$  et  $F2$  sont modifiées pour l'équilibre.

L'intérêt de la figure 11 est double. Elle montre que :

- Il est facile d'avoir des forces au point P dirigées vers le haut.
- La pointe pivote autour de P.

Nous pouvons nous reporter à la figure 9 pour intégrer l'effet de la pesanteur.

3. Conclusion des essais 1 et 2 :

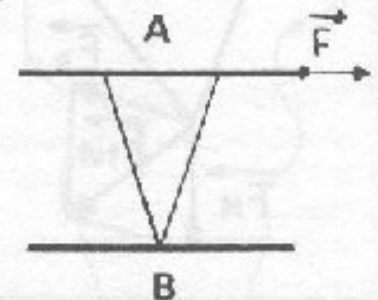
Il apparaît qu'une modification des efforts sur la surface plane de la pointe se traduit par des efforts correspondants au point de contact avec B. Il y a un transfert très direct et prévisible des efforts imprimés sur A vers B.

On remarque aussi que, par rapport aux figures 1 et 2, les phénomènes sont plus complexes et seront finalement plus utiles.

3.

1. L'ensemble A est soumis à des forces de torsion semblables à celles de la figure 8 (figure 12).

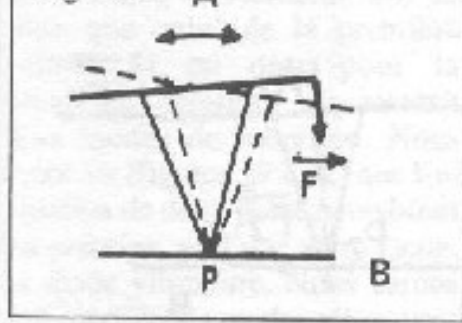
Fig. 12



2. L'ensemble A est soumis à l'effet de déport au point de pivotement P. Il y a une composante "horizontale" au mouvement de A (figure 13).

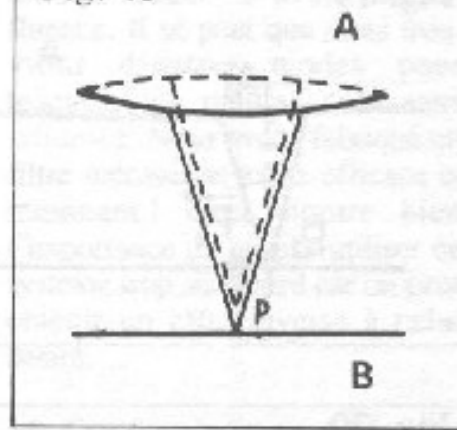
3. On voit que si la pointe se trouve en un nœud de vibrations, son effet n'est pas nul, car un

Fig. 13



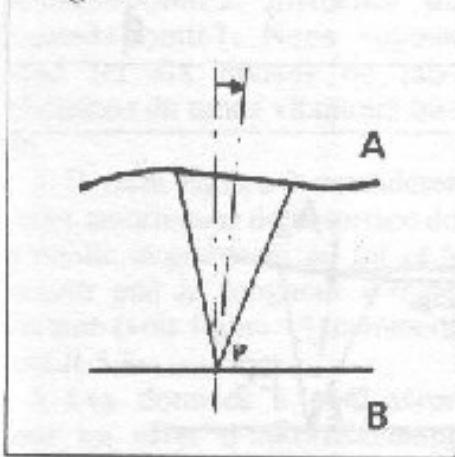
mouvement oscillatoire de la pointe est ajouté au mouvement de A. Son effet est, de plus, localement sensible dans le cas d'une vibration de longueur d'onde inférieure aux dimensions de la surface de la pointe : elle amortit par sa seule présence (figure 14).

Fig. 15



Là aussi, des efforts importants apparaissent au niveau de la pointe, d'amplitude de mouvement faible, orientée le long de l'axe de la pointe, vers le haut et vers le bas (figure 16).

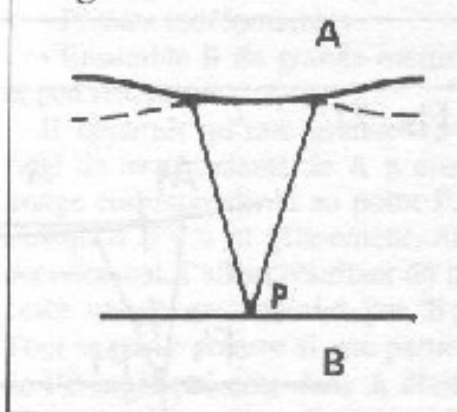
Fig. 14



En faisant une comparaison avec les figures 8 et 10, on peut déduire la présence de modes vibratoires très présents au niveau du point B (dimension du point augmentée de l'amplitude vibratoire de B (convenue très faible)).

4. Si la pointe se trouve en un ventre de vibrations, il y a décollement de la pointe. Pour que le contact de P sur A soit assuré, il faudra une modification du mode vibratoire de A, qui ne manquera pas de se produire si la masse de A est suffisante; C'est le même cas que celui des figures 4 et 5 avec, en plus, l'effet de la surface de la pointe appliquée sur A, de plus en plus présent à mesure que la longueur d'onde diminue (figure 15).

Fig. 16



#### 4. Conclusion

De tout ce qui précède, nous déterminerons un sens préférentiel au placement d'une pointe selon l'effet souhaité. Nous pressentons de plus une concentration de phénomènes vibratoires au point P, d'autant plus intense que l'on s'approchera des conditions théoriques : point de dimension tendant vers zéro, ensemble B de stabilité infinie, pointe en contact toujours au même point de B, et pas de décollement.

### III. Systèmes

#### à trois points

##### 1. Effet de stabilité d'un système à trois points

Contrairement à un système monopointe, un système à trois

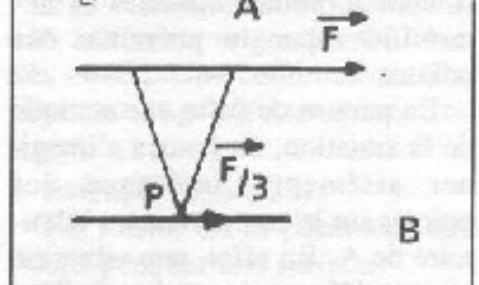
pointes est d'une stabilité extrêmement grande. En effet, chaque pointe formant chacune un système triangulé, est placée dans un système général triangulé. Ce phénomène statique est déjà en lui-même intéressant car il permettra de fixer une référence de position précise à l'ensemble A.

2. Les seules causes de variation de forme d'un système à trois points sont celles des effets de changement de forme de A et son comportement vibratoire; Voyons donc ce qui se passe quand A est animé de vibrations erratiques et indésirables, de torsions exagérées (pour une vision plus claire).

1. Visualisons une pointe sur les trois.

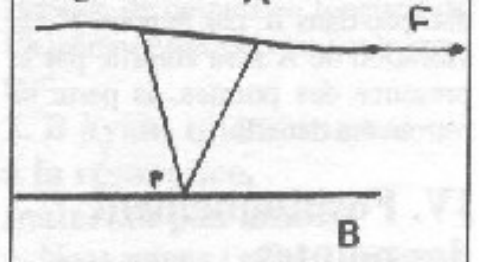
Une force  $\vec{F}$  est distribuée sur les pointes dans la même direction. S'il n'y a pas de glissement au point P, la force  $\vec{F}$  est intégralement distribuée aux points P (figure 17).

Fig. 17



Nous aurons probablement le cas suivant avec une déformation de A. Nous retrouvons alors les cas des figures 8, 10 et 13 (figure 18).

Fig. 18



2. Voyons ce qui se passe en visualisant deux pointes :

Voici une forme que peut prendre A en cas de déformation due à la force  $\vec{F}$  (figure 19).

3. Quelles autres formes A peut-il prendre ?

Cette forme-là ne pourra se produire que si A est très élastique. En effet, il faudra que sa longueur augmente : il n'y a pas de glissement de P1 et P2. Ce cas est possible mais peu probable (figure 20).

Cas plus possible qu'en figure 20. En effet, la longueur de l'arc A1A2 est plus grande que celle du segment A1A2. Les points peuvent prendre cette inclinaison (figure 21).

Cas différent de celui de la figure 20, mais plus probable. La force est dirigée dans le même sens, l'inclinaison des points est inverse (figure 22).

4. Si on se tient à ce nombre restreint de cas de figures, on peut déjà tirer quelques conclusions : une déformation apportée à A produit des forces correspondantes sur les points P. D'autre part, les différentes formes que peut prendre A sont fortement limitées et déterminées par la présence des pointes.

En partant de cette vue statique de la situation, on pourra s'imaginer aisément l'influence des pointes sur le comportement vibratoire de A. En effet, une vibration est une déformation qui varie dans le temps selon certains modes. La forme que prendra A en un certain instant sera celle qu'elle a le moins de mal à prendre, où elle dépensera le moins d'énergie à travers le système. On voit qu'une grande partie de l'énergie vibratoire sera dissipée dans B, par le point P : la vibration de A sera amortie par la présence des pointes, la perte se retrouvera dans B.

#### IV. Positionnement des pointes

1. Selon l'utilisation que l'on en demande, le placement des pointes a son importance. Admettons la présence dans A d'un mode de vibration particulièrement com-

Fig. 19

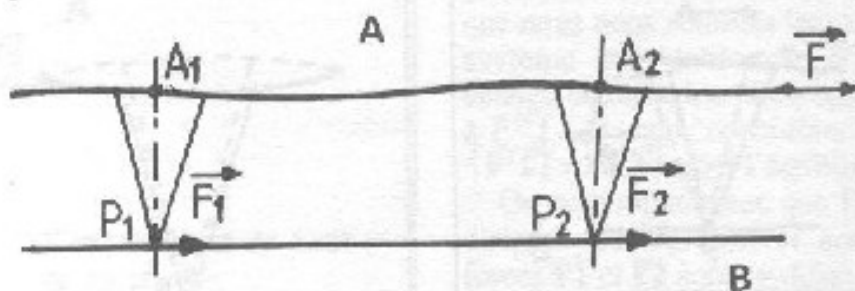


Fig. 20

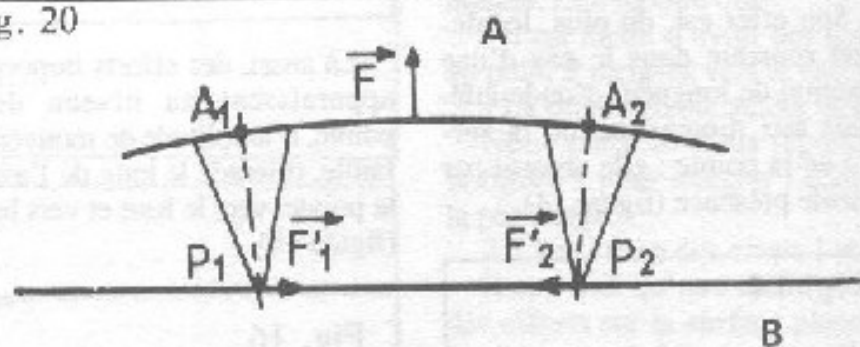


Fig. 21

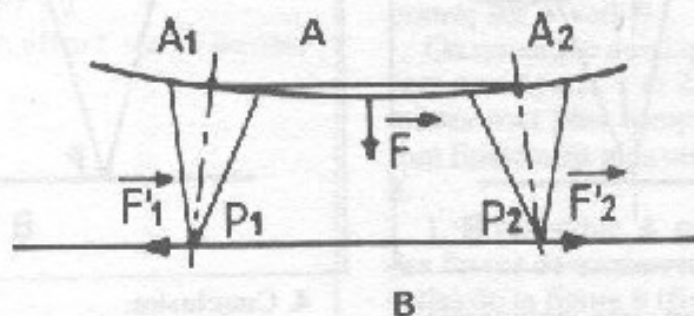
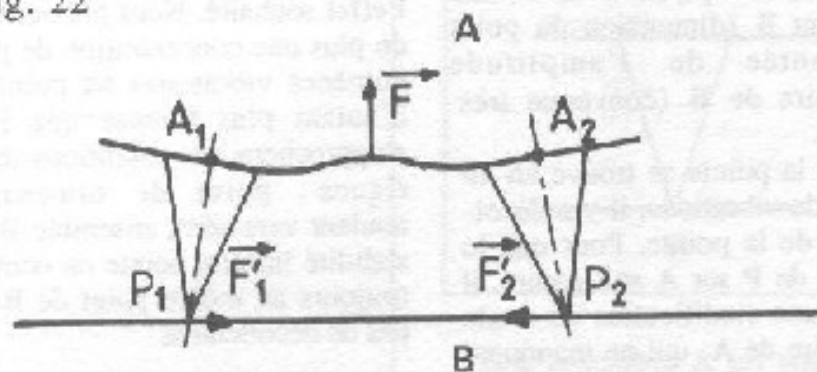


Fig. 22



plexe et indésirable.

1. La présence d'une pointe a tendance à amortir, selon sa position, un certain mode de vibration. Si on change sa position, on

amortit un autre mode de vibration. Certaines positions sont plus ou moins efficaces selon l'effet voulu.

2. Si on ajoute une deuxième



pointe, on pourra amortir soit le même mode de vibration, soit un autre que celui de la première pointe. Si on opte pour la deuxième solution, on amortit deux modes de vibration. Nous avons vu (figures 19 à 22) que l'utilisation de deux pointes modifiait par principe, et d'une autre façon, un mode vibratoire. Nous aurons déjà modifié les modes vibratoires de trois façons différentes avec deux pointes.

3. Si nous ajoutons une troisième pointe, nous amortissons un troisième mode vibratoire par la présence de cette pointe. Si nous optons pour cette solution, il y a de fortes chances pour que d'autres modes de limitation existent : influence de pointe3+pointe2, influence de pointe3+pointe1. Nous voyons donc ici six causes de modifications du mode vibratoire initial.

4. Il reste encore à considérer l'effet amortisseur de la surface de la pointe augmentant au fur et à mesure que la longueur d'onde diminue (voir figure 14, commentaire II.3.3).

5. Les données à considérer pour un effet d'amortissement maximal sont la position de chaque pointe, leur écartement, leur surface de contact. Il est bien évident que les essais sont à effectuer par chacun, le système étant trop complexe pour en tirer des règles définitives et simples.

## 2. Idée d'utilisation différente

Avec des pointes, et au vu de tout ce qui précède, nous pouvons obtenir un résultat très différent. Reprenons la figure 3 : nous remarquons que la pointe est sans influence si elle se trouve en un nœud de vibration (pointe dirigée de B vers A). Si nous plaçons trois pointes sur trois nœuds de vibration, les pointes sont toujours sans influence sur le mode de vibration. Si on s'éloigne de ce mode

(variation de fréquence), les pointes tendent à avoir une influence. Il se peut que nous trouvions d'autres modes pour lesquels les pointes sont sans influence; Nous avons fabriqué un filtre mécanique assez efficace et résonnant ! Ceci montre bien l'importance de ne pas utiliser ce système trop au hasard car on peut obtenir un effet inverse à celui désiré.

## V. Que se passe-t-il au point P ?

Dans les conditions telles que :

- Système à trois pointes
- Pointes dirigées de A vers B

Et les autres conditions générales :

- Pas de glissement ni de décollement
- Pointes indéformables
- Ensemble B de grande inertie et peu résonnant

Il apparaît qu'une grande variété de mouvements de A a une image correspondante au point P. Puisqu'il n'y a ni glissement, ni décollement, l'effort résultant dû à cette image est absorbé par B; Tout se passe comme si une partie de l'énergie présente dans A était transmise à B par la pointe.

Nous avons vu en II.1, figures 1, 2 et 3 que certains mouvements de A ne produisaient aucune image dans B. Invertissons le sens de la pointe et faisons vibrer B dans des conditions similaires : A reste immobile.

Récapitulons : Transfert d'énergie de A vers B, pas de transfert de B vers A. Nous sommes en présence d'une "diode" mécanique, d'assez mauvaise qualité, hélas, car certains modes vibratoires produisent ce résultat alors que d'autres produisent un résultat différent. Notons que nous avons des efforts plus grands rapportés à la surface du point P (surface théoriquement nulle) selon des vecteurs de directions très diverses.

## VI. Effets dus à des variations des conditions initiales

### 1. Décollement, glissement

Nous avons vu qu'une énergie déployée dans A (due à un mouvement, vibratoire ou autre) se retrouvait dans la pointe, en grande partie. Nous avons vu d'autre part que la direction des efforts résultants (figures 8 et 11) pouvait tendre à éloigner A de B. Si nous faisons intervenir la force de pesanteur, nous avons une amplitude limite des efforts avant décollement, dans certains cas.

Nous devons ici parler du cône d'adhérence, car nous aurons affaire à des effets de glissement.

**Rappel :** Le cône d'adhérence indique la limite d'inclinaison d'un vecteur force appliqué à un objet avant son glissement sur un support. Ce cône est d'ouverture variable selon les caractéristiques d'adhérence des matériaux utilisés.

Une combinaison de matériaux très adhérents engendre un cône très ouvert. Une combinaison très glissante engendre un cône très fermé.

Exemple (figure 23) :

$F_m$  : effet de la pesanteur sur l'objet posé sur une surface.

$F_t$  : force de traction sur l'objet.

$\vec{F}$  : force résultant de  $\vec{F}_m$  et  $\vec{F}_t$ .

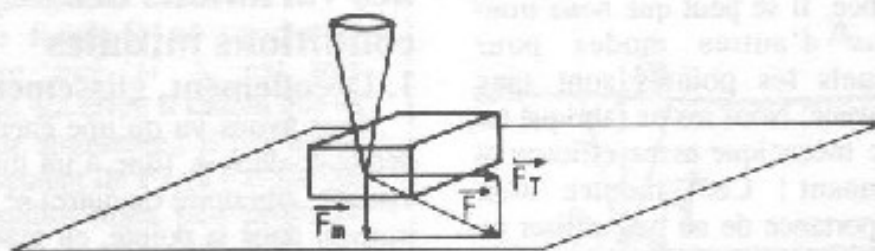
$\vec{F}$  est plus inclinée que la limite du cône d'adhérence : il y a glissement.

Dans certaines conditions, il y a tendance au glissement de notre système de pointes en fonction de l'adhérence des pointes sur le support.

### 2. B ayant une tendance à la résonance, matériau peu amorti

Nous aurons l'effet d'un diapason posé sur une table : la vibration du diapason sera amortie mais cet amortissement, du fait d'un bilan énergétique équilibré, se traduira par une énergie dispensée à

Fig. 23



la table sous la forme d'une vibration de la table et d'une mise en vibration de l'air environnant.

Nous remarquons que l'ensemble **B** peut être très lourd et dense et résonnant (ex. : masse métallique non amortie, certains bois résonnants, etc.). Dans ce cas, le point **P** pourra rester fixe, il pourra n'y avoir qu'une amplitude de mouvement très faible de **P**, l'ensemble **B** sera animé de modes de résonance tout à fait importants si, toutefois, les fréquences de vibration de **A** et de résonance de **B** sont proches.

### 3. Position de **P** variable sans perte de contact

Ceci indique que l'ensemble **B** est fait d'un matériau élastique. Même s'il est très antirésonant, les pointes étant libres de leurs mouvements en **P**, leur influence antivibratoire sur **A** se réduira à l'effet de leur surface en contact avec **A**.

### 4. Ensemble **B** soumis à des vibrations extérieures

Etant donné qu'il y a couplage mécanique important entre **A** et **B**, il ne faut pas compter sur des pointes pour isoler **A** des mouvements de **B** : ce n'est pas le mode d'utilisation de ce système. Il existe cependant un cas où les pointes isolent parfaitement **A** des vibrations de **B** : quand elles sont placées sur des nœuds de vibration. Le spectacle suivant pourrait - théoriquement - être présenté à nos yeux ébahis : **B** vibrant de puissante façon, et **A** posé dessus par l'intermédiaire de pointes, d'une stabilité olympienne (cas de

la figure 3 à l'envers). Rappelons que, malheureusement, ce cas n'est possible que pour un nombre très restreint de fréquences, elles-mêmes fonctions des modes de vibrations de **B**.

Un autre cas encore plus prosaïque : l'appareil, lourd et muni de pointes, a tendance à bloquer les vibrations de l'étagère en pin qui le supporte, l'étagère est "clouée" à l'appareil ! (Exemple intéressant : écoulement des vibrations sur une mécanique de lecteur de disques compacts. On peut obtenir un couplage entre une partie **A**, animée de vibrations dues à la rotation du disque, à l'amortissement de la lentille et au déplacement du bloc optique, et une partie **B** lourde et inerte, au travers d'une pointe et deux silent-blocs. Cela ne dispensera pas de suspendre le tout par des ressorts amortis pour éviter les sauts de pistes et pertes d'informations dues aux chocs et vibrations extérieurs (voir § VII.2)).

### 5. Ensemble **A** lourd et peu résonnant, ensemble **B** léger, déformable, et soumis à des vibrations

Ce cas, à rapprocher des précédents (VI.2, VI.3 et VI.4) présente un certain intérêt. En effet, l'étagère sur laquelle repose un appareil massif et qui a besoin d'immobilité, est si légère et déformable (toutes proportions gardées) que les pointes déterminent son mode de vibration. Si ce mode est présent, l'étagère vibre et l'appareil est immobile (les pointes sont

placées sur des nœuds de vibration). Si on s'éloigne de ce mode, l'étagère s'immobilise, car l'énergie est dissipée dans l'ensemble **A**. Si la masse de **A** est suffisamment grande par rapport à celle de **B**, on aura une impression d'immobilité de **A**.

D'autre part, l'étagère étant assimilable à un corps élastique, nous avons affaire à un montage fonctionnant en filtre coupe-haut : plus la fréquence des vibrations externes sera élevée, moins elles auront de facilités à faire vibrer **A**, car la fréquence de résonance principale du système est très basse.

L'amplitude des mouvements de **A** pourrait ainsi devenir négligeable par rapport au niveau d'exigence souhaitée.

Cette propriété, utilisée sur certains appareils de mesures comme le goniomètre représenté en introduction est connue et utilisée depuis longtemps : quand on frappe sur la table, l'appareil bouge peu. Ce cas intéressant est souvent rencontré chez les utilisateurs de pointe : étagères modestes et appareils alourdis. On remarque toutefois que son intérêt ne concerne que l'isolation d'un système de vibrations extérieures. Dans le cas de vibrations internes produites ou captées par l'appareil même, l'efficacité antivibratoire est nulle.

### 6. Couplage insuffisant entre **A** et la pointe

Nous savons que notre démonstration n'est valide que si la pointe est en couplage parfait avec **A**. Sinon, nous voyons réapparaître le cône d'adhérence entre **A** et la pointe. On peut donc réaliser un couplage par différents moyens en gardant à l'esprit qu'un Scotch double face ou une mousse autocollante induit une liberté de mouvements relative à la pointe, ce qui diminue son intérêt (voir figure 24). Une vis paraît être une meilleure solution, tout en évitant le phénomène suivant (figure 25).

Fig. 24

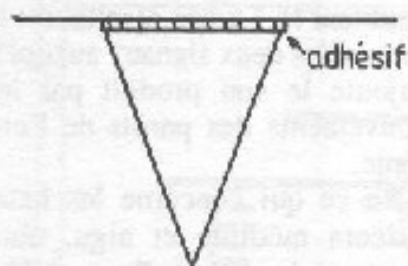
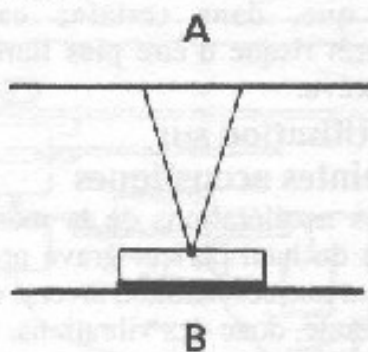


Fig. 27

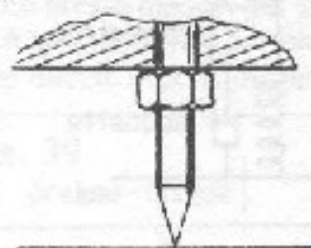


Tout le problème se reporte alors sur le couplage de la crapaudine et de B, sachant qu'une mousse ou un Scotch double face limite l'intérêt du système, qu'un feutre glisse, qu'un collage direct est le plus souvent réprimé par Madame, alors que penser de trous de fixation ?...

### 8. Pointes se déformant sous certaines conditions

Le système triangulé est garant d'une bonne stabilité, il se peut néanmoins que certains modes vibratoires produisent des déformations de la pointe en régime vibratoire. Certaines pointes existent, étudiées dans ce sens (pointes amorties par des anneaux de caoutchouc, matériaux lourds, peu résonnants, etc.), plus la pointe sera longue, plus elle produira de déformations, de flexions (vis rendue pointue en son extrémité) (figure 28).

Fig. 28

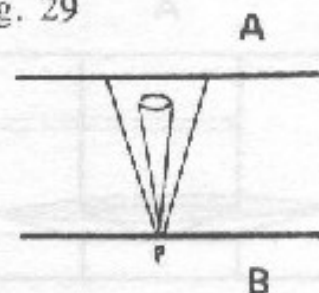


### 9. Point de contact P peu ponctuel

Si la pointe n'est pas très aiguë ou si elle est émoussée, on ne bé-

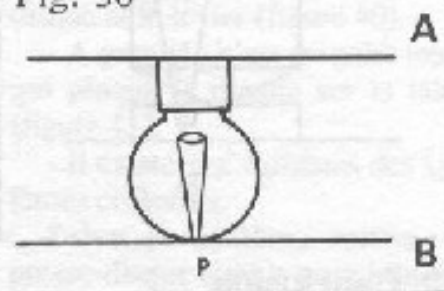
néficiera pas de l'effet d'accrochage sur B, le cône d'adhérence se formera, l'ensemble risque de ne présenter que peu d'intérêt (figure 29). On bénéficiera toute-

Fig. 29



fois de l'effet de stabilité dû à trois points d'appui. (Certains constructeurs proposent de petites sphères pour ne pas abîmer les supports, figure 30).

Fig. 30



D'autre part, certaines pointes sont d'angle très ouvert, de façon, probablement, à éviter les effets de déformations de la pointe (paragraphe précédent); L'accrochage au support est rendu très faible (figure 31) et le système ne fonctionne correctement qu'avec

Fig. 31

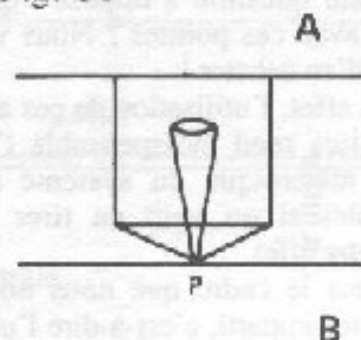
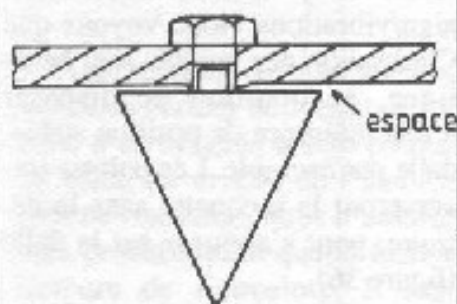


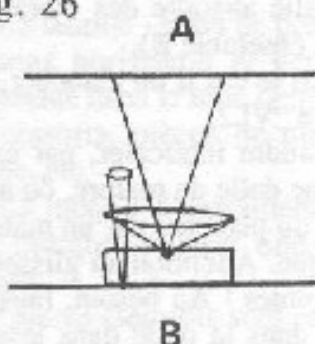
Fig. 25



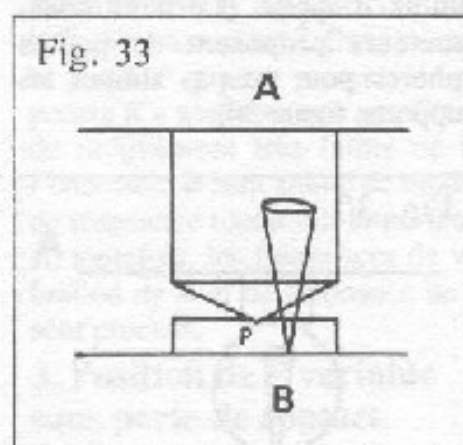
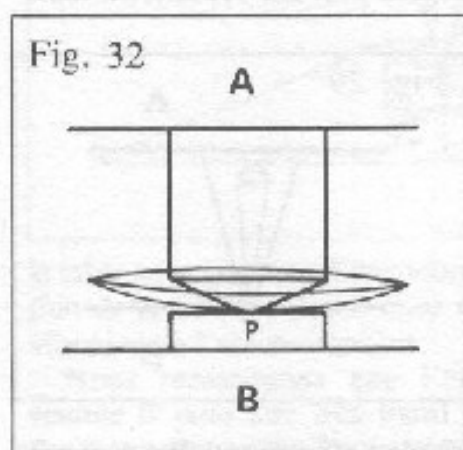
### 7. Présence d'une crapaudine sous la pointe

La plupart du temps, pour éviter de rayer la commode Louis XV en laque de Chine avec nos fameuses et destructrices - et blessantes - pointes, nous y adjoignons une crapaudine - pièce de monnaie, crapaudine comprise dans le prix des pointes, etc. Le couplage entre la pointe et la crapaudine est la plupart du temps satisfaisant : un creux y étant aménagé pour accueillir la pointe, nous obtenons un cône d'adhérence très ouvert (figures 26 et 27).

Fig. 26



une crapaudine fixée en B (figure 32). Si la crapaudine n'est pas fixée, un cône d'adhérence peu ouvert réapparaît (figure 33).



## 10. Conclusion

Plus on s'éloigne des conditions initiales, moins l'effet premier se fait sentir, laissant la place à des phénomènes indésirables jusqu'à rendre le système moins intéressant que s'il n'y avait rien.

## VII. Utilisation des pointes

Au vu de tout ce qui a déjà été dit, une question s'impose : que faire avec ces pointes ? Nous venons d'en acheter !

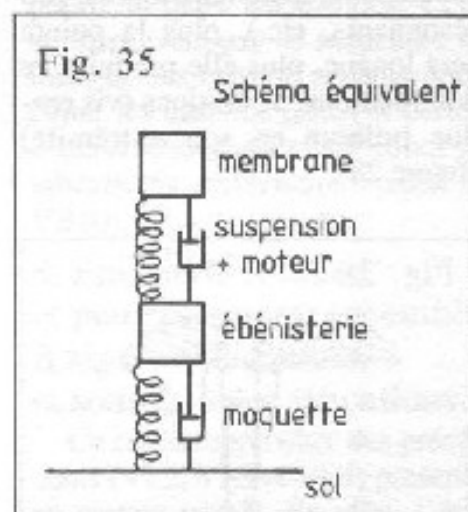
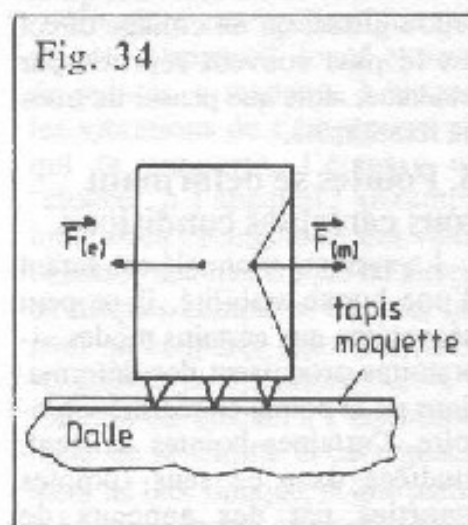
En effet, l'utilisation de ces accessoires rend indispensable l'étude mécanique du système au complet si on veut en tirer le moindre effet.

Dans le cadre que nous nous sommes imparté, c'est-à-dire l'utilisation des pointes sur un système de reproduction sonore, nous pou-

rons trouver quelques applications intéressantes. Nous verrons toutefois que, dans certains cas, l'intérêt risque d'être plus limité que prévu.

### 1. Utilisation sur enceintes acoustiques

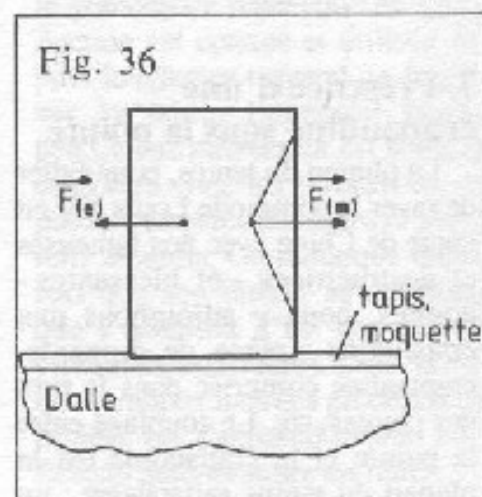
Les accélérations de la membrane du haut-parleur grave produisent une accélération inverse de l'enceinte, donc des vibrations. Si l'enceinte est posée directement sur un tapis, elle sera soumise à un mode de vibration fortement lié à celui du haut-parleur grave (figure 34). Les vibrations sont, bien entendu, causes de distorsion. En ef-



fet, l'ébénisterie est mise en mouvement d'une façon très différente des mouvements du haut-parleur grave. Son inertie est très différente de celle de la membrane. Son mouvement s'ajoute vectoriellement au mouvement de la mem-

brane, transformant le mouvement de la membrane par rapport à une référence de position fixe (c'est l'auditeur !). Le son résultant est la somme des deux signaux auxquels s'ajoute le son produit par les mouvements des parois de l'enceinte.

En ce qui concerne les haut-parleurs médium et aigu, nous assistons, les bras ballants, à leur déplacement avec l'ébénisterie. Le signal obtenu résulte du mouvement de leur membrane auquel s'ajoute le mouvement de l'ébénisterie. Il y a intermodulation aigu/vibrations. Nous voyons que l'utilisation des pointes sera bénéfique, à condition de disposer d'une référence de position stable, dalle par exemple. Les pointes traverseront la moquette sans la détruire, pour s'appuyer sur la dalle (figure 36).

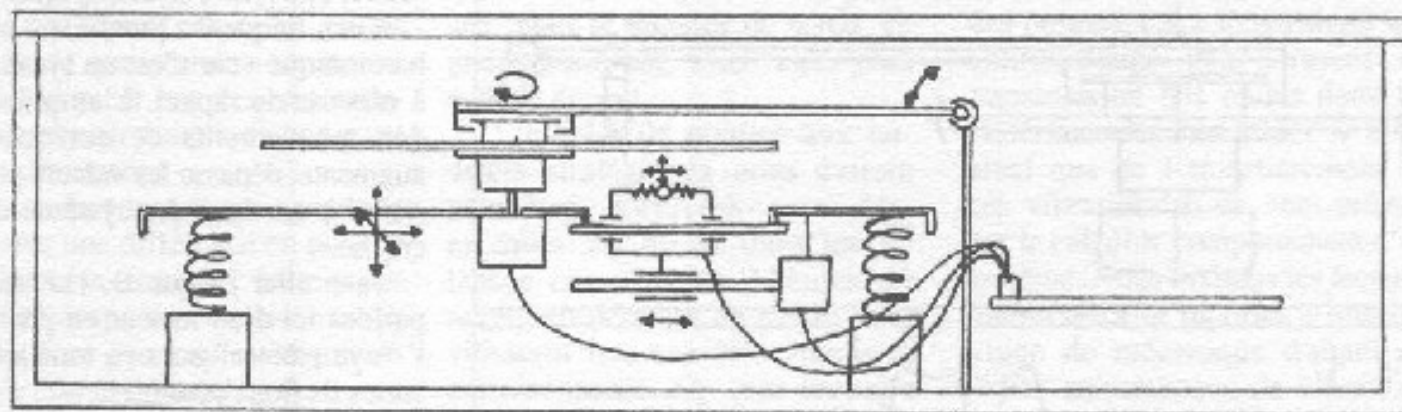


Evidemment, les voisins du dessous risquent d'être au "diapason" du programme musical en cours : aucune isolation phonique n'est à attendre de pointes ! (La dalle absorbe des vibrations, c'est l'ensemble B).

Dans le cas d'un plancher, voir le cas n° VI.2.

Il faudra intercaler, par exemple, une dalle de marbre, ou autre ; isolée du plancher par un matériau élastique. Attention au glissement des pointes ! Au besoin, faire des creux dans la dalle dans lesquels viendront s'insérer les pointes.

Fig. 38



Nous remarquons que nous bénéficions surtout de l'effet de stabilité d'un système à trois pointes. En effet, au niveau de l'amortissement vibratoire, nous n'amortissons probablement que la face inférieure de l'enceinte. Il reste toutes les autres faces, et là, il n'y a pas de pointes.

## 2. Utilisation sur lecteur de disques compacts

S'il est un appareil sur lequel les vibrations posent des problèmes, c'est bien le lecteur de disques compacts. Penchons-nous donc sur cet appareil et examinons cela de plus près.

### 1. L'objet et sa structure (figure 38)

Dans cet appareil, plusieurs objets sont en mouvement direct :

- Le disque et son moteur d'entraînement.

