

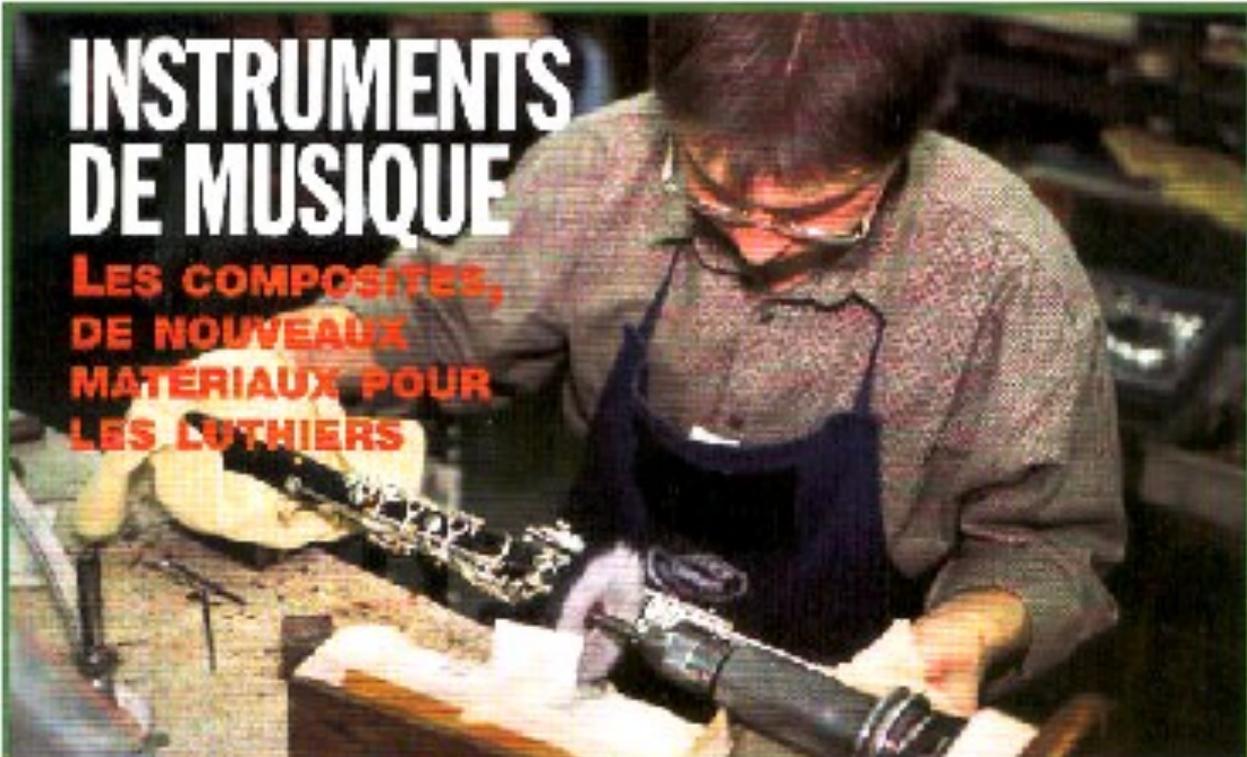
N°31 NOUVELLE SÉRIE 17^e ANNÉE

HAUTE FIDÉLITÉ PLUS!

L'AUDIOPHILE

INSTRUMENTS DE MUSIQUE

LES COMPOSITES,
DE NOUVEAUX
MATÉRIAUX POUR
LES LUTHIERS



MONTAGES A TUBES



La triode 845 montages
monotriodes classe A

CLASSIQUE

Les grands disques de
ces deux derniers mois

JAZZ

Après le Père Noël,
les rois mages



NAGUERE
RETOUR AUX H.P. A
RÉSONATEURS

THÉORIE

LE DRESSAGE DES ESCARGOTS
OU LE RETOUR AU NATUREL

QUOI DE NEUF ?
HEAD ACOUSTICS

M 2569 81 58,00 F RN



**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

**Page non
disponible**

Quoi de neuf?

HEAD ACOUSTICS

Maxime et Florian Louineau

Implantée depuis fort longtemps en Allemagne, la société Head Acoustics propose un système de mesure dans lequel l'acquisition et l'analyse des données acoustiques se fait de façon binaurale. Ce type de système n'a rien à voir, selon son concepteur le Dr Klaus Genuit, avec une simple tête artificielle ; il s'agirait plutôt d'un dispositif de mesure prenant systématiquement en compte les critères qui régissent l'audition humaine.

Dans le domaine de l'électroacoustique, les méthodes de mesure ont connu ces 15 dernières années des développements majeurs. L'apparition des analyseurs en temps réel, la mise au point des systèmes TEF (Temps-Energie-Fréquence) puis enfin, la généralisation de la mesure informatisée - via des logiciels dédiés à cet usage -, tous ces perfectionnements ont profondément bouleversé le paysage de l'électroacoustique. La sonorisation, l'étude et la fabrication de transducteurs, de même que l'acoustique architecturale, ont largement profité de ces évolutions. Mais pour performants qu'ils soient, ces nouveaux procédés de mesure ne sont pas exempts de défauts. La plus notable de ces imperfections, bien qu'elle ne soit pas couramment admise, se situe peut-être au niveau de l'acquisition des données acoustiques, ou plus

précisément au niveau du manque flagrant d'adéquation entre les modes d'acquisition de données en usage et les modes de fonctionnement de l'audition binaurale.

Les systèmes de mesure conventionnels et leurs limites

De façon générale, les protocoles de mesure en électroacoustique prennent en compte les caractéristiques de l'audition humaine au moyen de pondérations permettant d'intégrer dans le processus de mesure les caractéristiques moyennes de l'oreille, principalement en termes de sensibilité en fonction de la fréquence et du niveau sonore. Ces pondérations sont fort connues et se réfèrent toutes plus ou moins aux fameuses courbes tracées par Fletcher et Munson. Néanmoins, en regard de la com-

plexité du fonctionnement auditif, il n'est pas interdit de penser que cette adaptation est largement insuffisante et conduit bien souvent à un fossé entre la caractérisation objective d'un événement sonore - sa mesure et son analyse, en fait - et l'évaluation subjective de cet événement. Ainsi, la majorité des mesures s'effectuent grâce à un capteur unique dont la réponse est la plus linéaire possible, avec pour seules corrections les pondérations évoquées plus haut ; si ce type d'acquisition monophonique et quasi-linéaire permet une simplification de bon aloi, elle introduit en revanche un biais qui n'est pas négligeable. De même la mesure des systèmes d'écoute telle qu'on la pratique dans bien des cas est soumise à des limitations identiques, auxquelles on peut ajouter le fait que dans un système stéréophonique - et a fortiori multicanaux -, la mesure

d'une seule enceinte à la fois, qui plus est en proximité (à 1 m et en pression sous 100 Hz) n'est guère représentative des conditions réelles d'utilisation. Cette façon de procéder peut certes rendre compte des performances de l'enceinte en elle-même mais elle ne renseigne guère sur la qualité du couplage entre les enceintes et le local.

Des mesures qui nous ressemblent

Sans pour autant dresser un tableau trop sombre des mesures conventionnelles, on peut essayer de comprendre en quoi ces méthodes de mesure s'éloignent, dans leur principe de fonctionnement, du mode d'action de l'audition humaine. On peut, selon la firme Head Acoustics, distinguer quatre points fondamentaux dans l'élaboration d'un système de mesure anthropomorphique puisqu'au fond c'est bien de cela qu'il s'agit.

Tout d'abord, l'oreille externe est un filtre directionnel qui modifie la pression sonore arrivant au tympan dans des proportions importantes (de +15 à -30 dB), en fonction de la fréquence et de la direction de l'incidence sonore. Ces propriétés filtrantes de l'oreille externe sont dues aux diffractions, réflexions et résonances provoquées par la géométrie du pavillon auriculaire. Autre point important : la nature double du système auditif, qui va de pair avec un traitement du signal de type binaural et conditionne les notions d'audition spatiale, de sélectivité et d'annulation de bruits. Dans un champ sonore complexe comprenant des sources réparties dans l'espace et rayonnant des signaux non corrélés mais de puissance acoustique égale, la suppression de sources individuelles n'amène qu'une réduction insignifiante du niveau mesuré. Pourtant dans

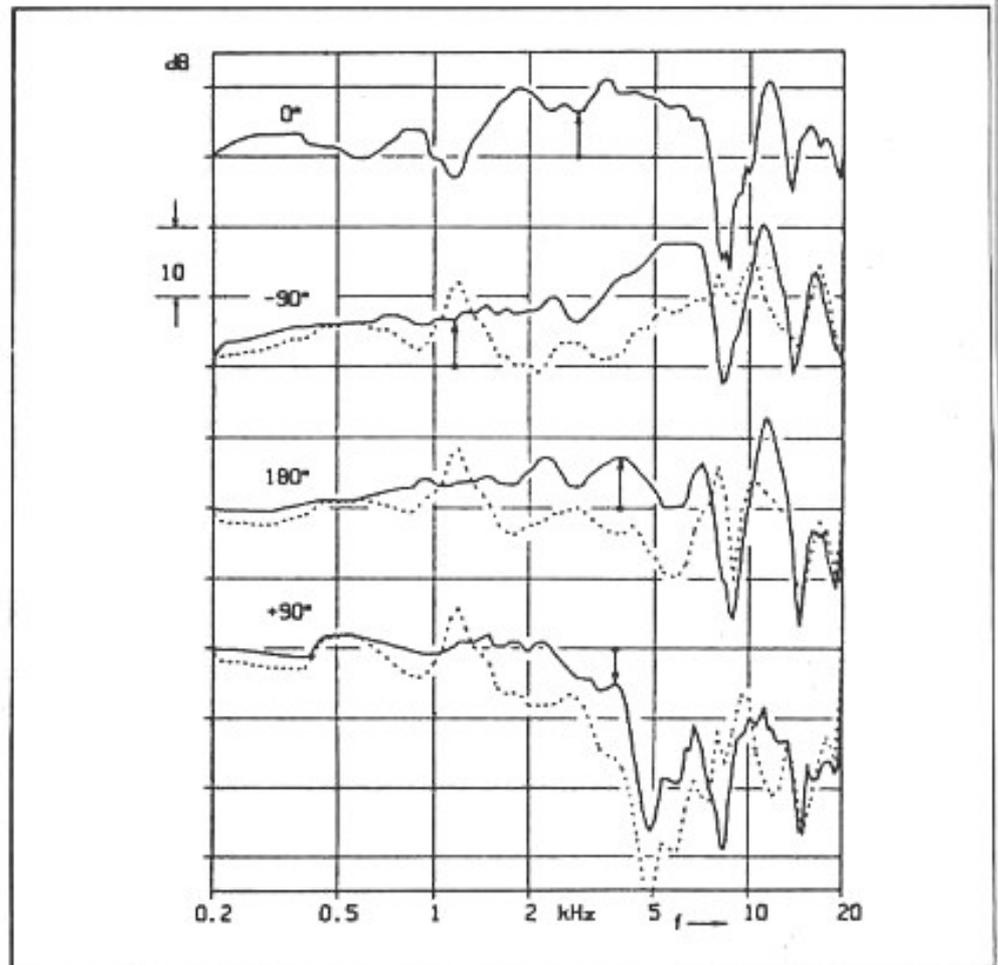


Fig. 1 : Résultats obtenus grâce à un capteur placé à 4 mm dans le canal auditif d'un sujet (voir texte).

ce cas, l'audition humaine est capable de percevoir des changements considérables de couleur sonore en se guidant sur les propriétés temporelles des signaux perçus. Troisième point : la sensation auditive n'est pas uniquement déterminée par la pression acoustique ; des critères psychoacoustiques entrent aussi en ligne de compte. Ces critères englobent les notions d'intensité, de brillance, de dureté et de tonalité. La qualification subjective d'un instrument de musique, par exemple, est étroitement liée à son accord alors que par ailleurs, même pour de légers décalages de cet accord - qui seront audibles -, on ne constatera aucune variation sonore en mesure pondérée A. Selon les séquences temporelles du signal ou sa distribution spectrale, des impressions subjectives très différentes peuvent exister, dues aux effets

de masques - antérieurs, postérieurs ou simultanés - mis en jeu dans le mécanisme de l'audition. Enfin, dernier élément, ce mécanisme possède une résolution élevée dans les domaines fréquentiels et temporels. Les analyseurs de spectre conventionnels possèdent, eux, une résolution temporelle et fréquentielle dont le produit est constant. En d'autres termes, $B \times T = \text{constante}$, où B est la résolution temporelle en hertz et T la résolution temporelle en secondes. Ces analyseurs conventionnels ne peuvent donc offrir simultanément une résolution élevée dans les deux domaines. Des recherches en psychoacoustique montrent que le produit $B \times T$ dans l'audition humaine s'établit aux alentours de 0,3. Le système auditif surmonte cette limitation en traitant les données en parallèle, montrant ainsi une grande résolu-

tion, fréquentielle, en même temps qu'une très bonne perception des variations temporelles du signal, telles que des changements rapides d'amplitude ou de fréquence.