- Le bloc optique dans son ensemble (sur des tiges ou autour d'un axe).

- La lentille - suivi de piste dans les sens horizontal et vertical -, suspendue dans le bloc optique par des ressorts, pièces de plastique souple, etc.

- Le moteur d'entraînement du bloc optique (moteur linéaire ou rotatif).

D'autres éléments sont en mouvement indirect, produit par les précédents :

- La base mécanique, suspendue sur des amortisseurs (ressorts, caoutchouc).

- Les fils de liaison avec les moteurs et le bloc optique qui, en principe, ne devraient pas "traîner" n'importe où et être libres, pour ne pas contrarier l'effet des suspensions.

D'autres éléments sont à considérer :

- Le boîtier, qui isole du mieux qu'il peut l'ensemble des poussières et vibrations extérieures - à moins qu'il ne fasse caisse de résonance.

- De nouveau la base mécanique, qui sera mise en vibration par le boîtier, par voie aérienne et par l'intermédiaire des suspensions, ce qui ne manquera pas de se répercuter sur les premiers éléments : la lentille, le bloc optique, le disque.

- Le presse-disque, qui est soit :

- A pression : en liaison mécanique directe avec le disque et son

moteur. Il sera aussi en couplage vibratoire avec le levier (figure 39).

- Magnétique : le disque est maintenu par un aimant qui le plaque sur la table d'entraînement. Il n'y a pas couplage entre le disque et le levier (figure 40).

- A gravité : c'est un palet lourd qui plaque le disque sur la table (figure 41).

- Il existe des variantes des systèmes ci-dessus.

Selon le système retenu, le presse-disque aura la possibilité de minimiser les vibrations du disque (figure 41), de les amplifier (figure 39) ou de fatiguer au minimum le moteur (figure 40).

- L'électronique qui, éventuellement, est sensible aux vibrations par effet microphonique.

### 2. Fonctionnement : problèmes de vibrations

**Rappel :** Le faisceau de diamètre 1 mm au niveau de la couche réfléchissante, éclaire soit

Fig. 39

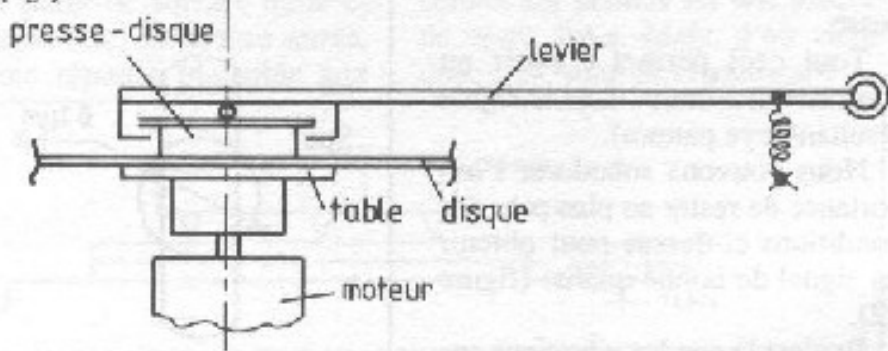


Fig. 40

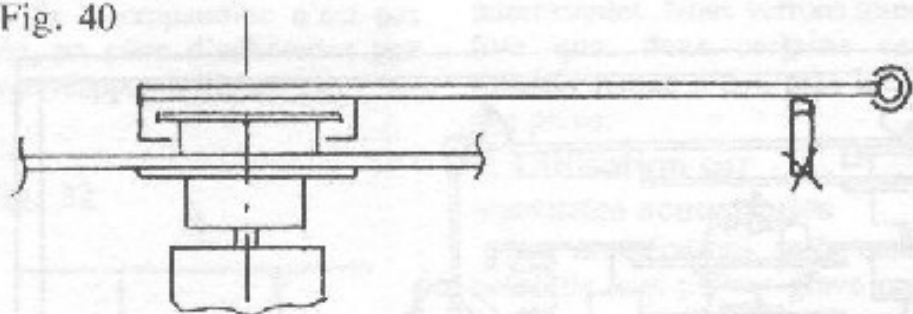
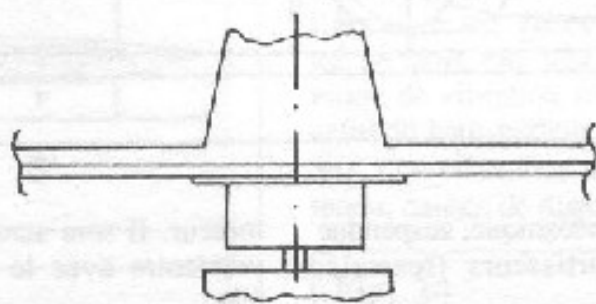


Fig. 41



une surface entièrement réfléchissante, soit une bosse d'épaisseur égale au quart de la longueur d'onde du faisceau à l'intérieur du disque.

Ce qui est "vu" par les capteurs est la somme d'une surface sans bosse et d'une surface avec bosse. S'il n'y a pas de bosse, le bilan est une réflexion maximale. S'il y a une bosse, le bilan est la lumière réfléchi par une surface sans bosse et une surface avec bosse. Comme l'épaisseur d'une bosse est égale à un quart de longueur d'onde, le signal global est annulé par opposition de phase, car le faisceau parcourt un aller plus un retour après réflexion, donc  $2\left(\frac{1}{4}\right) = \frac{1}{2}$  de longueur d'onde. Précisons que, dans la surface "éclairée" par le spot, et en présence d'une bosse, la surface sans bosse est égale à la surface de la bosse.

Tout ceci permet d'avoir un contraste maximum dans le signal résultant (eye pattern).

Nous pouvons subodorer l'importance de rester au plus près des conditions ci-dessus pour obtenir un signal de bonne qualité (figure 42).

Et c'est là que les vibrations en-

trent en jeu.

Le comportement général, en fonction des différents phénomènes, ira d'un fonctionnement sans reproche à l'impossibilité de lecture, en passant par un son crachouillant, des sauts de piste, impossibilité de lire certains disques (variations dans les caractéristiques de la gravure et du coefficient de réflexion).

D'autres phénomènes, mais ce n'est pas le sujet de cet article, brouillent la lecture. Il y en a beaucoup !

Le schéma classique, pour nous, est : le disque tourne, le moteur excite les résonances du disque, le disque vibre à sa fréquence de résonance, la lentille suit le disque (c'est un asservissement), la lentille vibre à la même fréquence que le disque pour pouvoir le lire.

Or, il se trouve que la lentille résonne, elle aussi, à cette fréquence - ou une fréquence proche, ou une harmonique - car c'est un système à ressorts de rappel. L'amplitude des mouvements de correction augmente, dépasse les valeurs possibles à corriger. Le système décroche.

Sans aller jusque là, car nous parlons ici d'un lecteur en panne, l'"eye pattern" aura eu toutes les sortes de flous possibles...

Voici donc dépeint brièvement ci-dessus la réalité des problèmes de vibrations sur les lecteurs de disques compacts.

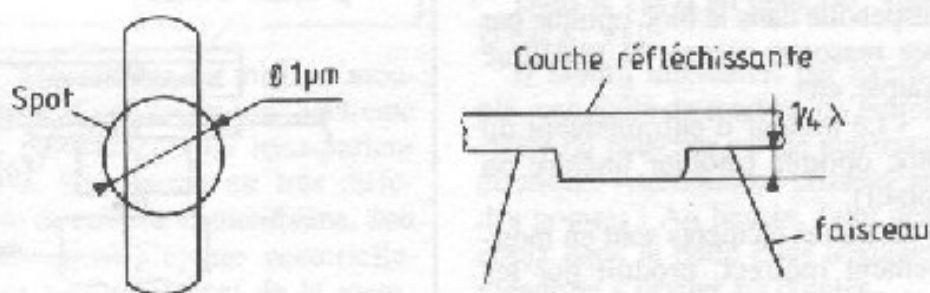
### 3. Les suspensions

Nous voyons qu'un élément sépare ce petit monde du nôtre : les suspensions de la mécanique. Sur certains appareils de bas de gamme, elles sont rigides et inefficaces, mais le bas de gamme, l'Audiophile semble l'ignorer... Plus l'appareil est intéressant, plus les suspensions sont, en principe, efficaces. L'efficacité des suspensions, en augmentant, diminue d'autant l'influence des pointes sous le boîtier, sauf pour d'autres phénomènes :

- Transmissions aériennes des vibrations du boîtier.
- Le phénomène mis en évidence au § IV.4 : l'étagère est prise de violents soubresauts et l'appareil ne bouge pas d'un millimètre (les pointes sont placées sur des nœuds de vibration).

N.B. : Les suspensions, en général, ne sont pas là pour jouer sur des problèmes de vibrations de la

Fig. 42



mécanique. Elles sont là pour éviter les sauts de piste dus à des chocs extérieurs. Il est à noter également que certains constructeurs comptent sur les pieds de l'appareil pour remplir en partie ce rôle... Prudence !

Il est clair que si nous voulons entendre une différence en plaçant des pointes sous un lecteur de disques compacts, nous avons déjà intérêt à ce que l'appareil soit en parfait état de fonctionnement.

Nous avons déjà supprimé les pieds d'origine, nous avons vissé solidement des pointes sur la plaque du fond, nous avons placé l'ensemble sur une dalle de marbre, découplée par un matériau souple. Nous avons creusé des petits trous dans lesquels viennent se loger les pointes. Tout a l'air OK. Nous avons maintenant le choix entre les deux comportements suivants :

- S'asseoir et écouter, profiter pleinement de l'instant présent.
- Continuer à réfléchir.

En conclusion à ce paragraphe, disons que chaque appareil pose ses problèmes particuliers et mérite une étude approfondie. Cette étude ne sera pas à généraliser à d'autres appareils.

### 3. Utilisation sur un amplificateur

Plusieurs causes de vibration sont présentes dans un amplificateur : le transformateur d'alimentation, les transistors de puissance, les tubes et transformateurs de sorties sur les appareils à tubes.

Sur le transformateur d'alimentation, nous pouvons déceler le 50 Hz secteur, superposé à un bruit dû à la modulation de la puissance par le signal : on entend la musique dans le transformateur d'alimentation à forte puissance. Il est évident que le phénomène ne sera audible que sur charge résistive, car si l'ampli est branché sur des enceintes acoustiques, le son des enceintes couvrira ce phénomène de faible amplitude.

On entend parfois aussi "chanter" les transistors de puissance; Quant aux tubes et transfos de sortie, ce phénomène est, chez eux, plus audible encore.

L'emploi de pointes aux endroits stratégiques nous évitera peut-être d'entendre un désagréable 50/100 Hz dans les silences complets de 3 heures du matin, en dérivant en partie cette vibration vers une dalle lourde et antirésonnante. Ce sera toujours mieux que de mettre l'ampli directement sur le plancher ou sur un meuble en bois. Cela dit, beaucoup d'amplificateurs de qualité vibrent très peu...

### 4. Utilisation sur d'autres éléments

Rien ne nous empêche de monter intégralement son système sur des pointes. Un préamplificateur présente peu de phénomènes vibratoires à moins que certains composants ne soient un peu microphoniques. Le remplacement ou l'amortissement ponctuel de ces éléments réglerait plus sûrement de tels problèmes que l'utilisation de pointes, semble-t-il. Il reste encore les magnétophones à cassettes, les radios, les DAT et autres. Cet article donne suffisamment d'éléments utilisables pour laisser à chacun un rôle créatif.

## VIII. Transfert d'énergie vibratoire en fonction de la fréquence

Dans le cadre que nous nous sommes donné - pointes indéformables, point de surface nulle et de position fixe, couplages serrés, etc; - une réponse plausible aux

questions que pose ce paragraphe se trouve en IV : positionnement des pointes. Ceci sous-entend une connaissance des vitesses de transmission des ondes dans les matériaux des ensembles A et B, ainsi que de l'amortissement de ces vibrations si on veut prévoir par le calcul le comportement d'un système. Nous invitons les lecteurs intéressés à se reporter à tout ouvrage de mécanique traitant du sujet : transmission de vibrations et d'ondes.

Si on considère que la pointe est influencée par un comportement vibratoire - qu'elle se déforme donc - dans le cadre de ce paragraphe, les répercussions seront multiples et se rapprocheront des conditions du paragraphe VI : effets dus à des variations des conditions initiales. Il convient donc de choisir, pour construire des pointes, un métal dur, ne s'é-moussant pas, peu résonnant (amorti), de façon à se rapprocher des conditions initiales.

## IX. Conclusion

L'utilisation des pointes en tant que diodes vibratoires ne semble être probante que si les conditions de début d'article sont respectées.

Pour cela, il semble nécessaire de fournir un effort de réflexion et de conception important, de prendre les problèmes à leur base, d'aller au plus simple, au plus efficace.

C'est alors qu'on constatera que les pointes ont un comportement très intéressant, irremplaçable.

Nous saurons aussi éviter des solutions telles que : mini-enceintes sur pointes sur une plaque de verre épais. Mais, d'où vient donc cette sorte de crissement ?

Fig. 43



**Page non  
disponible**



# son cinéma

## L'avenir du son numérique au cinéma

Tomlinson Holman

**A**

*u cours des dernières années sont apparus huit systèmes différents et incompatibles destinés au son numérique dans les salles de cinéma. Certains d'entre eux intègrent la bande sonore au film alors que d'autres utilisent une bande sonore sur support séparé synchronisé au film. Parmi ces systèmes, quelques-uns utilisent des bandes sonores compatibles alors que d'autres sont basés sur de nouveaux procédés.*

Parmi ces systèmes, quelques-uns font usage de compression des données afin de limiter la quantité d'informations à stocker. Pour d'autres, cette solution n'est pas applicable mais nous vivons sur ce point une époque très confuse : espérons donc que de cette confusion pourront émerger de nouvelles opportunités aussi bien pour les exploitants de salles que pour les constructeurs.

Il y a déjà eu, dans le passé, des époques où des technologies différentes étaient en compétition. Bien qu'une trêve technique relative ait régné depuis maintenant un certain

temps, les débuts du cinéma parlant n'étaient pas aussi calmes que ces récentes années. Par exemple, on pourrait appeler la période où fut présenté le cinéma parlant "l'ère de la guerre des formats". Il y eut de nombreux procès et les avocats semblent avoir plus bénéficié de la confusion qui en a résulté que les inventeurs de ces différents systèmes.

Ainsi, avec la présentation de plusieurs systèmes de son numérique, faisons-nous face une nouvelle fois à une seconde guerre des formats !

Quels sont les avantages et les

inconvenients des différents systèmes proposés ? Quels effets vont avoir ces films avec son numérique sur les installations de sonorisation, sur les enceintes par exemple ?

Si l'on prend en compte l'impact général des nouveaux systèmes, la plus grande question que l'on puisse se poser est : "Est-ce que mon système de sonorisation "Classe B" (1) est adapté à ces solutions d'avenir ?" "Est-ce qu'il dispose des corrections physiologiques dans les passages calmes ou forts, d'une bande passante adaptée dans le grave et dans l'aigu, d'une haute intelligibilité des dialogues et

d'une couverture uniforme du son sur l'auditoire pour lui permettre de survivre au challenge imposé par l'apparition des nouveaux systèmes ?"

La raison pour laquelle cette question est si importante est que sa réponse peut avoir un impact considérable sur le budget d'un film. Si le fait d'ajouter des possibilités de son numérique à un système de sonorisation de salles déjà existant est réalisable pour quelques milliers de dollars, le spectateur sera-t-il capable d'entendre la différence ? Que représente l'investissement en fonction de l'état de la salle, de son traitement acoustique pour l'isolation phonique, la réverbération et le contrôle des bruits de fond ? On peut constater que la question devient rapidement plus complexe que le fait de savoir si l'entrée est numérique ou analogique.

## Avant tout, pourquoi le numérique ?

Bien entendu, comme avec l'arrivée de toute nouvelle technologie, la réponse à cette question est à la fois technique et commerciale. La justification sur le plan technique des systèmes audio-numériques est simple : la technologie audio-numérique est un moyen de réaliser un nombre très important de copies qui conserveront chacune toutes les qualités de l'original. Les copies peuvent être alors considérées comme des "clones" de la source d'origine si certaines conditions sont réunies.

Le point faible inhérent à l'analogique est l'impossibilité de réaliser des copies parfaites de génération en génération. Alors qu'une part importante du travail consiste à réenregistrer en analogique pendant la post-production et à engendrer une copie aussi parfaite que possible, un système audio-numérique correctement conçu surpasse ces difficultés en assurant la génération de copies multiples

avec une grande transparence sonore.

En revanche, le problème inhérent à l'audio-numérique n'est pas celui de la copie mais plus exactement celui de la conversion dans les deux sens de l'analogique vers le numérique. Alors que la technique de conversion utilisée pour le Compact-Disc, le principe de la modulation par impulsions codées (PCM ou MIC en français), est bien développée, les systèmes de sonorisation audio-numérique appliqués au film nécessitent des méthodes nouvelles et plus complexes. Ceci est dû au fait que les contraintes de conversion sont plus grandes dans le monde du film, avec un support sur lequel l'espace réservé à la piste sonore est insuffisant pour y inscrire le son en codage numérique conventionnel. Ceci nous conduit à la nécessité de réduire la quantité des données à inscrire, c'est-à-dire à les compresser avant de les enregistrer, avec des conséquences évidentes sur la qualité sonore.

Un autre problème est que, étant donné la manière dont est généralement représentée la formation numérique sur le support (bande, film, etc.), il existe une limite liée au fonctionnement réel du système. En d'autres termes, les systèmes audio-numériques peuvent fonctionner parfaitement en raison de leur principe de correction d'erreurs sophistiqué alors qu'en fait ils tendent à devenir de moins en moins efficaces. Par contraste, les systèmes analogiques sont plus "progressifs" et donnent des signes de dégradation sonore avant d'avoir atteint le seuil de l'inefficacité.

Pour quels cas l'analogique et le numérique sont-ils le mieux adaptés ? L'analogique est actuellement excellent en début et en fin de traitement : préamplificateur de micro et amplificateur de puissance pilotant les enceintes. De plus, il est également le plus pratique pour de nombreux processus de production

complexes car la technologie audio-numérique équivalente n'existe pas ou n'est pas applicable en raison de ses prix énormes. Malgré tout, l'utilisation de la technologie audio-numérique se vulgarise de jour en jour dans la production et la post-production cinématographique et le fait qu'elle devienne prédominante n'est qu'une question de temps.

Comme nous l'avons déjà mentionné, la technologie audio-numérique est excellente lorsqu'il est souhaitable de réaliser de nombreuses copies avec les mêmes performances que celles de l'original. Cette définition convient particulièrement bien aux copies d'exploitation puisque la technologie du son cinéma s'est concentrée dès ses débuts afin de procurer à chaque spectateur, quelle que soit sa place dans la salle, la même expérience. Donc, et sans aucun doute sur ce point, il y a une adéquation parfaite entre les besoins de l'industrie cinématographique et les possibilités offertes par la technologie du son audio-numérique en ce qui concerne les copies de films.

L'autre argument présenté ci-dessus est le marketing. A une époque où le mot "audio-numérique" signifiait pour la plupart des gens une meilleure qualité sonore grâce à la popularité du Compact Disc, le fait que l'industrie cinématographique continue à utiliser des systèmes sonores analogiques peut sembler pour le moins aberrant pour certains. Bien que nous ne devrions pas être amenés à utiliser une nouvelle technologie uniquement pour impressionner les clients, ce facteur signifie que certains d'entre eux attendent maintenant des représentations avec une qualité sonore supérieure à celle dont ils disposent déjà à domicile !

## Standards numériques

Tous les systèmes de sonorisation audio-numérique, pour les applications du cinéma, adhèrent-ils à l'exception d'un seul d'entre eux ?

aux recommandations de la Sous-Commission Digital Sound on Film (2) du standard SMPTE en ce qui concerne le nombre de canaux de la bande son et leur disposition sur le support. Ceci implique trois canaux au niveau de l'écran, à droite, à gauche et au centre, deux canaux d'ambiance "Surround" gauche et droit et un canal grave pilotant un caisson grave. Un des systèmes actuellement en concurrence préconise cinq canaux au niveau de l'écran au lieu de trois mais se conforme pour le reste aux recommandations de la Sous-Commission. La Sous-Commission, qui s'est consacrée à ces travaux de standardisation depuis plusieurs années, s'est également penchée sur des questions de volume sonore de référence, de bande passante et de dynamique. Tous les systèmes concurrents adhèrent à ce standard. Celui-ci définit que tout système de sonorisation du numérique doit avoir une bande passante aussi étendue que celle de l'original à partir duquel ont été générées les copies. Il définit également une limite supérieure pratique : les systèmes de sonorisation utilisés au cinéma ne sont pas censés faire autant de bruit qu'un concert de rock en public.

## **Bande sonore intégrée au film contre bande sonore séparée et synchronisée**

En examinant les différences entre les divers systèmes numériques, nous pouvons les répartir en deux catégories : la piste sonore est placée soit directement sur le film lui-même, soit sur un support séparé (tel que disque ou bande) dont la lecture s'effectue en synchronisation avec le film.

Les systèmes intégrant la bande sonore au film présentent l'avantage naturel de ne nécessiter qu'un seul support pour transporter l'ensemble de la copie dans les salles.

Néanmoins, les tenants des divers systèmes bande sonore séparée et synchronisée mettent en avant certains avantages potentiels : l'un des avantages de l'enregistrement de la bande sonore sur un autre support que celui du film est que ce dernier n'est rien de plus qu'une copie ordinaire sans autre modification en ce qui concerne la production ou la distribution. En utilisant ces systèmes, l'électronique doit assurer une tâche supplémentaire qui consiste à synchroniser parfaitement l'image et le son selon un procédé défini. D'un autre côté, certaines configurations électroniques nécessitent l'enregistrement sur le film d'une piste étroite de synchronisation appelée "Time Code". Ce procédé ne perturbe pas la qualité de l'image et n'exclut pas l'utilisation d'une bande sonore conventionnelle. Son coût de revient est seulement un peu plus élevé que celui des procédés habituels.

Un autre avantage potentiel des systèmes à bande sonore séparée et synchronisée concerne l'usure du film. Un disque optique s'utilise sans aucune usure mécanique, ce qui lui confère une grande longévité. Le procédé IMAX par exemple utilise avec de bons résultats des Compact-Discs synchronisés au film pour des séances de longue durée. Il ne faut pas pour autant ignorer les autres formats audio-numériques sur bandes magnétiques. Certains d'entre eux ont fait la preuve de leur fiabilité dans des applications informatiques exigeantes. Les systèmes à bande sonore séparée et synchronisée peuvent également faire appel au Compact-Disc conventionnel dont la technologie est parfaitement maîtrisée. A l'opposé, les systèmes intégrant la bande sonore au film posent toujours des problèmes d'espace limité aux bords du film ou entre les perforations. Ceci élimine la possibilité de mettre en œuvre des procédés plus complexes.

## **Copie simple contre copie spécialisée**

Avec les systèmes audio-numériques intégrant la piste sonore et le film, la question est de savoir si les copies d'exploitation sont compatibles ou non avec les copies conventionnelles. Les copies compatibles (appelées également copies simples) comportent une piste sonore conventionnelle doublée d'une piste audio-numérique placée à un autre endroit sur le support. Les copies non compatibles n'utilisent que la bande sonore analogique ou bien encore uniquement la bande sonore audio-numérique. Dans chaque cas, on dispose d'une plus grande surface sur le support, avec les avantages d'une meilleure qualité sonore ou de possibilités de corrections d'erreurs plus sophistiquées. Mais ces avantages sont contrebalancés par des difficultés au niveau de la distribution et de la circulation des copies. Un autre avantage de la copie simple est que celle-ci, par définition, doit contenir également une bande sonore conventionnelle. Cela signifie qu'il existe une solution de secours lorsque des problèmes se produisent sur la piste numérique.

Nous avons mentionné plus haut que la plupart des systèmes audio-numériques sont susceptibles de pannes brutales, c'est-à-dire sans avertissement. Ainsi, la possibilité de détection d'une panne avec commutation automatique sur la piste de secours analogique est un avantage important.

## **Les modifications conséquentes à l'installation d'un système audio-numérique**

Il peut paraître surprenant pour certains d'apprendre que, malgré la grande qualité de la bande sonore disponible sur un film 70 mm, il

s'avère nécessaire d'effectuer un réglage approprié du système de sonorisation dans chaque salle. Un spectateur moyen est capable de discerner parfaitement toute variation d'équilibre entre les graves et les aigus ou bien encore des variations au niveau de la bande passante. Bien que cela ne soit pas toujours nécessaire, la pratique veut qu'un réglage soit effectué à chaque copie. J'ai vu récemment un film dans sa phase de doublage juste en fin de post-production et j'ai eu l'occasion de revoir une semaine plus tard ce film sur support 70 mm lors d'une première. La différence était frappante car je me suis aperçu que le résultat était réellement dépendant des performances du système de sonorisation. Dans la salle, les graves étaient déficients. Pourtant, le studio de doublage avait pris le soin de s'équiper du même système de sonorisation "Classe B" que celui de la salle. En plus, les dimensions du studio de doublage et celles de la salle étaient sensiblement les mêmes ! La différence provenait du fait que la copie analogique sur le support 70 mm était déficiente en graves. De ce fait, il était impossible de faire ressentir à l'auditoire la sensation qu'avait souhaitée le réalisateur. Lors de la post-production, le système de contrôle de qualité "TAP" (Theatre Alignment Program) proposé par Lucas Arts aurait révélé un tel problème. Ainsi, le fait que le système audio-numérique assure d'un jour à l'autre des résultats stables et cohérents est extrêmement important pour l'exploitation commerciale d'un film. De plus, les systèmes audio-numériques devraient nous débarrasser d'autres réglages relatifs aux installations de sonorisation dits "Classe A" (1) que tous les techniciens connaissent bien : variations d'un mois à l'autre des composants, des tubes, dérive mécanique, imperfections des réglages autres maladies dont souffrent souvent ces systèmes. Bien sûr, il reste à

savoir que ces nouveaux systèmes audio-numériques sont délicats et sujets eux aussi à des réglages perpétuels.

## Quel procédé a été retenu ?

Mais un autre aspect également connu concerne le fait que l'audio-numérique n'est pas séparable de la compensation acoustique de la salle, donc de l'équilibre sophistiqué devant être effectué entre les graves et les aigus. Ce problème n'est pas nouveau. Dès les années 30, on parlait à ce propos "de la reproduction de toutes les notes d'un piano avec la même force". L'égalisation de la salle (3) est utilisée par tous les systèmes pour améliorer de manière importante l'uniformité d'une salle à l'autre et ce procédé restera nécessaire tant que les salles seront différentes. Ce procédé pourra un jour être traité en numérique mais les caractéristiques qui affectent aujourd'hui l'acoustique d'une salle l'affecteront encore demain : il existe une moyenne spatiale et un délai temporel moyen qui produisent dans une salle un son aux résultats cohérents.

## Autres points de détails du système de sonorisation

Les performances d'un système de sonorisation dit "Classe B" (1) telles qu'elles sont décrites ci-dessus sont tout aussi importantes que la qualité sonore globale obtenue lors de l'installation de nouveaux systèmes audio-numériques dans les salles. Il est également important que la bonne conception du son qui se développe depuis des années devienne plus évidente lorsque le système est lui-même amélioré. Nous avons découvert, il y a longtemps, que fabriquer et commercialiser des produits pour l'insonorisation, pour le traitement acoustique, n'était pas forcément le meilleur moyen pour obtenir une

qualité sonore uniforme dans les salles.

Les impératifs d'une bonne acoustique doivent être pris en compte lors de la conception d'ensemble d'une salle. L'isolation des sources de bruit provenant de l'extérieur ou des salles voisines est devenu un problème familier pour les architectes. Elle fait toute la différence entre un complexe de salles et un autre. Plus subtil mais tout aussi évident est le bruit de fond du système de climatisation. Est-il suffisamment discret pour permettre d'exploiter des sons très faibles que peuvent reproduire les systèmes audio-numériques ? Une bonne installation de sonorisation prend en compte ce bruit de fond et améliore le rapport signal/bruit, donc l'intelligibilité des petits signaux. Le temps de réverbération doit également être contrôlé. Des caractéristiques de réverbération et de celles de bruit de fond vont découler des performances en relation avec les caractéristiques des enceintes. Il en résultera un degré d'intelligibilité du dialogue plus ou moins bon.

Un temps de réverbération réduit accroît sensiblement le pouvoir de localisation spatiale en stéréo, chose très importante sur les systèmes audio-numériques. En effet, les systèmes audio-numériques disposent d'au moins cinq canaux distincts en large bande. Il est donc souhaitable que le spectateur puisse localiser la direction de chacun de ces canaux. Ceci est amélioré dans une salle où le temps de réverbération est court tandis que dans une salle où le temps de réverbération est long, les canaux ont tendance à se fondre les uns dans les autres.

La puissance de l'amplificateur de même que la sensibilité des enceintes, doivent être prises en considération si l'on vise une faible distorsion à travers une grande plage dynamique. En 1983, le procédé THX (Tomlinson Holman eXperiments) a défini une obligation dans les installations de sono-

risation impliquant que le niveau sonore maximum pouvant être obtenu soit plus important que celui obtenu jusqu'à présent à partir des bandes sonores magnétiques utilisées en post-production. Cela signifie qu'il est pratiquement impossible d'entendre la distorsion de l'amplificateur de puissance dans une installation agréée THX fonctionnant à partir d'un niveau sonore étalonné : la distorsion produite au niveau de la bande son du film interviendra avant celle du système de sonorisation. Aujourd'hui, avec les systèmes de sonorisation audio-numériques, on atteint des performances identiques à celles obtenues au moment du traitement en post-production. L'exploitation de ces possibilités dans les meilleures installations de sonorisation permettent alors de reproduire les plus hauts niveaux sonores souhaitables sans aucune distorsion. En fait, les systèmes agréés THX prévoient une marge de sécurité à propos du niveau sonore maximum qui excède les possibilités des systèmes audio-numériques.

## A propos de "Digital Ready"

Malgré son utilisation en marketing, le terme "Digital Ready" peut s'appliquer aux équipements sonores courants : amplificateurs et enceintes prévus pour accepter une source audio-numérique, convertisseurs numérique/analogique. Il reste à savoir si les systèmes de sonorisation "Classe B" peuvent traiter complètement les signaux sans distorsion et si les autres critères concernant la transmission du son dans la salle sont atteints. Ces critères sont :

- 1) large bande passante amplitude/fréquence ;
- 2) réponse "douce" sur toute la gamme audio ;
- 3) couverture sonore uniforme sur tous les spectateurs ;

4) larges capacités dynamiques et faible distorsion ;

5) grande intelligibilité des dialogues ;

6) bonne localisation des sources frontales au niveau de l'écran ;

7) effet réaliste et efficace de l'environnement sonore "Surround".

## Conclusion

Nous avons présenté le son audio-numérique face aux contraintes du choix d'un système de sonorisation. Il existe sur les marchés plusieurs systèmes audio-numériques qui lancent tous le même défi. Insistons en précisant que les améliorations dues à l'apport des technologies audio-numériques seront complètement dépendantes de tout le système de sonorisation ainsi que des caractéristiques acoustiques des salles.

(1) Les systèmes traditionnels de sonorisation se divisent en deux parties : les systèmes dits "Classe A" et les systèmes dits "Classe B". Les systèmes dits "Classe A" sont ceux qui comprennent le film, la bande sonore, la tête de lecture qui reproduit le son et le signal standard. C'est à la sortie du système "Classe A" que sont créées les différentes sources : analogique, optique, magnétique sur support 35 ou 70 mm, son numérique sur film ou support séparé. Le tout avec la plus grande compatibilité possible. Les systèmes "Classe B" sont le reste du système de sonorisation qui comprend la correction acoustique de la salle, les filtrages et corrections électroniques, les amplificateurs de puissance et l'acoustique de la salle. Les systèmes "Classe B" sont prévus pour être utilisés à partir de n'importe quelle source analogique, optique, numérique, magnétique avec bande sonore sur film ou support séparé.

(2) "Digital Sound on Film" est peut-être un terme mal choisi. Il serait préférable de parler de Digital Sound for Film puisque ses conclusions concernent le son enregistré ou non sur le film.

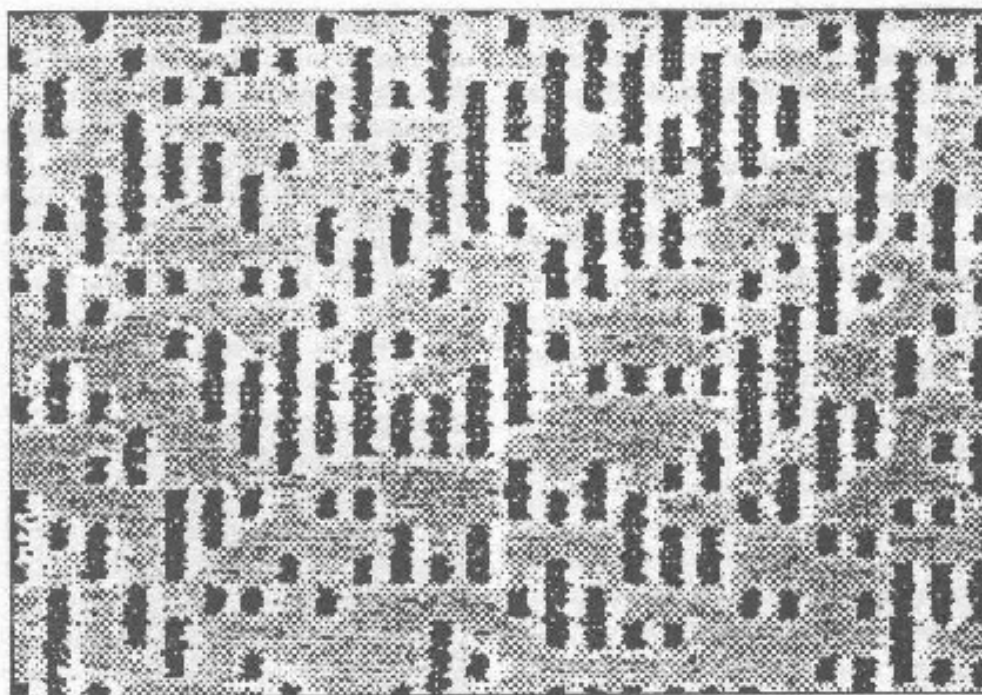
(3) On pourrait dire également que "l'égalisation de la salle" a été plus souvent réellement utilisée dans le

passé pour résoudre les problèmes d'enceintes plutôt que pour corriger des défauts propres à la salle. Plus récemment, des systèmes d'enceintes standardisées ont été installés dans les salles, les différences acoustiques d'une salle à l'autre étant compensées à l'aide d'égaliseurs.

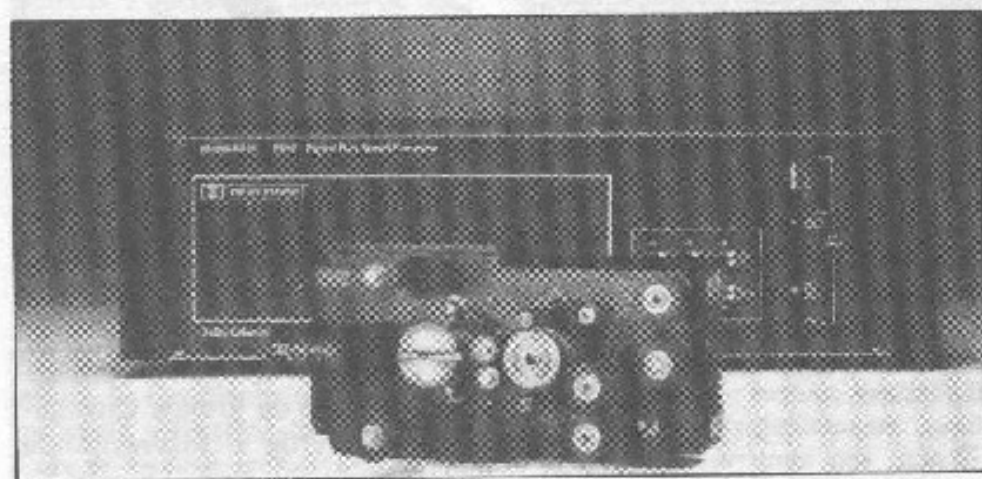


Tomlinson Holman est professeur associé du groupe Cinéma-Télévision de l'Université de Californie du Sud. Depuis de longues années, il est associé au groupe THX Sound System de Lucas Arts. Il est également chairman de l'Audio Recording & Reproduction Technology Committee de la SMPTE. Il a été nommé membre de l'AES, BKSTS et SMPTE. Ses travaux pour le programme THX lui ont valu deux médailles de la part de la SMPTE. Tomlinson Holman est également l'un des créateurs des électroniques audio haut de gamme "APT Holman" que l'on a connues à la fin des années 70.

\* Imprimé avec l'autorisation de Box-office Magazine.



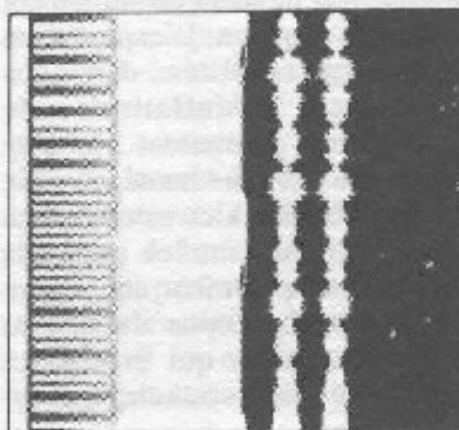
Microphotographie d'une piste audionumérique codée CDS-Kodak. Proposé en 1991, il a été abandonné.



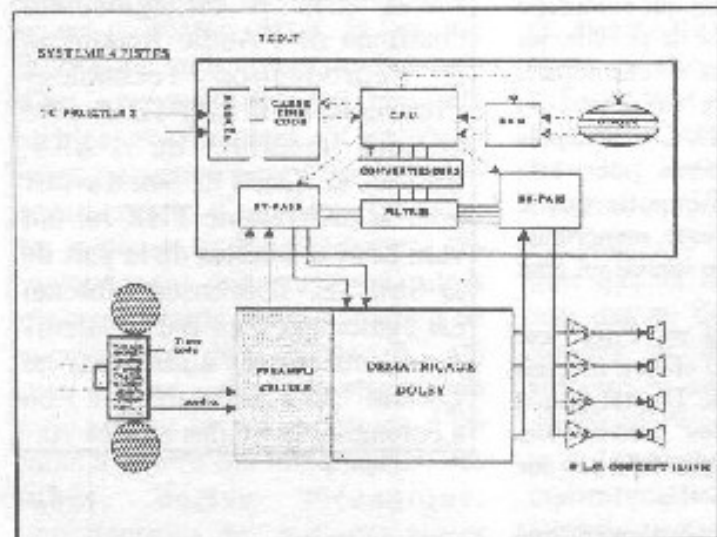
Dolby SR-D. Au premier plan, le lecteur opto-numérique 699 avec, en arrière-plan, le processeur audio-numérique DA-10.



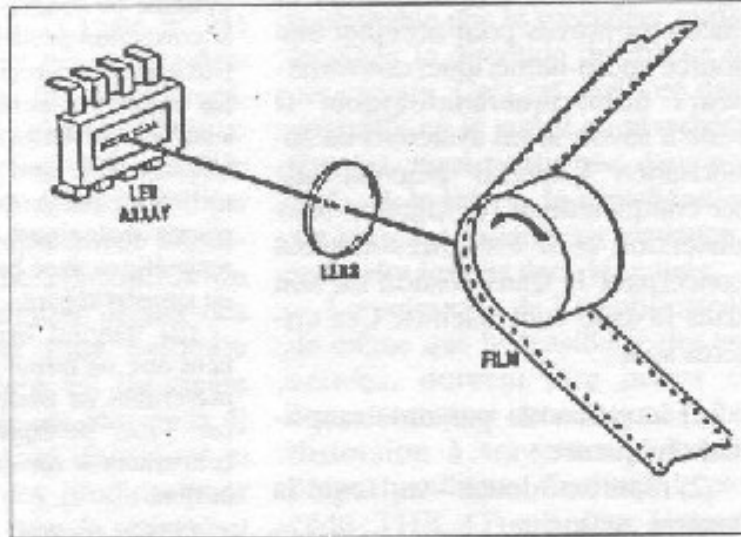
Procédé Dolby Stereo SR-D. Les pistes optiques traditionnelles sont conservées. La piste opto-numérique prend place sous forme de blocs entre les perforations du film. Ce procédé continue de se vulgariser.



Procédé français LC Concept. Un "code barre" situé entre le bord du film et les perforations assure la synchronisation avec un lecteur magnéto-optique séparé. Les pistes optiques traditionnelles sont conservées, ce qui le rend compatible avec les systèmes-son traditionnels.



Configuration d'un système LC Concept compatible Dolby.



Principe de la lecture de la piste sonore codée d'un film selon le procédé Kodak-CDS.

## Quelques précisions

En matière de son comme d'image, la guerre des formats date du début du cinéma. Depuis toujours, les exploitants savent que le succès commercial de chaque innovation, aussi attrayante soit-elle, reste lié à des problèmes de vulgarisation et de standard. A propos de qualité sonore ou d'intelligibilité du dialogue, on sait parfaitement que des procédés récents comme le Dolby SR permettent d'obtenir en analogique des performances remarquables, le tout étant principalement une question d'optimisation, d'acoustique et de réglages. Ces bons exemples sont rares (voir texte de Tomlinson Holman). Cette triste constatation (la grande majorité des salles parisiennes sont encore équipées en mono avec du matériel parfois ancien ou mal entretenu) n'a jamais empêché l'industrie du cinéma d'aller toujours plus loin en avant en perfectionnements. Plusieurs efforts dans ce sens ont été constatés. Mais c'est sans doute l'énorme succès du compact-disque dans le domaine grand public qui a incité l'industrie du cinéma à passer rapidement du système analogique au système audionumérique. On assiste depuis peu à la guerre des formats audionumériques. Certains sont tués dans l'œuf ou restent à l'état de prototypes, d'autres sont lancés avec de gros efforts médiatiques pour subir peu après un échec cuisant, d'autres coexistent dans l'attente de l'adoption d'un standard unique.

**Le procédé C.D.S.** proposé par Kodak/ORC dès la fin 90 (voir n° 20, Avril 92, pages 10 et 11) a été utilisé pour des films comme "Dick Tracy", "The Doors". Ce précurseur était bien parti car 600 salles américaines étaient déjà équipées en CDS/ORC lorsque le projet fut abandonné pour des raisons sans doute plus commerciales que techniques. Rappelons qu'il offrait 9 pistes (16 bits, compression des données en modulation Delta), dont 6 pour l'audio. La piste son codée, composée de 180 colonnes de données était placée entre les dents du film et l'image.

**Le procédé Dolby SR-D** a été proposé dès 1991 par Dolby Laboratories. Il joue la carte de la compatibilité. En effet, rien, du moins en apparence, ne différencie une copie standard 35 mm comportant deux pistes optiques d'une copie SR-D. La compatibilité est un mot facile, à condition de trouver l'endroit sur le film pour y placer, en plus des pistes optiques traditionnelles, la piste audionumérique codée. Pas question donc d'empiéter sur les territoires réservés au son ou à l'image. Dans ce procédé, les informations codées prennent place sous forme de blocs entre les perforations du film. Bien entendu, cette solution n'aurait pas été adoptée par Dolby s'il s'était posé des problèmes de fiabilité conséquents à l'usure ou aux rayures des copies. Les informations codées étant optiques et de taille relativement importante, il n'en résulte qu'une augmentation modérée du coût de revient. Le tirage des pistes son analogique et numérique s'effectue en une seule fois et il n'est pas nécessaire d'utiliser des tireuses "haute définition" ni des films spéciaux à grain ultra fin, ni les coûteux supports à piste magnétique rapportée. On obtient, en association avec le processeur Dolby SR-D CP-3 cinq canaux à large bande passante et un canal supplémentaire réservé aux fréquences graves. En cas de défaillance de la piste numérique, le système de lecture bascule automatiquement sur les pistes optiques. Rappelons qu'en format Dolby SR, on obtient plus de 90 dB de dynamique et plus de 16 kHz de bande passante. Ainsi, même en cas de problème, la commutation automatique en mode analogique ne produit aucune dégradation sensible du son. En France, une trentaine de salles en sont déjà équipées. Elles coexistent avec un autre procédé, français cette fois, le LC Concept. En réalisant ainsi des copies mixtes Dolby SR/SRD (cas de plusieurs films dont la parution est imminente) il suffit aux exploitants d'équiper leur salle pour disposer des possibilités du SR-D à partir des mêmes films.

**Le procédé LC Concept** reprend les premiers procédés de cinéma parlant, c'est-à-dire avec la piste sonore sur support séparé synchronisé au film. Ce procédé d'origine française (Löchen-Chedeville) utilise un support opto-numérique sur disque, la synchronisation s'effectuant à l'aide du code SMPTE (Time code) situé sur le bord du film. Les avantages sont nombreux: compatibilité totale car les pistes optiques (Dolby SR par exemple) sont conservées, passage d'une version anglaise à une version française ou étrangère par simple changement du disque, possibilité d'adjonction d'un projecteur séparé pour le sous-titrage, pas de limitation de nombre de pistes (4 pistes, 6 pistes ou plus), 2 heures 25 minutes de lecture par disque, avec possibilité de raccord non audible avec un éventuel disque suivant, absence du risque de confusion d'un support-son avec une autre copie. L'adaptation du lecteur de "codes barres" sur le projecteur est simple et le procédé utilise les processeurs LC 4 ou LC 6 dans lesquels viennent s'insérer les disques qui se présentent sous forme de cassette, donc à l'abri des traces de doigts, des rayures et des poussières. Pour plus d'informations, on pourra se reporter au n° 21 de L'Audiophile (Juin 92).

**Le procédé DTS** résulte de l'association Matsushita et Universal. Déjà utilisé dans plusieurs centaines de salles dans le monde (plus de 600), le procédé Digital Theatre Systems fait lui aussi usage d'un support opto-numérique séparé et synchronisé au film, ce qui est d'ailleurs à l'origine de conflits entre ce groupe et la firme LC Concept. Il en est fait beaucoup état actuellement, en particulier depuis la sortie du film Jurassic Park.

**Le procédé SDDS** équipe une partie du réseau américain, soit près de 250 salles du réseau AMC. Le procédé "Sony Dynamic Digital Sound" a été lancé à partir de l'association des firmes Sony, Tristar et Columbia. Sony étant de plus propriétaire de près d'un millier d'écrans aux U.S.A., ceux de la chaîne Loews, un développement rapide à court terme est possible. Même en cas de succès total, il faut néanmoins savoir que le plus gros réseau américain est United Artists Communications... qui dispose de plus de 2 000 salles.

Comme énoncé plus haut, la guerre des standards dans ce domaine ne fait que commencer et il est fort probable que l'on assiste à la coexistence de plusieurs procédés pendant une période plus ou moins longue.

En réalité il ne s'agit que d'un "petit détail" pour un exploitant de salle, son plus gros problème étant celui de la rentabilité, celui des salles obscures qui tendent à fermer les unes après les autres, ceux qui réagissent à contre-courant ayant compris qu'il fallait jouer sur le confort, sur la qualité du son et de l'image pour regagner en popularité. Ils ont sans doute raison.

J.H.

**Page non  
disponible**





# Chronique d'une optimisation sous contraintes

## 4ème partie



*a procédure itérative initiale d'ajustement du système est généralisée au traitement du bas du spectre audible. Celui-ci constitue l'essentiel de cette quatrième partie et met en lumière l'importance subjective du traitement correct du soubassement sonore d'un système multivoie.*

*Un parallèle est fait entre la Transformée de Fourier rapide et la méthode d'ajustement proposée. En guise de point d'orgue à cette chronique, une touche de modernisme conduit tout naturellement à l'informatisation de la procédure proposée, ce qui n'implique pas que le matériel de réglage utilisé soit frappé d'obsolescence et doit être voué aux gémonies... !*

### 13.4.3 Affinement de la procédure

La partie de la fig 42 dessinée en trait plein visualise en la simplifiant la procédure décrite en 7.3.2 : la corrélation entre les mesures de type fréquentiel (bruit rose) et celles de type temporel (impulsion) y apparaît clairement, mais cette procédure était taillée sur mesure pour une impulsion de 1,2 ms. Il faut donc s'assurer du fait que les méthodes et réglages

utilisés avec une impulsion de 10 ms en fig. 40 et 41 (sur base de 7.3.2) donnent des résultats cohérents lorsqu'une durée de 1,2 ms est à nouveau utilisée. C'est le but des compléments en trait interrompu introduits sur la fig. 42 et matérialisés par les oscillogrammes de la fig. 44 qui sera analysée ci-dessous.

Il faut signaler que, si ces vérifications sont relativement aisées à 1 m de distance, elles sont nette-

ment plus complexes, voire impossibles à 4 m, car les phénomènes vibratoires y sont plus flous : l'affaiblissement en pression acoustique de 1 à 4 m est très différent en passant de l'EG à l'A.

### 13.4.4 La transformée de Fourier : comment contourner l'incontournable ?

• Une réflexion très générale sur cette fig. 42 vue de Sirius permet de faire un parallèle intéressant

## Extension de la procédure de réglage à des impulsions de 10 ms

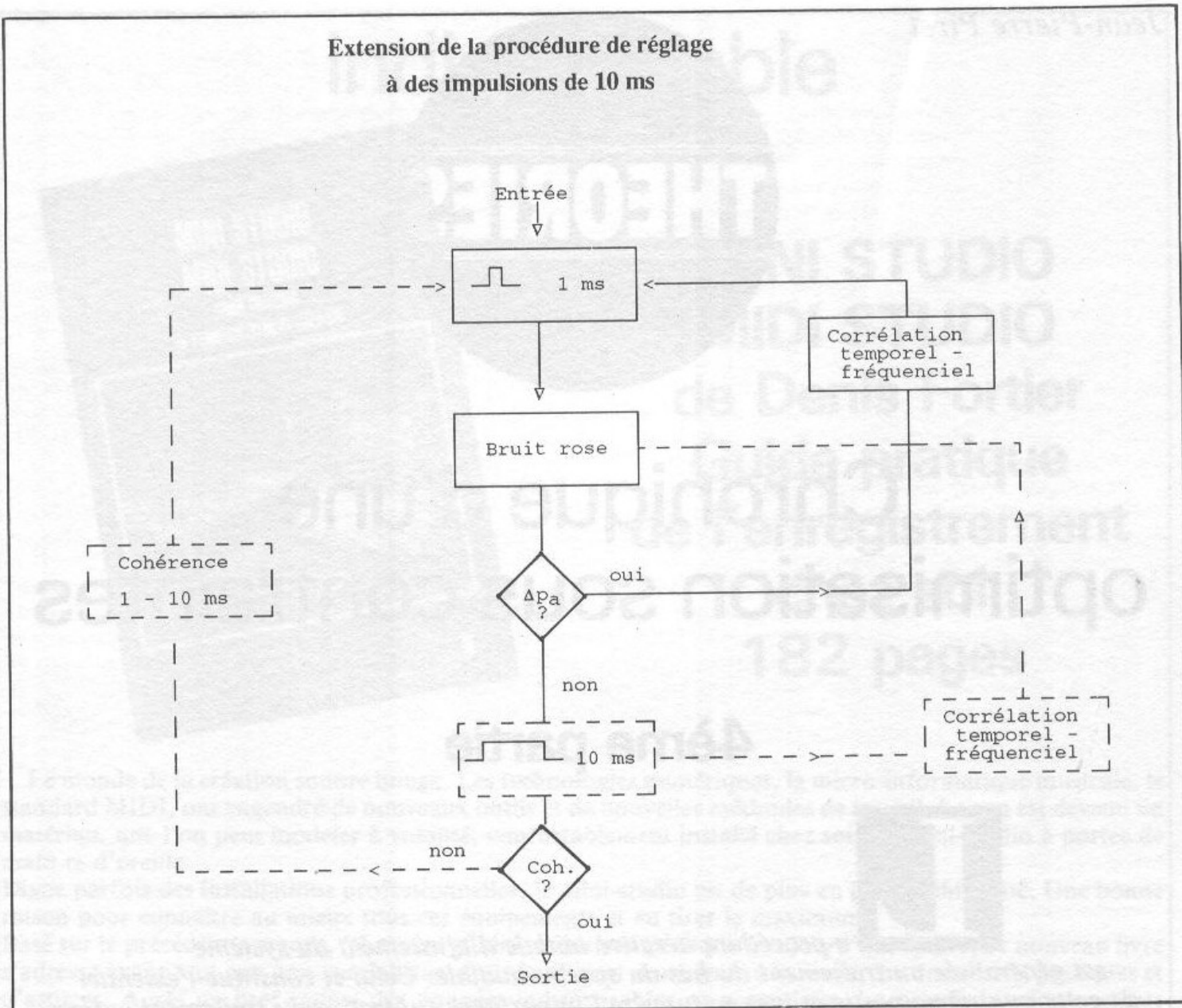


Fig. 42 : Extension de la procédure de réglage à des impulsions de 10 ms.

avec la transformée de Fourier. Cet apparentement dans les fondements s'explique comme suit :

- La transformée de Fourier est un outil très complet d'analyse des systèmes. Elle transpose du domaine temporel  $t$  au domaine fréquentiel  $f$  les amplitudes  $A$  et les phases  $\phi$  (fig. 43) mais nécessite :

- des moyens de calcul puissants (ordinateur portable) et un logiciel adéquat (transformée de Fourier rapide) ;
- une chambre sourde pour éliminer les bruits ambiants ;
- des impulsions extrêmement

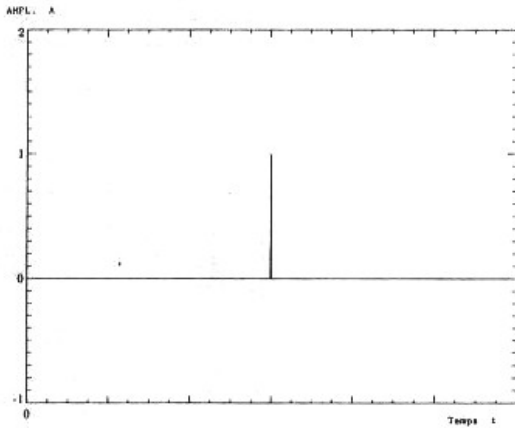
brèves (impulsion unité) de façon à couvrir tout le spectre utile (20 Hz-20 kHz dans le cas de l'audio).

La première condition nécessite l'achat d'un ordinateur portable et de convertisseurs A/N ; des logiciels réalisant la transformée de Fourier rapide sont maintenant du domaine public [4] et ne représentent qu'une trentaine d'instructions Fortran. La deuxième condition est rédhibitoire... car aucun mélomane n'est prêt à l'écoute en chambre sourde. La troisième condition est extrêmement racile à remplir mais conduit à une impossibilité pratique en milieu ambiant.

Il faut en effet réaliser que, pour transférer à une enceinte acoustique suffisamment d'énergie que pour réaliser des mesures en *milieu normal* avec une impulsion unité ( $\approx 5 \mu s$  chez les constructeurs d'après [2]), il faudrait utiliser des amplitudes ( $A$  sur la fig. 43) énormes pour obtenir un résultat audible et mesurable mais... en détruisant inévitablement le matériel !

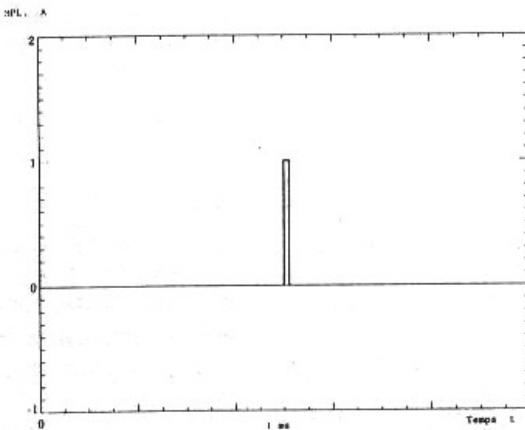
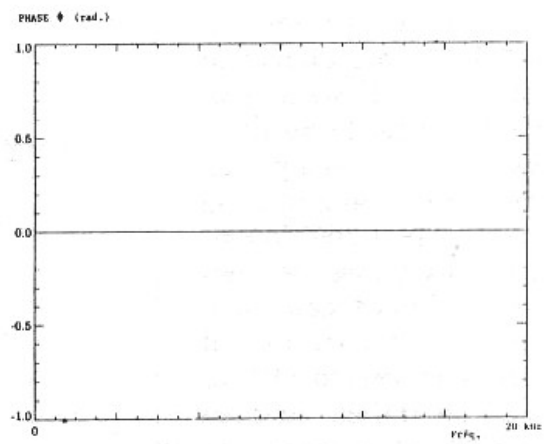
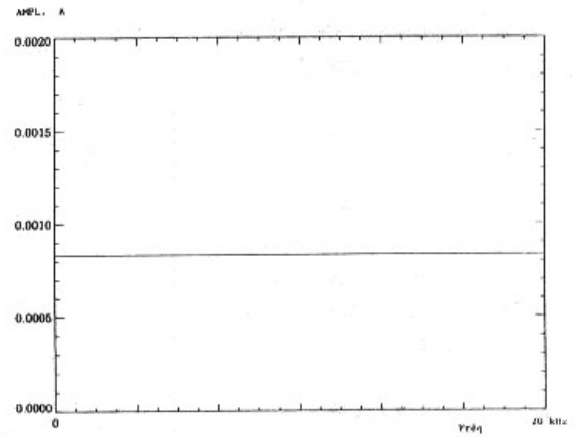
Concrètement, pour obtenir sur la voie EG seule filtrée en passe-bas à 100 Hz un niveau acoustique d'environ 80 dB en salle d'écoute à 1 m, il faut appliquer au transduc-

LA TRANSFORMEE DE FOURIER



a) IMPULSION UNITE  
LA TRANSFORMATION  $(t \rightarrow f)$  DONNE UNE REPOSE  
PLATE EN AMPLITUDE ET EN PHASE

$(t \rightarrow f)$  →



b) IMPULSION PLUS LONGUE (1 ms)  
LA TRANSFORMATION  $(t \rightarrow f)$  NE DONNE PLUS  
UNE REPOSE PLATE EN AMPLITUDE. LA PHASE  
VARIE ET PRESENTE DES DISCONTINUITES

$(t \rightarrow f)$  →

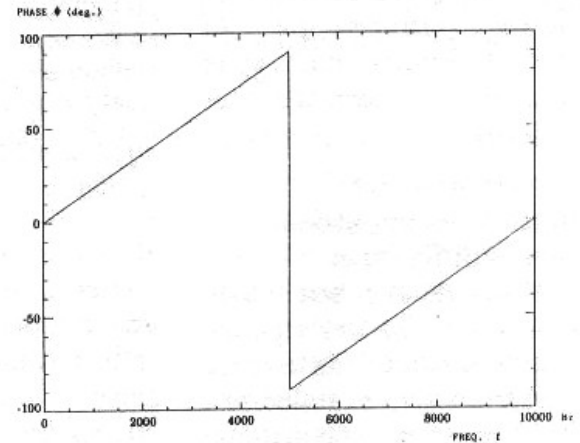
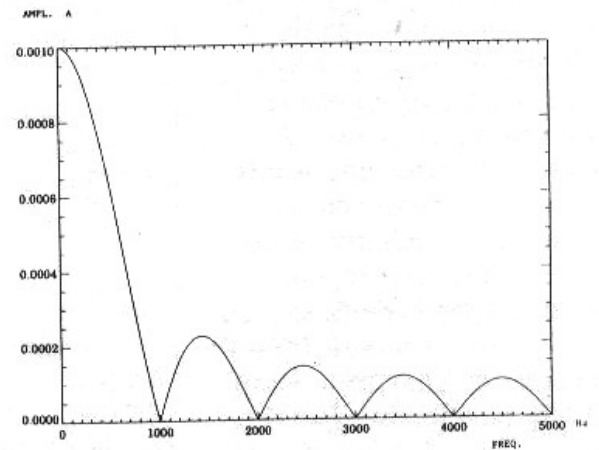


Fig. 43 : Transformée de Fourier. a) Impulsion unité. La transformation  $(t \rightarrow f)$  donne une réponse plate en amplitude et en phase ; b) Impulsion plus longue (1 ms) : la transformation  $(t \rightarrow f)$  ne donne plus une réponse plate en amplitude ; la phase varie et présente des discontinuités.

teur EG une tension d'environ 20 volts avec une impulsion de 10 ms. Il y correspond une énergie de

$$E = \frac{U^2 t}{R} = \frac{20^2}{15} (0,010) = 0,27 \text{ joule électrique}$$

Pour envoyer la même énergie électrique à ce transducteur attaqué par une impulsion de 5  $\mu$ s, il faudrait réaliser l'égalité

$$0,27 = \frac{U^2}{15} (0,000005)$$

ce qui conduit à une tension d'environ 895 volts à appliquer au transducteur EG !! Il s'agit tout simplement d'un essai destructif.

• Si, dès lors, cette analyse de Fourier veut être contournée au profit de moyens plus conventionnels comme ceux utilisés ici, des impulsions de durées nettement plus longues (1... 10 ms) doivent être utilisées pour pouvoir réaliser des mesures en milieu ambiant normal, mais ces mesures ne concernent alors qu'une partie restreinte du spectre audio et nécessitent un travail itératif un peu fastidieux que schématise la fig. 42.

Le lecteur remarquera en effet que la procédure décrite en fig. 42 analyse de manière itérative et corrélatrice les résultats en régime fréquentiel et temporel en utilisant du matériel plus conventionnel (oscilloscope et analyseur temps réel). Il faut bien réaliser que cette procédure n'est qu'un substitut relativement pauvre de la transformée de Fourier rapide, mais bien adaptée à des mesures en milieu ambiant.

### 13.4.5 Cohérence entre les réponses à des impulsions de longueurs différentes

Le problème de la cohérence de réponse du système à des signaux rectangulaires de durées différentes vaut le détour. Il sera examiné suivant deux approches : pragmatique (fig. 44) et théorique (fig. 45).

#### a. Approche pragmatique

• Les fig. 44a et 44b montrent que la cohérence entre ces oscillo-

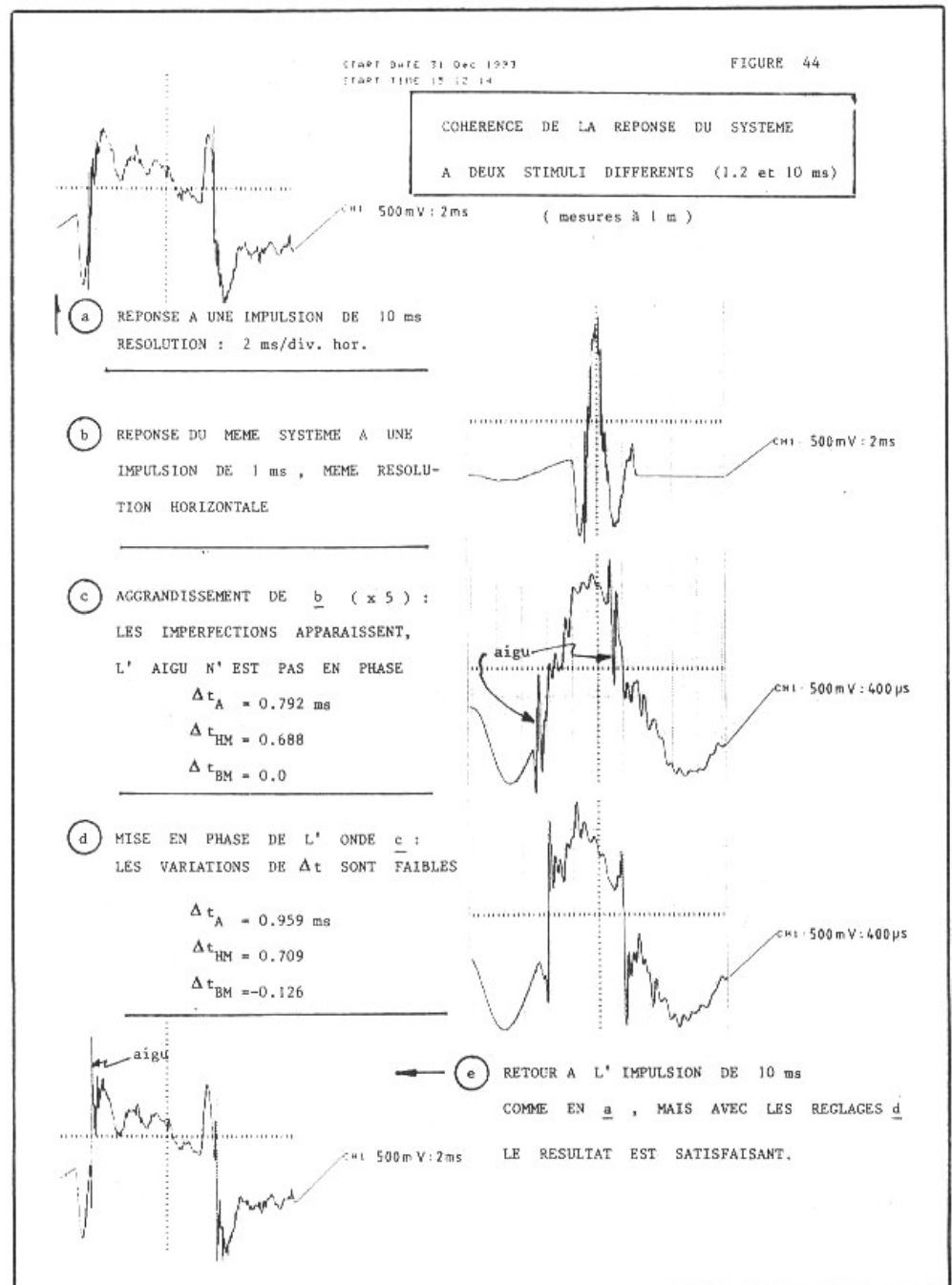


Fig. 44 : Cohérence de la réponse du système à deux stimuli différents (1,2 et 10 ms). a) Réponse à une impulsion de 10 ms, résolution : 2 ms/div. hor. b) Réponse du même système à une impulsion de 1 ms, même résolution horizontale. c) Agrandissement de b ( $\times 5$ ) : les imperfections apparaissent, l'aigu n'est pas en phase  $\Delta t_A = 0,792$  ms,  $\Delta t_{HM} = 0,688$  ms,  $\Delta t_{BM} = 0,0$ . d) Mise en phase de l'onde c : les variations de  $\Delta t$  sont faibles,  $\Delta t_A = 0,959$  ms,  $\Delta t_{HM} = 0,709$  ms,  $\Delta t_{BM} = -0,126$ . e) Retour à l'impulsion de 10 ms comme en a, mais avec les réglages d : le résultat est satisfaisant.

grammes est excellente s'ils sont observés à l'échelle de temps la plus longue (2 ms/div. hor.), mais cette résolution est faible car l'épaisseur du trait correspond aux phénomènes les plus rapides à décrire.

• En fait, un examen plus approfondi (fig. 44c) montre que, tous  $\Delta t$  inchangés, cette cohérence n'est

pas parfaite (l'A est en avance sur les autres composantes), mais les imperfections sont faibles : des réajustements de

$$\Delta \Delta t_A = 0,167 \text{ ms}$$

$\Delta \Delta t_{HM} = 0,021$  ms (incrément minimum)

$$\Delta \Delta t_{BM} = -0,126 \text{ ms}$$

suffisent à redresser la situation pour obtenir la réponse à 1,2 ms

présentée en figure 44d.

• Le retour à une sollicitation de 10 ms avec les valeurs de  $\Delta t$  de la figure 44d conduit à la fig. 44e qui peut être qualifiée de satisfaisante, la composante A se retrouve effectivement un peu en avance par rapport à la figure 44a, mais à cette échelle, le phénomène n'est pas important. Ce petit va-et-vient indique qu'il est préférable d'examiner d'abord une impulsion de 1,2 ms de façon à ajuster finement et avec une résolution suffisante les voies supérieures (fig. 44c) avant de passer à une impulsion plus longue : c'est bien ce qu'indique la procédure de la fig. 42.

### b. Approche théorique

• En faisant tout d'abord abstraction des  $\Delta t$ , la relation s'appliquant au filtre à quatre fonctions de transfert de la figure 45a est

$$e_2(p) = H(p) e_1(p)$$

où  $H(p) = H_A(p) + H_{HM}(p) + H_{BM}(p) + H_{EG}(p)$

et signifie que, à un signal appliqué  $e_1(p)$ , le système répondra par

$$e_2(p) = H(p) e_1(p)$$

Le résultat  $e_2(p)$  du passage par le filtre dépend de l'objectif poursuivi : si celui-ci est de reproduire fidèlement  $e_1(p)$  et si les éléments de  $H(p)$ , c'est-à-dire les fréquences de coupure, les pentes... sont réglées de façon que cet objectif soit atteint pour une impulsion de durée  $\tau$ , il le sera également pour une impulsion de durée  $10 \tau$  pour autant que  $\tau$  et  $10 \tau$  ne débordent pas du spectre de fréquences couvert par  $H(p)$ .

• Les  $\Delta t$  ne doivent être introduits qu'à cause du passage par des transducteurs électroacoustiques mal positionnés dans l'espace. Or, précisément, les différentes composantes parallèles  $[H(p) + \Delta t]$  ont fait l'objet d'ajustements tels que la réponse en fréquence de 20 Hz à 20 kHz est respectée à la sortie des transducteurs et pour une position

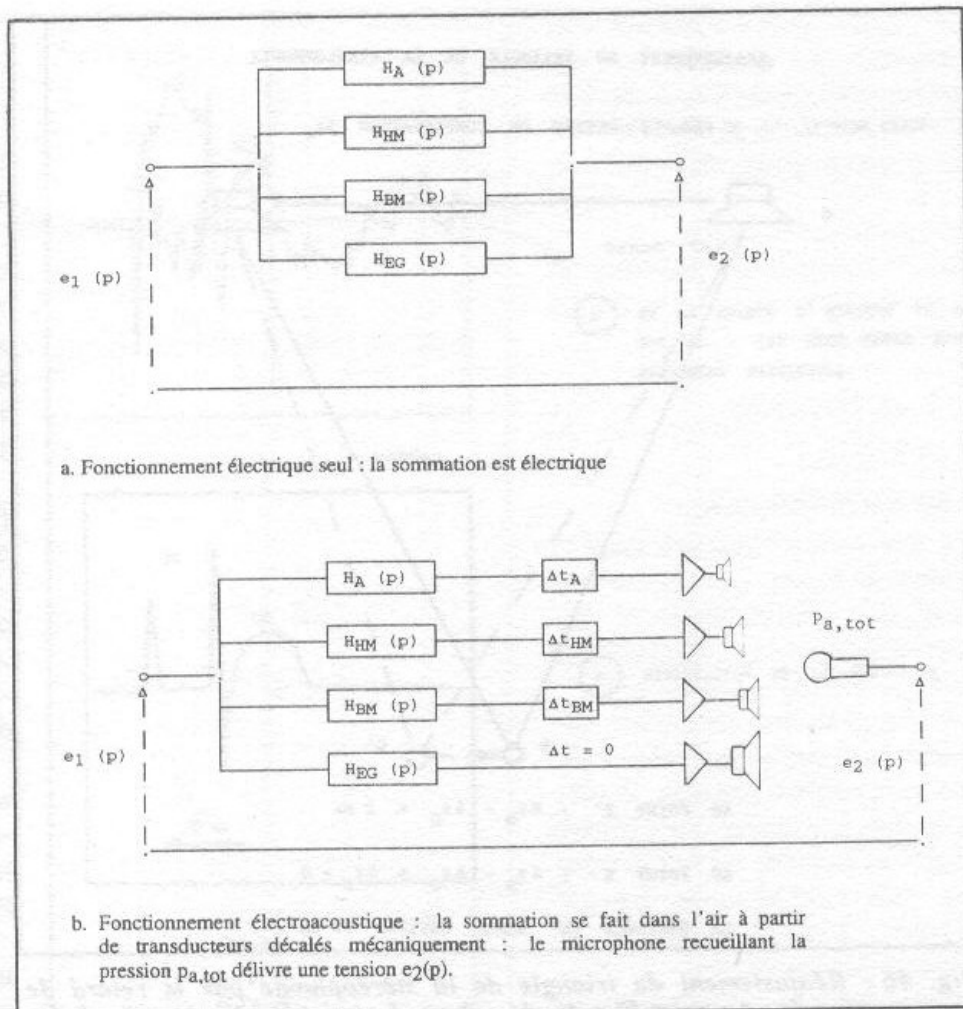


Fig. 45 : a) Fonctionnement électrique seul : la sommation est électrique. b) Fonctionnement électroacoustique : la sommation se fait dans l'air à partir de transducteurs décalés mécaniquement : le microphone recueillant la pression  $p_{a,tot}$  délivre une tension  $e_2(p)$ .

donnée du microphone (dans l'air). Voir la fig. 45b. Les courants correspondant à  $i_1(p)$  dans les différentes branches ( $i_A(p)$ ...  $i_{EG}(p)$ ) dépendent de la durée de l'impulsion appliquée. En l'occurrence (fig. 37), lorsque  $t = 10 \text{ ms}$ , les quatre branches sont sollicitées et  $I_{EG}(p) \neq 0$ , tandis que les courants dans les trois branches supérieures ne changent guère par rapport au cas où  $t = 1,2 \text{ ms}$  : ils conditionnent surtout les fronts de montée et de descente tandis que la composante  $I_{EG}(p)$  permet d'assurer l'assise d'une impulsion plus longue.