Tout ceci a conduit les concepteurs du système Head Acoustics à considérer que pour obtenir une évaluation du son équivalente à celle qu'effectue le système auditif, il convenait de prendre en compte à la fois les caractéristiques psychoacoustiques de l'audition humaine et le traitement du signal de type binaural.

Ceci implique bien sûr un système d'acquisition de données acoustiques qui respecte les principes évoqués plus haut. Un tel système peut ensuite être utilisé dans une vaste gamme d'applications, qui vont de l'enregistrement musical à la mesure électroacoustique, qu'elle soit destinée à l'industrie (par exemple évaluation des nuisances sonores dans des milieux divers) ou bien encore à la mise au point de systèmes de reproduction. Cet outil d'acquisition fait intervenir une notion particulière : la fonction de transfert de l'oreille humaine. Bien qu'assez peu utilisé en mesure traditionnelle, le concept n'est pas nouveau puisqu'on l'emploie entre autres dans le domaine de la transmission de données audio, en téléconférence notamment. Rappelons brièvement de quoi il s'agit. Chacun sait que l'audition spatiale dépend en premier lieu de l'anatomie humaine : réflexions dues aux épaules, distance entre les oreilles, effet d'ombre de la tête sur les ondes sonores d'incidences opposées, résonances dans l'oreille externe et le canal auditif, tous ces phénomènes font que le son venant de chaque direction possède, au final, ses propres caractéristiques de réponse en fréquence et en phase (différences de temps d'arrivée). En résumé, l'ensemble buste/

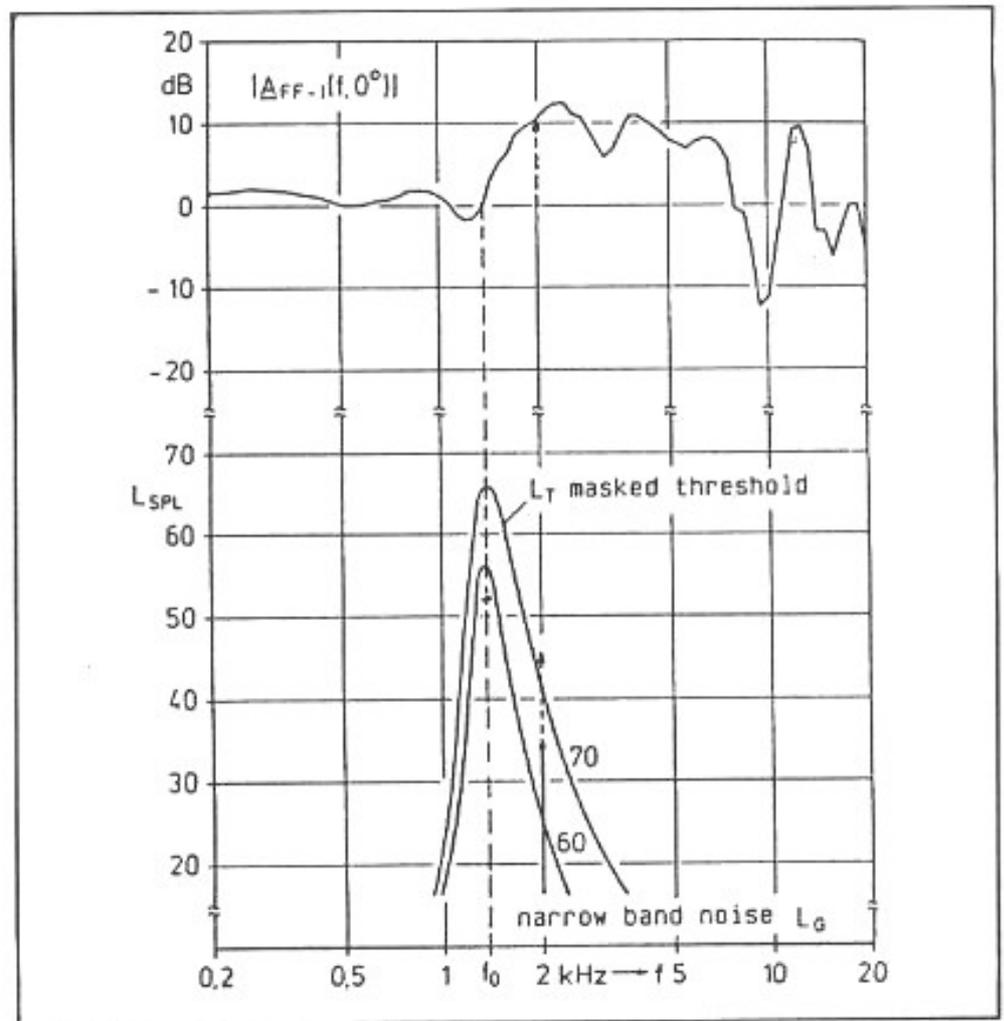


Fig. 2 : Dans certains cas, l'oreille peut percevoir ce qu'un microphone ne perçoit pas. C'est le cas ici où la fonction de transfert de l'oreille - qui présente une "bosse" importante à 2 kHz - permet d'éviter l'effet de masque produit par le signal à 70 dB SPL (voir texte).

oreilles, pour ne s'en tenir qu'à l'aspect "extérieur", c'est-à-dire sans parler du traitement de l'information par le cerveau, cet ensemble constitue un capteur directionnel aux caractéristiques complexes et, dans une certaine mesure, propres à chaque auditeur. C'est la synthèse de tous ces paramètres qui détermine la fonction de transfert de l'oreille externe.

Il est possible, à partir d'un ensemble de tests, d'obtenir une modélisation mathématique d'une fonction de transfert type, représentant en fait une moyenne de différentes mesures effectuées sur différents sujets. On peut voir figure 1 un exemple de ce type de fonction de transfert. Les courbes indiquent en fait une pression acoustique

obtenue à 4 mm à l'intérieur du canal auditif pour une seule oreille. Ces courbes sont données pour l'oreille gauche, avec 4 angles d'incidence distincts : 0°, 90° à gauche, 180°, 90° à droite. La base de chaque flèche indique le niveau de référence, les courbes en trait plein représentent la fonction de transfert de l'oreille externe en champ libre (son direct) tandis que celles en pointillé montrent, pour chaque direction, la différence par rapport à l'incidence frontale en champ libre. La fonction de transfert de l'oreille n'étant pas linéaire, on comprend l'intérêt qu'il y a à construire un capteur possédant les mêmes caractéristiques ; ce capteur pourra détecter des sons que ne capterait pas un microphone conventionnel à la

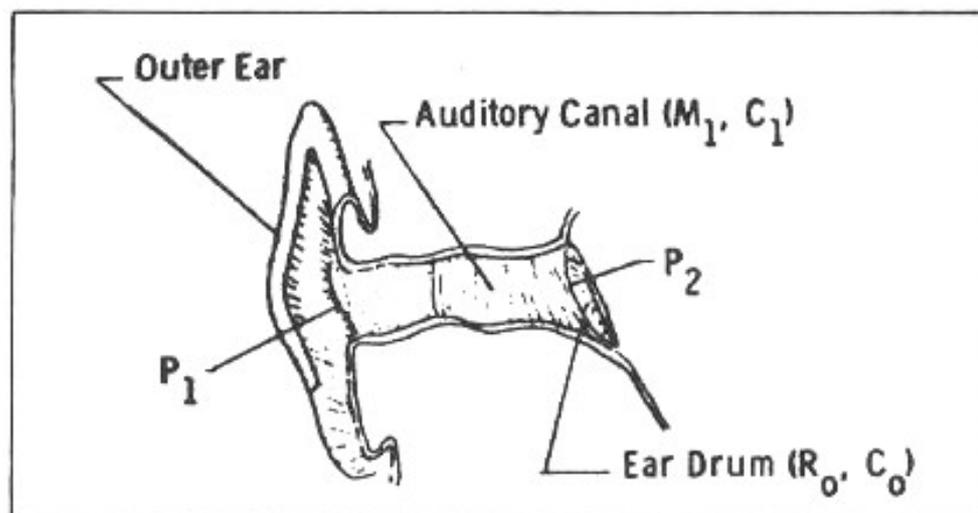


Fig. 3 : Vue en coupe de l'oreille externe.

courbe de réponse droite. Si par exemple on émet simultanément, à un niveau de 60 dB, deux signaux, l'un composé d'une fréquence pure à 2 kHz, l'autre d'un bruit masquant à bande étroite, les deux types de systèmes d'acquisition (linéaire et non linéaire) pourront reconnaître les deux signaux. Mais si l'on augmente de 10 dB le niveau du bruit masquant, seul le système de type binaural captera les deux stimuli, le microphone conventionnelle "perdant" le signal à 2 kHz par effet de masque.

Un dispositif de mesure binaurale permet justement d'éviter ce genre de défaut. La prise d'informations s'effectue au moyen d'une tête artificielle adaptée à chaque application. Afin de faciliter certains travaux, les dimensions des pavillons auriculaires sont simplifiées et d'une expression mathématique connue. Différents systèmes d'acquisition et de traitement informatique viennent compléter l'outil. Ils sont dédiés à deux principaux champs de mesure : l'analyse des systèmes de transmission téléphonique (avec dans ce cas une tête munie d'une bouche artificielle) et les mesures de bruit dans des milieux divers. Toute une gamme d'accessoires permet de répondre à des besoins précis. On peut par exemple contrôler le signal enregistré par le

système de mesure au moyen d'un boîtier comportant différents filtres ainsi qu'un amplificateur alimentant un casque électrostatique de haute qualité (Stax). Il est alors possible, en effectuant des manipulations fréquentielles et/ou temporelles sur le signal enregistré d'estimer "directement" leur impact subjectif. D'autres accessoires offrent par exemple la possibilité de convertir un signal monophonique en signal de type binaural.

L'éternel retour de la tête artificielle

L'histoire des dispositifs destinés à reproduire l'audition humaine se confond avec celle de la stéréophonie, mais ce n'est qu'à partir de la seconde guerre mondiale qu'on a commencé à mettre au point des dispositifs

d'acquisition de données acoustiques (en fait de prise de son) prenant réellement en compte la physiologie humaine. Ainsi, il y a une trentaine d'années, le célèbre H.F. Olson, à qui l'on doit entre autres la conception des microphones à ruban RCA, présentait un système de simulation vocale monté dans un dispositif tête/buste artificiel. Ce simulateur était très performant puisque sa réponse en fréquence tenait dans $\pm 2,5$ dB entre 60 Hz et 12 kHz et que ses caractéristiques directionnelles étaient sensiblement identiques à celles de la voix humaine. Les composantes basse fréquence émises par le torse étaient de plus prises en compte grâce à un judicieux système d'événements débouchant dans le thorax du mannequin. De la même façon, les laboratoires CBS mettaient au point, à peu près à la même époque, un système complet de mesures binaurales comprenant bien sûr l'ensemble torse/tête équipé de capteurs placés dans les "oreilles" et, là encore, d'un simulateur vocal. Les concepteurs avaient de plus prévu une unité de traitement de signal offrant une égalisation variable en fonction du niveau capté. Le but de ce dispositif était bien entendu de disposer d'un ensemble de mesures qui possèdent des caractéristiques les plus proches possibles de l'audition humaine. Au lieu de présenter une courbe amplitude-fréquence linéaire