• L'examen théorique du problème montre donc (fig. 45b) que, si les quatre fonctions de transfert  $H(p)$  et les trois retards temporels  $\Delta t$  sont soumis à une impulsion

$e_1(p)$  de durée différente ( $t$  ou  $10 t$ ), la réponse globale du système  $e_2(p)$  est la même, pourvu que les éléments constitutifs des filtres (A → EG) soient en mesure de traiter la gamme de fréquences contenues dans le signal  $e_1(p)$ .

### 13.5 Remise en forme du triangle de la stéréophonie

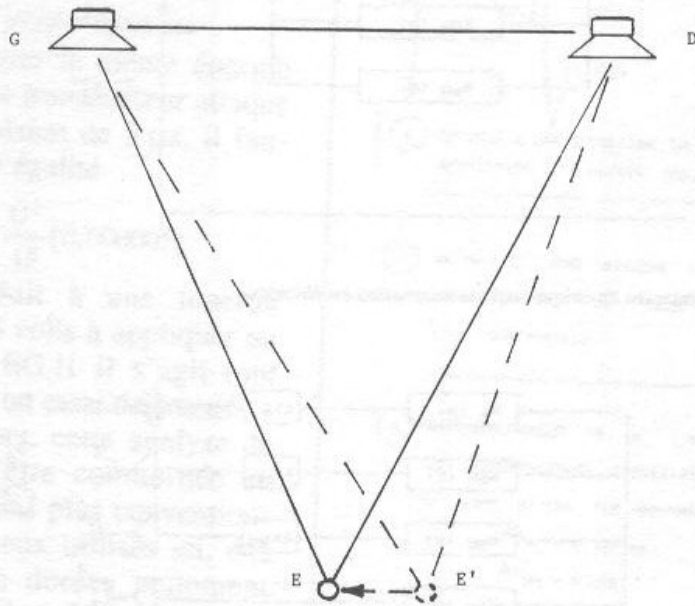
Le triangle G - D - E (écoute) doit être équilatéral ou isocèle en conditions d'écoute normale. Les dissymétries de l'électronique, du local et des transducteurs G et D conduisent, en fin de réglage, à un retard global moyen  $\Delta t_G$  différent de  $\Delta t_D$ .

$$(\Delta t_G = \Delta t_{A,G} + \Delta t_{HM,G} + \Delta t_{BM,G})$$

Cette différence, en valeur abso-

REAJUSTEMENT DU TRIANGLE DE LA STEREOPHONIE

PAR LE RETARD DE COMPENSATION  $\Delta t_c$



AU POINT E' :  $\Delta t_D - \Delta t_G = 2 \text{ ms}$

AU POINT E :  $\Delta t_D - \Delta t_G + \Delta t_c = 0$

LA DISTANCE EE' EGALE ENVIRON 70 cm

lue, atteint dans ce cas une valeur de

$$\Delta t_D - \Delta t_G \cong 2 \text{ ms}$$

qui correspond à  $\approx 70 \text{ cm}$  et déforme donc le triangle idéal G D E qui devient G D E'. La différence EE' atteint 70 cm et nuit très rapidement à une bonne image stéréophonique (fig. 46). L'appareil de filtrage offre la possibilité d'ajouter aux retards de voie  $\Delta t_v$ , un retard de compensation  $\Delta t_c$ , identique pour toutes les voies d'un canal et permettant de recentrer l'image stéréophonique si  $\Delta t_c$  (ms) correspond à la distance EE' (en cm).

En l'occurrence, un  $\Delta t_c = 2 \text{ ms}$  doit être appliqué au canal le plus en avance, celui de gauche dans ce cas. De cette façon, le son en provenance de l'enceinte de gauche arrive au même moment aux oreilles de l'auditeur que celui en provenance des transducteurs de droite, car le point E' a été ramené en E.

Fig. 46 : Réajustement du triangle de la stéréophonie par le retard de compensation  $\Delta t_c$ . Au point E' :  $\Delta t_D - \Delta t_G = 2 \text{ ms}$ . Au point E :  $\Delta t_D - \Delta t_G + \Delta t_c = 0$ . La distance EE' égale environ 70 cm.

FORMES D' ONDES OBTENUES A 4 m SUR UNE IMPULSION DE 10 MILLISECONDES

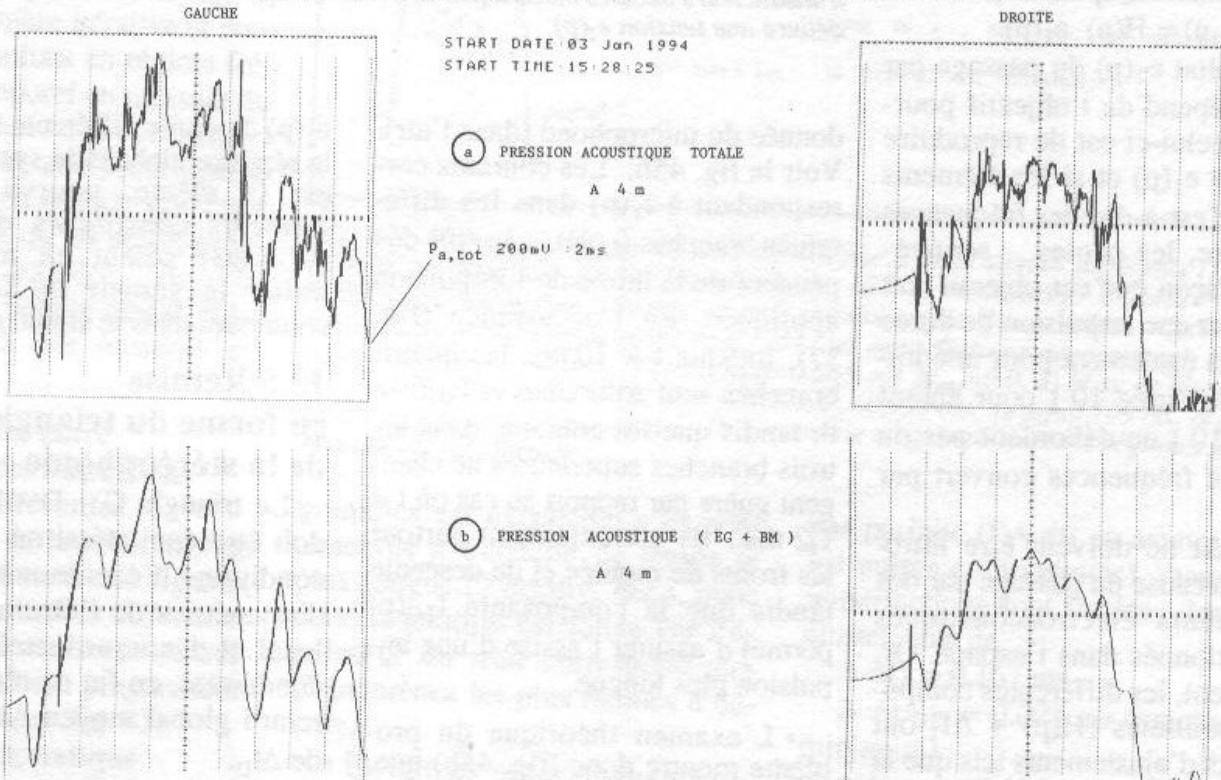


Fig. 47 : Formes d'ondes obtenues à 4 m sur une impulsion de 10 ms. a) Pression acoustique totale à 4 m; b) Pression acoustique (EG+BM) à 4 m.

### 13.6 Commentaires généraux sur l'allure des figures 10 ms

Les figures présentées dans ce paragraphe 13 mettent en évidence que :

- l'allure générale de la réponse à une impulsion de 10 ms à 4 m dépend essentiellement de la somme (EG + BM). Ceci apparaît clairement sur les figures 47a et 47b où ces sommes (EG+BM) sont représentées ;

- les HP supérieurs (A et H) soumis à une impulsion d'une telle durée réagissent comme à un échelon : ils oscillent à leur fréquence de résonance (dans leur enceinte). Ceci est clair pour l'aigu et le haut-médium en fig. 40a et 40b (traînage) ;

- l'échelle de temps utilisée pour l'examen des phénomènes influence énormément le jugement qualitatif émis (voir fig. 41 et 44b) ;

- les formes d'ondes à 1 m sont ajustables et perfectibles au moyen des  $\Delta t$  (fig. 41) tandis que les phénomènes deviennent beaucoup plus flous à 4 m (fig. 47).

### 13.7 Effet de l'absence de mise en phase de l'EG

La fig. 48 a été réalisée en envoyant à une enceinte des impulsions de 10 ms alors que seules les trois voies supérieures avaient fait l'objet d'un alignement en phase précédemment (voir 8). La fig. 48a montre clairement la réponse du BM en nette avance sur l'EG ( $\Delta t_{BM} = 1,16$  ms seulement suivant 9.1) tandis que, sur la fig. 48c, les deux composantes sont en phase car la valeur de  $\Delta t$  a été considérablement augmentée. Sur cette figure,  $t_{0,EG} \cong 8,94$  ms (voir l'indication en bas à droite de l'écran). La fig. 48b représente de façon stylisée la fig. 48a pour bien mettre en évidence les deux réponses BM et EG fortement décalées dans le temps.

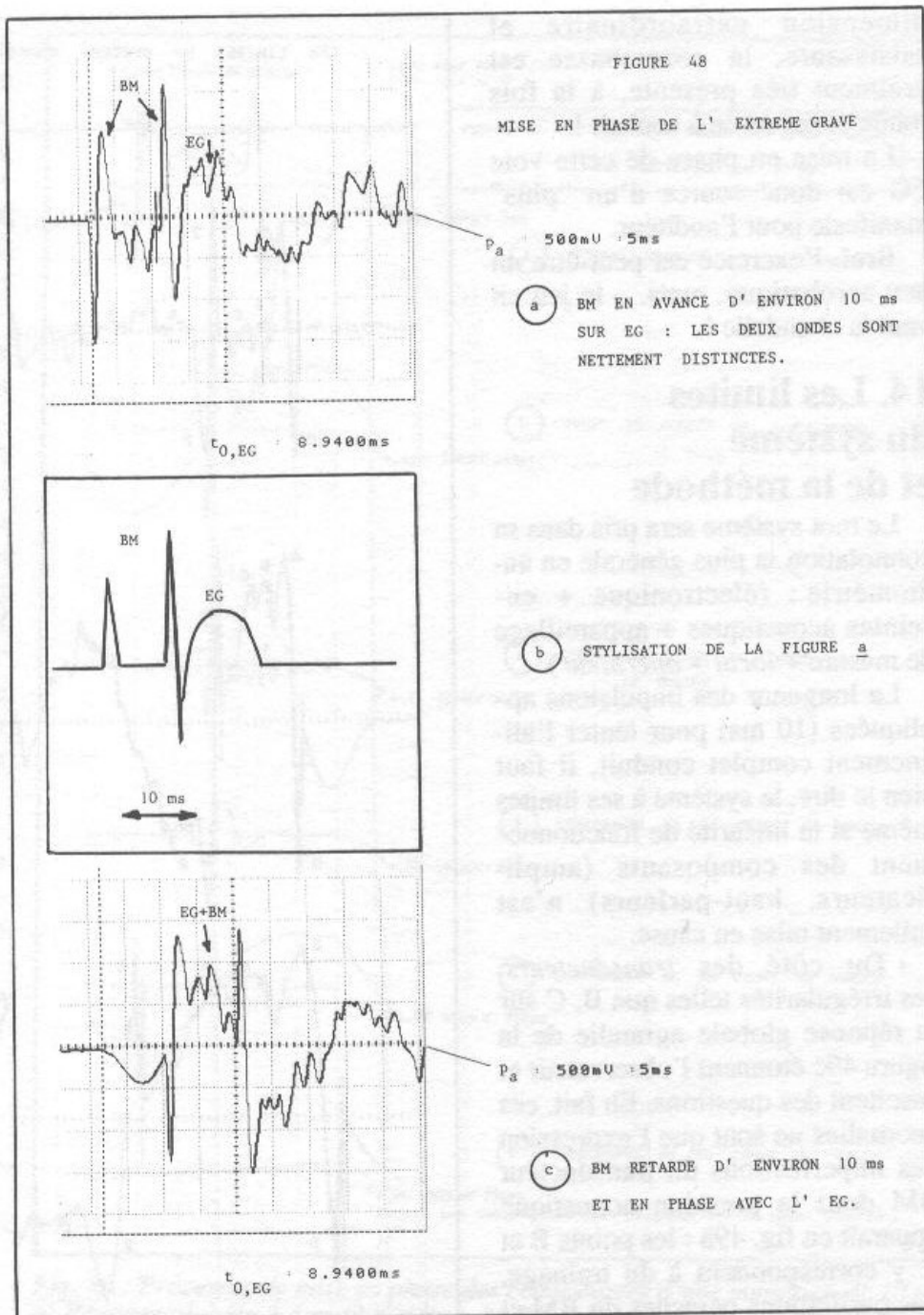


Fig. 48 : Mise en phase de l'extrême-grave. a) BM en avance d'environ 10 ms sur EG : les deux ondes sont nettement distinctes. b) Stylisation de la fig. a. c) BM retardé d'environ 10 ms et en phase avec l'EG.

### 13.8 L'impact sur l'écoute

Celui-ci est indiscutable et percutant. Il ne s'exprime évidemment pas en termes de ciselé et de détails soudainement perçus comme après la mise en phase des trois voies supérieures. Il s'agit ici de la perception de grandes masses orchestrales dans le grave dont la dynamique paraît soudain énorme et la cohérence très grande : la fig. 48b fait comprendre qu'une onde EG en

avance de 10 ms sur le front de montée BM ne peut pas être ressentie de la même façon que ces deux ondes en phase. La pression acoustique instantanée due à l'impulsion est d'ailleurs et évidemment plus élevée si les deux composantes sont en phase. D'ailleurs, 100 Hz, fréquence de coupure EG - BM, ce n'est pas si bas et très clairement perçu par l'oreille... ! L'énergie acoustique libérée par les timbales prend une

dimension extraordinaire et saisissante, la contrebasse est vraiment très présente, à la fois ronde et rugueuse à souhait !

La mise en phase de cette voie EG est donc source d'un "plus" manifeste pour l'auditeur.

Bref, l'exercice est peut-être un peu acrobatique, mais... le jeu en vaut la chandelle !

## 14. Les limites du système et de la méthode

Le mot système sera pris dans sa connotation la plus générale en audiométrie : (électronique + enceintes acoustiques + appareillage de mesure + local + opérateur)

La longueur des impulsions appliquées (10 ms) pour tenter l'alignement complet conduit, il faut bien le dire, le système à ses limites même si la linéarité de fonctionnement des composants (amplificateurs, haut-parleurs) n'est nullement mise en cause.

• Du côté des transducteurs, des irrégularités telles que B, C sur la réponse globale agrandie de la figure 49c étonnent l'observateur et suscitent des questions. En fait, ces anomalies ne sont que l'expression des imperfections du transducteur BM dont la pression acoustique apparaît en fig. 49a : les points B et C y correspondent à du traînage, des oscillations parasites du BM et aux modes de fractionnement de la membrane. Ce fonctionnement un peu faible en régime impulsionnel pourrait sans doute être amélioré par l'adoption d'un facteur de force B1 plus élevé pour les transducteurs.

• Le local lui-même, dernier maillon de la chaîne, est loin d'être parfait : ses résonances propres, ses dimensions et le positionnement dissymétrique des enceintes a conduit à des difficultés lors du réglage et ne permet pas l'obtention de réponses identiques à gauche et à droite (voir fig. 47).

• Du point de vue audiométrie,

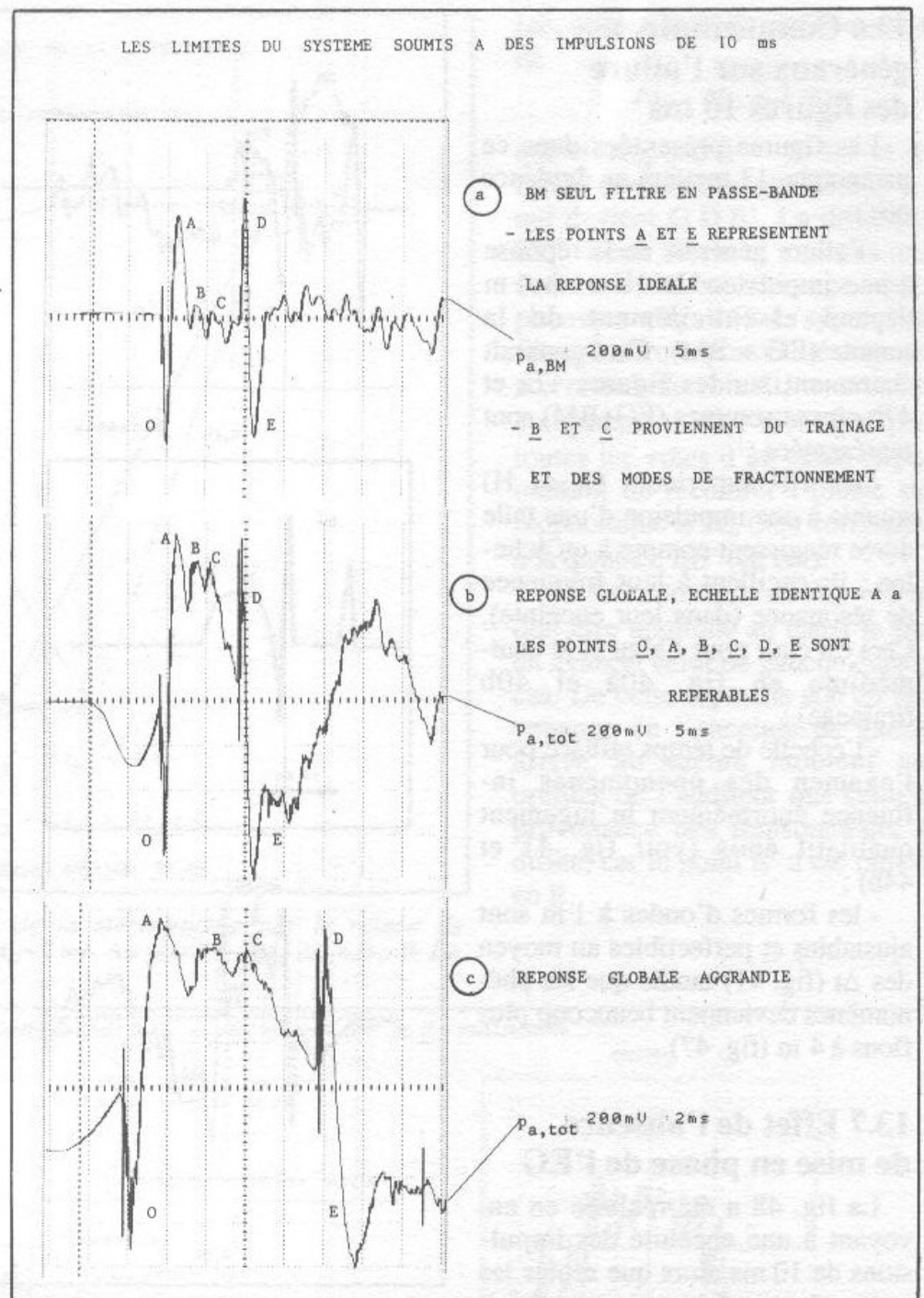


Fig. 49 : Les limites du système soumis à des impulsions de 10 ms; a) BM seul filtré en passe-bande. Les points A et E représentent la réponse idéale. B et C proviennent du traînage et des modes de fractionnement. b) Réponse globale, échelle identique à a : les points O, A, B, C, D, E sont repérables. c) Réponse globale agrandie.

le fait de vouloir réaliser à 4 m des mesures sur une impulsion de 10 ms ( $\lambda = 3,4$  m) avec la résolution disponible sur l'oscilloscope est un exercice périlleux : il oblige à passer continuellement d'une résolution horizontale de 0,2 ms/cm à 2 ms/cm (soit un rapport de 10) pour l'examen successif de phénomènes très rapides (HM+A) et

plus lents (EG+BM) : voir la fig. 50. Celle-ci met en évidence les phénomènes à deux échelles de temps extrêmes (2 ms et 200  $\mu$ s). La fig. 50a concerne la réponse globale à une impulsion de 10 ms tandis que la fig. 50b montre, agrandi 10 fois, le front de montée de cette réponse. Les fig. 50c à 50f sont les différentes composantes,



de l'aigu à l'extrême-grave de ce front de montée. Cette figure donne une idée de la difficulté de la mise en phase sur une impulsion longue de 10 ms : l'alignement des signatures des différentes voies au centre 0 de l'écran au moyen des  $\Delta t$  du filtre conduit à un va-et-vient fastidieux et générateur d'erreurs.

• L'électronique elle-même n'apprécie pas toujours les avanies subies car, si la réponse de l'amplificateur EG (à courant continu) à une impulsion de 10 ms est irréprochable, il n'en va pas de même du filtre actif (voir fig. 39b) pour des raisons un peu mystérieuses qui n'ont pas fait l'objet d'approfondissements (? alimentation à découpage). A cela s'ajoutent les limites inhérentes à la numérisation décrites en 12.4 et 12.9.

• Toute tentative de quantification des phénomènes s'est révélée très difficile : d'une part, les valeurs de  $\Delta t$  indiquées par le filtre actif ne correspondent pas exactement aux valeurs données par l'oscilloscope et rendent tout calcul précis impossible. De plus, elles varient avec les valeurs des pentes  $p_k$  choisies pour chacune des voies. En l'occurrence, l'auteur a tenté d'établir la relation entre les  $\Delta t$  en ms indiqués par l'appareil et le positionnement relatif en cm des différents transducteurs d'une enceinte, mais l'opération n'est pas simple. Ce point a été éclairci en 13.4.2.

Ces difficultés expliquent que, la plupart du temps, seuls des résultats et des courbes qualitatifs ont été présentés. Une fois de plus, la mesure n'est pas un but en soi dans cette démarche, mais uniquement un moyen de tendre vers une satisfaction auditive maximale. Dès lors, toute mesure ou calcul théorique n'aboutissant pas est abandonné au profit d'une approche très pragmatique.

La méthode, elle-même, a ses limites. Il faut bien reconnaître que

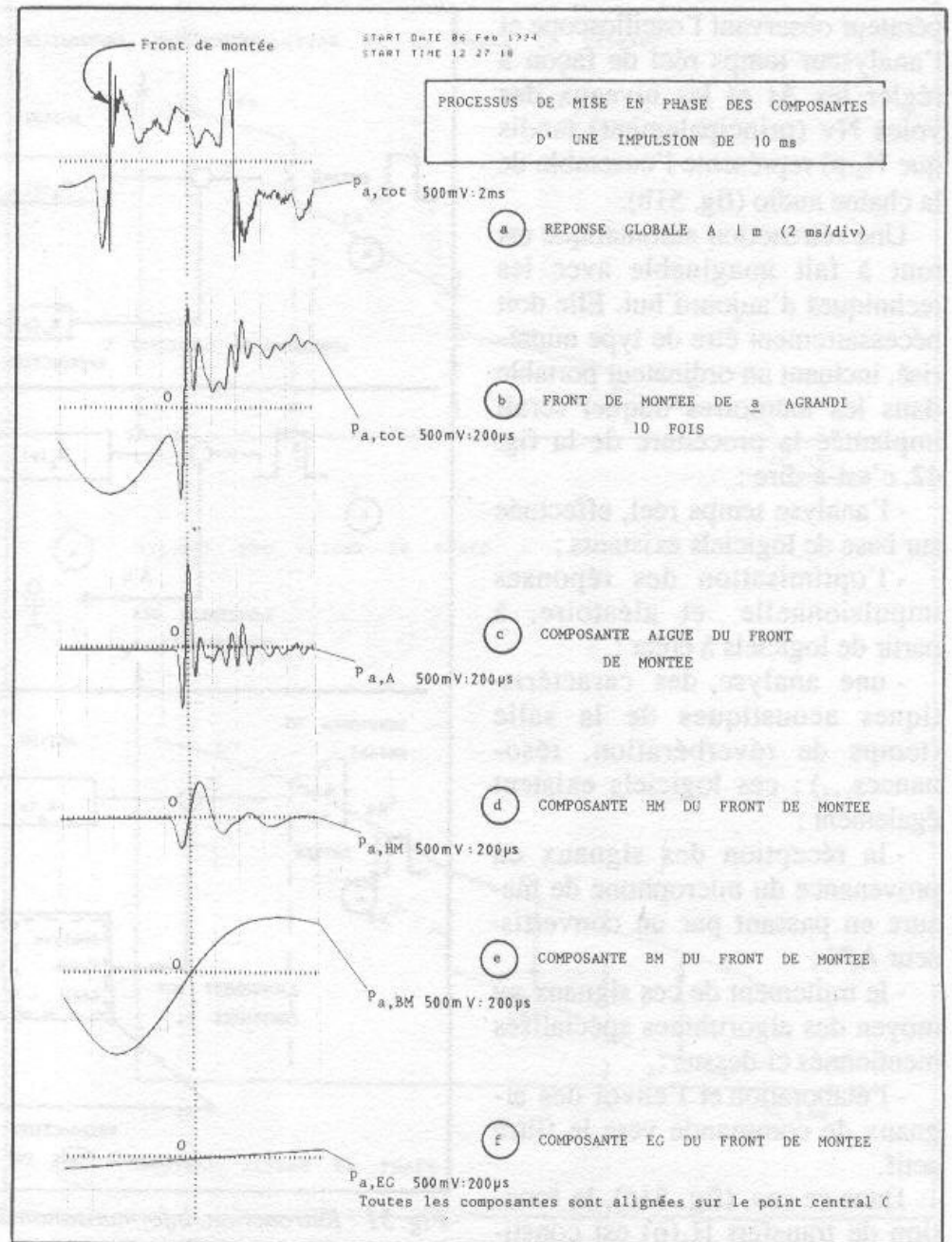


Fig. 50 : Processus de mise en phase des composantes d'une impulsion de 10 ms. a) Réponse globale à 1 m (2 ms/div.). b) Front de montée de a agrandi 10 fois. c) Composante aiguë du front de montée. d) Composante HM du front de montée. e) Composante BM du front de montée. f) Composante EG du front de montée. Toutes les composantes sont alignées sur le point central 0.

réglé un système 4 voies à partir de la méthode itérative proposée n'est pas une sinécure... La difficulté de mise au point augmente avec le nombre de voies. Quatre voies représentent ici en quelque sorte une limite supplémentaire du côté de l'ingéniosité de l'opérateur. Celle-ci est en effet parfois mise à rude épreuve. Le paragraphe suivant explore une voie permettant d'automatiser la démarche.

## 15. Informatisation de la rétroaction

La fig. 51a représente de façon schématique le fonctionnement d'un système à rétroaction permettant d'adapter automatiquement la sortie S d'un processus à l'entrée E en fonction de commandes (consignes) C.

Il est clair que, dans les travaux de réglage présentés ici, la rétroaction  $H_r(p)$  a lieu par le biais de l'o-

pérateur observant l'oscilloscope et l'analyseur temps réel de façon à régler les  $\Delta t$  et les niveaux des voies  $N_v$  (principalement) tandis que  $H_a(p)$  représente l'ensemble de la chaîne audio (fig. 51b).

Une rétroaction automatique est tout à fait imaginable avec les techniques d'aujourd'hui. Elle doit nécessairement être de type numérisé, incluant un ordinateur portable dans les mémoires duquel serait implantée la procédure de la fig. 42, c'est-à-dire :

- l'analyse temps réel, effectuée sur base de logiciels existants ;
- l'optimisation des réponses impulsionnelle et aléatoire, à partir de logiciels à créer ;
- une analyse des caractéristiques acoustiques de la salle (temps de réverbération, résonances...) : ces logiciels existent également ;
- la réception des signaux en provenance du microphone de mesure en passant par un convertisseur A/N ;
- le traitement de ces signaux au moyen des algorithmes spécialisés mentionnés ci-dessus ;
- l'élaboration et l'envoi des signaux de commande vers le filtre actif.

Dans ce cas, (fig. 51c), la fonction de transfert  $H_a(p)$  est constituée de l'électronique et, en particulier, du filtre actif. La pression acoustique  $p_{a,tot}$  produite par les transducteurs (sortie) est envoyée par le microphone (mic.) à l'ordinateur pour analyse et ajustement progressif amenant les consignes (du filtre) de leur valeur initiale  $C_0$  à leur valeur finale  $C_f$ .

Le filtre numérique utilisé permet ce type de couplage à un ordinateur au moyen d'une interface de type RS 485 asynchrone aux normes EIA, avec un protocole de transmission propre et une vitesse de communication de 9.600 ou 38.400 bauds. Celui-ci permet la réception de signaux de commande envoyés par l'ordinateur.

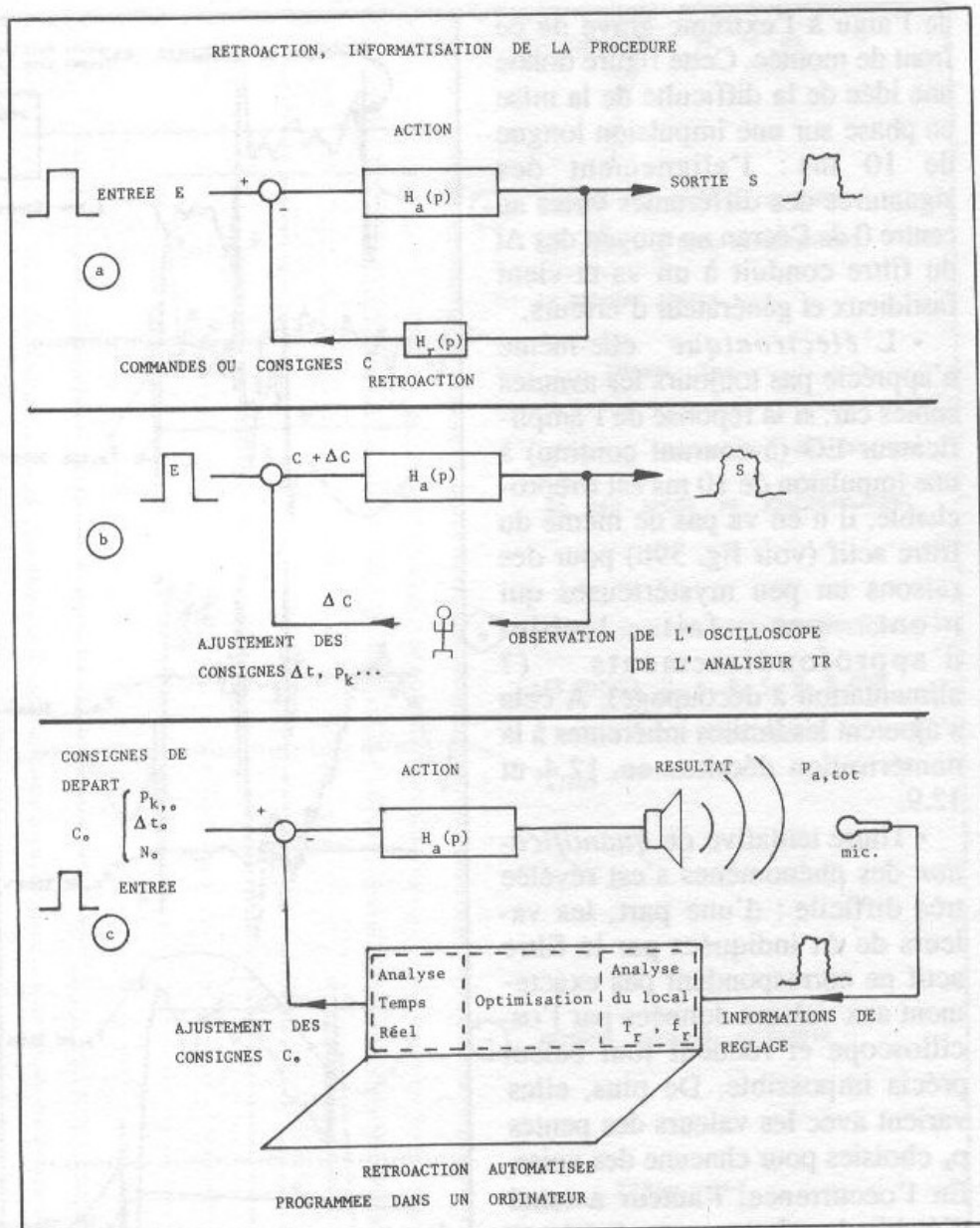


Fig. 51 : Rétroaction, informatisation de la procédure.

Dans ce cas, fig. 51c, le jeu de consignes de départ  $C_0$ , constitué de valeurs par défaut du type :

$$\begin{aligned} \Delta t_{v,o} &= 0,0 \text{ ms} \\ P_{k,o} &= -12 \text{ dB/oct.} \\ N_{v,o} &= 0 \text{ dB} \end{aligned}$$

$f_{c,l,o} = \dots$  Hz (les valeurs "constructeur", par exemple) évoluerait automatiquement vers un jeu de consignes finales  $C_f$  :

$$\begin{aligned} \Delta t_{v,f} &= \dots \text{ ms pour chaque voie} \\ P_{k,f} &= \dots \text{ dB/oct. pour chaque} \\ &\text{pente} \end{aligned}$$

$N_{v,f} = \dots$  dB pour chaque voie  
 $f_{c,l,f} = \dots$  Hz pour chaque fréquence charnière  
 en fonction des critères d'optimisation retenus, et notamment des

poids  $\alpha, \beta$  et  $\gamma$  (voir 6.1). Il faut noter que le type d'algorithme d'optimisation à implanter, c'est-à-dire :

$$\min \sum_i (u_i(t) - u_{i,dés})^2$$

est extrêmement simple puisque les valeurs  $u_{i,dés}$  sont des constantes égales à une pression acoustique instantanée ou moyenne (voir 6.1). Il s'agit simplement de rechercher une somme de moindres carrés.

## 16. Phase absolue du système

Un signal sinusoïdal d'amplitude constante et de fréquence variable a

été appliqué au système et le déphasage du vecteur pression acoustique reçu par le microphone a été mesuré de façon à vérifier d'une autre manière la mise en phase globale des quatre voies du système. Le temps a manqué pour réaliser un relevé complet et chiffré mais ces mesures ont montré que la phase du vecteur  $p_a$  évolue régulièrement sans discontinuité aux passages par les fréquences de coupure du système. La figure 52a montre l'allure que devrait avoir l'évolution de cette phase si tous les  $\Delta t$  de voie étaient égaux à 0, tandis que la fig. 52b donne la variation de  $\phi$  en fonction de la fréquence  $f$  après ajustement des retards de voie  $\Delta t_v$  : ceux-ci lissent la courbe  $\Phi = \Phi(f)$  par l'introduction de  $\Delta \Phi_A$ ,  $\Delta \Phi_{HM}$ ...

## 17. En guise d'épilogue

- Les mesures de performances et l'ajustement de haut-parleurs se font le mieux, comme pour tous les systèmes électromécaniques, en régime impulsionnel.

- La multi-amplification reporte les problèmes de filtrage en amont de l'amplification de puissance et évite les problèmes

- de pertes d'insertion du filtrage
- d'interactions électromagnétiques

- de dimensionnement, de vibrations du filtrage

- de variation d'impédance des HP

inhérents aux filtres passifs traditionnels travaillant à basse impédance et courant élevé à l'intérieur de l'enceinte elle-même.

Le filtrage a alors lieu à haute impédance et à courant faible et permet l'utilisation de toutes les astuces de l'électronique (numérique) pour faire varier en souplesse tous les paramètres du filtrage et donc optimiser le réglage de l'enceinte acoustique *dans l'environnement où elle fonctionne*. Ces avantages augmentent avec le nombre de voies, mais au prix

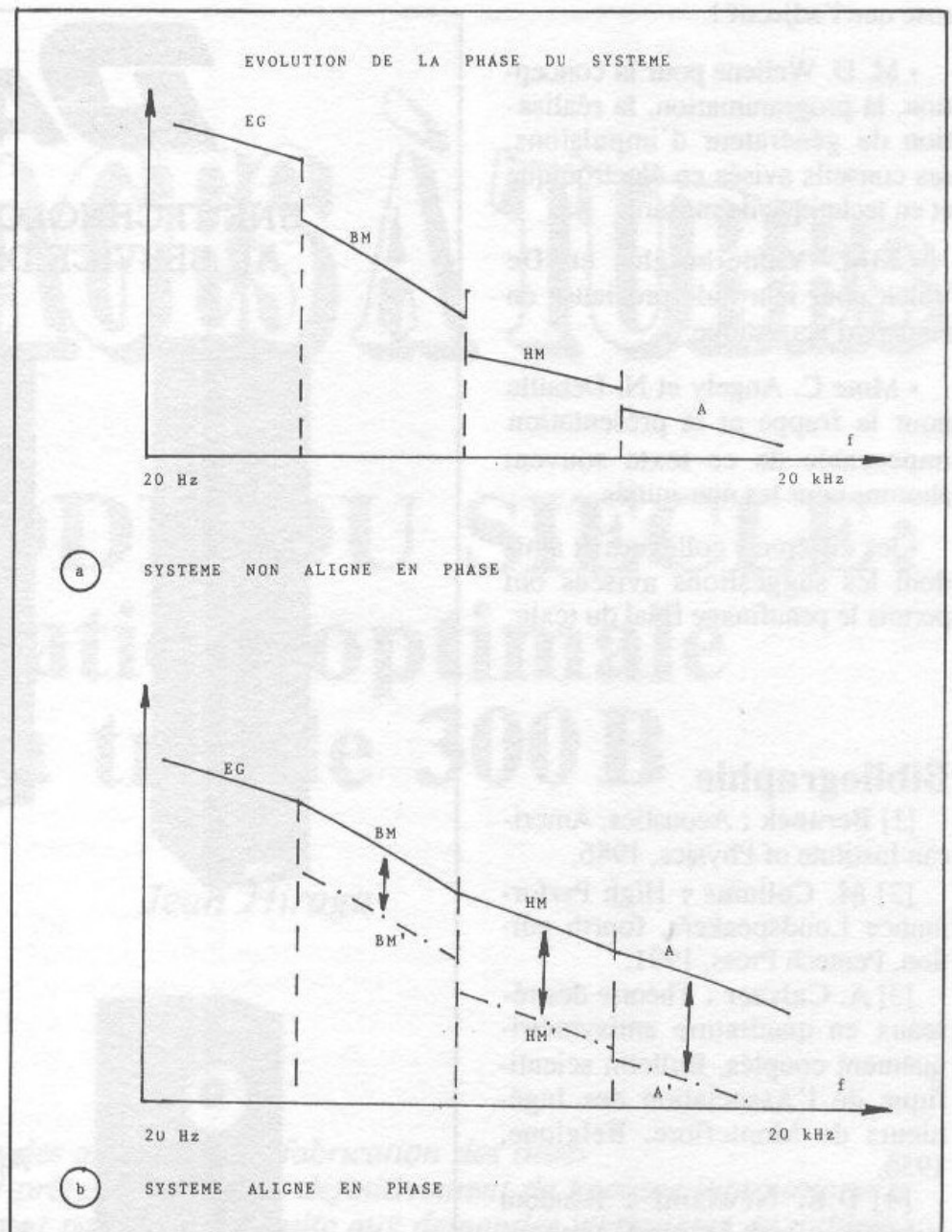


Fig. 52 : Evolution de la phase du système. a) Système non aligné en phase. b) Système aligné en phase.

d'une complexité croissante de mise au point...

- La mise en œuvre de ces filtres actifs (numériques) sur une chaîne multi-amplifiée permet la mise en phase des différentes voies, apporte une grande souplesse au réglage des niveaux de voies et règle dans de nombreux cas les problèmes que présente la courbe de réponse aux fréquences de coupure. L'utilisation de ces appareils nécessite toutefois un équipement de mesure et de réglage important et... beaucoup de temps et de patience. Enfin, ces filtres numériques sont encore per-

fectibles.

- Une informatisation de la procédure utilisée est envisageable et ne requiert pas un effort énorme. Celle-ci ne fait appel qu'à des moyens conventionnels.

## 18. Remerciements

L'auteur tient à remercier chaleureusement les personnes qui l'ont aidé dans la réalisation de ce travail :

- En tout premier lieu son épouse, dont la patience et les oreilles ont parfois été mises à rude épreuve... : du bruit rose, ça n'a de

rose que l'adjectif !

- M. D. Wellens pour la conception, la programmation, la réalisation du générateur d'impulsions, ses conseils avisés en électronique et en technique de mesure.

- MM. Vanlerberghe et De Valck pour leur aide précieuse en matière d'acoustique.

- Mme C. Angely et N. Detaille pour la frappe et la présentation impeccable de ce texte souvent abscons pour les non-initiés...

- les différents collègues et amis dont les suggestions avisées ont permis le peaufinage final du texte.

## Bibliographie

[1] **Beranek** : Acoustics, American Institute of Physics, 1986.

[2] **M. Colloms** : High Performance Loudspeakers, fourth edition, Pentech Press, 1991.

[3] **A. Calvaer** : Théorie des réseaux en quadrature antisymétriquement couplés, Bulletin scientifique de l'Association des Ingénieurs de Montefiore, Belgique, 1956.

[4] **D.E. Newland** : Random Vibrations and Spectral Analysis Longman Scientific and Technical + Wiley and Sons, Inc.

[5] Rédigée avec l'aimable collaboration scientifique de **N. Janssens**.

---

# MONTAGES À TUBES

## LA TRIODE DU SIÈCLE: Utilisation optimale de la triode 300 B

*Jean Hiraga*

**A**

*u cours des années 70, la fabrication des tubes pour applications audio était prête à disparaître définitivement de la scène internationale. Mais les choses ne se passèrent pas ainsi car, suite aux demandes incessantes de milliers d'adeptes répartis un peu partout dans le monde, elle connut un nouvel essor dans des pays comme la C.E.I., la Chine ou dans les pays de l'Est. Grâce à des montages parfois très sophistiqués, ce fut la "redécouverte" des tubes tétrodes et pentodes tels que la 6550, la KT 88 ou l'EL34. Plus récemment, les audiophiles ont redécouvert, aux U.S.A., en Europe, une bonne vingtaine d'années après le Japon, les qualités exceptionnelles des triodes de puissance à chauffage direct. La plus célèbre d'entre elles est la fameuse WE 300B conçue par la Western Electric en 1938. Nous trouverons ici un aperçu sur ses conditions optimales d'utilisation.*

### **La triode du siècle.**

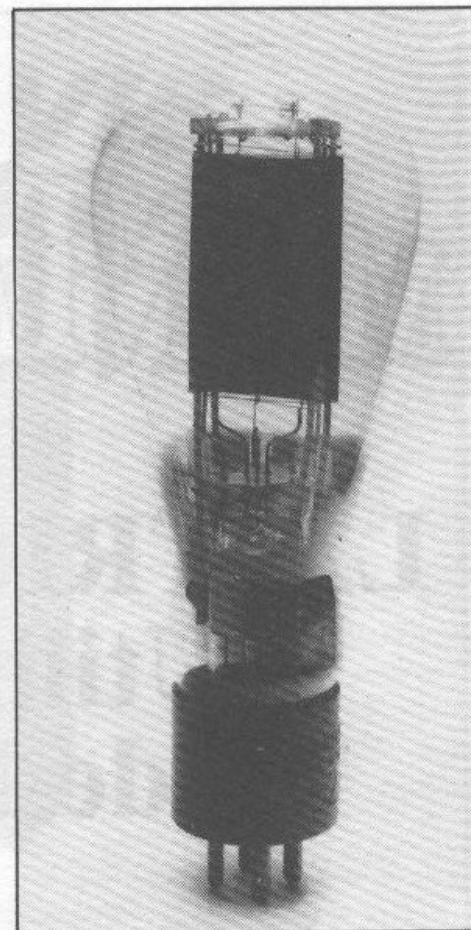
C'est à juste titre que l'on considère la WE 300B comme la reine des triodes. Née pour ainsi dire à la fin de l'ère des triodes, à une époque où l'on commença à s'orienter vers des tubes plus intéressants sur les critères de rende-

ment comme la tétrode ou la pentode, la WE 300B réunit à elle seule toutes les connaissances acquises dans ce domaine depuis l'invention de la triode vers 1912. L'histoire passionnante de ce tube et de la firme qui l'a conçue est détaillée dans un article de

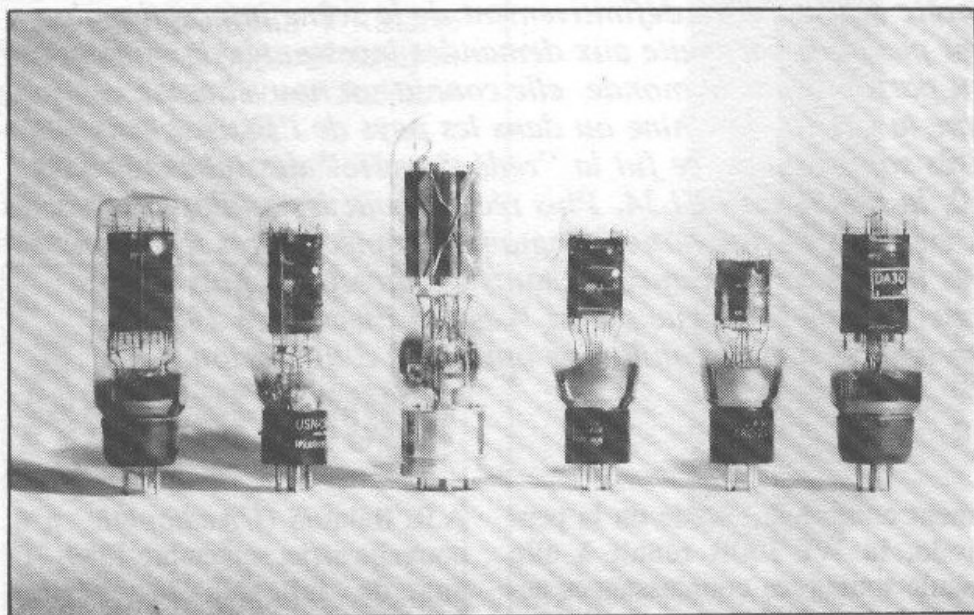
A.R. Balaton (*L'Audiophile* n°6, nouvelle série, septembre 1989, "75 ans de tubes à la Western Electric"). Les lecteurs intéressés pourront s'y reporter pour plus de détails. Conçue pour les applications du cinéma parlant (amplificateurs 86A, 91A, 91B

entre autres), la WE 300B est l'une des très rares triodes de puissance à chauffage direct qui réunit autant d'atouts: utilisation sous des valeurs de tension plaque traditionnelles, comprises entre 250 V et 400 V, caractéristiques de transfert extrêmement linéaires, l'atout le plus important étant une valeur de dissipation plaque très supérieure à celles rencontrées sur les triodes réalisées précédemment. Elle est en effet de 40 watts. Précisons à ce sujet que la 45 conçue par RCA au début des années 30 faisait partie des premières triodes "haute fidélité", ses 10 watts de dissipation plaque limitant toutefois sa puissance de sortie à 3 watts seulement (en simple étage). Il ne fait aucun doute que ces "petits watts de bonne qualité" ont contribué à réaliser à l'époque des haut-parleurs au rendement aussi élevé que possible. Quelques années plus tard, la 2A3, sorte de "double 45" obtint un énorme succès grâce à une dissipation plaque de 12 watts, portant la puissance de sortie à 3,5 watts (en simple étage). Une dissipation plaque de l'ordre de 25 watts fut ensuite atteinte par des tubes tels que la 50 américaine (grand bulbe

ST 19, similaire à celui utilisé sur la WE 300B), la PX 25 anglaise, la F 704 hollandaise ou la TB 520 japonaise (figure 1). En été 1935 apparaissait chez Western Electric la WE 300A, que l'on pourrait assimiler à une sorte de "super WE 252A". La WE 252A était une triode à chauffage direct munie d'un grand bulbe en forme d'aubergine (figure 2) qui avait été conçue juste avant la WE 300A. Sa dissipation plaque atteignait déjà 35 watts. La fabrication de la WE 300A fut reprise sous licence, en Grande Bretagne, par le groupe STC, sous l'appellation 4300A. Trois ans plus tard naissait la fameuse WE 300B (figure 3). Les articles qui ont concerné ce tube lors de sa lancée faisaient état de son excellent rendement par rapport à des tubes soit plus volumineux, soit fonctionnant sous des tensions beaucoup plus élevées comme le WE 242C (sorte de 211/VT4C). La figure 4 montre notamment le plus faible encombrement de la plaque de la WE 300B par rapport à celle de la WE 252A, ceci malgré une valeur de dissipation plaque plus faible de cette dernière (35 watts pour la WE 252A contre 40 watts



*Fig. 2 : Triode Western Electric WE 252A, avec embase gravée et bulbe en forme d'aubergine. Certaines versions de ce tube étaient équipées d'une anode en grillage pressé et nervuré, laissant ainsi entrevoir la grille et le filament.*



*Fig. 1 : Quelques triodes célèbres à chauffage direct. De gauche à droite, la PX25 anglaise de GEC, la WE 300 B dans sa version militaire USN-CW, la grande 845 de RCA, la 50 de RCA montée sur bulbe ST-19, la 2A3 RCA à éléments triodes montés en parallèle et la DA 30 anglaise de GEC, une concurrente de la 300 B.*

pour la WE 300B). Quant à la fabrication de la légendaire WE 300B, elle cessa définitivement en fin 1988, soit 53 ans après la naissance de la WE 300A..

Dès le milieu des années 60, la WE 300B avait déjà atteint un prix d'or au Japon et également chez Western Electric. Les différents stocks de WE 300B (incluant les USN CW 300B réservés à l'armée américaine et les 300B canadiennes fabriquées par la filiale Northern Electric) s'épuisèrent peu à peu, ce qui participa à faire "grimper" encore plus haut des prix qui étaient déjà élevés: en 1970, la WE 300B se négociait vers les 110 dollars auprès de la Western Electric, mais uniquement sous forme de service après-vente sous contrat, pour une clientèle exclusive, de 30 à 70 dol-

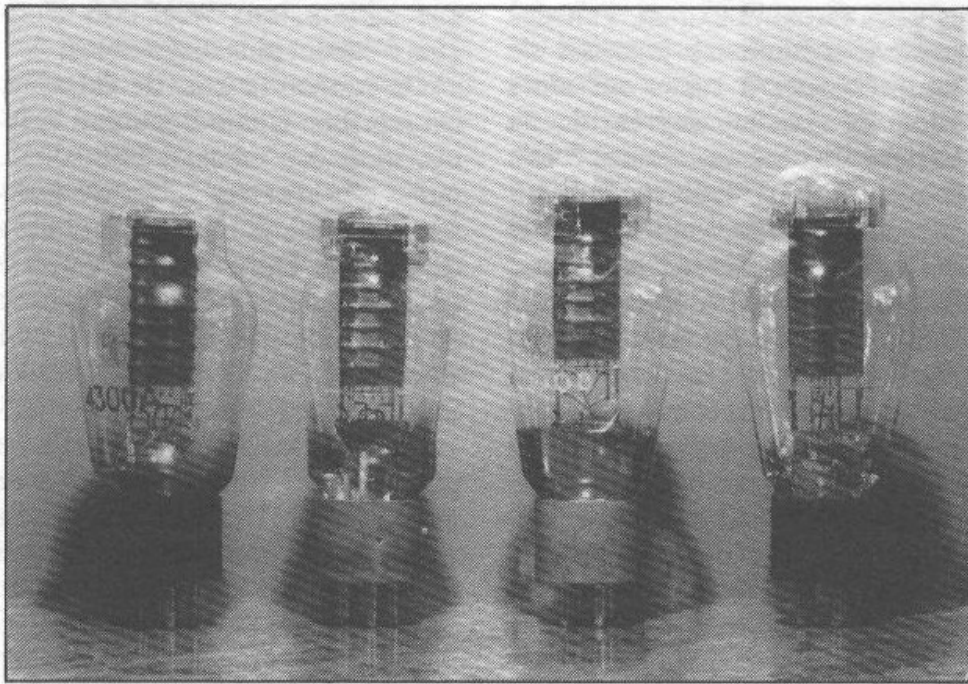


Fig. 3 : De gauche à droite, la STC anglaise 4300A, ancienne version, la STC 4300A, version plus récente avec petit bulbe, la version spéciale "4300B" avec bulbe ST-19. Enfin, à droite, la WE 300B, première version à embase gravée.

lars chez les différents grossistes en tubes américains et déjà à plus de 1 000 F au Japon. En 1980, les versions les plus prisées de la WE 300B (années 40, embase gravée) se négociaient au prix fort, aux alentours de 2 000 F pièce. Entre temps, divers spécialistes du tube encore actifs à l'époque tels que Hitachi et Okaya au Japon ainsi que Cetron aux U.S.A. se lancèrent, non sans mal, dans la fabrication des tubes 300B (figure 5). Les versions américaines Cetron obtinrent un certain succès, ce qui ne fut pas le cas des différentes versions japonaises (commercialisées sous les marques

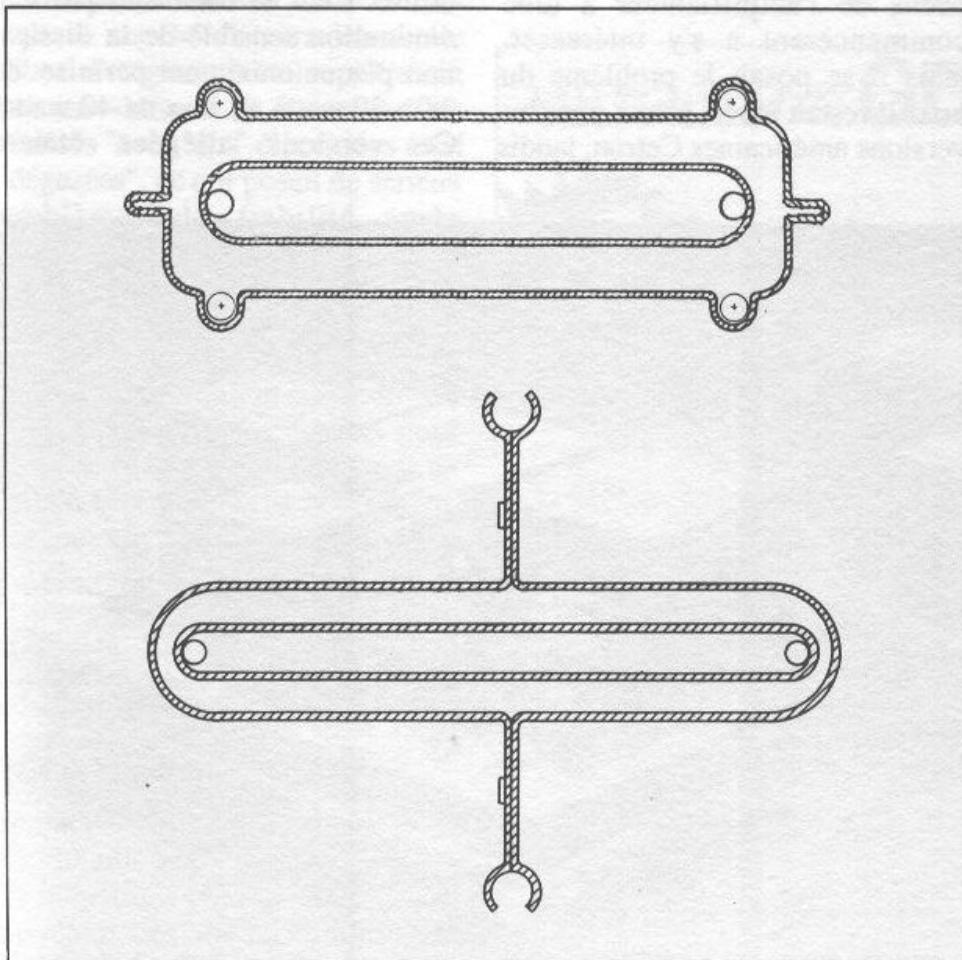


Fig. 4 : Vue en coupe de la plaque du tube WE 252A (en haut) comparée à celle de la WE 300B (en bas). Malgré ses grandes dimensions, la dissipation maximale de plaque de la WE 252A n'excède pas 35 watts, contre 40 W pour la WE 300B.

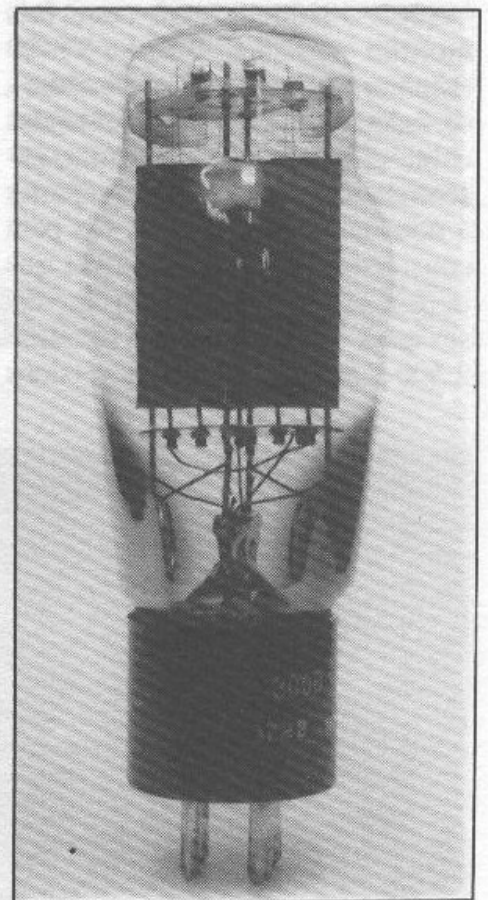


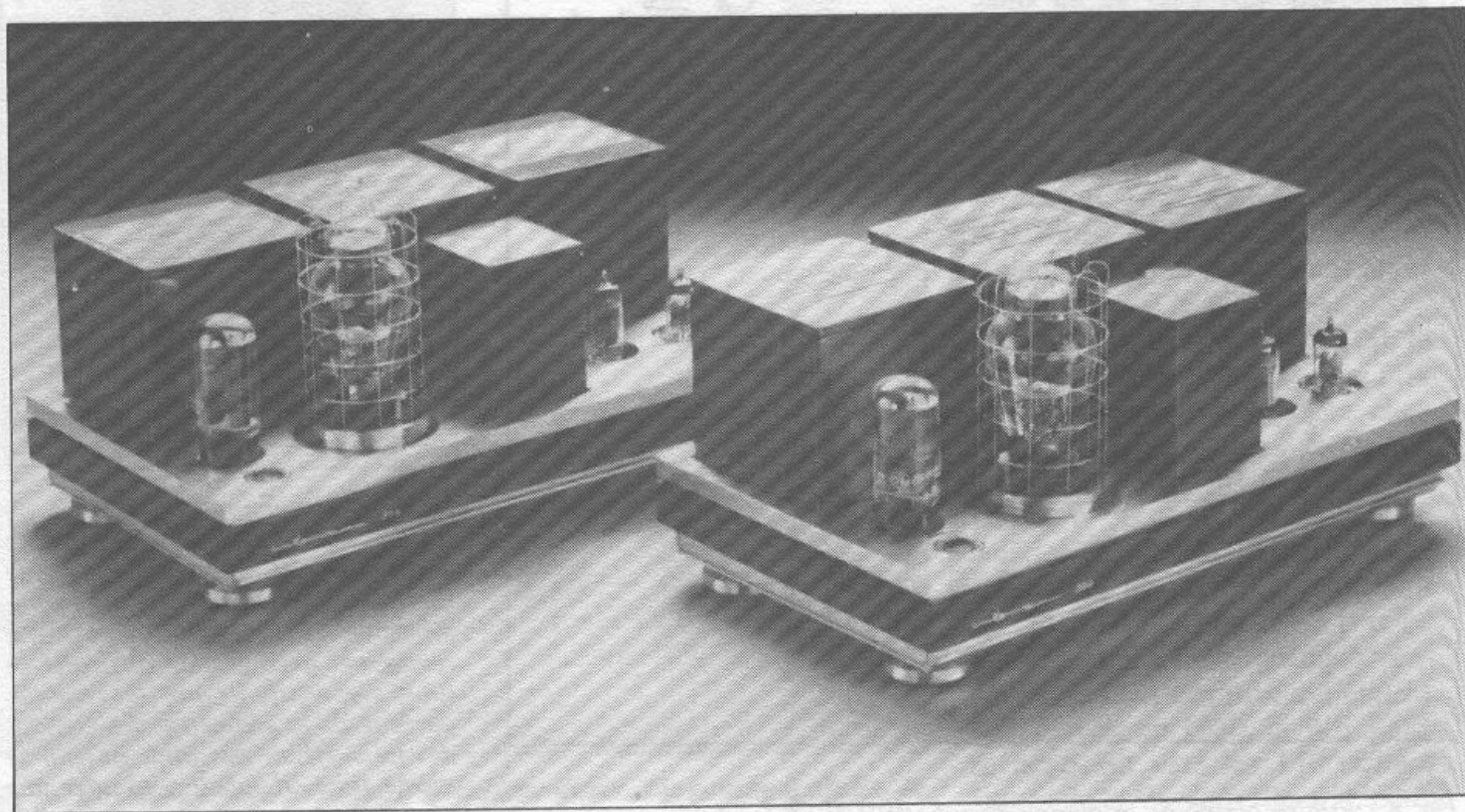
Fig. 5 : Un premier prototype de triode 300B, fabriqué par la firme américaine Cetron pour le compte de la société japonaise Sunsey Entreprise, en 1973. Les ingénieurs qui réalisèrent avec grande difficulté ce tube s'aperçurent que la réplique parfaite de la géométrie des électrodes ne suffisait pas pour obtenir le même tube. Il fallait y ajouter une réplique aussi parfaite que possible du filament d'origine, ce qui ne fut obtenu que plusieurs générations plus tard.

Zaïka, Eltus ou Okaya). La clientèle exigeait en contrepartie un tube en tous points identiques à la WE 300B d'origine. En 1976, le groupe JVC exposa même lors de l'Audio Fair de Tokyo un amplificateur équipé d'un nouveau tube double triode baptisé "600B": il était constitué de deux triodes 300B montées sur un support dont le standard ne se retrouvait que parmi les tubes cathodiques. Au cours des années 70 furent reprises en Grande Bretagne la fabrication des triodes STC 4300A (bulbe étroit et moins haut que le ST-19 américain) puis, un peu plus tard et sur commande spéciale, la "4300B", laquelle était cette fois montée sur un bulbe ST-19 (hauteur 151 mm, embase incluse), de façon à satisfaire aux demandes d'une clientèle très exigeante, essentiellement japonaise (se reporter à nouveau à la figure 3). On peut considérer que c'est vers 1983 que le prix des WE 300B s'envola vers ses plus hauts sommets (environ 2 500 F au Japon pour les versions

les plus rares). Luxman, l'un des derniers spécialistes japonais de l'amplificateur à tubes eut alors l'idée de lancer auprès de la Western Electric une série spéciale de tubes WE 300B, ceci pour inaugurer la sortie d'un amplificateur de très haut de gamme réalisé en série limitée en début 1984, le MB 300 (figure 6). Cette initiative eut pour effet de "tempérer" les prix pendant quelques années, mais avec une conséquence supplémentaire. Le tube WE 300B était réservé jusqu'alors aux "initiés", au petit créneau des audiophiles amateurs et artisans. Présenté cette fois sous la forme d'un maillon de très haut de gamme issu d'un grand constructeur, il révéla ainsi ses pleines capacités. Le WE 300B regagna encore en popularité, mais cette fois à travers les cinq continents. Des spécialistes américains et européens de l'amplificateur à tube commencèrent à s'y intéresser, mais il se posait le problème du prix. Il restait élevé, même pour les versions américaines Cetron, tandis

que les versions WE 300B d'origine n'étaient plus disponibles.

On connaît la suite de l'histoire. On reprit en Chine Populaire la fabrication des tubes KT 88, 6550, puis celle d'autres tubes de puissance comme la 6L6GC. La raison est simple: entre 1968 et 1976 le prix de gros des KT 88 anglaises de la GEC fut multiplié par 22: il passa de 1,76£ Sterling à quelques 38 £ Sterling! Lors de chaque dévaluation de cette monnaie, le groupe GEC trouvait en plus de nombreux arguments pour valider une augmentation sensible du prix des KT 88. Mais ce n'est pas tout. Les électrodes de ce tube sont essentiellement constituées de nickel. C'est, comme on le sait un métal de prix très élevé. Or, il avait été constaté, sur les dernières séries de KT 88 de GEC, une diminution sensible du poids total de nickel utilisé. Ceci se traduisait par une diminution sensible de la dissipation plaque maximum permise: de 28 à 30 watts au lieu de 40 watts! Ces versions "allégées" étaient



*Fig. 6 : Amplificateur monotriode Luxman MB-300. Il fut réalisé en série limitée (500 exemplaires seulement) en 1984. Il concentrait tout le savoir de Luxman en matière de transformateur de sortie et des composants passifs.*



ainsi devenues quasi-inutilisables sur les célèbres Mac Intosh MC 275. La situation avait déjà été mise à profit par le groupe anglais British Industries "Genalex" qui proposait depuis un certain temps déjà la série spéciale "Gold Lion". S'inspirant de cette idée, un grossiste new-yorkais commercialisa à son tour les KT 88 "Gold Monarch" sous un emballage qui ressemblait à s'y méprendre à celui des "Gold Lion". Mais les augmentations successives du prix de la KT 88 sous ces différentes formes eurent raison de ce tube célèbre. On s'orienta alors vers les équivalents américains, parfois plus robustes, puis vers d'autres tubes fabriqués dans les pays de l'Est (KT 90, KT 99). C'est devant cette situation et pour répondre à une importante demande, mais à des prix plus raisonnables, que la Chine Populaire décida de prendre en main ce créneau de marché. A leurs débuts, les tubes d'origine chinoise n'étaient pas sans défauts. Ils étaient parfois réalisés avec des électrodes mal "dégazées", ce qui posait de sérieux problèmes de fiabilité après quelques mois d'utilisation. D'autres offraient des caractéristiques sensiblement différentes des versions d'origine, car des pièces réservées normalement pour tel tube étaient utilisées parfois pour d'autres. Mais il s'y mêlait aussi un certain esprit de perfectionnement, pas toujours bien placé, conduisant à l'élaboration de tubes genre "moutons à cinq pattes", entre autres la ECC 83 équipée d'un blindage central séparant les deux sections triodes! Bien entendu, quelques grossistes en tubes se trouvèrent lésés par ces nouvelles productions chinoises et firent de ces défauts une arme. Cependant, les industriels chinois du tube surent réagir très vite en éliminant un à un "bricolages" et défauts. Ne serait-ce que pour préserver une clientèle fidèle et sans cesse grandissante. Ainsi naquit la KT 88 chinoise. Le célèbre logo "Gold

Lion" devint "Golden Dragon" et les boîtes rouges se transformèrent en boîtes vertes. De succès en succès, les fabrications chinoises s'étendirent alors aux tubes triodes à chauffage direct avec, en priorité la GD 300B, baptisée également "Golden Dragon" (figure 7). Elle fut suivie de la 2A3 et même de grosses triodes genre 211 et 845. Dans les revues japonaises spécialisées, des essais comparatifs effectués en aveugle mirent en évidence le fait qu'après une courte période de rodage, ces différents tubes offraient des performances tout à fait similaires à celles des versions d'origine, avec des qualités sonores également très proches, voire identiques. Les mauvaises critiques sur les tubes d'origine chinoise s'apaisèrent ainsi peu à peu, exception faite de celles émanant de grossistes et détaillants en tubes améri-

cains anciens et nouveaux qui, comme on peut l'imaginer, souhaitaient préserver leur marché. Si l'on prend conscience du fait que de nos jours, le prix des 6550 ou KT 88 de premier choix peu atteindre, voire dépasser les 750 F, on comprend qu'à prix équivalent ou même légèrement inférieur, de nombreux amateurs estiment à juste raison qu'il est désormais plus intéressant de s'orienter vers la 300 B d'origine chinoise. Actuellement, d'autres pays de l'Est commencent à s'intéresser sérieusement à la fabrication en petite série de certaines triodes de puissance à chauffage direct pour utilisation audio, ne serait-ce que pour relancer partiellement des usines qui fabriquaient des tubes en grande série il y a quelques années seulement. Si, d'un côté, on peut regretter la disparition des plus grands spécialistes du tube comme



Fig. 7 : Publicité japonaise récente de triodes GD 300B chinoises portant la marque Golden Dragon. Malgré une forte ressemblance avec les 300B de Western Electric, elles diffèrent au niveau du mode de suspension des filaments : ressort en spirale pour la GD 300B et tige "canne à pêche" pour la WE 300B. D'autres petites différences existent comme la forme des supports en mica sur le support de getter (on prononce G-terre).

Western Electric, RCA, Mullard, Siemens ou Telefunken, on ne peut nier le fait que grâce à ces nouvelles productions, les tubes et les applications audio qui en découlent satisfont aux besoins de dizaines de milliers d'amateurs dans le monde et survivront encore après l'an 2000.

## Utilisation optimale de la WE 300B

Lors de la rédaction de cet article, l'auteur s'était proposé de publier tous les schémas de montages monotriodes conçus autour de la 300B ainsi que les photos de tous les amplificateurs concernés. Ce projet fut vite abandonné: il aurait nécessité au moins 80 pages sous forme condensée!

Avant d'aborder quelques conseils en vue de l'utilisation optimale de la 300B, il semble important de souligner que les tubes sont tous sujets à des tolérances de fabrication: géométrie des électrodes et matériaux constitutifs de celles-ci, couches émissives des cathodes ou des filaments, degré de précision du montage mécanique, qualité du vide etc. Il en découle bien entendu une dispersion des caractéristiques dont il faut être conscient. Certains tubes américains baptisés "6CA7" ou "EL 34" par exemple, ne sont pas de vrais tubes pentodes identiques aux versions Philips d'origine mais des tétrodes à faisceaux dirigés sensiblement différents. Il peut en résulter de gros problèmes de compatibilité lors du remplacement sur un amplificateur d'une vraie EL 34 par une pseudo "EL 34" de ce type. Ainsi, à partir de la même valeur de tension plaque et de polarisation négative de la grille de commande, le courant total plaque + écran peut, d'une marque de tube à l'autre, varier dans des proportions considérables. Par rapport à une valeur "normalisée" de 70 mA par exemple, le courant plaque peut, selon l'origine du tube, se situer entre 40 mA et 110

mA avec, dans le dernier cas, un dépassement de la dissipation maximale de plaque permise par le tube et, dans le premier cas, un risque d'écrêtage prématuré du signal de sortie. Si un simple réglage de polarisation accompagné d'une mesure du courant total par tube suffit généralement lors d'un tel remplacement sur un amplificateur, quelques "spécialistes" du tube n'hésitent pas à profiter de la situation en proposant, parfois à des prix très élevés, des tubes triés ou appariés. **Beaucoup trop souvent, on "compare la sonorité d'un tube de telle marque par rapport à celle d'un tube d'une autre marque" sans se rendre vraiment compte que l'on compare quelquefois non seulement des différences de sonorité dues à l'origine des tubes, mais aussi celles qui sont tout simplement dues à des différences de courant de repos entre ces tubes.** Pour la même raison, on peut estimer à tort qu'une EL 34 de telle marque est moins fiable qu'une EL 34 de telle autre marque tout simplement parce que sur le même amplificateur, le courant de repos trop élevé obtenu avec la première conduit à un dépassement de la dissipation maximale de plaque permise par ce tube. Dans tous les cas, le remplacement d'un tube par un autre doit être complété d'une mesure du courant de repos, tout réglage "à l'oreille" étant totalement insuffisant et déconseillé. Quelquefois, cet état de dépassement des conditions de courant et de tensions maximum permises reste pratiquement invisible. La plaque du tube ne rougit pas forcément et le dépassement des limites autorisées peut se situer au niveau de la grille accélératrice: elle peut, par rougissement excessif de ses spires, soit participer à un vieillissement prématuré du tube, soit finir par entraîner un blocage du tube, suite à un effet d'ionisation générale interne. Le tube se comporte alors comme une diode, du moins jusqu'à son auto-destruction.

La dispersion des caractéristiques de tubes n'est donc pas un détail d'importance secondaire.

Les tubes 300B, ceux d'origine Western Electric comme ceux fabriqués par Cetron ou en Chine Populaire, connaissent tous ces phénomènes de dispersion. Cependant, il est impossible de juger de la dispersion d'un tube de marque donnée par rapport à ses caractéristiques officielles en ne prenant pour base que quelques tubes. L'expérience du tri en série des tubes montre qu'il en faut une bonne centaine pour bien cerner les tendances du point de vue largeur de dispersion et par rapport aux valeurs normalisées. En général, il résulte du tri d'une centaine de tubes ou plus, une dispersion en forme de "chapeau de gendarme" dite "gaussienne", dont la partie la plus élevée doit correspondre aux valeurs normalisées.

## Caractéristiques et classification de la WE 300B

La WE300B est une triode à chauffage direct, de puissance "modérée" conçue pour un fonctionnement en classe A en basse fréquence.