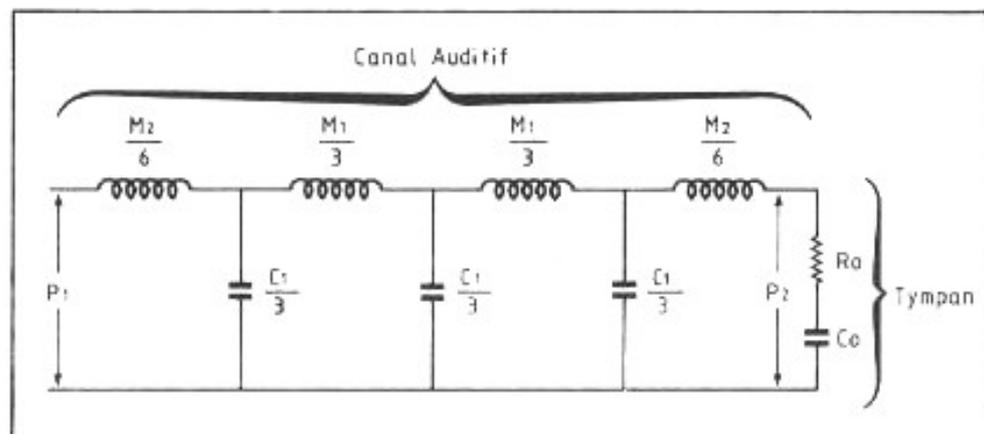
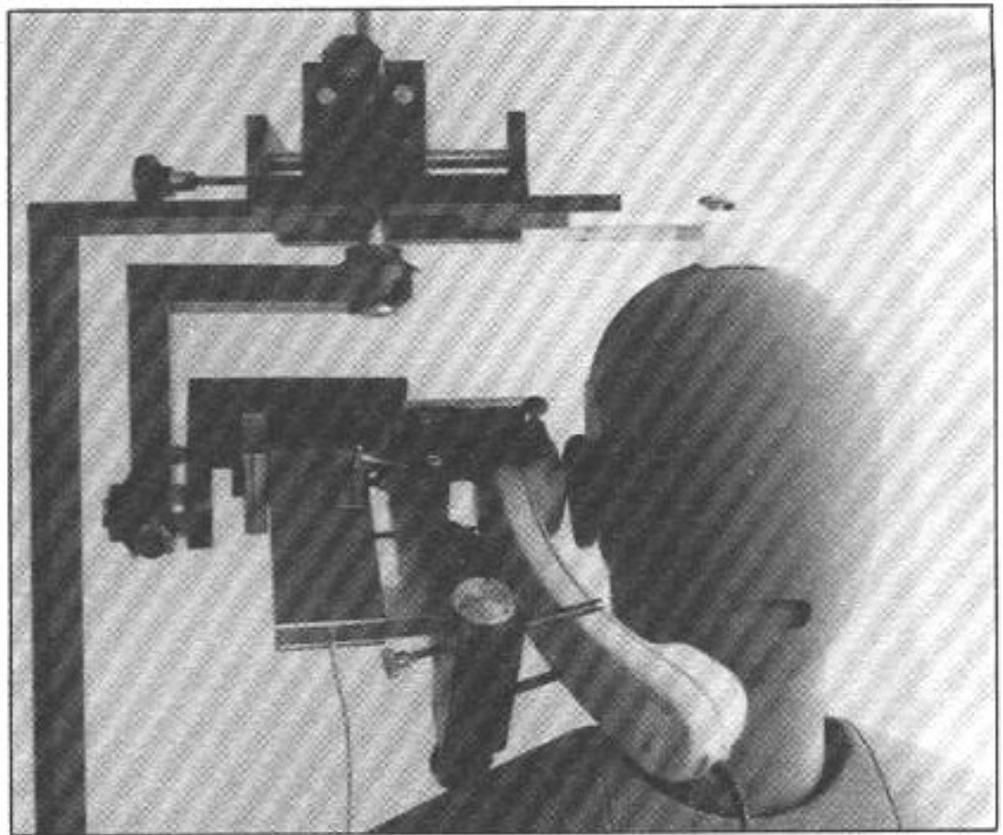


Fig. 4 : Equivalent analogique du canal auditif et du tympan (d'après I).

quelle que soit l'intensité acoustique mesurée, comme c'est traditionnellement le cas, le système en question possédait une linéarité variable en fonction de l'intensité. Les caractéristiques de cet égaliseur variable s'inspiraient bien sûr des courbes de sensibilité de l'oreille déterminées par Fletcher et Munson. On obtenait ainsi un capteur binaural dont le comportement pouvait être assimilé à celui de l'oreille humaine. Il faut souligner que le principal but de toutes ces recherches n'était pas, et de loin, de concevoir un système de prise de son inédit. Les domaines d'application se trouvaient plutôt du côté de l'industrie ou de la recherche, qu'il s'agisse de la conception de casques de plongée, de systèmes de communication à l'usage des pilotes d'avion ou bien encore de l'étude de la diffraction et de l'absorption dues à la présence d'un corps humain dans une capsule spatiale. Depuis cette période, un bon nombre de fabricants de microphones ont proposé leur système de tête artificielle, de B&K à Neuman, mais là encore ces dispositifs sont plutôt destinés à des mesures spécifiques qu'à des prises de son à usage discographique. Outre le manque de souplesse inhérent à tout couple figé, la raison de cet échec relatif est plutôt à chercher du côté du manque de compatibilité de ce genre de prise de son. L'écoute au casque révèle comme on le sait des qualités de spatialisation étonnantes mais le passage sur des enceintes est toujours décevant : le système ne fonctionne bien qu'à la condition d'éviter toute interaction avec le local d'écoute et toute diaphonie perçue entre les deux canaux, ce qui n'est bien sûr pas le cas avec deux haut-parleurs disposés à quelques mètres de l'auditeur.

Le système Head Acoustics, quant à lui, est un peu l'héritier des précurseurs de la mesure



Mesure d'un combiné téléphonique avec un système Head Acoustics équipé d'un pavillon auriculaire spécifique.

binaurale évoqués plus haut. Et sans mettre en doute le travail de ses concepteurs, il faudrait être naïf pour imaginer que ceux-ci n'ont pas utilisé - ne serait-ce que pour l'assimiler et faire des choix différents - une base théorique solide datant de plusieurs décennies. Ce qu'il faut en revanche souligner, c'est le bénéfice qu'apportent ces méthodes de mesure dans le domaine de la lutte contre les émissions sonores nuisibles. Une meilleure compréhension des phénomènes de gêne auditive, une analyse plus fine des solutions à mettre en œuvre, tout cela est loin d'être négligeable et laisse supposer des applications multiples dans le secteur de l'industrie. En revanche, l'application de ces méthodes binaurales à des fins d'enregistrement musical semble moins convaincante, à cause surtout de la rigidité du processus et de son manque de compatibilité. Sans oublier le caractère aléatoire de l'éventuel succès de telle ou telle méthode de prise de son, les

résultats étant, après tout, laissés à l'appréciation - subjective ! - de chaque auditeur. A l'inverse, l'étude et la mise au point de dispositifs électroacoustiques auraient probablement beaucoup à gagner à l'utilisation de mesures binaurales.

Bibliographie

I. "An Electrical Dummy for Acoustical Testing", **E.L. Torick, A. Di Mattia, A.J. Rosenheck, L.A. Abbagnaro et B.B. Bauer.** 1966, 31st Convention of the AES, cité in "An anthology of articles on microphones from the pages of the JAES, vol. 1-27 (1953-1979).

II. "Field-Type Artificial Voice", **H.F. Olson.** 1965, 29th Convention of the AES, *ibid.*

III. Documents Head Acoustics.

Head Acoustics est distribué en France par **Elexo 12**, rue des Petits Ruisseaux, 91371 Verrières-le-Buisson. Tél. : 69.30.28.80 - Fax : 69.30.68.51.

**Page non
disponible**



LE DRESSAGE DES ESCARGOTS OU LE RETOUR AU NATUREL

Jérôme Prévost

T

ous ceux qui ont découvert les qualités des bons pavillons sont unanimes : l'alternative devient quasiment de la science fiction. Malheureusement, leur rareté ne provient que d'une chose : ils sont difficiles à bien réaliser ou, dit autrement, ils sont hors de prix lorsqu'on arrive à en trouver. Si, en plus, ils doivent avoir des caractéristiques particulières pour un système particulier, une seule solution s'impose : les fabriquer soi-même.

Les fabriquer soi-même... Facile à dire ! Mais que vais-je donc bien découper dans mes (chères) planches ?

A force de fouiner dans les revues spécialisées ou dans de vieux ouvrages techniques, on peut réunir quelques lignes de direction principalement calculatoires. Mais il manque toujours quelque chose d'essentiel. Force est de constater que la réussite demande des compétences dépassant le seul

calcul acoustique. Une solide patience, une minutie à toute épreuve, un peu de dessin technique, de la géométrie dans l'espace, du calcul numérique, de la menuiserie sont quelques-uns des domaines qu'il faut, à un moment ou à un autre, aborder.

Le cauchemar est désormais terminé ! Cet article a pour objet de tracer une voie de conception la plus générale possible. Pour éviter de sombrer dans de la pure théorie

qui n'intéresserait que moi, une VRAIE réalisation servira de support d'exemple. Celle-ci résume quasiment tous les problèmes que l'on peut rencontrer. Il s'agit d'un pavillon de bas-médium en bois sablé à une cellule courbée en escargot à 180°.

Mais n'allons pas trop vite ! Concevoir des jolies trompes demande avant tout un petit cheptel de bases mathématiques pas méchantes qu'il est néanmoins de bon

goût de réunir dans notre premier chapitre :

Les mathématiques nécessaires pour bien parler le pavillon

Les fonctions exponentielles et hyperboliques

Très utilisées dans la définition des pavillons, leurs propriétés numériques sont, par chance, simples. Elles se dérivent et s'intègrent sans trop de peine.

Les formules d'expansion exponentielles ou hyperboliques ont la propriété commune de varier lentement au départ et d'accélérer rapidement ensuite [fig. 1].

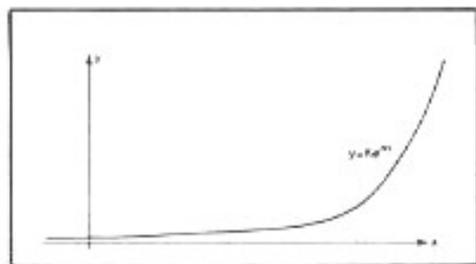


Fig. 1 : Fonction exponentielle.

Cette propriété est plus importante que l'on croit. Nous verrons, lorsque nous aborderons les profils (côtés) de notre pavillon, qu'il faudra prendre des précautions si on veut éviter des formes de cavités qui pourraient survenir à la gorge.

Rappel sur les fonctions hyperboliques :

$$\operatorname{ch}(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

et

$$\operatorname{sh}(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$$

Dérivées et normales

Notre intérêt pour les dérivées nous servira principalement à relier des portions de pavillon ayant des profils de lois d'expansion différentes sans causer de ruptures [fig. 2].

En 1, nous avons un raccord en valeur uniquement : sa dérivée n'est pas continue. Il est bien évident que nous ne voulons pas de ça

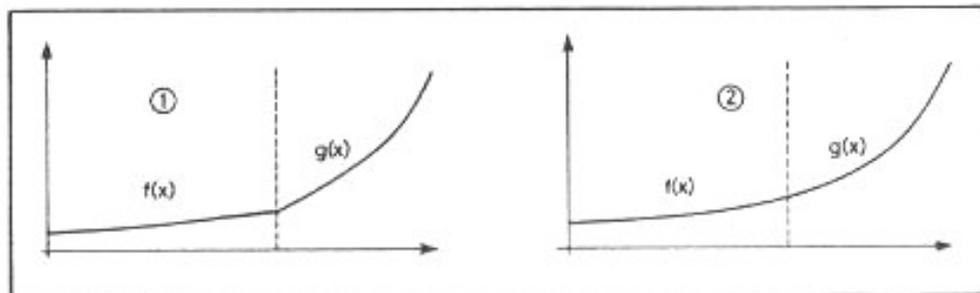


Fig. 2

dans notre pavillon. C'est beaucoup mieux en 2. Il ne faudra donc pas s'étonner de rencontrer des dérivées dans nos calculs !

Celles-ci, notées $\frac{\partial f(x)}{\partial x}$ (ou $\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2}$ pour la dérivée seconde), se calculent littéralement par les règles de dérivation que l'on peut trouver dans tout bon livre de mathématiques (voir bibliographie). Dans certains cas où elle n'est pas aisément calculable (où $f(x)$ n'est pas connue directement), des procédés numériques seront utilisés et seront développés au moment voulu.

Les normales nous serviront à ajouter des surépaisseurs à un profil : il faudra bien en tenir compte pour les collages [fig. 3].

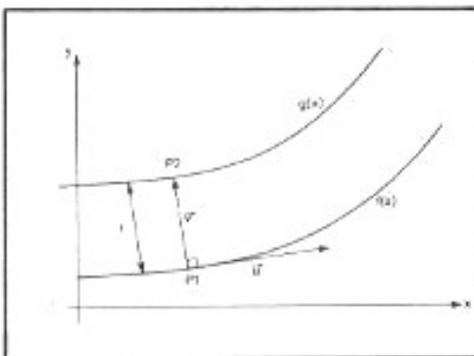


Fig. 3 : Evaluer une surépaisseur.

v , vecteur normal à $f(x)$ est déduit de la dérivée de $f(x)$:

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right)^{-1} \\ 1 \end{bmatrix}$$

(par exemple).

Pour une surépaisseur ϵ , P1 de-

vient P2 par translation de $\epsilon \frac{\vec{v}}{\|\vec{v}\|}$.