Présentée avec un bulbe dit ST-19 et un brochage américain 4 broches dit "UX", elle comporte une fixation par bayonnette latérale (43°) avec une embase prévue pour s'adapter soit sur les supports 143B de Western Electric, soit sur les supports 100M ou 115B du même fabricant. Ce tube est équipé d'un filament en "M" constitué de deux éléments reliés en parallèle (contrairement à la 4300A anglaise sur laquelle le montage du filament est effectué en série. Le filament est alimenté normalement en courant alternatif, mais il peut l'être aussi en courant continu bien que le constructeur n'apporte pas de détail à ce sujet, hormis le fait que dans le cas d'une alimentation en courant alternatif, le "retour" de grille et de

plaque doit s'effectuer soit par le point milieu de l'enroulement du chauffage filament 5 V, soit par le point milieu d'un rhéostat (valeur conseillée 50  $\Omega$ /10 W). Le filament doit être alimenté sous 5 volts, sa consommation en courant étant de 1,2 A. Précisons à ce sujet qu'il existe, parmi les différents modèles réalisés par WE, STC, Cetron, GD et les autres marques, des petites variantes au niveau du courant filament. Il varie entre 1,05 et 1,22 A environ. Les premières versions de tubes STC 4300A sont d'autre part équipées de filaments de section cylindrique, contrairement à celles des WE qui ont toutes la forme d'un ruban de faible largeur. Parmi toutes les versions de 300B connues, le filament de la WE 300B Western Electric apparaît de toute évidence comme le plus performant de tous. Sa couche émissive associe haut rendement et haute fiabilité (10 000 heures d'utilisation pour un fonctionnement sous une dissipation plaque modérée) et l'émission du flux électronique se stabilise vers 5 V, contrairement à celle de la plupart des autres 300B qui continue d'augmenter au delà de la tension filament nominale. Le filament utilisé est une version dite à "basse température" (885°C environ), mais à pouvoir émissif élevé, ceci contrairement à des tubes à filament en tungstène thorié qui sont portés à haute température, ce qui produit une lumière presque blanche (cas des tubes 10, 10Y, 801A, 211/VT-4C ou 845).

Le tube doit être bien ventilé et disposé de préférence verticalement sur le châssis. Dans le cas forcé d'une disposition horizontale, le plan du filament doit être vertical, de façon à éviter un risque de court-circuit éventuel avec la grille.

Les capacités inter-électrodes sont les suivantes:

- capacité grille-plaque: 15 pF
  - capacité grille-filament: 9 pF
  - capacité plaque-filament: 4,3 F
- En prenant pour base une ten-

sion plaque de 300 V, une polarisation grille de - 61 V et une tension de chauffage filament de 5 V, on a:

- courant plaque: 60 mA
- coefficient d'amplification: 3,85
- Impédance interne: 700  $\Omega$ .
- Conductance mutuelle: 5 500 micromhos.

**Les conditions maximum d'utilisation** concernent la tension plaque maximum, le courant plaque maximum et la dissipation plaque maximum. **Toutefois, elles ne concernent pas ces trois paramètres pris simultanément:**

- Tension plaque maximum: 450 V
- Dissipation plaque maximum: 40 W

- Courant plaque maximum avec polarisation fixe: 70 mA

- Courant plaque maximum avec polarisation automatique: 100 mA

- Résistance de fuite de grille: 250 k $\Omega$  max. avec auto-polarisation et 50 k $\Omega$  max. en polarisation fixe.

Comme indiqué ci-dessus, un fonctionnement sous 450 V de tension plaque, avec un courant de repos de 100 mA et une dissipation plaque de 40 W n'est pas autorisé, car on dépasse de 9 à 10 W la limite de dissipation plaque indiquée par le constructeur. A ce sujet, et bien que la valeur de dissipation maximale soit de 40 W, le tableau d'utilisation montre que la dissipation plaque réelle ne dépasse jamais 36 W.

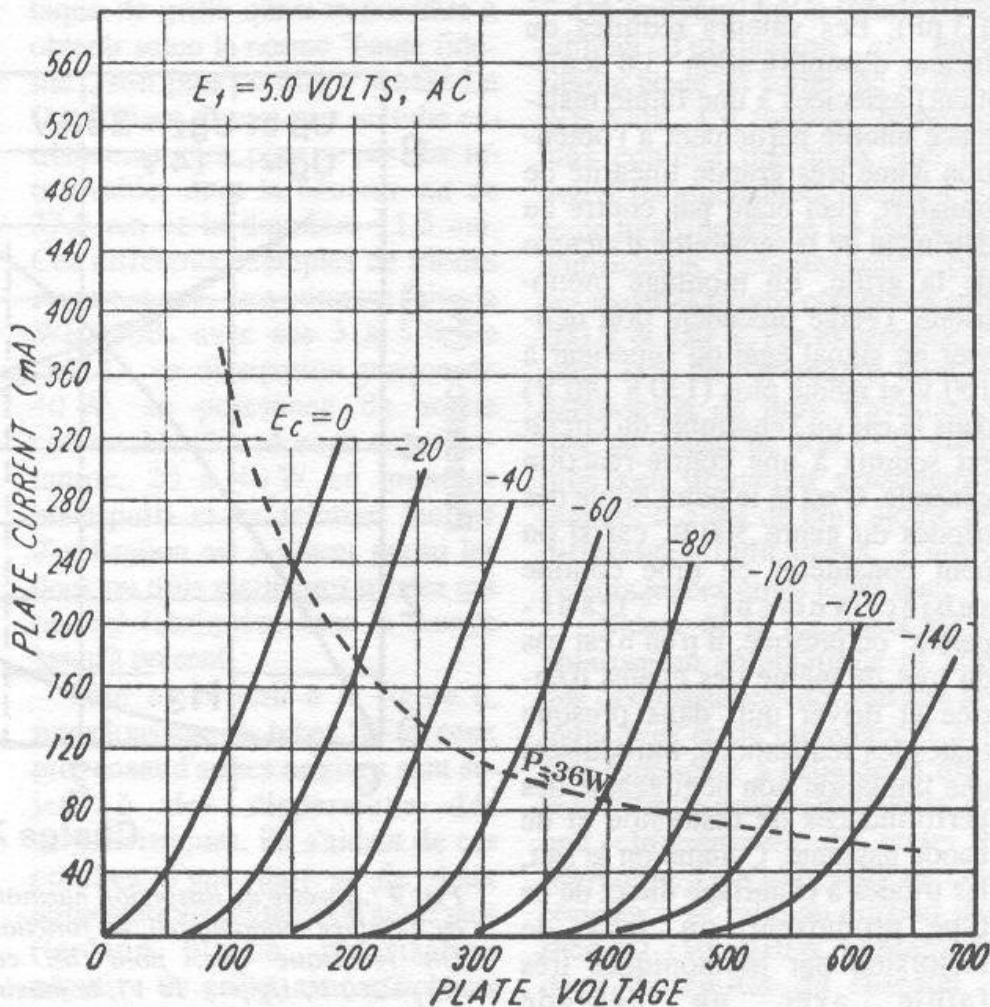


Fig. 8 : Triode WE 300B. Caractéristique de courant plaque en fonction de la tension plaque, ceci pour une valeur de polarisation grille comprise entre 0 V et - 140 V. En pointillé, la courbe de dissipation plaque de 36 W, que le constructeur conseille de ne pas dépasser. La linéarité est exceptionnelle en regard de la valeur de dissipation plaque.

## Caractéristiques courant/tension plaque en fonction de la polarisation grille

On les trouvera sur la figure 8. On remarquera la linéarité exceptionnelle des caractéristiques, avec une équidistance parfaite des courbes  $U_p/I_p$  en fonction des différentes valeurs de polarisation grille. Sur cette courbe a été ajoutée celle de la dissipation plaque maximum, de 36 W, qu'il ne faut pas dépasser, bien que la limite se situe en fait à 40 W. Selon les années de publication, certaines fiches techniques de ce tube indiquent d'ailleurs une dissipation plaque maximum de 36 W (au lieu de 40 W) et une capacité plaque-filament de 4,1 pF (au lieu de 4,3 pF). Les valeurs réduites du facteur d'amplification (3,8 seulement) associées à une faible résistance interne participent à l'obtention d'une très grande linéarité de transfert, ceci étant par contre au détriment de la sensibilité d'attaque de la grille. En montage monotriode, l'étage précédent doit délivrer un signal égal ou supérieur à 100 V et même plus (130 à 140 V) dans le cas où l'ensemble du circuit est soumis à une contre-réaction générale. C'est là le point faible des triodes du genre 300 B, car si on peut considérer ce tube comme subjectivement "transparent" ou presque, il n'en n'est pas du tout de même des étages d'entrée et driver qui, dans presque toutes les réalisations, introduisent une limitation non négligeable des performances de distorsion et de bande passante. Comme on le sait, les triodes à chauffage direct de ce type produisent un taux de distorsion par harmoniques très faible avec un dégradé extrêmement régulier des rangs pairs et impairs. Pour la WE 300B l'ordre de valeur de la D.H.T. est de 3 à 5% seulement. Il semble important de souligner à ce sujet que, contrairement à ce que l'on

entend parfois, les tubes triodes utilisés de façon intrinsèque ne produisent pas "que" de la distorsion par harmoniques pairs. Il s'agit plus exactement d'un dégradé idéal, car régulièrement décroissant d'harmoniques 2,3,4,5,6 etc. On pourra à ce sujet se reporter à l'ouvrage "Initiation aux amplis à tubes" de l'auteur, page 67, où figure l'analyse spectrale de la distorsion produite par plusieurs tubes triodes à chauffage direct.

Précisons encore que, contrairement à ce que l'on entend parfois également, les tubes **tétrade et pentodes de puissance** ne procurent pas de distorsion harmonique à tendance paire, mais impaire. Il en résulte à l'écoute une tendance naturelle "dure" et agressive, que l'on essaie de combattre au mieux à

l'aide de différents circuits. Sur les KT 88 et 6550 par exemple, en montage à lampe de sortie unique, le taux de distorsion harmonique est de l'ordre de 9 à 10%, ce avec une forte prédominance des harmoniques impairs et avec un dégradé des rangs impairs et pairs irrégulier (figure 9). Si l'un des avantages de ce tube est un rendement favorable : 60% en moyenne pour un tube tétrade de puissance contre 45% environ pour une triode à chauffage direct), l'inconvénient majeur est une linéarité de transfert des caractéristiques nettement inférieure à celles offertes par les meilleures triodes de puissance à chauffage direct. Quant au montage push-pull, utilisé sur la quasi-totalité des amplificateurs équipés de

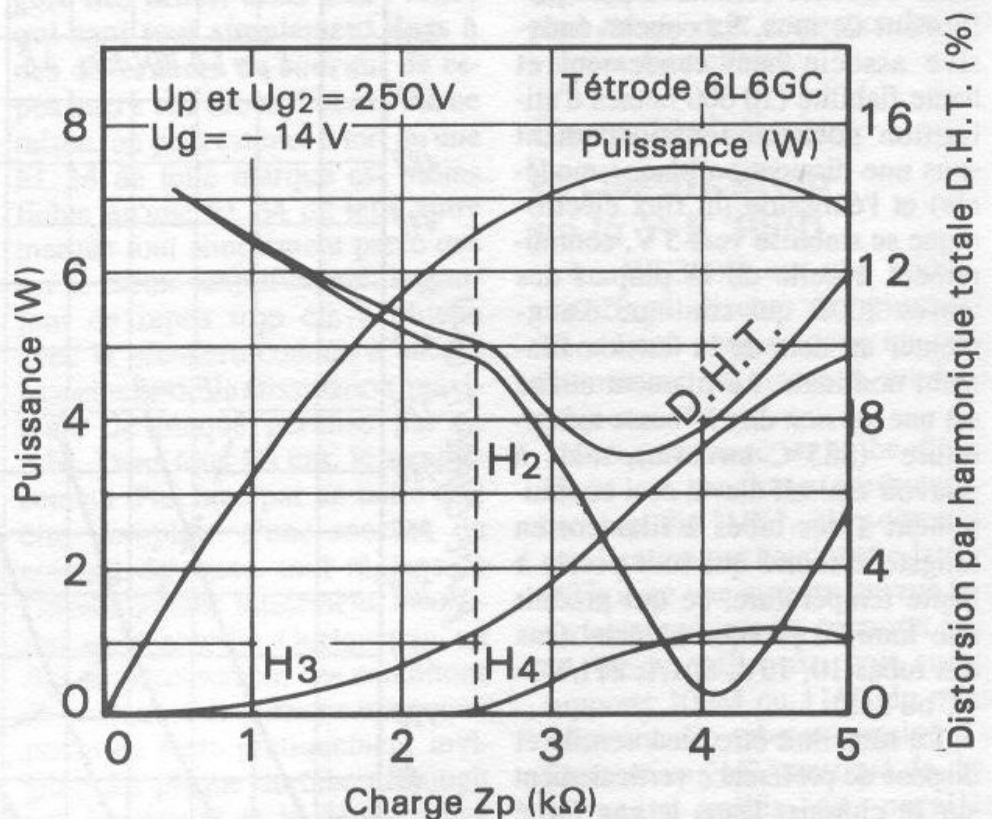


Fig. 9 : Spectre de distorsion harmonique typique d'un tube tétrade (6L6GC en montage monolampe), en fonction de la puissance et de la charge choisie. On remarque que, pour les conditions d'utilisation données ( $U_p$ ,  $U_{g2}=250$  V,  $U_{g1}=-14$  V), le maximum de puissance (7,5 W, pour un taux de T.H.D. de 15%) obtenu avec une charge de 3,8 kΩ. On remarque une variation sensible des harmoniques en fonction de la puissance et de la charge, avec forte prédominance de l'harmonique 3 dans la zone où l'on obtient le maximum de puissance. En montage monolampe, la 6L6 GC doit en fait être chargée par 2,5 kΩ si l'on souhaite obtenir un meilleur dégradé des harmoniques 2, 3 et 4. Le montage push-pull atténue le niveau de T.H.D. mais rend à nouveau prédominante la distorsion par harmoniques impaires.

**6550, KT 88, EL 34 ou 6L6GC, il est bon de souligner qu'il ne peut réduire, par principe, que la distorsion par harmoniques de rangs pairs, ceci en classe A, AB comme en classe B.** De la sorte, on fait que souligner ce défaut de prédominance des harmoniques impairs. Il existe, parmi les différentes possibilités d'utilisation de la **KT 88** en configuration push-pull ultra-linéaire (prises d'écran sur le transformateur de sortie, effet de contre-réaction plaque/écran) des modes de fonctionnement qui conduisent à des taux de distorsion de **1 à 2%** seulement et à des puissances de sortie comprises entre 50 et 100 W. Si ce chiffre peut paraître très alléchant en tant que valeur de D.H.T. (distorsion par harmoniques totale), il ne faut pas perdre de vue le fait que **la distorsion est par contre composée essentiellement d'harmoniques impairs.** L'analyse spectrale de la distorsion apporte une réponse indéniable en cas de litige, et les exceptions à cette règle sont très rares. Ajoutons que l'on constate en plus, très fréquemment lors des mesures, un spectre de distorsion dont la distribution harmonique varie sans cesse selon la puissance et la fréquence. Cette constatation peut malgré tout aller à l'encontre d'amplificateurs à tubes que l'on apprécie tant pour leur "musicalité". La question est de savoir par rapport à quelle référence...

Pour en revenir aux meilleures triodes à chauffage direct, rappelons qu'il existe d'autres tubes de puissance réduite (RE 604 ou AD 1 chez Telefunken, PX 4, chez GEC/Osram, PP3/250 chez Mazda U.K., 2A3 chez RCA ou chez Fivre en Italie, 10, 12A, 45, 71A ou 112A aux U.S.A., F 410 en France pour n'en citer qu'une petite partie) sur lesquelles le taux de D.H.T. se situe entre 1,5 et 2,5% seulement. Hors fabrication depuis de longues années, parfois depuis les années 30, ils continuent d'être toujours très recherchés par les initiés fana-

tiques de triodes à haute linéarité. L'ancienne version RE 604 de Telefunken, en état neuf, en boîte d'origine, avec bulbe en forme d'aubergine se négocie par exemple au Japon aux environs de 2 500 F pièce! Si ce prix est effectivement élevé, en particulier en termes de prix par watt, précisons qu'il existe aussi des amplificateurs de très haut de gamme dont le prix dépasse les 200 000 F. Si l'on s'aventure dans les triodes à haute puissance, la DA 250 chez GEC en Grande Bretagne bat tous les records avec quelques 800 W de puissance disponible en mode push-pull et 5% de D.H.T. seulement! L'inconvénient majeur de cette triode géante est la valeur trop élevée de la tension d'alimentation, soit quelques 2 500 V, ainsi qu'une tension d'attaque de grille quasi-impossible à obtenir selon la norme "haute fidélité", soit plus de 400 V RMS! La DA 250 est d'autre part un tube extrêmement rare, pour ne pas dire introuvable, dont la hauteur est de 37,5 cm et le diamètre 11,3 cm. Ces différents exemples de triodes montrent que, tous comptes faits, la WE 300B, avec ses 3 à 5% de D.H.T., sa dissipation plaque de 40 W, sa puissance de sortie confortable (5 à 14 watts en monolampe, 20 à 40 W en montage push-pull) et sa relative facilité d'utilisation est à placer parmi les deux ou trois meilleures triodes qui ont été fabriquées dans le monde jusqu'à présent.

Pour en revenir à la figure 8, rappelons que les tubes WE et ceux provenant d'autres origines sont sujets à des dispersions des caractéristiques. En s'aidant de ces courbes d'une part et de deux alimentations réglables d'autre part (tension plaque, polarisation négative de grille, avec afficheurs séparés des tensions), on peut au besoin mesurer les tubes et établir, par la méthode point par point, à condition de ne jamais dépasser les 36 watts de dissipation plaque, une nouvelle famille de courbes.

Généralement, trois ou quatre points suffisent pour reconstituer une courbe et quelques repères permettent d'établir une nouvelle famille de courbes et de connaître l'écart de celles-ci par rapport aux courbes officielles. On pourra alors établir avec précision le point de fonctionnement idéal sur la droite de charge. En réalité, une charge réelle (transformateur de sortie + charge du secondaire par le haut-parleur) de valeur 2,5 k $\Omega$  n'est pas une droite disposée entre les points 500 V et 200 mA de la figure 8, mais plus exactement une ellipse dont les paramètres dépendront d'une charge qui n'est pas purement résistive, mais à prépondérance tantôt inductive, tantôt capacitive, ceci lorsque le circuit sera sollicité par le signal audio.

On trouvera, sur la figure 10, un tableau d'utilisation en mode simple étage de sortie, de la triode WE 300B. Ce tableau, beaucoup plus complet que ceux que l'on trouve habituellement réduits à une seule ligne, concerne les conditions d'utilisation recommandées, pour des tensions plaque comprises entre 200 V et 450 V. Par expérience, on peut déjà dire d'emblée qu'il est déconseillé de faire travailler le tube au dessus de 400 V: la vie du tube s'en trouverait sensiblement réduite. Il a été de plus ajouté aux différentes indications, d'autres valeurs jugées utiles telles que:

- Valeur de la résistance  $R_k$  en polarisation automatique (à noter que ces résistances doivent être non inductives et de puissance 5 à 10 fois supérieure à celle de la dissipation réelle dans la résistance, soit une cinquantaine de watts en moyenne). Une extrémité de cette résistance se relie au curseur d'un rhéostat (50  $\Omega$ /10W bobiné), les deux extrémités du rhéostat se fixant aux connexions filament du support du tube triode. L'autre extrémité de la résistance de polarisation retourne à la masse, au même endroit que celui du retour à la masse de la résistance de fuite de

CONDITIONS D'UTILISATION RECOMMANDEES											
Tension Plaque (volts)	Polarisation Grille (- volts)	Courant Plaque (mA)	Résistance de pol. Rk (ohms)	Charge de Plaque (Z ohms)	Puissance de sortie (watts)	Dissipation Plaque (watts)	Rendement (P.diss/P.sort) (%)	Marge de sécur p. rapp. à une diss. max 40W (%)	Harmonique 2 H <sub>2</sub> (-dB)	Harmonique 3 H <sub>3</sub> (-dB)	Moyenne H <sub>2</sub> +H <sub>3</sub> (-dB)
200	- 42	30	1400 Ω	2000	3,0	6	50,0	85	20	31	26
200	- 39	40	975 Ω	2500	2,6	8	32,5	80	26	38	32
200	- 37	50	740 Ω	2500	2,5	10	25,0	75	30	45	37,5
250	- 55	30	1833 Ω	2000	4,9	7,5	65,3	81,25	18	27	22,5
250	- 55	30	1833 Ω	4500	3,2	7,5	42,6	81,25	27	40	33,5
250	- 52	40	1300 Ω	3000	4,0	10	40,0	80	26	36	31
250	- 50	50	1000 Ω	2500	4,4	12,5	35,2	68,75	26	39	32,5
250	- 48	60	800 Ω	2000	4,7	15	31,3	62,5	26	38	32
250	- 48	60	800 Ω	2700	4,1	15	27,0	62,5	30	45	37,5
250	- 45	80	562 Ω	1500	5,0	20	25,0	50	26	41	33,5
300	- 65	40	1625 Ω	2500	6,7	12	55,8	70	20	30	25
300	- 63	50	1260 Ω	2000	7,2	15	48,0	62,5	21	29	25
300	- 63	50	1260 Ω	3000	6,1	15	40,6	62,5	26	37	31,5
300	- 61	60	1016 Ω	2400	6,6	18	36,6	55	26	37	31,5
300	- 61	60	1016 Ω	3400	5,6	18	31,1	55	30	44	37
300	- 58	80	725 Ω	1700	7,5	24	31,2	40	26	37	31,5
350	- 76	50	1520 Ω	3600	7,8	17,5	45,8	56,25	26	38	32
350	- 76	50	1520 Ω	5000	6,2	17,5	35,4	56,25	30	45	37,5
350	- 74	60	1233 Ω	2000	10,2	21	48,5	47,5	21	30	25,5
350	- 74	60	1233 Ω	3000	8,3	21	32,5	47,5	26	38	32
350	- 74	60	1233 Ω	4000	7,0	21	33,3	47,5	30	44	37
350	- 71	80	887 Ω	2200	9,6	28	34,2	30	26	39	32,5
400	- 91	40	2275 Ω	5000	8,4	16	52,5	30	26	37	31,5
400	- 89	50	1780 Ω	3000	11,5	20	57,5	50	21	31	26
400	- 89	50	1780 Ω	4000	9,4	20	47,0	50	25	38	31,5
400	- 87	60	1450 Ω	3500	10,5	24	43,7	40	26	38	32
400	- 87	60	1450 Ω	5000	8,3	24	34,5	40	30	46	38
400	- 84	80	1050 Ω	2500	12,5	32	39,0	20	25	37	31
450	- 104	40	2600 Ω	6000	9,5	18	52,7	55	26	38	32
450	- 102	50	2040 Ω	5000	10,7	22,5	47,5	43,75	27	39	33
450	- 102	50	2040 Ω	6500	9,0	22,5	40,0	43,75	30	45	33,5
450	- 100	60	1666 Ω	4000	12,5	27	46,2	32,5	26	38	32
450	- 100	60	1666 Ω	5500	10,1	27	37,4	32,5	30	44	37
450	- 97	80	1212 Ω	2000	17,8	36	49,4	10	21	30	25,5
450	- 97	80	1212 Ω	3000	14,6	36	40,5	10	26	37	31,5
450	- 97	80	1212 Ω	4500	11,5	36	31,9	10	31	45	38

Fig. 10 : Triode WE 300B. Conditions d'utilisation recommandées, pour des tensions plaque comprises entre 200 V et 450 V (il est conseillé de ne pas dépasser 400 V). Le tableau a été complété de différentes valeurs qu'il semble utile de connaître : dissipation plaque pour chaque utilisation, rapport dissipation plaque/puissance de sortie, marge de sécurité par rapport à la dissipation plaque maximale de 40 W, distorsion H<sub>2</sub> et H<sub>3</sub> et moyenne H<sub>2</sub>+H<sub>3</sub>.

grille. Mais ce sujet concerne cette fois celui du câblage idéal de masse, qu'il est toujours important de respecter. Il ne faut pas oublier que d'ordinaire, la résistance de polarisation automatique "Rk" est découplée par un condensateur de valeur comprise entre 40 et 100 μF, que les audiophiles découplent encore par d'autres condensateurs non polarisés de qualité, genre polypropylène. On remarquera que la valeur de la résistance est très précise et que la demi-valeur ohmique du rhéostat est incluse (soit 25 Ω à retrancher à toutes les valeurs "Rk" indiquées, pour un rhéostat de 50 Ω). Précisons encore que les valeurs de Rk indiquées sur le tableau de la figure 10 ne peuvent être uti-

lisées sur un montage que si les caractéristiques du tube sont exactement les mêmes que celles des spécifications officielles. Si l'on "oublie" ce petit détail, il ne faudra pas être surpris de constater différents problèmes allant de la non-similarité des performances entre les canaux jusqu'à un écrêtage prématuré et "inexplicable" dès 2,5 watts en sortie, alors que le tube et la tension d'alimentation devraient permettre normalement d'obtenir 7 à 8 watts sans difficulté. Bien entendu, cette remarque s'applique aussi bien à l'étage de puissance qu'aux étages précédents.

- Dissipation plaque pour chaque condition d'utilisation. La connaissance de cette valeur est utile. On

remarquera que, parmi les différentes conditions d'utilisation proposées, seules trois d'entre-elles correspondent à une dissipation plaque de 36 watts. En deçà de 30 watts, pour une tension plaque inférieure à 350 V, une longue durée de vie est assurée, soit de 8 000 à 10 000 heures pour la WE 300B. Pour les 300B d'origine chinoise, le manque de recul ne permet pas encore de connaître leur durée de vie moyenne, bien que l'on considère ces tubes comme fiables. A ce sujet, la mesure précise du courant de repos à long terme pourrait permettre d'établir une courbe "d'épuisement" du pouvoir émissif du filament, ceci pour diverses conditions d'utilisation de tension et de

courant plaque. On pourrait sans doute en déduire la durée de vie moyenne de ce tube.

- "Rendement", ou plus exactement rapport en % entre la puissance dissipée pour chaque condition d'utilisation et la puissance de sortie. La connaissance de cette valeur est également très utile. On notera en effet que pour des écarts de l'ordre du 1/2 watt en puissance de sortie, la puissance dissipée peut par contre varier sensiblement.

- Marge de sécurité par rapport à la dissipation plaque maximum permise. Pour 300 V de tension plaque, 40 mA de courant plaque et pour une charge de 2,5 k $\Omega$ , elle atteint 70 %. C'est une condition favorable, car la dissipation plaque effective n'est que de 12 watts pour une puissance de sortie de 6,7 watts!

- Distorsion par harmoniques pairs.

- Distorsion par harmoniques impairs.

- Distorsion par harmoniques 2+3.

La connaissance de ces chiffres de distorsion par harmoniques 2 et 3 est utile, car elle facilite soit le choix de la charge optimale, soit le choix des paramètres de courant, de tension ou de polarisation qui permettent d'aboutir aux valeurs de distorsion les plus favorables.

## A propos des transformateurs de sortie

S'il n'existait pas certains problèmes incontournables liés à la conception des transformateurs de sortie, le choix de la valeur optimale de la charge serait facile. Au niveau des transformateurs de sortie, l'optimisation d'un paramètre s'effectue souvent au détriment d'un autre. Un couplage très serré, avec "enroulements primaires et secondaires entrelacés en "sandwich" de trop nombreuses fois participe à un meilleur couplage primaire/secondaire et, en théorie, à

une faible perte d'insertion totale (elle est rarement inférieure à 0,25 dB dans les meilleurs cas). Il participe malheureusement aussi à augmenter les capacités parasites, à augmenter également le facteur de volume du bobinage, dont les fractionnements multiples nécessiteront des couches isolantes supplémentaires, sans parler des couches qui resteront incomplètes, en laissant donc des vides entre les couches, avec les risques de vibrations mécaniques qui peuvent en découler. Ceci nuit aux performances, en particulier au-delà de 20 kHz. Un enroulement primaire réalisé en fil d'assez gros diamètre est avantageux du point de vue résistance en courant continu (c'est un paramètre important des transformateurs de sortie qui peut influencer sensiblement les résultats d'écoute). Par contre un enroulement réalisé en fil de petit diamètre permettra d'obtenir à volume égal une valeur d'inductance primaire plus élevée, ce qui pourra contribuer à étendre la réponse aux fréquences graves. Mais le transformateur de sortie audio de qualité est tout un savoir-faire pour ce qui concerne le bobinage, les matériaux, la qualité des tôles et la technique de découpe de celles-ci, l'imprégnation, la précision et le soin apporté à la réalisation. Quant aux performances de mesures des transformateurs de mesure, seules comptent finalement celles que l'on obtiendra en association avec un montage donné. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, les performances dans les plages non audibles, c'est-à-dire entre 1 et 16 Hz d'une part et entre 20 kHz et au moins 150 kHz d'autre part sont d'une grande importance, ne serait-ce que pour connaître la stabilité de l'amplificateur après application d'une éventuelle contre-réaction.

Pour la triode 300B, la valeur optimale de la charge se situe aux alentours de 3,5 k $\Omega$ . Du moins théoriquement. En réalité, si l'on fait usage des meilleures versions

de transformateurs de sortie simple étage (genre Partridge TK 4519) on s'aperçoit que sous une valeur de 2,3 k $\Omega$ , on peut obtenir une valeur d'inductance aussi élevée que celle d'un modèle concurrent dont le primaire est de valeur 3,5 k $\Omega$ , mais dont la résistance en courant continu est nettement inférieure. Lors d'une forte modulation, entre les valeurs de polarisation proches de 0 V et celles proches du "cut-off" (courant plaque nul ou presque, dû à un blocage par une polarisation grille fortement négative), le courant plaque peut varier entre 0 et plus de 200 mA. Dans ces conditions, le transformateur dont la résistance en courant continu de l'enroulement primaire est faible, de 50  $\Omega$  par exemple, sera, à inductance primaire égale, plus favorable que celui dont la résistance en courant continu est de 120  $\Omega$  ou 150  $\Omega$ . Par ailleurs, il faut savoir qu'il est impossible de prédire, à partir d'un ensemble de mesures, la qualité sonore, la "personnalité" exacte d'un transformateur de sortie par rapport à un autre, à condition d'exclure bien entendu les modèles très différents sur des paramètres de bande passante ou de tenue en puissance. Pour des questions d'imprégnation différente, le même type de transformateur de sortie peut "sonner" de façon totalement différente, sans que des différences aussi marquées apparaissent pour autant aux mesures.

Pour la WE 300B on peut établir, pour chaque condition de tension plaque, de courant plaque et de polarisation grille, des courbes de variation de puissance de sortie en fonction de la valeur de la charge, ainsi que les valeurs prises par la distorsion par harmonique 2 et par harmonique 3. Pour une valeur de tension plaque de 350 V, de courant plaque de repos 60 mA correspondant à une polarisation grille de - 74 V, la puissance de sortie varie entre 4 et 10 watts et la distorsion harmonique entre - 26 dB et - 50 dB selon la valeur

de la charge, comprise entre 1 et 9 k $\Omega$ . Ce graphique, compilé à partir de trois autres est représenté sur la figure 11. A partir du tableau de la figure 10, il serait de la sorte possible d'établir une trentaine de courbes semblables à celles de la figure 11. Ceci n'est en fait pas vraiment utile compte tenu de la similarité des tendances.

Si l'on se réfère à nouveau au tableau de la figure 10, les conditions les plus favorables d'utilisation de la WE 300B en simple étage sont:

- dans la plage des 350 V: - 71 V/80 mA/2,2 k $\Omega$ /887 $\Omega$  pour 9,6 W en sortie, suivi de - 74 V/60 mA/3 k $\Omega$ /1 233 $\Omega$  pour 8,3 W en sortie.

- dans la plage des 400 V: - 84 V/80 mA/2,5 k $\Omega$ /1 050 $\Omega$  pour 12,5 W en sortie, suivi de - 87 V/60 mA/3,5 k $\Omega$ /1 450 $\Omega$  pour 10,5 W en sortie.

Enfin, dans la plage non recommandée d'utilisation, qui peut nuire à une longue durée de vie du tube, sans toutefois dépasser pour autant une dissipation plaque de 36 watts, le meilleur résultat est obtenu avec une tension plaque de 450 V, un courant plaque de 80 mA pour une polarisation grille de - 97 V, avec une charge de 3 k $\Omega$  et une résistance de polarisation automatique de 1 212  $\Omega$ . On obtient ainsi une puissance de sortie théorique de 14,6 watts avec un taux de distorsion par harmoniques total qui sera de l'ordre de 3,2 % seulement. Le remplacement de la charge de 3 k $\Omega$  par une charge de 2 k $\Omega$  (sans changer les autres paramètres) porte la puissance maximum théorique à 17,8 watts, mais avec un taux de distorsion supérieur, comme le laissait présager le graphique de la figure 11. Cette ultime condition d'utilisation a été mise à profit sur l'amplificateur "Stéréo Gallery" proposé au Japon en 1968 (il a été décrit dans l'ouvrage "Initiation aux amplis à tubes de l'auteur). Hormis sa puissance de sortie très généreuse, il ne fait cependant pas

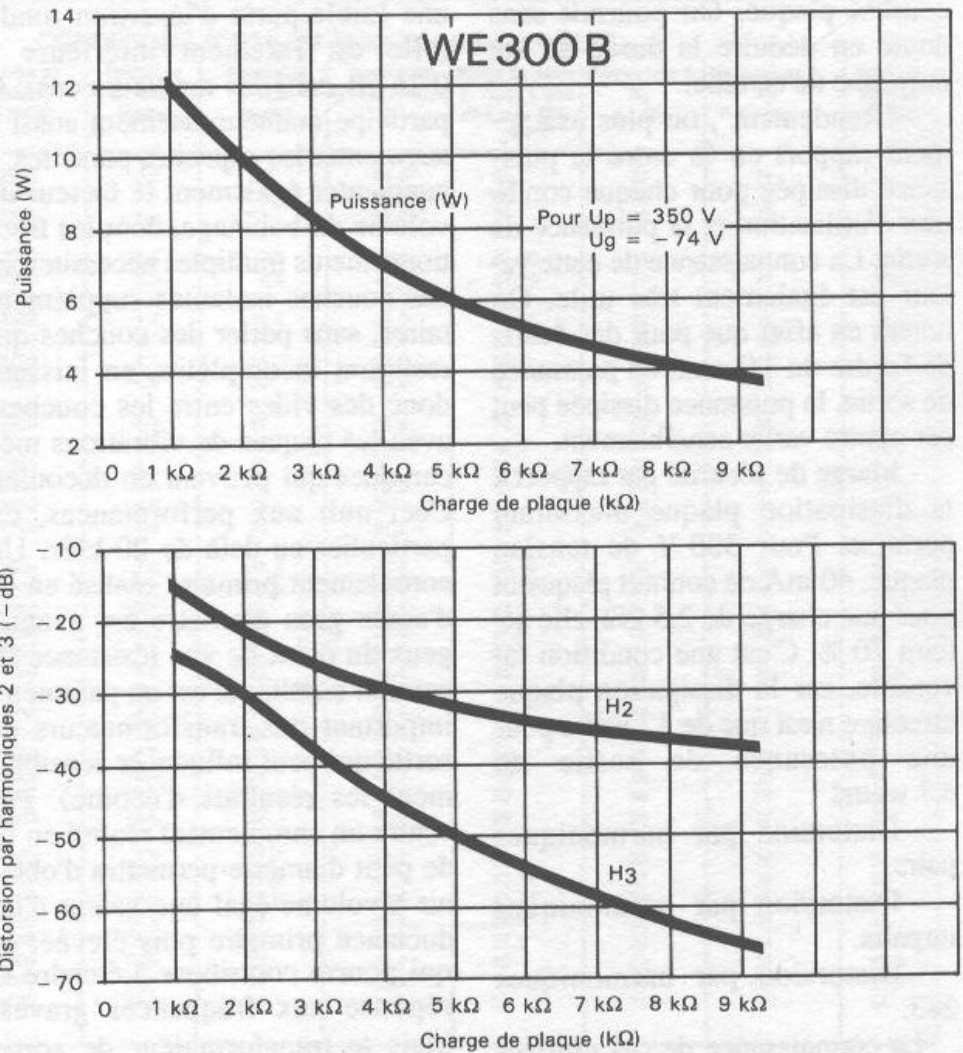


Fig. 11 : Triode WE 300B. Caractéristique de puissance et de distorsion par harmoniques 2 et 3 en fonction de la valeur de la charge  $Z_p$  (k $\Omega$ ). La valeur optimale se situe entre 2 et 4 k $\Omega$ , pour les valeurs de  $U_p = 350$  V et  $U_g = -74$  V. D'autres courbes de puissance et de distorsion pourraient être établies pour chacune des conditions du tableau de la figure 10.

partie des réalisations les plus performantes sur le plan de l'écoute.