Nous verrons comment ce calcul sera utilisé lors de la partie consacrée aux découpes. Nous aurons aussi l'occasion d'évaluer des normales à des courbes paramétriques $C(x,y)$ dans le plan. Dans ce cas, si

$C(x,y) = \begin{cases} x = Fx(t) \\ y = Fy(t) \end{cases}$, alors le vecteur dérivé sera :

$$\vec{d} = \begin{cases} d_x = \frac{\partial Fx(t)}{\partial t} \\ d_y = \frac{\partial Fy(t)}{\partial t} \end{cases}$$

et le vecteur normal :

$$\vec{n} = \begin{cases} n_x = -\frac{\partial Fy(t)}{\partial t} \\ n_y = \frac{\partial Fx(t)}{\partial t} \end{cases}$$

Ce vecteur \vec{n} n'étant pas unitaire, nous utiliserons $\vec{n}_u = \frac{\vec{n}}{\|\vec{n}\|}$, vecteur normal à la courbe de longueur l avec

$$\|\vec{n}\| = \sqrt{n_x^2 + n_y^2}$$

Continuité sur trajectoire courbe

Illustrons ceci sur un exemple (non innocent...) :

Soit une trajectoire formée d'un demi-cercle et d'une droite [fig. 4].

La jonction en P ne pose, a priori, pas de problème de continuité. Considérons alors une fonction toute simple, disons une exponentielle [fig. 5].

Au lieu d'appliquer $f(x)$ à l'axe standard x , utilisons la trajectoire T où x devient une abscisse curvi-

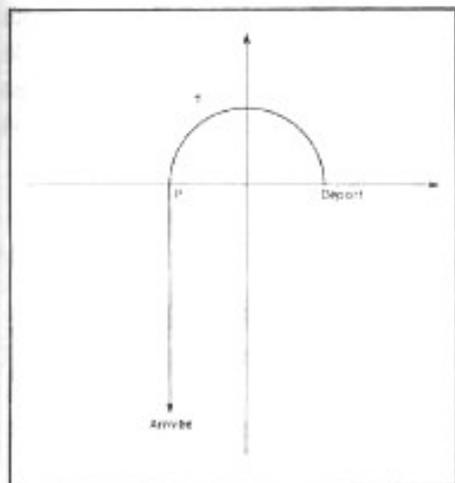


Fig. 4

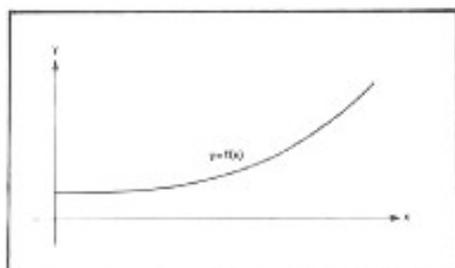


Fig. 5

ligne. On s'attend à obtenir quelque chose de ce genre [fig. 6].

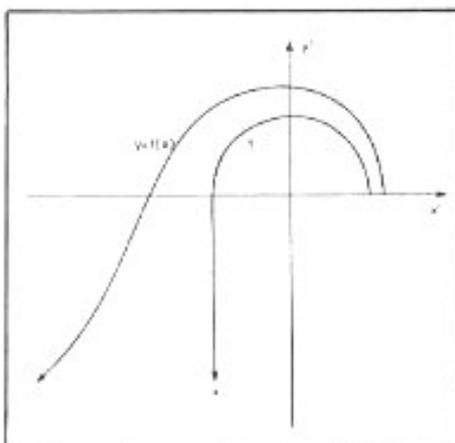


Fig. 6

En fait, la vraie allure de $f(x)$ est comme ceci [fig. 7].

Voici où je veux en venir : la continuité d'un profil n'est pas forcément conservée lors d'une torsion sur une trajectoire qui semble pourtant continue. Nous verrons les implications dans le chapitre concernant les torsions. Le problème vient d'une rupture de vitesse de T . Supposons qu'un point P se promène sur T et que l'on évalue sa vitesse.

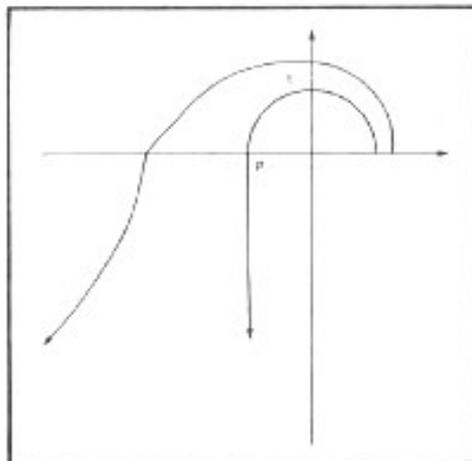


Fig. 7

Sur le demi-cercle :

$$T(x, y) = \begin{cases} R \cos(\theta) \\ R \sin(\theta) \end{cases}$$

et

$$\vec{v}(x, y) = \begin{cases} \frac{\partial T_x}{\partial \theta} = -R \sin(\theta) \\ \frac{\partial T_y}{\partial \theta} = +R \cos(\theta) \end{cases}$$

Sur la droite : $\vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ K \end{pmatrix}$ où K est

une constante.

Au point de rencontre $P(\theta = 180^\circ)$, on doit avoir, pour éviter une discontinuité :

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -R \end{pmatrix}$$

La condition de continuité en vitesse impose $K = -R$, cas obtenu avec beaucoup de chance ! Comme la trajectoire T dépend essentiellement des caractéristiques physiques désirées, il serait acrobatique de partir d'une trajectoire continue pour en déduire le profil correct.

Le problème de torsion n'existe pas si notre pavillon est droit et symétrique, cas très particulier rarement utilisé. Un simple pavillon multicellulaire comprend des cellules tordues [fig. 8].

$T1 \dots T4$ sont des trajectoires de torsion calculables. Mais attention à leur choix, surtout si le pavillon est en deux parties (courbe à la gorge, droit en embouchure) comme c'est souvent le cas (pavillons Le Dauphin ou Prévost).

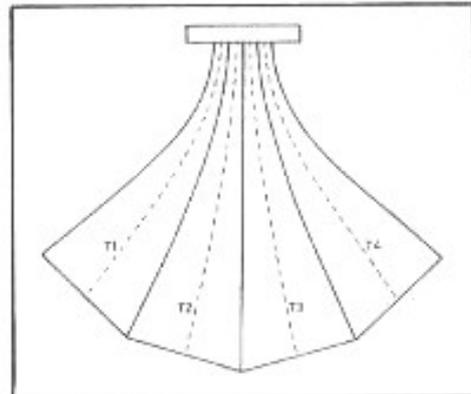


Fig. 8

Conclusion : Si l'on doit faire subir une torsion à son cornet, attention aux trajectoires définies par morceaux !

Les courbes de Bézier

Cette partie n'est pas directement liée aux calculs acoustiques des pavillons, mais à leur torsion. C'est plutôt une réponse possible et efficace aux problèmes cités précédemment. Ici, seule leur formulation sera abordée. Leur utilisation sera détaillée dans la partie torsion.

Les courbes de Bézier font partie des outils des infographistes CAO pour la confection de courbes ou de surfaces gauches. D'autres systèmes équivalents pourraient bien sûr être utilisés (Splines par exemple). En voici le principe :

Soient $n+1$ points $P_i(x, y)$ dans le plan avec $i \in [0K n]$. Les courbes de Bézier se déduisent de ces points d'une manière unique et logique. Contrairement aux Splines, elles ne passent pas forcément par ces points, appelés points de contrôle. Ces courbes ont pour propriétés :

- Ce sont des courbes dans le plan (pour notre cas).

$$C(x, y) = \begin{cases} x = F_x(t) \\ y = F_y(t) \end{cases}$$

- $F_x(t)$ et $F_y(t)$ sont des polynômes de degré n avec $0 \leq t \leq 1$.

- Elles sont tangentes aux segments P_0P_1 et $P_{n-1}P_n$ en P_0 et P_n .

- Elles sont incluses dans le polygone formé des points $P_0 \dots P_n$.

- Elles sont globales : la modification d'un point entraîne une modification de toute la courbe.

Elles se formulent comme ceci :

Soit

$$B_{i,n}(t) = C_i^n (1-t)^{n-i}$$

avec

$$C_i^n = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

et

$$n! = 2.3.4 \dots n.$$

$B_{i,n}$ est un polynôme de degré n appelé polynôme de Bernstein. Ces courbes ont pour équation paramétrique :

$$C(x,y) = \begin{cases} \sum_{i=0}^n F_x(t) P_{i,x} B_{i,n}(t) \\ \sum_{i=0}^n F_y(t) P_{i,y} B_{i,n}(t) \end{cases}$$

$P_{i,x}$: abscisse du point P_i ; $P_{i,y}$: ordonnée du point P_i .

Prenons un exemple avec 4 points, c'est-à-dire $n=3$:

Pour $P_1(1,1)$, $P_2(0,2)$, $P_3(-3,0)$ et $P_4(2,-2)$:

$$\begin{cases} B_{0,3} = C_3^0 t^0 (1-t)^3 = (1-t)^3 \\ B_{1,3} = C_3^1 t^1 (1-t)^2 = 3t(1-t)^2 \\ B_{2,3} = C_3^2 t^2 (1-t)^1 = 3t^2(1-t) \\ B_{3,3} = C_3^3 t^3 (1-t)^0 = t^3 \end{cases}$$

D'où :

$$C(x,y) = \begin{cases} F_x(t) = (1-t)^3 - 9t^2(1-t) + 2t^3 \\ F_y(t) = (1-t)^3 + 6t(1-t)^2 - 2t^3 \end{cases}$$

Graphiquement, C se représente ainsi [fig. 9] :

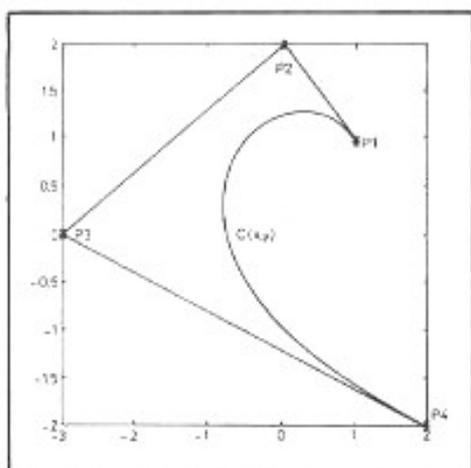


Fig. 9

Ecrit à la manière d'un livre de mathématiques, il n'est pas évident de voir qu'en fait ces courbes sont simples à calculer. Leur application informatique sera développée ultérieurement.

Voilà ce qu'il est nécessaire de comprendre pour la suite : ce n'est pas énorme !

Les bases informatiques qui simplifient la vie

Si, dans le temps, les concepteurs de pavillon alignaient leurs pages de calculs avec tout un lot de méthodes numériques, il serait dommage de ne pas utiliser l'outil actuel : l'informatique. Actuellement, il n'existe pas d'applications dans le domaine du calcul pavillonnaire qui soient disponibles. Quelques cas isolés existent, notamment au Japon, mais pour les dégoter... Il serait plus rapide de tout réécrire soi-même. Le but de ce paragraphe n'est pas de donner un cours magistral d'informatique théorique mais de présenter comment les différents calculs ultérieurs seront appliqués dans un programme personnel. A l'heure actuelle, les PC compatibles IBM se sont tellement démocratisés que l'on peut facilement avoir sous la main quelqu'un qui ait un peu programmé dans sa vie. Les exemples ici seront écrits en C. J'admets que ce n'est pas le choix le plus simple mais, dans le calcul numérique, les langages courants (Pascal, Basic, Modula-2, C++,...) se ressemblent beaucoup. En fait, tout ce qui est développé dans cet article est facilement portable vers un autre langage.

Utiliser un ordinateur nous ouvre ici des possibilités qui nous permettent d'aller très loin dans les calculs (résolution d'équations exotiques, sorties de plans pour des traceurs ou même des machines-outils, visualisation des résultats en direct...).

Nous allons commencer par un survol (très) rapide de la syntaxe du C qui nous sera nécessaire. Il ne fera appel à aucune spécificité d'un compilateur particulier.

Les types de données utilisés

Nous n'en utiliserons que deux : le nombre entier et à virgule flottante.

Les notations C sont : *int* et *double*. En Pascal, ce serait *integer* et *real*. Nous n'irons pas plus loin dans ces types. La seule limitation proviendrait de la plage de valeur du type *int* (16 bits -32768 à 32767), le type *long int* sera utilisé quelquefois pour cette raison (32 bits, plage de -2147483648 à 2147483647).

Allure générale d'un programme C

Bien que l'ossature d'un programme puisse être très variable, nous pouvons nous fier au modèle du listing a.

Les lignes d'instruction se terminent par un ; sauf pour les déclarations de fonctions.

Dans cet article, seuls des fragments de programmes sous forme plus ou moins complexes mais suffisantes seront donnés.

Une fonction calculant la surface d'un pavillon exponentiel pour une abscisse donnée est fournie en exemple listing b.