Dans le numéro de Février 94 de la revue japonaise "MJ", M. Tetsuo Kurokawa, un spécialiste de l'amplificateur à tubes aux performances de bande passante et de distorsion très poussées, a proposé un montage à deux étages, de puissance 10 watts, avec le tube WE 300B précédé d'une pentode japonaise assez rare (utilisée autrefois en balayage ligne de télévision), la 12GN7A. Le gros inconvénient de cet excellent montage, qui procure avec 6,5 dB de contre-réaction seulement, une bande passante de 170 kHz à 0,5 dB près, est celui de la liaison directe entre les

deux étages. Une panne (tube, résistance) au niveau de l'étage d'entrée porte alors la grille de la triode 300B à une valeur positive...ce qui n'est pas très conseillé pour un tube dont le prix actuel se situe aux alentours de 2 500 F pièce! Il semble donc plus sage de travailler avec un condensateur d'entrée sous une tension plaque-filament de l'ordre de 300 à 360 V. Rappelons que dans le cas d'une polarisation automatique, la tension plaque réelle est mesurée par rapport au filament (cathode dans le cas d'un chauffage indirect) et non par rapport à la masse. Par rapport au potentiel de masse, la tension plaque inclut donc en série la tension de polarisation, soit 424 V



pour 350 V effectifs et -74 V de polarisation grille. D'autre part, dans le cas d'un montage mono-triode stéréophonique avec alimentation commune, les variations du courant total en fonction de la modulation sont très importantes. Il est donc conseillé de surdimensionner le transformateur d'alimentation, sans quoi il ne faudra pas être surpris de constater une chute de la tension d'alimentation à pleine puissance qui pourra dépasser les 50 V, ceci par rapport à la valeur obtenue en l'absence de modulation. Le redressement par valves à chauffage direct est très intéressant sur le plan de la qualité d'écoute, car il n'introduit pas de phénomène de "dureté" lié aux pics de commutation générés par les diodes au silicium. Ce seul "petit" détail pris isolément a suffit à certains

puristes pour s'orienter définitivement vers les montages alimentés par batteries, genre Final Audio (Japon) Avant Garde (Suisse) ou Rowland Research (U.S.A.). Par contre, les valves auront le désavantage d'introduire dans l'alimentation une résistance série non négligeable, comprise entre 200 et 300  $\Omega$  environ. C'est là qu'interviennent une multitude de possibilités au niveau des montages qui incluent condensateurs de filtrage spéciaux ou alimentations stabilisées. Curieusement, le célèbre Akihiko Kanéda, qui ne jurait que par les amplificateurs classe A transistorisés voici quelques années seulement, semble être revenu aux montages à tubes triodes, mais très inhabituels et hybrides cette fois. Ils se rapprochent, par certains côtés, de ceux à liai-

sons directes réalisés par M. Tetsuo Kurokawa cité plus haut. Sans doute extrêmement performants, compte tenu des compétences indéniables du chercheur passionné Kanéda, ces nouveaux montages présentent eux-aussi l'inconvénient de nécessiter de bonnes compétences en électronique, un tri serré des composants, des tubes, des transistors (introuvables dans leur presque totalité) avant de passer à une procédure précise des réglages nécessaires à la mise en route. Les conséquences d'une panne ne sont, là non plus, pas vraiment prises en compte. On peut, de ce fait, avoir des raisons légitimes de ne mettre les schémas concernés qu'à la portée des connaisseurs qui sauront en mesurer les risques... et en apprécier les qualités.

**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**



**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**



**M**

*Maxime et Florian  
Louineau*

*erveilleux objet décoratif ou antiquité à reléguer sur une étagère de l'histoire des techniques, le phonographe ne laisse en général pas indifférent. L'aventure mouvementée de l'industrie phonographique et les ultimes raffinements qui précédèrent son déclin ont eu en partie pour moteur l'avènement des procédés d'enregistrement électrique. Autre temps, autres mœurs ; à cette époque, dilemmes et interrogations concernaient les mérites respectifs de l'enregistrement acoustique et de son concurrent électrique ainsi que ceux des reproducteurs associés. Néanmoins, les discussions de l'époque autour de ce que nous aurions tendance à considérer comme des curiosités étaient plutôt vives. Petit retour en arrière.*

# LE PHONOGRAPHE

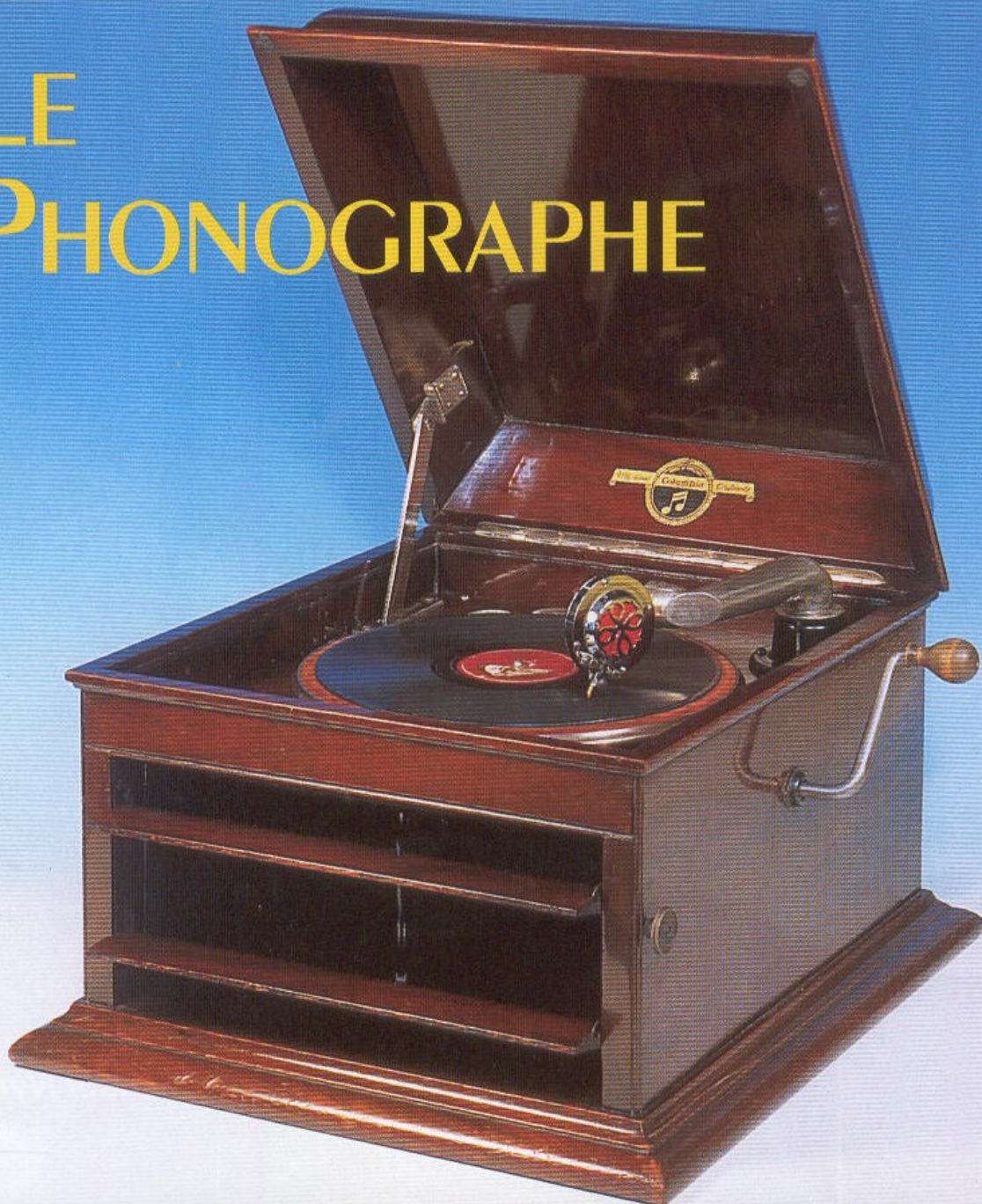




Photo 1 : lecteur de rouleaux Columbia 1906.



Photo 2 : phonographe Columbia.

## Une brève histoire de la reproduction sonore

Les prises de son en 1906 se déroulaient dans l'ambiance plutôt rigide imposée par les procédés d'enregistrement acoustique. Si de nos jours on déplace un pied de micro, à cette époque on plaçait les musiciens et leurs instruments autour d'un pavillon afin d'obtenir une balance correcte. Par ce biais et au prix d'un inénarrable entassement des musiciens, l'énergie acoustique recueillie au cours de ces véritables cérémonies était en général suffisante pour graver en direct dans de la cire tiédie la prestation des artistes. Le traitement acoustique des locaux consistait à les rendre le plus réfléchissant possible afin de ne pas gaspiller la précieuse énergie acoustique émise par des phénomènes d'absorption. On dénombrait alors deux formats d'enregistrement : la gravure verti-

cale et la gravure latérale. En gravure verticale étaient réalisés des rouleaux (firmes Edison, Pathé et Columbia) ou des disques tandis que la gravure latérale était utilisée seulement pour les disques. Les durées d'enregistrement allaient de deux à quatre minutes (vitesse de rotation de 80 à 120 tours/mn dans le cas des disques). La duplication des rouleaux s'effectuait par injection d'un mélange de cire et de stéarate de plomb dans un moule de cuivre "tiré" par galvanoplastie sur le rouleau original (le père) préalablement enduit de plombagine pour être conducteur. Le démoulage étant possible de par la différence des coefficients de dilatation entre la cire injectée et le moule. Les disques étaient dupliqués par des méthodes de pressage.

Les appareils de reproduction maintenant plus que centenaires pour les premiers construits ont connu à

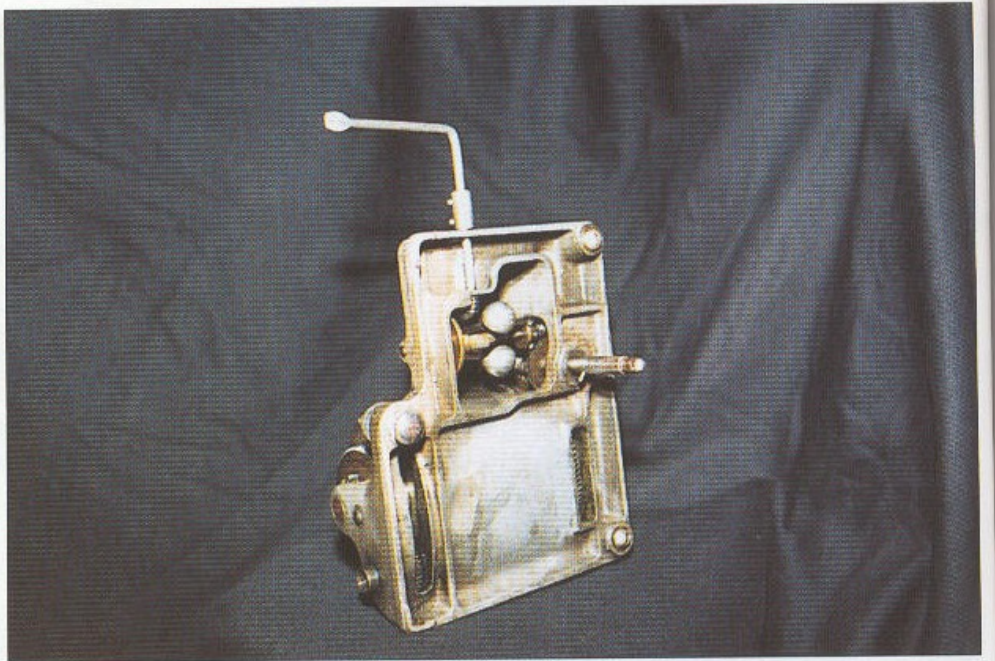
cette époque une diffusion considérable liée au nombre de produits enregistrés déjà disponibles sur le marché (la capacité de production de l'usine Pathé sise à Chatou en 1906 était de 100.000 disques par jours).

Les phonographes de marque Columbia en photos 1 et 2, dont les superbes pavillons incarnent à eux seuls l'industrie phonographique dans la mémoire collective, donnent une idée de ce que pouvait s'offrir un amateur mélomane nanti au début de ce siècle. Ce sont des appareils déjà évolués (mais si...) qui diffèrent sensiblement des machines parlantes antérieures. Le pavillon n'est plus d'allure conique mais largement épanoui en corolle - plus de 60 cm à l'embouchure - ce qui procure, malgré une bande passante réduite et un peu torturée, une sonorité puissante. Le modèle photo 1 est un lecteur acoustique de rouleaux datant de

1906. Les rouleaux étant enregistrés en gravure verticale, la tête de lecture disposée horizontalement se déplace le long d'un guide parallèle à la surface du rouleau. Le diaphragme est actionné par un système de levier dont une extrémité est munie d'une pointe de saphir non amovible. Un système permettait indifféremment la lecture de rouleaux de 2 à 4 minutes. L'autre appareil est, lui, destiné à la lecture des disques 78 tours en gravure latérale. La tête est en position verticale et son diaphragme en aluminium actionné par un stylet muni dans ce cas d'une aiguille interchangeable. A ce propos, dans la composition des disques à aiguilles à base de gomme laque, on ajoutait entre autres une charge d'abrasif, le sulfate de baryte, destinée à limiter l'usure du disque au détriment de l'aiguille. Pour la confection du diaphragme des matériaux variés ont été utilisés, on peut citer par exemple l'aluminium ou le cuivre en feuille mince, le verre, le mica mais aussi le tissu bakéliné.

### Problèmes de pointes...

Cette diversité dans le choix des matériaux et l'empirisme qui prévalait souvent lors de la conception de ces reproducteurs acoustiques sont responsables de la signature sonore souvent très affirmée des différents phonographes. Ces dispersions plus ou moins heureuses sont encore accentuées, dans le cas de la gravure latérale, par la variété des aiguilles disponibles et par leur influence sur le rendu sonore. Les résultats obtenus peuvent en effet varier dans de très larges proportions selon l'aiguille employée, tant en ce qui concerne le volume sonore que l'équilibre tonal ou la définition. Le choix du matériau pour cet usage fait largement appel, on s'en doute à une foule de compromis entre des paramètres bien souvent contradictoires. Résistance à l'érosion soigneusement choisie (en fait un intermédiaire entre deux impératifs : ne pas trop user le disque mais pouvoir tout de même en lire une face sans changer d'aiguille), rigidité,



Photos 3 et 4 : moteur Gramophone (1920). Ce moteur possède deux ressorts - d'où l'importance du barillet - et un châssis en fonte moulé d'une seule pièce.

transmission des vibrations, amortissement interne, facilité de production, autant de contraintes à respecter. Il serait pourtant bien difficile de dénombrer toutes les variétés alors en usage tant elles sont nombreuses. Il est tout de même possible de distinguer deux principaux types de matériaux : le métal et les matières organiques, animales ou végétales. La première catégorie a sans conteste connu la plus grande diffusion tandis que la seconde en est toujours resté à un stade plus ou moins confidentiel. Seul le bambou peut prétendre à une certaine notoriété, son

utilisation remonte fort loin puisqu'en 1907 déjà elle avait fait l'objet d'un brevet aux Etats-Unis. Ce type d'aiguille de section triangulaire procure des résultats intéressants, surtout en ce qui concerne l'atténuation du bruit de surface et l'obtention d'un timbre très naturel qui, dans certains cas (selon le disque), surpasse de très loin ce qu'on peut obtenir avec une aiguille métallique. Le niveau sonore, en revanche, est assez faible et la résistance du matériau peut poser problème : il arrive sur des passages fortement modulés que l'extrémité de l'aiguille se brise ! A moins de dispo-





Photos 5 et 6 : moteur des premiers phonographes Pathé 1906.

ser d'une réserve conséquente, il faut donc recouper l'aiguille ou repolir la surface en contact avec le disque : la taille se fait en biseau. Quant aux matériaux organiques d'origine animale, le plus connu d'entre eux est l'épine de porc-épic qui, selon des documents d'époque, semble donner des résultats dignes d'intérêt. On conviendra cependant que la perspective de tondre un porc-épic ne met pas l'essai à la portée de tous. Les passionnés pourront toujours se rabattre sur l'oursin ou le cactus, tous deux plus faciles à trouver...

## Une période charnière

Aux Etats-Unis, le milieu de la première décennie marque une époque de transition de l'industrie du phonographe. Afin de limiter les phénomènes d'envahissement domestique liés aux dimensions atteintes par les pavillons en corolle, Eldridge R. Johnson, dirigeant de la firme Victor, met sur le marché en 1906 un phonographe à pavillon interne : le Victrola IV. Cet instrument, malgré ses perfectionnements, récemment inventés et brevetés par Johnson lui-même (le bras au profil

non tubulaire adopte une expansion croissante et repose sur une rotule équipée de roulements à billes) n'atteint pas la qualité de reproduction des modèles haut de gamme de la firme à pavillon extérieur. Ce fait, lié à la difficulté de construire un pavillon acoustiquement performant dans l'espace disponible, ne freinera pas les ventes, bien au contraire ; aidé par le prestige et la force publicitaire de Victor à l'époque cet appareil deviendra un succès. D'autres constructeurs mettront sur le marché des phonographes à pavillon interne : Edison en 1910 avec un lecteur de rouleau - l'Amberola - et Columbia en 1911 avec le modèle Grafonola. La forte concurrence qui règne entre les différentes firmes encourage l'amélioration des procédés d'enregistrement acoustique ainsi que la mise au point de supports de meilleure qualité. Chaque constructeur n'aura alors de cesse de prouver la supériorité de ses enregistrements ou de ses phonographes sur ceux de ses confrères : Victor, Edison et Columbia se livrent une lutte acharnée. Ce climat dynamique dans lequel finalement clients et constructeurs trouvent leur compte se maintiendra jusqu'à l'ouverture de la première station de radiodiffusion KDKA située à Pittsburgh à la fin de l'année 1919. Depuis les centaines d'auditeurs de la première heure, véritables passionnés de liaison sans fil qui écoutaient rivés à leur casque, ce public restreint va rapidement s'accroître jusqu'à atteindre très vite plusieurs millions d'auditeurs. En l'espace d'une année, la couverture radiophonique s'est étendue aux Etats-Unis et au Canada tandis que les récepteurs maintenant munis de haut-parleurs permettent à l'entourage des possesseurs de radio d'en profiter, ce qui accroît encore l'audience. Indifférents au changement de mentalité qui s'opère chez ceux qui sont leurs clients, ou pourraient le devenir, les ténors de l'industrie phonographique pratiquent la politique de l'autruche et se reposent sur le prestige des interprètes de leurs catalogues. Si les stations de l'époque

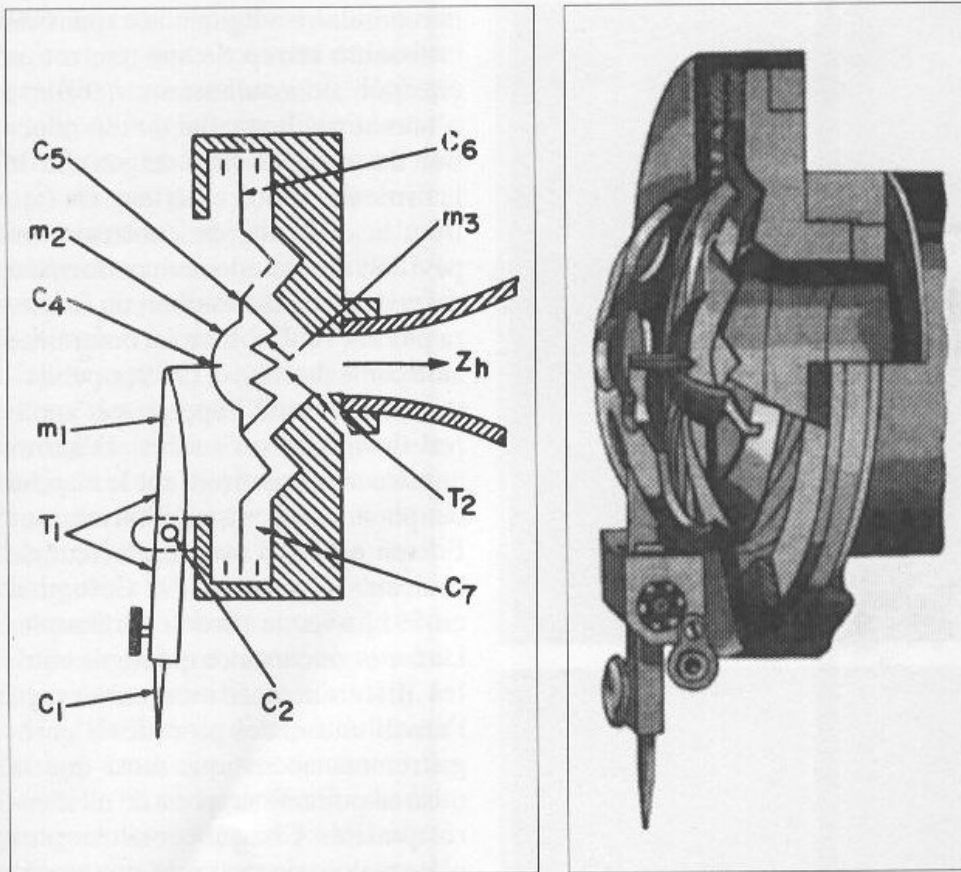


Fig 1 : vue en coupe de la tête de lecture de l'Orthophonic Victrola et représentation mécanique.

ne diffusent pas encore ces artistes enregistrés sur disque ou sur rouleau, pour la bonne raison que les contrats signés avec les maisons de disques étaient, pour la majorité, exclusivement phonographiques, la sonorité des récepteurs, malgré ses imperfections, s'avère supérieure à celle des phonographes. Et surtout il suffit de tourner quelques boutons pour entendre, ad libitum, de la musique qui se joue à des kilomètres de distance ; magique, non ?

La technologie disponible (microphone à condensateur et amplificateur) aurait déjà permis aux firmes impliquées de mettre en œuvre l'étude de techniques d'enregistrement électrique, seule alternative en regard des limites atteintes par les procédés d'enregistrement acoustique. Il faut croire qu'il manquait le plus important : la motivation. La première tentative remarquable dans ce domaine revient à deux chercheurs anglais : L. Guest et H.D. Merriman qui commencèrent leurs expériences en 1919 dans un laboratoire personnel situé dans un

garage londonien. Un an plus tard, le jour de l'armistice, ces précurseurs parviennent à enregistrer par un procédé électrique la messe en l'honneur du soldat inconnu célébrée à l'Abbaye de Westminster. L'autre fait marquant est que cet enregistrement était effectué à distance : le microphone était relié aux machines situées dans un immeuble adjacent par une ligne téléphonique. Cette première britannique, vite tombée dans l'oubli, aura quand même mis la puce à l'oreille des firmes "La Voix de son Maître" et "Columbia" qui entamèrent discrètement et à l'insu l'une de l'autre des essais sur les procédés d'enregistrement électrique. Aux Etats-Unis une équipe d'ingénieurs des laboratoires Bell Telephone, le secteur Recherche et développement de l'American Telegraph Co., AT&T, entame dès 1919 un programme de recherche sur le sujet sous la direction de J.P. Maxfield. Après avoir étudié et défini le cahier des charges d'une tête de gravure électromagnétique fabriquée ensuite par Western Electric, un laboratoire

dédié à l'enregistrement est aménagé dans l'immeuble Bell au 463 West Street, NY. Ce laboratoire était relié par ligne téléphonique avec la scène du théâtre du Capitol afin de tester le matériel en situation réelle. Dans le même laps de temps, un phonographe perfectionné conçu pour la relecture acoustique de ces enregistrements électriques naissait sur les planches à dessin. Maxfield et Harrison utilisèrent les théories relatives aux lignes de transmission pour "mettre à plat" le savoir empirique des constructeurs de l'époque en matière de phonographe et établir les analogies électriques qui se rapportent aux systèmes mécaniques de reproduction acoustique.

Pour la première fois l'étude des différents éléments du système reproducteur d'un phonographe résultait non pas de l'expérience ou d'une longue tradition mais des conclusions imposées par l'analyse des schémas électriques équivalents depuis le sillon du disque jusqu'à l'embouchure du pavillon. Un phonographe de ce type vit le jour en 1924. La vue en coupe figure 1 représente sa tête de lecture dont la conception sophistiquée rejoint, hormis l'absence de pièce de mise en phase et de circuit magnétique, celle d'une chambre de compression. La fréquence de coupure dans l'aigu, liée au comportement de l'équipage mobile était fixée à 5 kHz. Ce qui, de toute façon, représente un compromis entre ce qu'il est mécaniquement possible de construire, le bruit de surface des disques et le contenu des enregistrements électriques à ces fréquences. On peut voir figure 2 le schéma électrique équivalent. La membrane était en aluminium embouti (épaisseur : 0,0017 inches) et intégrait une suspension périphérique tangentielle dont la répartition géométrique des embossages en iris rejetait les phénomènes de résonance au-dessus de la fréquence de coupure haute de l'ensemble. La surface active de cette membrane était de 13 cm<sup>2</sup> pour un poids de 0,186 g. Pour lui assurer un fonctionnement en piston, cette dernière était mue par

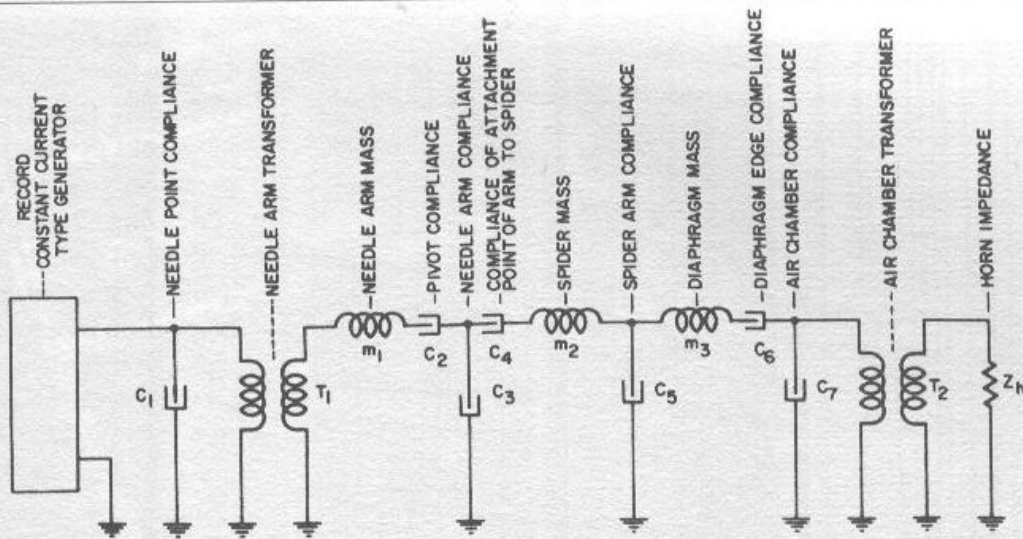


Fig 2 : schéma électrique équivalent du système figure 1.

l'intermédiaire d'une étoile en aluminium à six branches rapportée sur son pourtour et réunie au sommet du bras de levier. Ce spider, pour reprendre le terme utilisé par Maxfield et Harrison, assimilé à une compliance dans le schéma électrique équivalent, assurait une autre fonction : légèrement déformable, il autorisait un degré de liberté dans la liaison de la membrane avec le levier comparable avec ce que procurerait une rotule. Ce double rôle ambigu facilite cependant la transmission des vibrations : le point d'attache avec le bras de levier se déplace suivant un arc de cercle. Toutefois, la gravure latérale imposant à cet élément un fonctionnement en push-pull, il est vraisemblable que l'ensemble des six branches relié d'un côté à la membrane et réuni de l'autre au bras de levier ne se comportait pas comme une compliance pure sous les efforts successifs de traction ou de compression. La rotation du levier s'effectuait par l'entremise d'un ingénieux système de roulement à billes : l'axe magnétisé retenait les billes en place dans les deux cages usinées sur le corps de la tête. Le pavillon mis au point pour relier cette tête de lecture d'avant-garde au milieu ambiant constituait l'aboutissement et la finalisation par Maxfield et Harrison des travaux dus entre autres, à Webster. Il s'agit d'un pavillon exponentiel replié d'expansion douce (voir fig. 3), d'une longueur totale de

72 pouces. Sa fréquence de coupure basse est d'environ 115 Hz. La courbe fig. 4 donne la réponse en fréquence (en unités de transmission) en A, de ce phonographe, en B de l'un des meilleurs modèles existant. L'absence de la bosse importante visible en courbe B explique le fait que ce phonographe - le A - malgré ses performances accrues sonne subjectivement moins bien sur les enregistrements acoustiques. Présenté pour

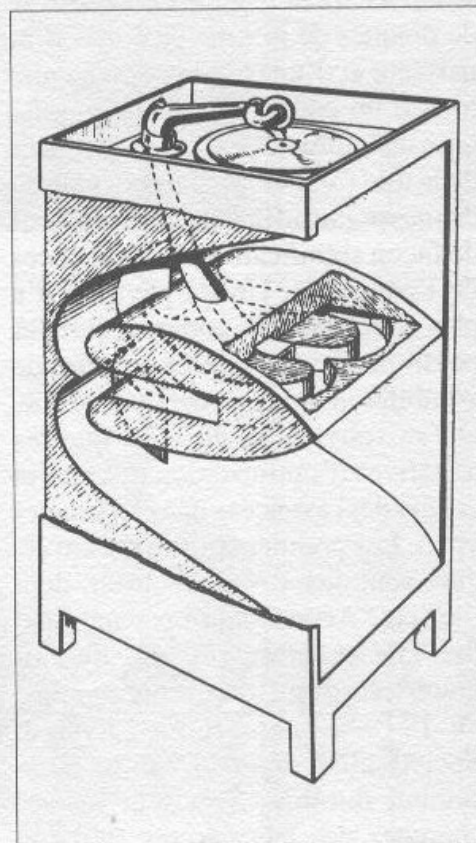


Fig 3 : vue en coupe du Victor Orthophonic

la première fois par les laboratoires Bell au début de l'année 1924 à un des leaders de l'industrie phonographique aux Etats-Unis, la firme Victor, le procédé d'enregistrement électrique ainsi que l'appareil décrit ci-dessus ne remporteront pas pour cette fois les suffrages des décideurs de cette firme. Au pied du mur - les ventes de disques et de phonographes étant toujours au plus bas - Victor signa au mois de mars 1925 un accord avec Western Electric concernant l'exploitation du procédé d'enregistrement électrique, mais aussi les droits de fabrication du phonographe à pavillon exponentiel replié développé par les laboratoires Bell. Peu de temps après, Columbia signa de son côté un accord concernant lui aussi l'exploitation du procédé électrique et développa un modèle adapté à ceux-ci : le Columbia Viva Tonal Grafonola. Mais ce dernier, moins soutenu par la publicité que son concurrent le Victor "Orthophonic Victrola" lancé en novembre 1925, ne connaîtra pas le même succès. Pourtant, l'un comme l'autre, ces deux appareils symbolisent sans aucun doute la grandeur et la décadence de l'industrie phonographique au début des années 30.

## Le Columbia Viva Tonal

Malgré le nombre important d'appareils produits jusqu'au début des années trente, il devient assez dif-

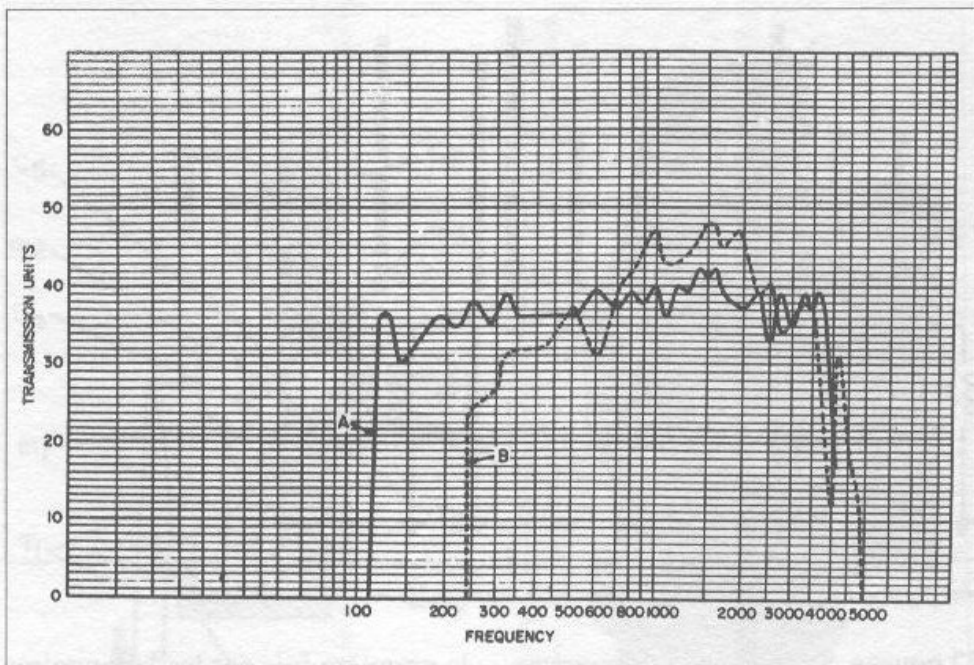


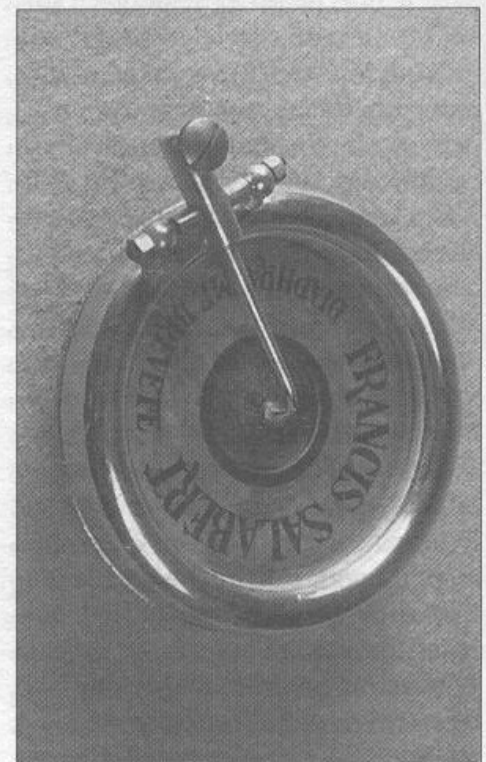
Fig 4 : courbes de réponse de deux modèles différents de phonographes (voir texte).

ficile de trouver des modèles d'origine, complets et en état de marche. De plus, les modèles les plus recherchés ne sont pas toujours les plus musicaux ; l'intérêt historique mais surtout esthétique guide bon nombre de collectionneurs. Ainsi, les phonographes à pavillons externes, en métal peint, nickelé, en bois ou même parfois en cristal attirent-ils les acheteurs par leur beauté, même si leur son n'est pas toujours à la hauteur. Le phonographe présenté ici est un Columbia "Viva Tonal". Ce modèle, peu courant, ne manque pas d'intérêt, principalement en raison de la sophistication de son système mécano-acoustique. Il possède un pavillon interne, mais contrairement aux premiers appareils de ce type, il ne s'agit pas d'un simple "cornet" coudé à angle droit. Étudié en 1924, commercialisé deux ans plus tard, le "Viva Tonal" était l'un des plus perfectionnés du moment. Il ne fut pas produit longtemps (jusqu'en 1928) et représente en quelque sorte la fin d'une lignée : dès 1930, les procédés électriques triomphent. Comme on peut le voir (photos 7 à 9), son pavillon est un modèle développant une longueur totale d'un mètre et présentant une surface d'embouchure de 462 cm<sup>2</sup>. L'expansion se fait de

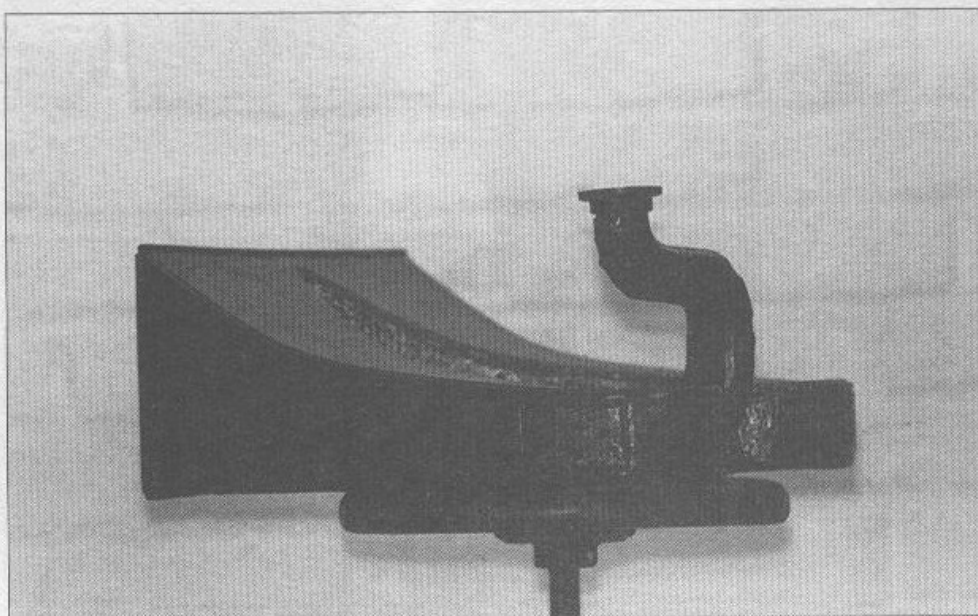
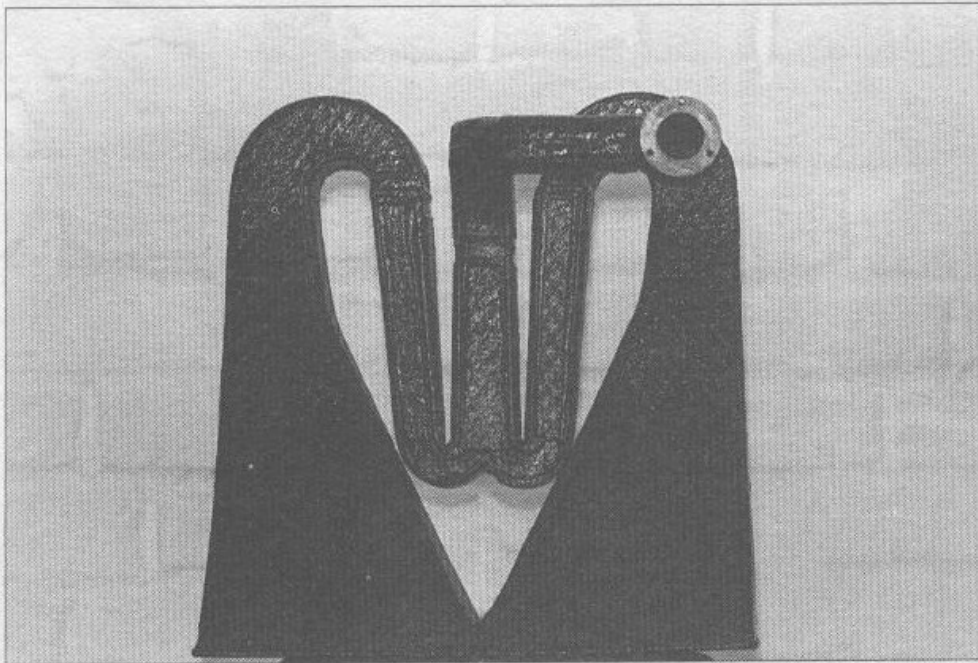
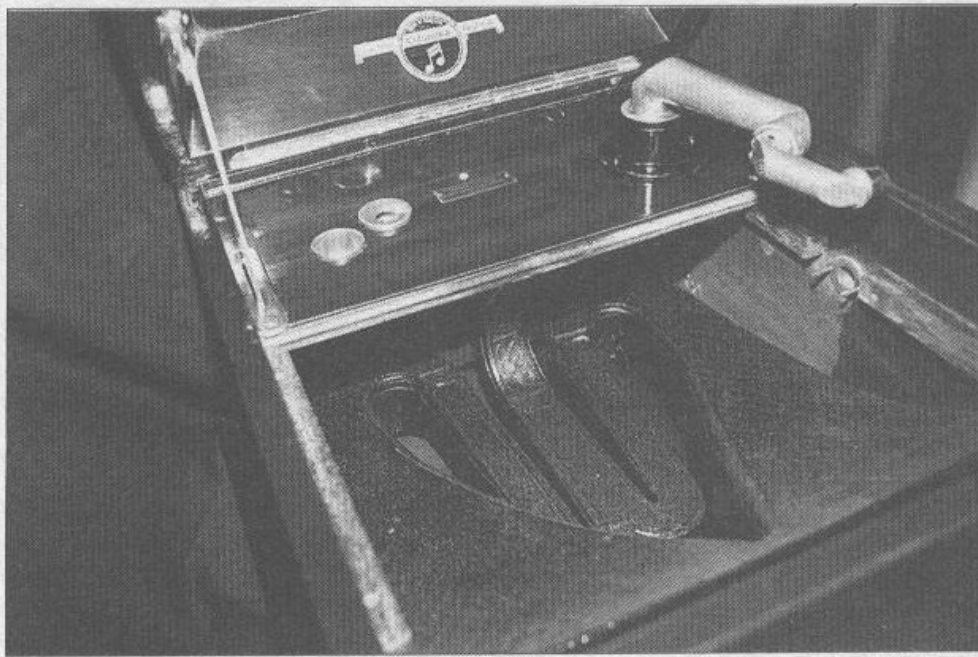
manière exponentielle et l'encombrement reste raisonnable de façon à utiliser au maximum le volume de la caisse en bois. L'ensemble est réalisé en tôle étamée et présente, malgré la qualité de construction des résonances audibles. Le problème a été en grande partie résolu par un amortissement mécanique constitué de plaques de bitume de 2 mm d'épaisseur et d'une application au pistolet d'un enduit liquide lui aussi à base de bitume. Au vu de l'épaisseur de la tôle (3/10ème), l'augmentation de masse est suffisante pour atténuer de façon significative les résonances de l'ensemble. Un tel pavillon n'a plus grand chose de commun avec les pavillons fleurs et autres corolles de volubilis en usage au début du siècle. On se souviendra en effet que les tentatives d'optimisation de ceux-ci étaient déjà avancées dans les années vingt. Les premiers travaux d'envergure sont dus à A.G. Webster, dont l'article "Acoustical Impedance and the Theory of Horns and Phonograph", écrit en 1914 et communiqué en 1919 à l'American Physical Society allait connaître un retentissement durable. Suivirent les recherches des laboratoires Bell (un article paru en 1924, sous la plume de Slepian et Hanna, avait pour su-

jet "The Function and Design of Horns for Loudspeaker") et de la Western Electric Co., pour qui Maxfield et Harrison dirigèrent les premières recherches sur les procédés électriques d'enregistrement.