De toute façon, pour utiliser les applications informatiques fournies, il faudra avoir quelques notions de programmation pour les réunir dans son programme personnel. Les petits suppléments (comme les boucles et les conditions) seront décrits quand ils apparaîtront. Je n'en dirai pas plus dans ce domaine, l'art de la programmation, contrairement à ce qu'en pensent certains, ne s'acquiert qu'avec les années et non avec les livres.

```

#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

<type> Fonction1(<type> paramètre 1, <type> paramètre 2 ...)
{
    calcul ...
}

<type> Fonction3(<type> paramètre 1, <type> paramètre 2 ...)
{
    calcul ...
}

<type> Fonction3(<type> paramètre 1, <type> paramètre 2 ...)
{
    calcul ...
}

void main(void)
{
    double a,b,c;

    a=fonction1(p1,p2,p3...);
    b=fonction2(p1,p2,p3...);
    c=fonction3(p1,p2,p3...);
}

```

fonctions extérieures
(maths, entrées/sorties...)

Fonctions de calcul. elles retournent un type (double ou int) et acceptent des paramètres de type quelconque, en nombre quelconque.

fonction obligatoire main() qui est le point d'entrée du programme. C'est ici que l'on appelle les autres fonctions.

Listing a

```

double surface(double x)
{
    double S0=1.5;
    double m=0.5;
    double S;

    S=S0*exp(m*x);
    return(S);
}

```

Son utilisation serait :

```

#include <math.h>

void main(void)
{
    double x=1.5;
    double Surf;

    Surf=Surface(x);
    ...
    ...
}

```

Définition de la fonction.

La fonction exp() retournant l'exponentielle de l'argument est standard. Son utilisation (comme sin, cos, log ...) nécessite la ligne #include <math.h> pour être accessible.

Listing b

Etude théorique des pavillons

Les principaux types et leur formulation

Les calculs pavillonnaires se trouvent aisément dans la littérature spécialisée actuelle ou dans les

ouvrages universitaires de physique d'antan.

Bien que le nombre d'expansions existantes soient impressionnant, il n'en ressort que quelques types qui s'adaptent à l'écoute haute-fidélité.

Nous pouvons résumer les ex-

pansions en trois familles :

- Celles qui n'ont aucun intérêt !
- Celles qui sont purement théorique.
- Celles qui sont en majeure partie empiriques.

Voir tableau a.

Remarquons que les expansions

Peu d'intérêt	Mathématiques	Plus ou moins empiriques
Polynomial $S = S_0 x^n$ dont : Cônique : $S = S_0 x^2$ Parabolique : $S = S_0 x^4$	Hyperbolique: $S = S_0 [ch(mx) + Tsh(mx)]$ ou $S = S_0 [\alpha e^{mx} + \beta e^{-mx}]$ avec $\begin{cases} \alpha = \frac{1+T}{2} \\ \beta = \frac{1-T}{2} \end{cases}$ Dont : Exponentiel : $S = S_0 e^{mx}$ ($T = 1$) Caté noïdal : $S = S_0 ch(mx)$ ($T = 0$)	Western Electric 15A. Hiwata. Toujours sur des bases théoriques longuement retravaillées.

Tableau a

ne fournissent que des surfaces. En pratique, les pavillons droits circulaires sont ceux qui colleraient le mieux à la théorie. Il est évident que ceux qui respectent les lois avec une forme très asymétrique ou disproportionnée auront des caractéristiques imprévisibles [fig. 10].

Nous pressentons déjà que ces formules, qui doivent être suivies scrupuleusement, fourniront des résultats ayant de grandes chances d'être éloignés des valeurs théoriques (surtout en bande passante et en directivité). Nous utiliserons, comme tout le monde, le type hyperbolique, parfaitement connu et dont les qualités peuvent être excellentes. Notons que le choix d'une autre expansion ne change rien au principe de calcul.

Fréquence de coupure, choix du moteur, dimensions

Les critères servant de base de calcul proviennent essentiellement du système où le pavillon intégrera. Ceux-ci doivent être suffisamment flexibles pour éviter d'avoir un trou de 50 Hz dû à la justesse relative des formules (disons, par exemple, que je veuille une voie médium couvrant 600-8 000 Hz, mais je peux aussi me contenter de 650-7 500 Hz ou 550-8 500 Hz). Hors de question de dire : "Mon filtre

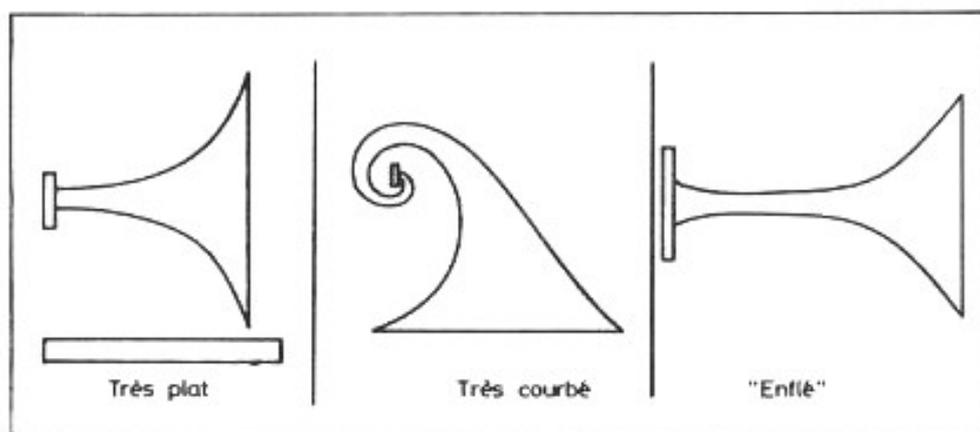


Fig. 10

actif coupe à 597,3 Hz, il faut que mon pavillon tombe ici."

Ayant tout à peu près évalué, il reste à trouver ses moteurs. Il est important de calculer ses pavillons en fonction du moteur que l'on a et non le contraire. Ceux-ci serviront de départ dans les calculs, ne serait-ce que par leur diamètre d'ouverture. Leur choix est primordial. Si, par exemple, ils ne sont pas conçus pour descendre suffisamment bas, il ne servirait à rien de les charger avec un pavillon de 1 m² d'embouchure.

Le choix actuel n'est pas excessivement fourni pour les modèles haut de gamme. Les bons modèles sont toujours les mêmes : Altec 288, JBL 244X, TAD 2001... En 2", le choix est encore plus restreint. Il ne faut pas non plus négli-

ger des modèles qui sembleraient moins prestigieux mais qui donneraient des résultats étonnants (Altec 806-8A...).

Une fois ses moteurs en main, les calculs commencent. En général, ils se présentent ainsi [fig. 11].

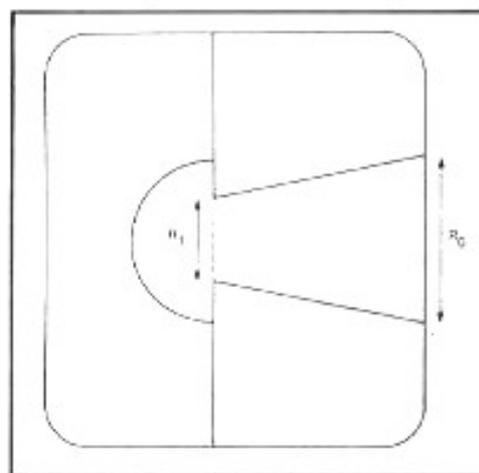


Fig. 11

Présentation d'une amorce de pavillon (en général conique). R_0 est donné en pouces, bien qu'il puisse être légèrement différent des valeurs constructeur.

Première remarque fondamentale :

Il FAUT respecter le mieux possible cette amorce pour une liaison moteur-pavillon impeccable. L'onde sonore étant à haute pression et faible amplitude (impédance élevée), la moindre rupture (ou pire, diamètre et forme de jonction différents) auront à coup sûr des répercussions. De toute façon, les sommités en la matière sont unanimes sur ce point : fuir comme la peste les ruptures lorsqu'on parle de pavillons de (haute) qualité.

Nous pouvons maintenant nous lancer dans la première partie de nos calculs : l'expansion de notre pavillon

$$S = S_0 [ch(mx) + Tsh(mx)]$$

- Le coefficient m

Il décide de la longueur du pavillon d'après les surfaces d'entrée et de sortie. Il s'évalue selon une contrainte de fréquence de coupure que l'on trouve sous différentes formes (qui reviennent heureusement au même) :

$$m \leq \frac{12,5 F_c}{v} \quad [1]$$

F_c (Hz) ; v ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) ; m (cm^{-1}).

$$F_c \geq 27 \cdot 10^4 m \quad [2]$$

F_c (Hz) ; m (cm^{-1}).

v représente la célérité du son dans l'air et F_c la fréquence de coupure théorique. Nous avons encore une confirmation du flou entre théorie et pratique par la valeur de v . Elle est donnée à $300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ici ou $330 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ là... Donc méfiance !

- Le coefficient T

Il modifie la forme et la vitesse de l'expansion. Les valeurs préconisées sont celles comprises entre 0 et 1. Mais quelle valeur prendre ? Ce mystère s'est levé lors de la découverte par hasard d'un livre [3] qui fournit ces courbes

[fig. 12].

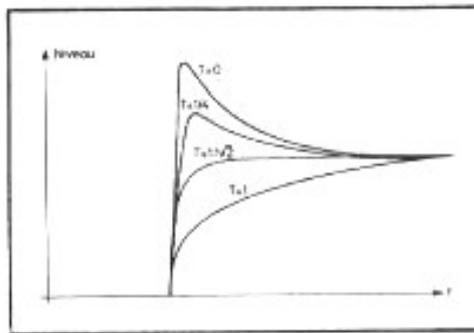


Fig. 12

T se comporte comme un facteur d'amortissement où $T = \frac{1}{\sqrt{2}}$ représenterait une réponse type Butterworth. Les valeurs inférieures, bien qu'apportant un gain substantiel dans le bas, présentent le risque d'un beau son de cavité résonnante !

- Longueur et embouchure

La surface d'embouchure dépend (malheureusement) de la longueur d'onde la plus longue à reproduire selon :

$$D \geq \frac{\lambda}{3}$$

D : diamètre de sortie.

Dans le cas d'une sortie non circulaire, le flou s'installe de plus belle sur la rigueur de cette loi ! Faut-il prendre la plus petite dimension, la plus grande, une valeur intermédiaire ?

Disons que la valeur moyenne semble la plus raisonnable (pour une cellule de $10 \times 18 \text{ cm}$, $D = 14 \text{ cm}$), mais ce n'est pas d'une justesse absolue !

Ayant dorénavant sa surface d'entrée (par le moteur) et la sortie (par la formule ci-dessus), il ne nous reste plus qu'à calculer la longueur par :

$$X_M = \frac{1}{m} \ln \left[\frac{S_M + \sqrt{S_M^2 - 4\alpha\beta}}{2\alpha} \right]$$

avec : $\alpha = S_0 \left[\frac{1+T}{2} \right]$;

$$\beta = S_0 \left[\frac{1-T}{2} \right]$$

(Cette formule n'est autre que l'expansion remise dans l'autre sens en fonction de S).

X_M est évidemment approximatif. Si nous trouvons $X_M = 79,84 \text{ cm}$, autant prendre $X_M = 80 \text{ cm}$ et réévaluer m avec précision. Si, en pratique, les valeurs absolues de X_M ou m sont floues, il faut les fixer d'une manière précise car $S(x)$ DOIT suivre une loi d'expansion bien définie !

Voilà pour cette partie. C'est, en fait, la plus simple que tous ceux qui ont voulu toucher de près ou de loin aux pavillons ont déjà abordé. Pourtant, ces calculs ne représentent pas grand chose par rapport à ce qui nous attend... Appliquons-les tout de même à notre exemple.

Notre pavillon

Nos données initiales sont :

- Utilisation du moteur JBL 2440 (2").

- Fréquence de coupure 280-300 Hz environ (utilisation 280-1 kHz).

Les dimensions du 2440 sont indiquées fig. 13.

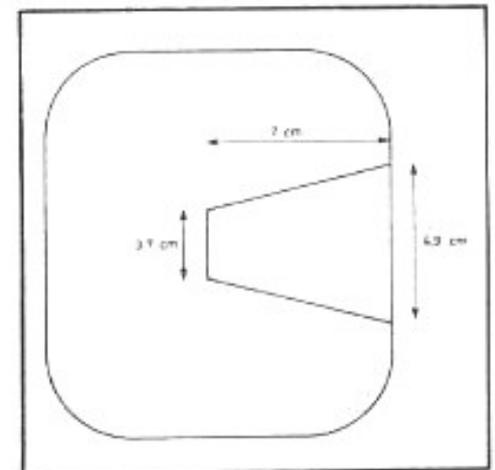


Fig. 13

Notons l'importance de mesurer soi-même : la sortie fait 4,9 cm et non 2" (5,08 cm) !

De là,

$$S_0 = \left(\frac{4,9}{2} \right)^2 \pi$$

surface de gorge (cm^2).

Le coefficient T sera choisi le plus avantageux possible dans le bas, c'est-à-dire à $T = \frac{1}{\sqrt{2}}$. Pour une utilisation large bande médium, autant prendre $T=1$, pavillon exponentiel.

La fréquence de coupure utilisée dans les calculs est choisie inférieure à celle désirée. Ceci n'a pour but que de faire travailler le pavillon dans la zone où l'impédance acoustique est moins tourmentée. En général, une fréquence moitié est adoptée, mais ici nous pouvons tabler sur $F_c = 180$ Hz pour une utilisation à 300 Hz. Le type hyperbolique peut, à notre avantage, réduire un peu la coupure basse. Attention quand même à ne pas exagérer !

Pour $F_c = 180$ Hz,

$$D_{\min} = \frac{\lambda_{\max}}{3} = \frac{1}{3} \frac{330}{180} 10^2 \text{ cm} \\ = 61,1 \text{ cm}$$

(vitesse du son prise à 330 m.s⁻¹).

Un cercle de diamètre 61,1 cm correspond à peu près à un carré de 54x54 cm. Notre système ayant une largeur de 50 cm, notre choix se portera sur une embouchure de 50x50 cm, soit $S_M = 2500 \text{ cm}^2$.

On pourra me reprocher le peu de précision que je porte sur les calculs mais couper les hertz en

quatre ne sert à rien. Il faut en fait fixer des valeurs approximatives d'une manière précise !

Le coefficient m, dépendant de la fréquence de coupure, sera :

$$m \leq \frac{12,5 F_c}{v}$$

soit

$$m \leq \frac{12,5 \cdot 180}{330 \cdot 10^2} = 6,8181 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$$

La valeur maximale de m est celle qui nous intéresse car elle correspond au pavillon le plus court. Il ne nous reste plus qu'à calculer X_M , longueur totale :

$$X_M = \frac{1}{m} \ln \left[\frac{S_M + \sqrt{S_M^2 - 4\alpha\beta}}{2\alpha} \right]$$

$$\text{avec : } \alpha = S_0 \left[\frac{1 + \sqrt{2}}{2\sqrt{2}} \right];$$

$$\beta = S_0 \left[\frac{\sqrt{2} - 1}{2\sqrt{2}} \right]$$

soit $X_M \approx 73,98$ cm, disons 75 cm.

m (précisément) vaudra :

$$m = \frac{1}{X_M} \ln \left[\frac{S_M + \sqrt{S_M^2 - 4\alpha\beta}}{2\alpha} \right] \\ = 6,72731 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$$

Ces résultats, considérés comme définitifs, sont résumés dans ce tableau : tableau d.

Les profils Problèmes

Tous nos calculs précédents ne nous fournissent que des surfaces. A priori, la forme du pavillon peut être n'importe quoi, sous réserve qu'il suive la loi d'expansion. Il est, en général, plus simple de construire des formes rectangulaires, surtout si les dimensions sont importantes. Les versions circulaires nécessitent un tour pas forcément facile à trouver et, si elles sont repliées, la fabrication devient inextricable.

Concevoir des profils (côtés) corrects demande pas mal de recherches pour obtenir une forme régulière, simple à calculer et qui facilite la construction. Prenons par exemple ce type de profil souvent rencontré [fig. 14].

W (largeur) et H (hauteur) sont les demi-tailles des parois. On a toujours $S(x) = 4 W(x) H(x)$.

Cet exemple se rencontre dans certains pavillons sectoriels pour une cellule donnée. Tout ceci ne semble causer aucun problème, mais...

Résumons nos contraintes :

- Entrée circulaire à respecter (à cause du moteur).

- Jonction moteur-pavillon la meilleure possible.

S_0	$\left(\frac{4,9}{2}\right)^2 \pi \approx 18,8574$	cm ²	Surface de gorge
S_M	2500	cm ²	Surface d'embouchure
X_M	75	cm	Longueur totale
m	$6,72731 \cdot 10^{-2}$	cm ⁻¹	Coefficient d'expansion
T	$\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,7071$	-	Coefficient de forme
R_0	$\frac{4,9}{2} = 2,85$	cm	Rayon d'entrée
S(x)	$\frac{S_0}{2\sqrt{2}} \left[(1 + \sqrt{2})e^{mx} + (\sqrt{2} - 1)e^{-mx} \right]$	cm ²	Formule d'expansion à $T = \frac{1}{\sqrt{2}}$ ch et sh remplacés.

Tableau d

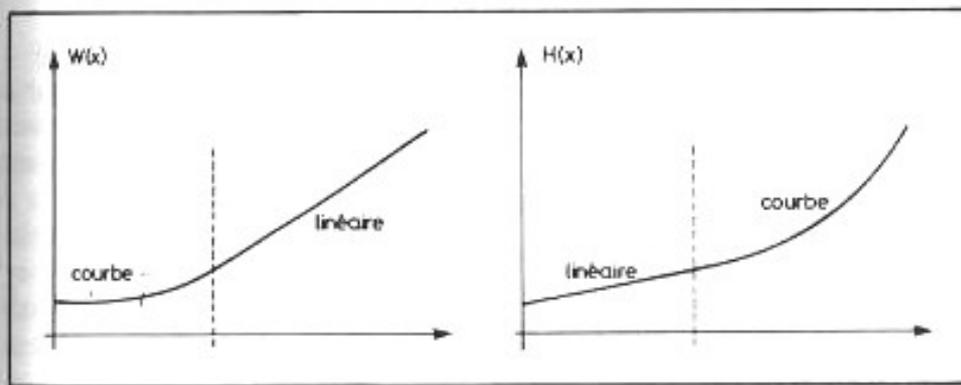


Fig. 14

- Ruptures de changements de profil, s'ils existent, à éviter.

- Rapport W/H idéalement linéaire ou le moins perturbé possible (voir [2] page 181).

Cela fait beaucoup de choses ! Essayons de les analyser séparément, sachant qu'elles peuvent engendrer des problèmes simultanés.

Commençons par le plus gros problème : l'entrée circulaire. Si la construction à base de parois droites (en bois ou autre) semble être le cas courant, elle ne permet pas les sections circulaires. Voici ce qu'il ne faut pas faire [fig. 15].

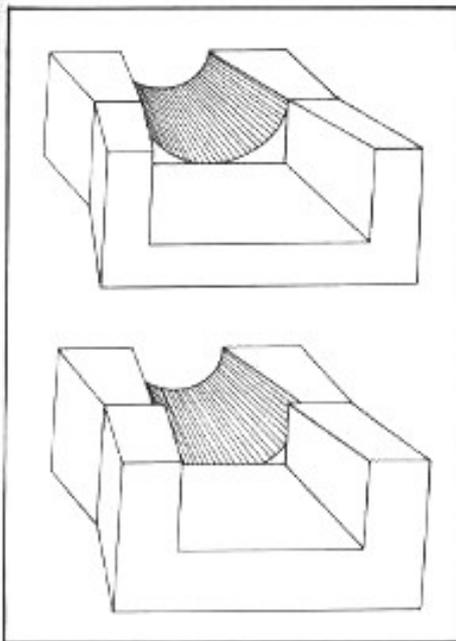


Fig. 15

D'un côté, nous assistons à une superbe rupture de forme et un non-respect de l'expansion et de l'autre un obstacle au niveau du moteur bien que la section carrée de gorge respecte la contrainte de

surface.

La solution serait un passage graduel entre section ronde à rectangulaire, comme ceci [fig. 16].

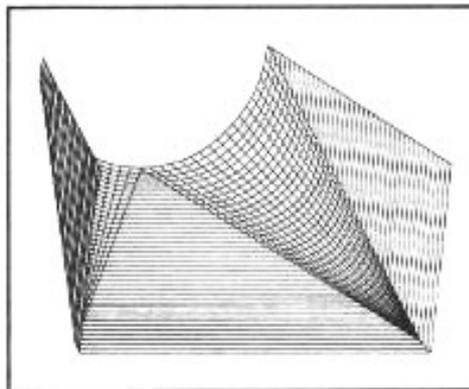


Fig. 16

Comme la surface du carré de côté égal au diamètre du moteur est plus grande que S_0 , nous pouvons ajouter de la matière ou arrondir les angles et récupérer la bonne surface. Ce passage, qui doit être suffisamment long, nécessite un usinage plus complexe et la création d'un profil secondaire différent du profil théorique que nous aurions choisi. A ce profil secondaire correspond une surface secondaire $S'(x)$, telle que :

- $S'(0) = D_0^2$ (D_0 étant le diamètre de gorge).

- $S'(x_j) = S(x_j)$ où x_j est l'abscisse de jonction entre les deux profils.

$S'(x)$ a pour propriété principale d'être supérieure à $S(x)$ jusqu'en x_j . Voyons comment cela se présente pour $x < x_j$ [fig. 17].

$W'(x)$ et $H'(x)$ sont ces profils secondaires avec

$$S'(x) = 4W'(x)H'(x)$$

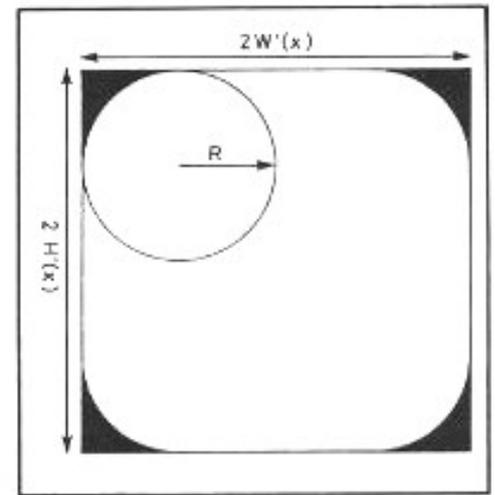


Fig. 17

L'ajout de matière, défini par le rayon R, est :

$$\Delta S = S' - S \text{ (partie noire).}$$

Le rayon R de correction est alors donné par :

$$R = \sqrt{\frac{S'(x) - S(x)}{4 - \pi}}$$

Mais le rajout de ce nouveau profil, s'il enlève le problème de rupture de forme au niveau du moteur, ajoute une contrainte de rupture supplémentaire en x_j . Heureusement, ce problème peut être résolu assez simplement par un bon choix de $W'(x)$ et $H'(x)$. Mais alors, quelle(s) fonction(s) conviendrait ?

A priori, n'importe quoi, pour peu que l'on puisse corriger par la suite (c'est-à-dire que l'on peut calculer R). Mais attention ! C'est ici que vient jouer la propriété spéciale des fonctions hyperboliques appliquées aux pavillons (voir chapitre 1). Nous situant dans la gorge (avant x_j), $S(x)$ varie lentement (si x_j est suffisamment court). Si nous choisissons une fonction $W'(x)$ (ou $H'(x)$) n'importe comment, voici ce qui risque d'arriver [fig. 18].

R est supérieur à $H'(x)$ dans notre cas. Ceci se passe si $W'(x)$ (ou $H'(x)$) est trop rapide. Le rayon de correction sera tel que l'on assiste à un rétrécissement sur une dimension. Le pavillon aurait une forme comme ceci [fig. 19].

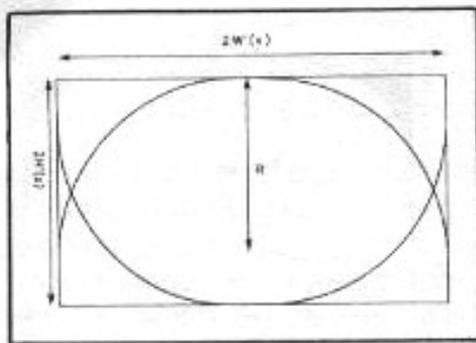


Fig. 18

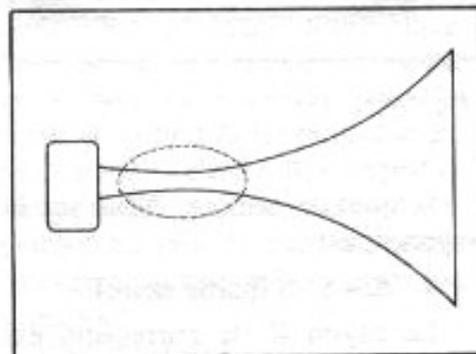


Fig. 19

Cette sorte de cavité peut être voulue, mais nous, nous n'en voulons pas !

Résumons les contraintes de $W'(x)$ et $H'(x)$ [fig. 20].

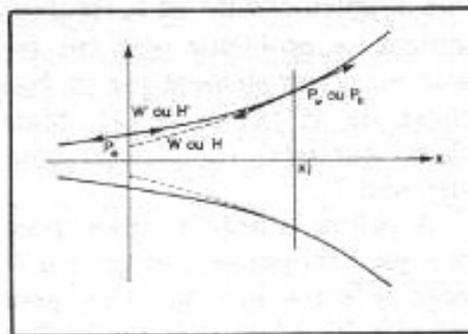


Fig. 20

- Pas de rupture au niveau du moteur.