Pour en revenir au Columbia "Viva Tonal", son entraînement se fait à partir d'un moteur à ressort très silencieux assorti du classique régulateur à boules et d'un dispositif de variation de vitesse. Sur le modèle dont nous disposons, le moteur ne fonctionnait pas, son ressort étant apparemment cassé. Ce que confirma le démontage. Cette panne n'a rien d'étonnant dans la mesure où c'est à peu près la seule qui puisse se produire sur ce type de moteur. La réparation est simple mais quelques précautions s'imposent. Il faut enlever le couvercle du barillet, sortir l'axe et enfin extraire le ressort de la cuvette. Sauf exception, la pièce se retrouve facilement. Il s'agit d'un ruban d'acier trempé d'une longueur de plusieurs mètres (entre 2 et 3) qui comporte un trou à une extrémité et qui est recourbé à l'autre, de façon à pouvoir procéder à l'accrochage. Les ressorts sont stockés enroulés et maintenus sanglés par un cerclage en



Tête de lecture Salabert à diaphragme plan en mica rose.



Photos 7, 8, 9, : vues du pavillon replié du Viva Tonal.

fil de fer. Au remontage, plus encore qu'à l'extraction, la prudence est de mise : un ressort qui se détend brutalement peut être dangereux. Il faut donc faire attention quand on coupe le fil du cerclage. Dans le doute, on confiera ce travail à une personne expérimentée. Au remontage, on accroche le ressort à la face interne du barillet et on l'enroule, spire après spire, en prenant soin de graisser à chaque tour, jusqu'à la fin et sans lâcher. On peut alors remonter le couvercle et l'axe. Précisons enfin qu'il est inutile de ressouder un ressort cassé - le trempage ne le supporte pas - et que ce type de pièce doit être stocké hors gel, faute de quoi il arrive qu'à la détente le ressort se brise en morceaux.

La tête de lecture du "Viva Tonal" est un modèle particulier qui diffère sensiblement de certaines réalisations concurrentes. On y trouve un système de cantilever qui transmet le mouvement de l'aiguille à la membrane et pivote sur un axe dont chaque extrémité est montée sur roulement à billes. Les dispositifs de l'époque employaient couramment un cantilever monté sur une ou plusieurs lamelles suffisamment souples pour assurer la liberté de mouvement voulue. Certaines têtes, encore, faisaient appel à un cantilever monté sur pointes ou sur couteaux et maintenu par un dispositif vis plus ressorts. En ce qui concerne la tête Columbia, sa conception globale, hormis le système de renvoi mécanique bien entendu, n'est pas sans évoquer certaines chambres de compression des années 30. Contrairement à des modèles plus anciens (Pathé ou Salabert par exemple) pourvus de membranes planes en mica rose, cette tête utilise une membrane en aluminium munie d'une suspension tangentielle (voir photo 10). La partie centrale de cette membrane est constituée d'une pièce rapportée par rivetage et l'ensemble est pincé dans le corps de la tête entre deux joints en caoutchouc. Des modèles similaires quant au profil mais possédant une suspension annulaire ou en spirale ont

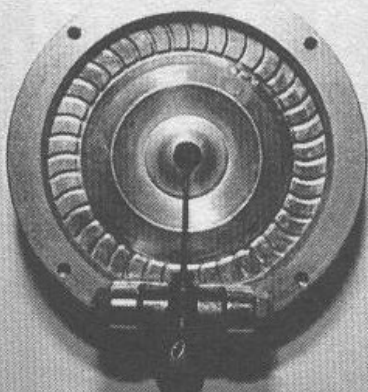


Photo 10 : tête Columbia avec membrane à suspension tangentielle.

aussi existé. Une analogie certaine existe entre ces membranes de phonographe et celles que l'on peut trouver dans les capsules de microphone téléphonique à charbon : étant donné les liens qui unissaient l'industrie phonographique aux compagnies téléphoniques, la chose n'est pas surprenante

Le phonographe est-il vraiment éloigné des préoccupations de

l'Audiophile ? Peut-être pas tant que cela. Posséder ce genre d'instrument permet en quelque sorte de se rafraîchir la mémoire, de réapprendre à faire abstraction des nombreuses incertitudes relatives à la qualité sonore au profit de la musique. Ce que beaucoup d'entre nous ont oublié dans leur obsession à traquer ce qui se passe loin derrière la virgule. Sur un bon appareil, la restitution d'un

disque en bon état a un côté direct subjectivement magique. Ce tempérament charmeur empreint de désuétude ramène avec une facilité déconcertante à une époque où les gens n'étaient pas plus sourds que nous, mais seulement moins bien équipés. Ou en tout cas différemment.

## Bibliographie

R. Gelatt, "The Fabulous Phonograph", J.B. Lippincott, Philadelphia, P.A., 1954.

O. Reed and W.L. Welch, "From Tinfoil to Stereo", Howard W. Sams, Indianapolis, 1959.

### Remerciements

Nous sommes redevables à Mme Steger pour son précieux concours. L'amateur passionné trouvera chez elle tout ce qui concerne le phonographe ; pièces de rechange, machines restaurées et... conseils utiles.

Mme Steger, 76 Av. Michelet, 93400 St-Ouen/Tél 40.12.53.78



La famille royale visite les usines Columbia (doc. Mme Steger).

**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**



**Page non  
disponible**

**Page non  
disponible**

# POINT DE VUE

## DISTORSION THERMIQUE, MEMOIRE DES ISOLANTS ET LA VOIE THERMIQUE

**J**

*'ai découvert L'Audiophile au n° 10 de la nouvelle série, et depuis j'ai pu lire maintes fois des articles, sur les amplificateurs et les câbles, se référant à la fameuse distorsion thermique d'Héphaïstos. N'en connaissant pas les origines, j'ai donc fait l'acquisition des inévitables n°s 32 et 33, bien décidé à en savoir plus.*

*A suivi une analyse des hypothèses et résultats présentés dans quatre articles, qui m'a conduit à émettre une nouvelle hypothèse : si le phénomène était linéaire ? Cette analyse a fait l'objet d'une lettre adressée à Héphaïstos au mois d'avril de cette année. Elle vous est présentée en substance aujourd'hui.*

### Distorsion thermique et mémoire des isolants

L'analyse des articles [1], [2] et [4] d'Héphaïstos et [3] de Pierre Johannet a été réalisée en synthétisant les principales hypothèses et résultats de mesures. En voici les points marquants et quelques remarques :

#### Point 1 :

Dans [1], on peut lire page 55 : "On peut déduire des formes des signaux obtenus les conclu-

sions suivantes : ils ne résultent pas de phénomènes électriques... ; les signaux obtenus ne correspondent pas à un modèle linéaire ; on n'obtient pas de belles courbes exponentielles" (quel courage !). Mais les réponses temporelles aux signaux rectangulaires des transistors testés ont cependant des formes "exponentielloïdes".

#### Point 2 :

Du dernier article paru à ce jour [4], malgré les efforts

d'Héphaïstos sur le choix du signal (localement sinusoïdal), l'harmonique 2 est resté en dessous de -100 dB.

#### Point 3 :

Dans [1], Héphaïstos présente en page 47 un article de A.M. Fishtein mettant théoriquement en évidence deux tensions caractérisant les effets thermiques dans un transistor :

- U1(t) provoquant une distorsion linéaire et notamment un déphasage variant avec la fréquence,

-  $U_2(t)$ , fonction de la puissance du signal, le terme non linéaire provoquant en régime sinusoïdal un taux de distorsion sur l'harmonique 2 de l'ordre de plusieurs pourcents.

On peut lire également dans [1] que le  $V_{be}$  varie de 1 à 3 ou 4 mV/°C.

### Remarque 1 :

En comparant les points 2 et 3, on peut mettre en doute l'existence du terme  $U_2(t)$ . Reste alors  $U_1(t)$  qui vient en contradiction avec le point 1, puisque linéaire.

### Remarque 2 :

Ce n'est pas parce que le signal n'est pas une exponentielle pure que le phénomène n'est pas linéaire. D'ailleurs, A.M. Fishtein prévoit une somme pondérée d'exponentielles temporelles pour  $U_1(t)$  (proportionnelle à  $H(t)$  vraisemblablement). L'aspect temporel d'un tel signal peut alors être fort différent de celui d'une simple exponentielle.

### Point 4 :

Dans [3], P. Johannet a montré que la réponse de certains condensateurs à des signaux pseudo-rectangulaires était entachée d'un effet de mémoire. La modélisation (linéaire) du phénomène pouvait être faite par un circuit RC rajouté (forme exponentielle de la réponse). D'autre part, parce qu'un condensateur testé ne présente pas l'effet de mémoire, l'auteur suppose l'existence d'un seuil et compare le phénomène observé, rendu ainsi non linéaire, à la distorsion thermique des transistors.

### Remarque 3 :

Quand un transistor ne présente pas de distorsion, y'a-t-il un seuil ou n'est-elle pas mesurable ?

### Point 5 :

Dans [2], Héphaïstos a relaté une expérimentation, parue dans une revue anglaise, montrant que la distorsion harmonique sur différents condensateurs serait de l'ordre de -110 à -120 dB et, selon, lui, probablement inaudible.

### Remarque 4 :

En comparant les points 4 et 5, on peut penser que les condensateurs sont la source d'une distorsion linéaire (circuit RC) qui déforme les signaux temporels, mais ne présentent pas ou peu de distorsion harmonique.

### Remarque 5 :

Il faudrait se poser la question de l'existence d'une implication ou d'une équivalence mathématique entre  $A=[$ fonction de transfert non linéaire avec l'amplitude du signal d'entrée] et  $B=[$ création d'une distorsion harmonique en régime sinusoïdal]. S'il y a au moins  $A \Rightarrow B$ , on a également  $[\text{non } A] \Rightarrow [\text{non } B]$ . Dans ce cas, il ne peut y avoir que la solution de la distorsion linéaire pour expliquer la distorsion thermique des transistors ou l'effet de mémoire des isolants.

La conclusion s'impose d'elle-même : et si finalement distorsion thermique et mémoire des isolants n'étaient "qu'une" distorsion linéaire ?

## La viscoélasticité linéaire

Des phénomènes comparables à ceux observés existent, comme la viscoélasticité linéaire. Certains matériaux, à l'aspect caoutchouteux, réagissent différemment en fonction de la vitesse de variation de contrainte, et possèdent même la mémoire des contraintes qu'on leur a appliquées. De plus, ces matériaux ont une réponse temporelle "exponentielle" et dissipent de l'énergie mécanique en chaleur. Et pourtant ces matériaux sont linéaires !

En rhéologie, la viscoélasticité linéaire permet de représenter le comportement de tels matériaux. Ils sont caractérisés entre autres par un module d'élasticité longitudinal complexe  $E = E'(1 + j \operatorname{tg} \delta)$ , comprenant une partie réelle  $E'$  relative à l'élasticité même et une tangente de perte  $\operatorname{tg} \delta$  représentant

la dissipation de l'énergie mécanique en chaleur. Comme on peut le constater sur la figure 1, ces grandeurs varient avec la fréquence.

Rappelons brièvement tout d'abord le comportement de ces matériaux et la modélisation du phénomène avant d'en donner une explication. De façon générale en mécanique, les variables utilisées sont la contrainte  $\tau(t)$  et la déformation  $\epsilon(t)$  ou la vitesse de déformation

$$v(t) = \frac{d\epsilon(t)}{dt}$$

base de la viscoélasticité linéaire sont la complaisance  $J$  (en fait un ressort) telle que  $\epsilon(t) = J \tau(t)$  et la viscosité dynamique  $\eta$  (amortisseur visqueux) telle que  $\tau(t) = \eta v(t)$ . Pour faciliter le raisonnement, on peut assimiler  $\tau(t)$  à la tension  $u(t)$ ,  $\epsilon(t)$  à la charge  $q(t)$  et  $v(t)$  au courant  $i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$ . Cette

équivalence électro-mécanique des équations nous amène à assimiler de la même façon  $J$  à la capacité  $C$  telle que  $q(t) = C u(t)$  et  $\eta$  à la résistance  $R$  telle que  $u(t) = R i(t)$ .

On définit la fonction de fluage  $f(t)$  comme la déformation dans le temps que prend le matériau lorsqu'il est soumis à un échelon de contrainte. La déformation  $\epsilon(t)$  à une contrainte quelconque  $\tau(t)$  s'écrit alors comme le produit de convolution de la contrainte avec la dérivée de la fonction de fluage, soit :

$$\epsilon(t) = \tau(t) * f(0) + \int_0^t f'(t-t') \tau(t') dt'$$

On peut noter dès à présent que si on prend pour conditions limites  $t < 0$ ,  $\tau = 0$  et  $\epsilon = 0$ , la déformation  $\epsilon(t)$  dépend donc bien des contraintes appliquées depuis l'instant  $t=0$  (où la charge  $q(t)$  dépend des tensions appliquées depuis  $t=0$ ).

Dans le cas particulier des matériaux viscoélastiques linéaires, la fonction de fluage s'écrit :

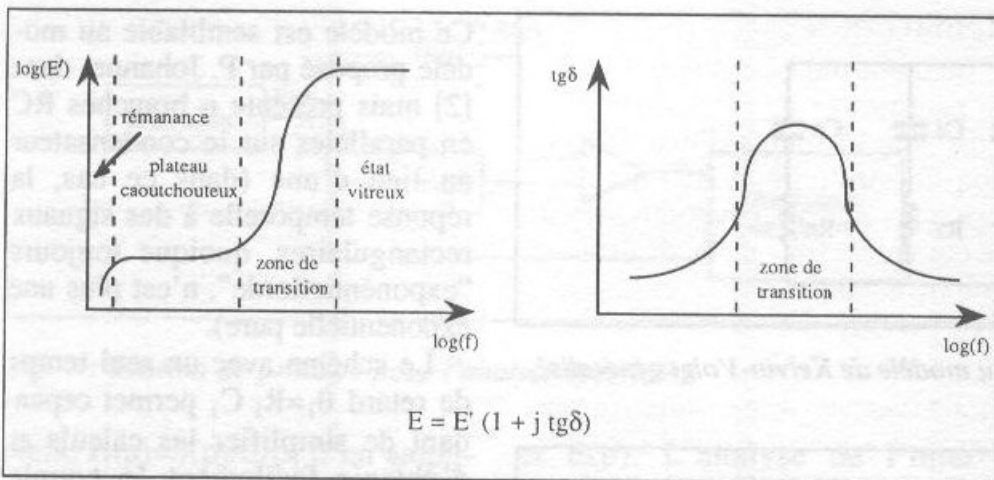


Fig. 1 : Variation du module d'élasticité  $E$  avec la fréquence.

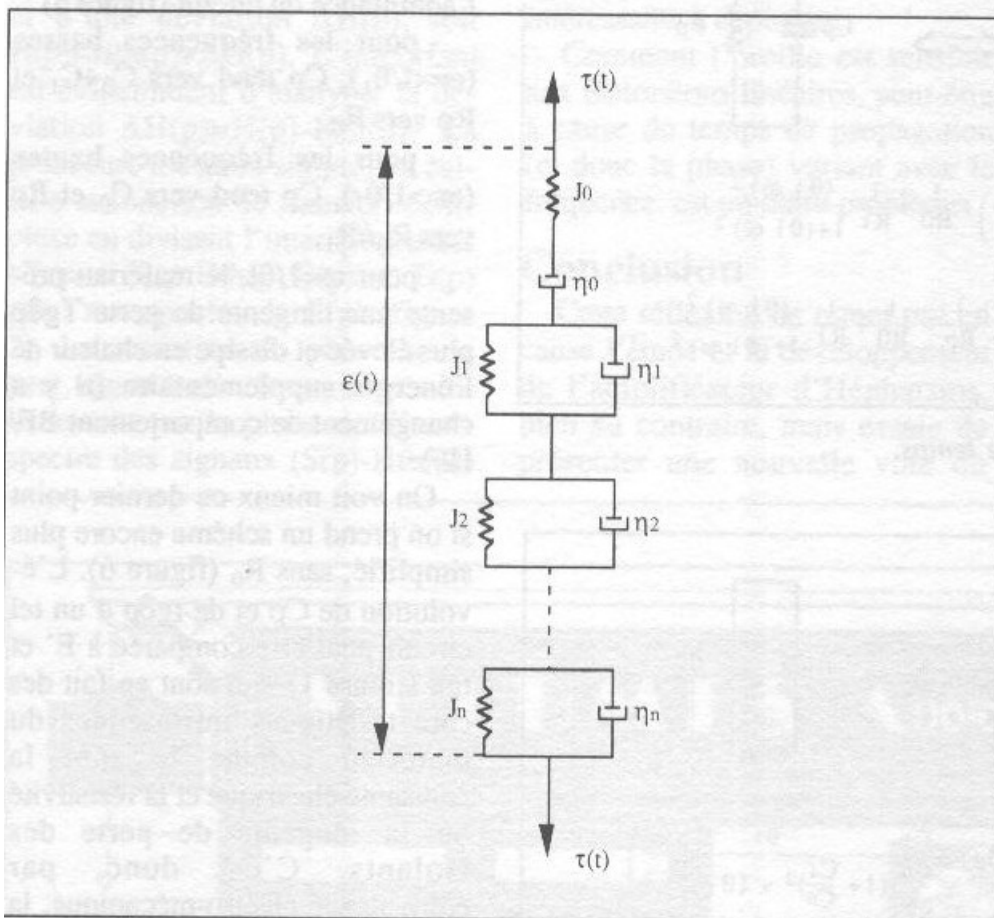


Fig. 2 : Modèle de Kelvin-Voigt généralisé.

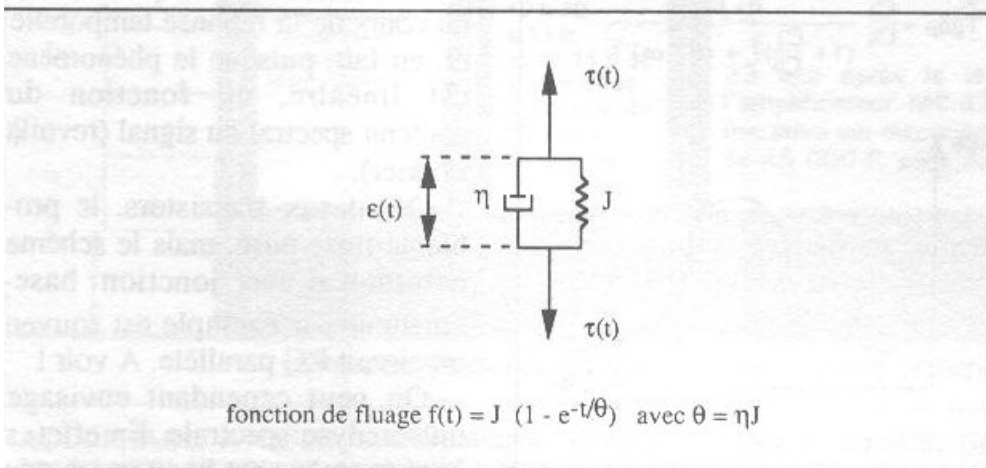


Fig. 3 : Solide élémentaire de Kelvin-Voigt.

$$f(t) = J_0 = \frac{t}{\eta_0} + \sum_{i=1}^n J_i \left( 1 - e^{-\frac{t}{\theta_i}} \right)$$

avec  $J_0$  l'élasticité instantanée,  $\eta_0$  la composante de rémanence (ou résistance de fuite) et  $j_i \ i \in [1, n]$  les élasticités retardées de constantes de temps  $\theta_i = \eta_i J_i$  (ou  $R_i C_i$ ).

Pour modéliser une telle fonction, on utilise par exemple le modèle de Kelvin-Voigt généralisé (figure 2) comprenant l'élasticité instantanée  $J_0$ , la composante de rémanence  $\eta_0$  et  $n$  éléments  $\eta_i J_i$  appelés solides élémentaires de Kelvin-Voigt (figure 3).

Quant à l'explication du phénomène à proprement parler, la théorie de Rouse suppose qu'il existe un certain nombre de configurations possibles dans la structure moléculaire du matériau. Le processus de changement de configuration (mode coopératif) prend un temps  $\theta_i$  nécessaire pour que l'agitation thermique réalise ce changement (il y a autant de  $\theta_i$  que de modes coopératifs). On peut lire aussi dans "Initiation à la rhéologie" de G. Couarraze et J.-L. Grossiard (Edition Tech et Doc Lavoisier, seconde édition, page 184) : "L'élasticité retardée se manifeste ainsi comme un processus étroitement associé à l'écoulement dont elle modifie le régime graduellement, au fur et à mesure que les différents modes coopératifs sont excités thermiquement".

Je conseille fortement cet ouvrage de base à tous ceux qui veulent en savoir plus sur la rhéologie.

### La voie linéaire

On peut essayer de transposer les résultats de la viscoélasticité linéaire aux isolants en appliquant l'équivalence électro-mécanique, citée au paragraphe précédent, au modèle de Kelvin-Voigt généralisé. On obtient alors le schéma présenté en figure 4, avec  $\theta_i = R_i C_i$  ième constante de temps,  $i \in [1, n]$ .

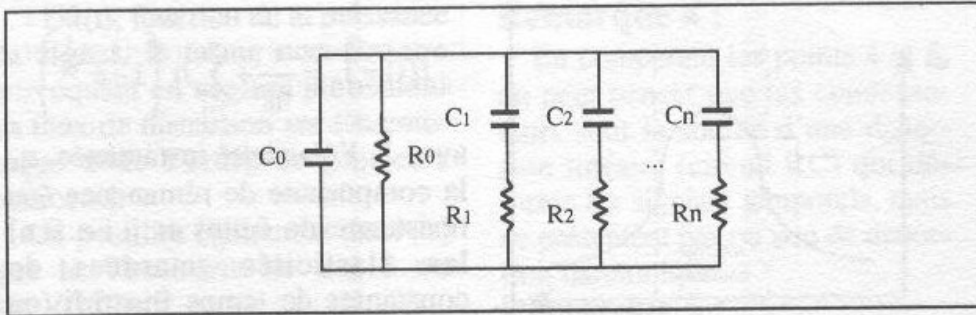


Fig. 4 : Equivalence électro-mécanique du modèle de Kelvin-Voigt généralisé.

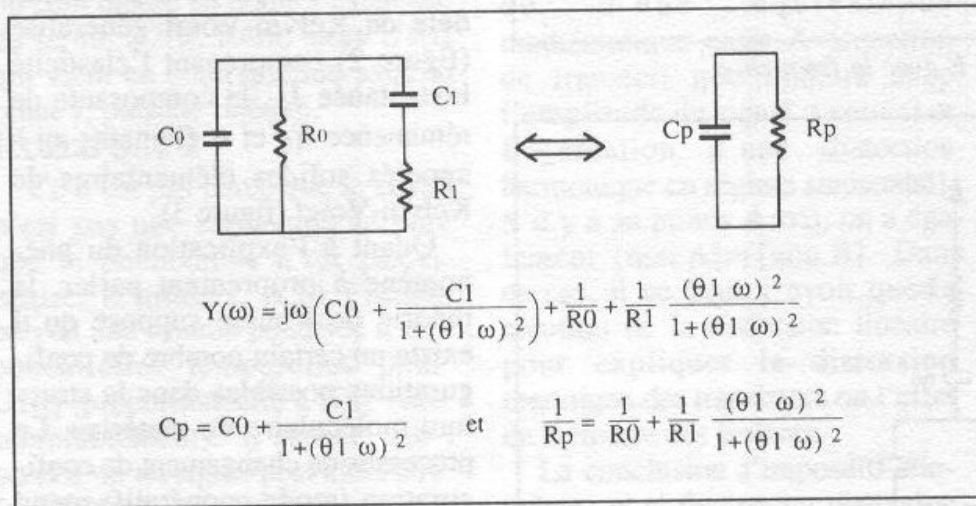


Fig. 5 : Modèle à une seule constante de temps.

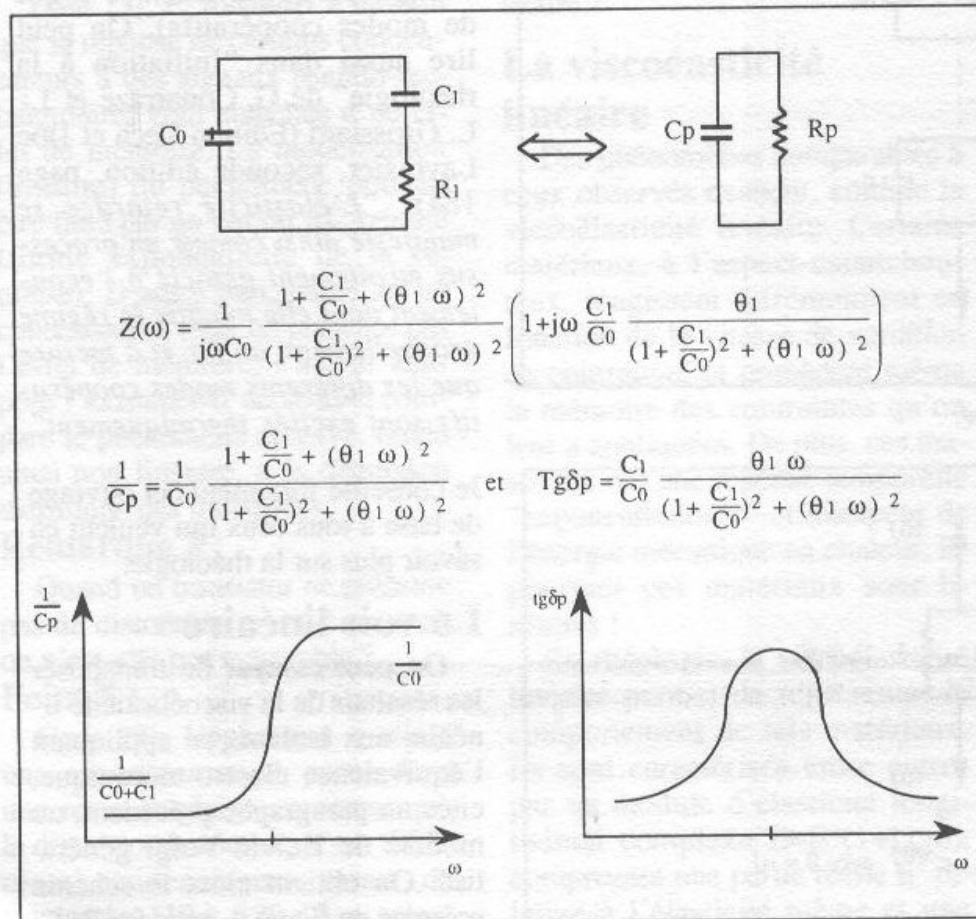


Fig. 6 : Modèle simplifié à une seule constante de temps.

Ce modèle est semblable au modèle proposé par P. Johannet dans [2] mais présente n branches RC en parallèles sur le condensateur au lieu d'une (dans ce cas, la réponse temporelle à des signaux rectangulaires, quoique toujours "exponentielle", n'est plus une exponentielle pure).

Le schéma avec un seul temps de retard  $\theta_1 = R_1 C_1$  permet cependant de simplifier les calculs et d'obtenir facilement le couple équivalent  $R_p // C_p$  en écrivant l'admittance du circuit (figure 5) :

- pour les fréquences basses ( $\omega \ll 1/\theta_1$ ),  $C_p$  tend vers  $C_0 + C_1$  et  $R_p$  vers  $R_0$ ,

- pour les fréquences hautes ( $\omega \gg 1/\theta_1$ ),  $C_p$  tend vers  $C_0$  et  $R_p$  vers  $R_0 // R_1$ ,

- pour  $\omega = 1/\theta_1$ , le matériau présente une tangente de perte  $Tg\delta_p$  plus élevée et dissipe en chaleur de l'énergie supplémentaire (il y a un changement de comportement BF/HF).

On voit mieux ce dernier point si on prend un schéma encore plus simplifié, sans  $R_0$  (figure 6). L'évolution de  $C_p$  et de  $tg\delta_p$  d'un tel circuit peut être comparée à  $E'$  et  $tg\delta$  (figure 1), qui sont en fait des caractéristiques intrinsèques du matériau comme le sont la constante électrique et la résistivité ou la tangente de perte des isolants. C'est donc, par équivalence électro-mécanique, la constante diélectrique et la résistivité de l'isolant qui évoluent au cours de la réponse temporelle et, en fait, puisque le phénomène est linéaire, en fonction du contenu spectral du signal (revoilà Fourier).

Quant aux transistors, le problème reste posé, mais le schéma habituel d'une jonction base-émetteur par exemple est souvent un circuit RC parallèle. A voir !

On peut cependant envisager une analyse spectrale. En effet, si le phénomène est linéaire, on peut écrire que la fonction de transfert

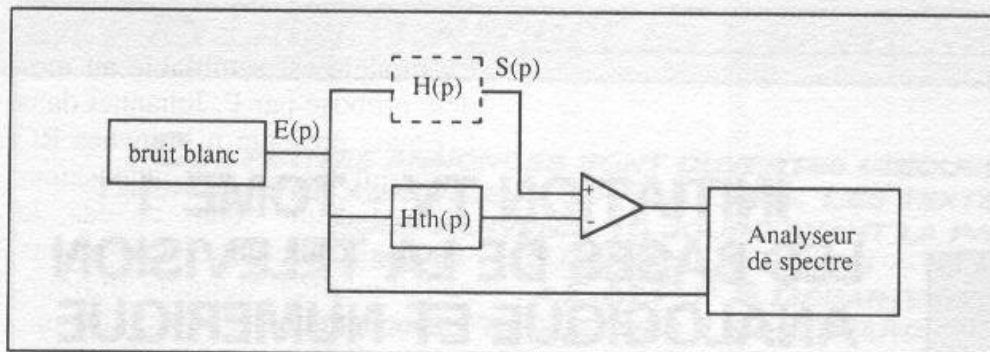


Fig. 7 : Schéma de principe pour l'analyse spectrale.

réelle  $H(p)=S(p)/E(p)$  d'un amplificateur est la somme d'une fonction de transfert théorique  $H_{th}(p)$  et d'une déviation  $\Delta H(p)$ , soit  $H(p)=H_{th}(p)+\Delta H(p)$ . L'important est évidemment d'analyser la déviation  $\Delta H(p)=H(p)-H_{th}(p)$ . La procédure est alors simple, on calcule la fonction de transfert complexe en divisant l'interspectre des signaux  $(S(p)-H_{th}(p) E(p))$  et  $E(p)$  par l'autospectre de  $E(p)$  (figure 7). La variation de phase seule peut, quant à elle, être analysée directement par la phase de l'interspectre des signaux  $(S(p)-H_{th}(p))$

et  $E(p)$ . L'analyse de l'intercorrélation pourra peut-être également donner des résultats intéressants à exploiter.

Comment l'oreille est sensible aux distorsions linéaires, peut-être à cause du temps de propagation (et donc la phase) variant avec la fréquence, est un autre problème.

## Conclusion

Cette réflexion ne remet pas en cause l'étude et le développement de l'amplificateur d'Héphaïstos, bien au contraire, mais essaie de présenter une nouvelle voie où

trouver la réponse à l'interrogation laissée en suspens dans le n° 27 n.s. : comment mesurer la distorsion thermique ?

Je suis ravi de constater que ma lettre est prise en référence par Pierre Johannet [5] pour l'évolution dans la modélisation des isolants, et que la voie linéaire génère déjà des idées nouvelles vers la mesure de cette fantomatique distorsion thermique.

En espérant avoir levé le voile sous lequel elle se cache...

## Bibliographie

[1] "La distorsion thermique, elle existe, je l'ai rencontrée", **Héphaïstos**, n° 32.

[2] "Faut-il brûler Fourier ?", **Héphaïstos**, n° 22 n.s.

[3] "Les câbles, les condensateurs et la mémoire des isolants", **P. Johannet**, n° 25 n.s.

[4] "Ça dépasse la mesure", **Héphaïstos**, n° 27 n..

[5] "Réflexion sur la musicalité des amplificateurs ou les leçons du câble", **P. Johannet**, n° 29 n.s.