- Pas de rupture en x_j .

En toute rigueur, $W'(x)$ et $H'(x)$ doivent vérifier :

$$\left. \begin{aligned} W'(0) = H'(0) = R_0 \\ \left(\frac{\partial W'}{\partial x} \right)_{x=0} = \left(\frac{\partial H'}{\partial x} \right)_{x=0} = P_m \end{aligned} \right\} 1$$

$$\left. \begin{aligned} W'(x_j) = W(x_j) \end{aligned} \right\} 2$$

$$\left. \begin{aligned} H'(x_j) = H(x_j) \\ \left(\frac{\partial W'}{\partial x} \right)_{x=x_j} = \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)_{x=x_j} = P_w \\ \left(\frac{\partial H'}{\partial x} \right)_{x=x_j} = \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)_{x=x_j} = P_h \end{aligned} \right\} \begin{matrix} 2 \\ 3 \end{matrix}$$

W et H, s'ils sont choisis différents (section rectangulaire), auront des profils associés W' et H' qui doivent vérifier chacun 4 équations. La fonction la plus simple serait un polynôme de degré 3 sous la forme :

$$\begin{aligned} W'(x) &= ax^3 + bx^2 + cx + d \\ H'(x) &= a'x^3 + b'x^2 + c'x + d' \end{aligned}$$

avec les coefficients valant :

$$a = \frac{P_w - P_m - 2bx_j}{3x_j^2}$$

$$b = \frac{3W(w_j) - P_w x_j - 2P_m x_j - 3R_0}{x_j^2}$$

$$c = P_m$$

$$d = R_0$$

et

$$a' = \frac{P_H - P_m - 2b'x_j}{3x_j^2}$$

$$b' = \frac{3H(x_j) - P_H x_j - 2P_m x_j - 3R_0}{x_j^2}$$

$$c' = P_m$$

$$d' = R_0$$

Ceci fonctionne correctement si l'on choisit bien x_j . Il faut se méfier de ces polynômes qui peuvent changer de cavité entre 0 et x_j . Concrètement, le profil ne doit pas être de ce type [fig. 21].

Ceci peut se détecter si $\frac{\partial^2 W'}{\partial x^2}$

(ou $\frac{\partial^2 H'}{\partial x^2}$) s'annule entre 0 et x_j ,

c'est-à-dire que le point d'inflexion

1 Continuité en valeur 0.
Pente donnée selon le moteur.

2 Continuité en valeur en x_j .

3 Continuité en pente en x_j .

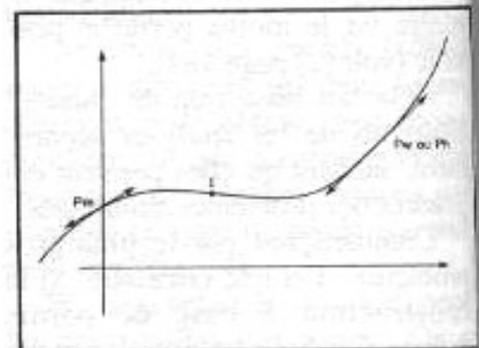


Fig. 21

I est là où il ne faut pas. Comme (par exemple) $\frac{\partial^2 W'}{\partial x^2} = 6ax + 2b$, nous pouvons facilement vérifier !

Ceci restreint la plage de validité de x_j mais, en tâtonnant un peu, il n'y a pas de problème. Dans le cas où le pavillon doit être tordu (comme dans notre exemple), vouloir conserver absolument la continuité en 0 est illusoire car les pentes sont asymétriques sur deux côtés [fig. 22].

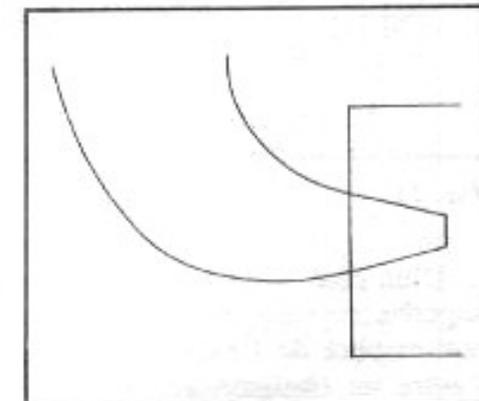


Fig. 22

Ici, et uniquement parce que nous ne pouvons faire autrement, nous pouvons délaissier cette condition et ramener le profil secondaire à un polynôme du 2^{ème} degré et laisser librement le profil en 0. En variant x_j , nous ajusterons cette partie pour obtenir le meilleur raccord possible.

Application à notre pavillon

Dans le souci de simplifier la conception, la section a été choisie carrée. Mais garder un cas rectangulaire ne change rien au principe ! Dorénavant, $W(x)=H(x)=F(x)$, profil égal à $\frac{1}{2}\sqrt{s(x)}$ par définition. D'autre part, vu que le pavillon sera courbé, le profil secondaire $F'(x)=W'(x)=H'(x)$ ne subira plus directement les contraintes de gorge. En résumé, voici comment cela se présente [fig. 23].

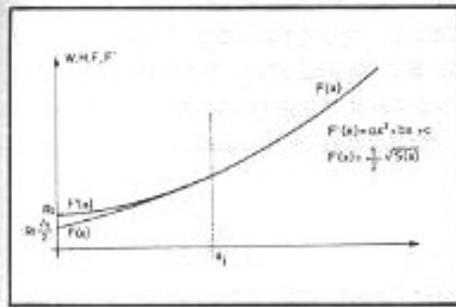


Fig. 23

La valeur x_j est arbitraire. Les coefficients a , b et c sont donnés par :

$$a = \frac{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_{x=x_j} x_j - \frac{1}{2}\sqrt{s(x_j)} + c}{x_j^2}$$

$$b = \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_{x=x_j} - 2ax_j$$

$$c = R_0$$

Les applications numériques nous fournissent :

- $x_j=20$ cm (valeur totalement arbitraire).

$$\frac{\partial F}{\partial x} = K \left[\frac{(1+\sqrt{2})e^{mx} + (1-\sqrt{2})e^{-mx}}{\sqrt{(1+\sqrt{2})e^{mx} + (\sqrt{2}-1)e^{-mx}}} \right]$$

$$\text{avec } K = \frac{m}{4} \sqrt{\frac{S_0}{2\sqrt{2}}}$$

(Gardons un souvenir ému de nos dérivées d'antan.)

$$a = 2,73724 \cdot 10^{-3}$$

$$b = 2,0439 \cdot 10^{-2}$$

$$c = 2,45$$

Soit :

$$F(x) = 2,73724 \cdot 10^{-3} x^2 +$$

$$2,0439 \cdot 10^{-2} x + 2,45 \text{ cm}$$

Nous pouvons vérifier qu'il s'agit bien d'une parabole à concavité tournée vers le haut ($a>0$) toujours positive ($b^2-4ac<0$).

Regardons de plus près ce qui se passe au niveau de la jonction moteur-pavillon. Les pentes p_m niveau moteur et p'_m niveau pavillon ne sont pas égales (nous aurions alors une chance phénoménale !).

- D'un côté :

$$p_m = \frac{4,9/2 - 3,7/2}{7} = 8,5714 \cdot 10^{-2}$$

- Au pavillon :

$$p'_m = \left(\frac{\partial F(x)}{\partial x}\right)_{x=0} = b = 2,0439 \cdot 10^{-2}$$

Vu la faiblesse de ces valeurs, la rupture est douce. Elle pourrait être améliorée par un choix plus judicieux de x_j . Si l'on visualise l'erreur $\epsilon(x_j) = p_m - p'_m$, voici ce que cela fournit globalement [fig. 24].

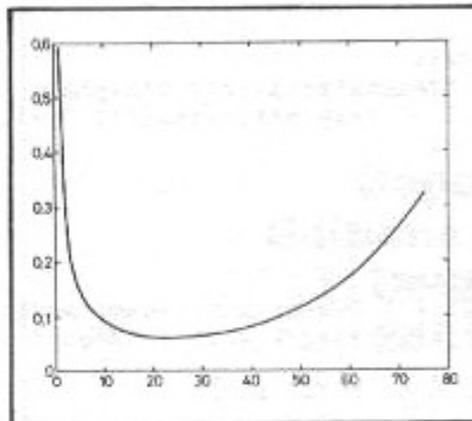


Fig. 24

La plage de valeurs minimales se situe entre 15 et 35 cm sans va-

riation notable. Notre valeur $x_j=20$ cm est un choix correct. Trop petite, l'établissement vers une section carrée serait trop abrupt. Trop longue, elle nécessiterait un usinage d'une pièce un peu trop important.

Autre point important : il faut observer si la position du minimum du profil $F'(x)$ (la base de la parabole) n'est pas entre 0 et x_j . Si c'est le cas, voici ce qui se passe [fig. 25].

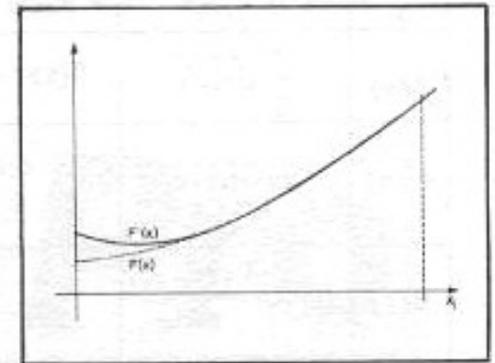


Fig. 25

Nous aurons encore apparition d'un phénomène de cavité. Le minimum vaut $x_{\min i} = \frac{-b}{2a}$. Si nous représentons $x_{\min i}$ en fonction de x_j [fig. 26].

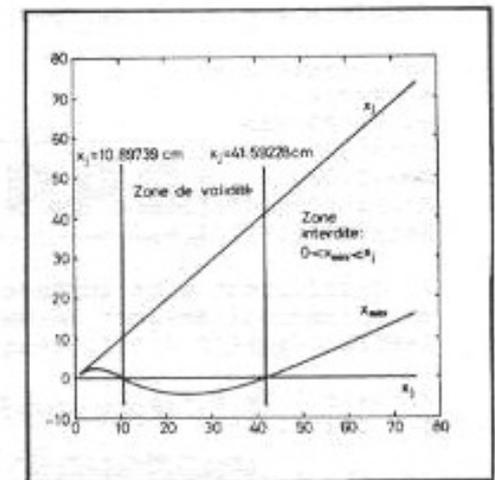


Fig. 26

Ceci peut être étendu au cas du degré 3, si nous pouvons imposer la contrainte de continuité au niveau du moteur. C'est plus complexe car nous avons deux extremums et un point d'inflexion.

Comme nous avons pu le remarquer, la solution du 2^{ème} degré n'est pas si mauvaise et peut être appliquée.

Il ne nous reste plus qu'à évaluer $R(x)$, rayon de correction qui fournira à la fin une surface égale à $S(x)$ en tout point entre 0 et x_j . Précédemment, nous avons vu que

$$R = \sqrt{\frac{S'(x) - S(x)}{4 - \pi}}. \text{ Visuellement,}$$

$R(x)$ ressemble à ceci [fig. 27].

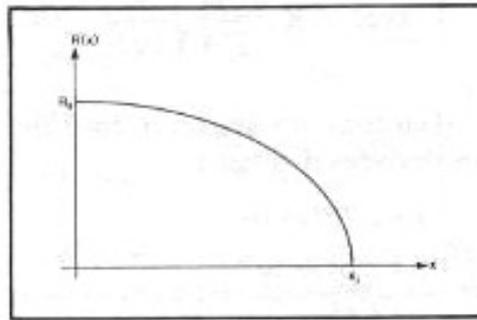


Fig. 27

Voilà ! Tout est évalué pour notre pavillon (qui est encore droit). Notons la cerise sur le gâteau : le rapport $\frac{W}{H}$ est ici on ne peut plus linéaire : il est constant et égal à 1 !

Résumons finalement nos résultats dans le tableau C

Et voici le fragment de programme qui évalue à peu près toutes les données (a, b, c, ε, m...).

x_j	20	-	Abscisse de jonction $F(x)-F'(x)$	cm
$F(x)$	$\frac{1}{2} \sqrt{s(x)}$	$S(x) = \frac{S_0}{2\sqrt{2}} \left[(1 + \sqrt{2})e^{mx} + (\sqrt{2} - 1)e^{-mx} \right]$	Profil principal	cm
$F'(x)$	ax^2+bx+c	$a \approx 2.73724 \cdot 10^{-3}$ $b \approx 2.0439 \cdot 10^{-2}$ $c \approx 2.45$	Profil secondaire	cm
$R(x)$	$R = \sqrt{\frac{S'(x) - S(x)}{4 - \pi}}$	$S'(x) = 4F'^2(x)$	Rayon de correction	cm

Tableau c

```
#include <math.h>
#define PI 3.141592654

void Calcule(double Xj)
{
    double m, a, b, c, R, F, dF, Fp, S, T, Alpha, Beta, R0, S0, Xm, Sm;

    T=1.0/sqrt(2.0);
    R0=4.9/2.0;
    S0=R0*R0*PI;
    Sm=50.0*50.0;
    Xm=75.0;
    Alpha=S0*(1+T)/2.0;
    Beta=S0*(1-T)/2.0;

    // Coefficient m et surface s(Xj)
    m=1.0/Xm*log((Sm+sqrt(Sm*Sm-4.0*Alpha*Beta))/(2.0*Alpha));
    S=S0/2.0/sqrt(2.0)*((1.0+sqrt(2.0))*exp(m*Xj)+(sqrt(2.0)-1.0)*exp(-m*Xj));

    // calcul de F(xj)
    F=0.5*sqrt(S);

    // calcul de dF/dx en Xj
    dF=m/4.0*sqrt(S0/(2.0*sqrt(2.0)));
    dF=dF*((1.0+sqrt(2.0))*exp(m*Xj)+(1.0-sqrt(2.0))*exp(-m*Xj));
    dF=dF/sqrt((1.0+sqrt(2.0))*exp(m*Xj)+(sqrt(2.0)-1.0)*exp(-m*Xj));

    // calcul des coefficients a,b,c de F'(x) en Xj
    c=R0;
    a=(dF*Xj-F+c)/(Xj*Xj);
    b=dF-2.0*a*Xj;
    // tout est prêt pour être utilisé...
}
```

Les valeurs extrêmes des x_{mini} [fig. 26] sont obtenues par essais successifs. Attention ! Le résultat n'est pas défini pour $x_j=0$! Attention aussi à l'évaluation des exponentielles sur des valeurs trop grandes. Une calculatrice allant jusqu'à 10^{99} ne peut évaluer plus de e^{230} environ. Le type *double*, valide jusqu'à 10^{307} peut aller à e^{707} .

Conclusion

Ouf ! Nous voici prêts à concevoir le pavillon (encore droit) de nos rêves. Les applications mathématiques ne sont pas encore trop compactes mais ce n'est que partie remise ! Nous verrons dans la deuxième partie comment tordre tout ceci soi-même avant que quelqu'un d'autre ne le fasse (autour du cou de préférence), afin de ne pas susciter des hurlements de la part de son entourage. Nous étudierons aussi les méthodes permettant de savoir ce qu'il faut découper à plat pour les portions gauches avant de se lancer dans la grande aventure (qui a déjà commencé d'ailleurs) !

Bibliographie

[1] "Techniques des haut-parleurs et enceintes acoustiques", **Pierre Loyez**, Editions Fréquences.

[2] "Les haut-parleurs" (3^{ème} édition), **Jean Hiraga**, Editions Fréquences.

[3] "Electro-Acoustique", **M. Rossi**, Dunod, 1986.

Tables et formules de mathématiques, **Murray R. Spiegel**. Série Shaum.

**Page non
disponible**

MONTAGES À TUBES

LA TRIODE 845 MONTAGES MONOTRIODES CLASSE A

Jean Hiraga

A

la fin des années 60 furent introduits sur le marché les premiers amplificateurs transistorisés. Au début, ils étaient peu performants mais ils s'améliorèrent rapidement. En l'espace de quelques années seulement, ils devinrent les concurrents redoutables des meilleurs montages à tubes. Pour mieux creuser l'écart entre les technologies tubes et transistors, on y ajouta les critères de puissance élevée, de prix par watt, de bande passante, de distorsion, d'encombrement et de durée de vie. La conséquence est bien connue : on abandonna peu à peu les montages amplificateurs à tubes en faveur des montages transistorisés. Le Japon suivit les mêmes évolutions technologiques. Dans ce pays, un bon nombre d'audiophiles continuèrent toutefois de s'intéresser de très près aux tubes, car ils étaient persuadés que l'on n'était pas encore parvenu à en extraire toute la quintessence dans les applications haute fidélité. Ils n'étaient pas les seuls à le croire.

Des Américains comme Futterman, des Japonais comme Shimada, Otobé ou Takésué développèrent des montages à tubes sans transformateur de sortie. Sur ces montages qui étaient déjà capables d'atteindre plus de 500 kHz de bande passante, on supprima par la suite le condensateur de liaison en sortie au moyen d'une alimentation

symétrique. Ce type de circuit push-pull baptisé OTL-OCL, c'est-à-dire sans transformateur de sortie ni condensateur de liaison, est la base de tous les montages amplificateurs transistorisés modernes. A partir des années 60, un nombre sans cesse croissant d'amateurs japonais commença à délaisser les tubes tétrodes et pentodes de puissance et participa à la

renaissance de la triode de puissance à chauffage direct dans les applications haute-fidélité. Des tiroirs, des greniers, des anciens stocks japonais, des surplus américains et européens surgirent différentes triodes basse fréquence dont la fabrication avait parfois été abandonnée depuis longtemps. Les stocks limités en triodes anciennes du genre 10, 12A, 45, 50, 2A3, WE 300B,

l'inégalité des prix dans ce domaine eurent pour conséquence de ne mettre ces étonnantes triodes qu'à la portée des amateurs, les industriels préférant se rabattre sur des pentodes et tétrodes courantes comme les EL34, 6L6GC, KT 66, KT 88 et autres 6550. En 1977, la lancée en France de la revue *L'Audiophile* s'accompagna d'articles de l'auteur sur ces montages équipés principalement de tubes WE 300B, 2A3, VT 52.

Quantité ou qualité ?

Les triodes à chauffage direct utilisées pour ces applications haute-fidélité ont une valeur de dissipation plaque maximum comprise généralement entre 10 et 40 W. A partir d'un montage à lampe de sortie unique, le rendement n'est pas très élevé et il faut prendre en compte une marge de sécurité par rapport à la valeur de dissipation plaque maximum. Prenons le cas de la WE 300B dont la valeur P_{max} est de 40 watts. En prenant une marge de sécurité de 8 watts, la dissipation plaque choisie passe à 32 watts. Le rendement énergétique se situant dans une plage comprise entre 20 et 35%, on obtient une puissance de sortie comprise entre 6 et 14 watts que l'on retrouve sur les réalisations courantes équipées de ce tube. Le taux de distorsion harmonique produit par les triodes "audio" à chauffage direct est relativement faible. Il se situe entre 2 et 5% seulement avec une prédominance d'harmonique 2, tandis qu'avec une tétrode du genre 6550, on obtient entre 9 et 10% avec une forte prédominance d'harmonique 3, nettement plus désagréable à l'écoute. Les montages amplificateurs à triode de sortie unique peuvent en conséquence être réalisés soit sans contre-réaction, soit avec un faible taux de contre-réaction car on obtient aisément des résultats d'une qualité sonore fascinante en regard de la simplicité du montage. Sur le plan des mesures, un montage à

lampe de sortie unique peu ou non contre-réactionné ne peut donc aller très loin. Les performances de bande passante niveau/fréquence, de distorsion et surtout de puissance sont de ce fait très inférieures à celles des électroniques transistorisées. En haute-fidélité, la qualité d'écoute primant toujours sur le reste, ces montages sont devenus de plus en plus populaires. La quinzaine d'années qui s'est écoulée depuis prouve qu'il ne s'agissait pas d'une mode passagère car ces montages sont désormais appréciés non seulement au Japon ou en France, mais dans d'autres pays comme l'Allemagne, l'Italie, la Grande-Bretagne, les Etats Unis ou le Canada. Ils ont démontré, au même titre que la vraie classe A transistorisée (ou à tubes), l'intérêt du "watt de qualité" en haute-fidélité. On pourrait par analogie avec la photographie, comparer les résultats obtenus à partir d'une optique à très haute définition et à très faible distorsion, genre formule Gauss à 8 lentilles par rapport à ceux d'une optique simple à 4 lentilles, genre Zeiss Tessar. En laboratoire, la première serait supérieure à la seconde lors des mesures de distorsion géométrique ou de "piqué". En comparant à partir des mêmes optiques des photographies de paysages, de portraits ou de nus, la petite optique à 4 lentilles Tessar serait par contre indiscutablement supérieure à la première en matière de "transparence", de pureté, de saturation des couleurs, de qualité des dégradés de teintes et de luminosité. La mesure est un point de repère utile mais la finalité d'un amplificateur haute-fidélité n'est pas un usage exclusif en laboratoire. Pour ce dernier, il existe des appareils spécifiques, comme les amplificateurs de mesure Brüel et Kjaer 2706, 2707 ou 2708 qui sont inconnus des mélomanes. Soulignons encore le fait que sur les montages transistorisés, haute puissance et

faible taux de distorsion harmonique sont toujours obtenus en associant de nombreux transistors, un étage de sortie push-pull ou multiple-push-pull et une contre-réaction à taux élevé. Or, le plus grand défaut du montage push-pull est justement de ne pouvoir supprimer par principe que la distorsion harmonique d'ordre pair, peu gênante à l'écoute ce qui laisse émerger la distorsion par harmoniques d'ordre impair, celle qui est justement responsable à l'écoute de phénomènes de dureté et "d'anti-musicalité" (ils sont liés à des phénomènes de dissonance entre des fondamentales et des harmoniques de rang donné). Pour en revenir aux petits amplificateurs à triode de sortie unique, la puissance de sortie réduite limite toutefois très sérieusement leur champ d'applications.

Pour une poignée de watts en plus

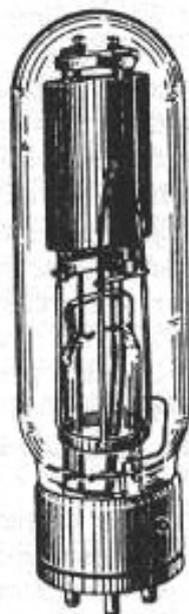
Le montage amplificateur à triode de sortie unique limite sérieusement la puissance de sortie. Avec la WE 205D conçue vers 1918 par la Western Electric on obtient à partir d'un chauffage filament 4,5 V/1,6 A et d'une tension plaque de 350 V une puissance de sortie de l'ordre de 0,87 W seulement. Avec la WE 252A, elle passe à 6,2 W. La WE 300B, très en vogue actuellement car disponible en version chinoise à un prix beaucoup plus attractif que la version d'origine, fait mieux, soit 7,5 W pour 350 V de tension plaque (contre 450 V pour la WE 252A). Au-delà de cette puissance, les choses se compliquent car la tension plaque augmente très vite et le courant grille, quasi-inexistant pour des valeurs conventionnelles de tension plaque et de polarisation négative de grille (450 V et -60 V environ) commence à naître (il devient gênant, même s'il se chiffre en microampères). La WE 242C, conçue pour concurrencer la 211/VT4C fabriquée par la General

Electric permet d'obtenir 22 W en sortie à partir d'une tension plaque de 1 250 V. Aux U.S.A., la triode 845 dont il va être question dans cet article fut réalisée par RCA, puis sous licence par les firmes Delco Radio Division (DR-845), General Electric (GL-845), Taylor (T-845), United Electronics (UE-845 et UE-945), Westinghouse (WL-845), puis, plus récemment, par Cetron CE-845). La dernière version connue, d'origine chinoise est proposée sous plusieurs marques comme Golden Dragon, Sungrill ou Silvertone. La première triode 845 RCA eut pour concurrente une version très proche issue de la Western Electric, la redoutable WE-284D. On trouvera ses caractéristiques principales sur la figure 1. Cette triode obtint dans les applications du cinéma parlant (série d'amplificateurs dérivés des WE 43A) un tel succès qu'elle fut baptisée "Voix du Théâtre". C'est un nom qui fut repris plus tard par Altec pour la célèbre gamme d'enceintes professionnelles. Précisons que les WE 242C et WE 284D de Western Electric se présentent sous le même aspect extérieur, la seule variante se situant au niveau du pas de grille (ils se différencient des séries General Electric, RCA ou Cetron par une embase en bronze avec marquage chimique noir sur celle-ci ainsi que par des plaques non pas en carbone, mais en nickel recouvert d'un traitement thermique qui leur donne un aspect extérieur gris mat). Ces tubes ont été pendant longtemps réservés à un usage professionnel, ce qui explique qu'ils sont peu connus et quasi-introuvables de nos jours. Avec la WE 284D, on accède à une puissance de sortie de 40 watts pour une tension plaque de 1 250 V, soit une bonne dizaine de watts de plus qu'avec la 845 classique. C'est déjà mieux, à condition de disposer d'un signal d'attaque de 209 V, soit près de 300 V (!) pour un montage contre-

IMPORTANT—READ CAREFULLY

Western Electric

284D Vacuum Tube



CLASSIFICATION

The 284D vacuum tube is a three element tube intended primarily for use as an audio-frequency power amplifier or modulator. It replaces the 284A and 284B vacuum tubes.

GENERAL RATING

Filament Voltage	10.0 volts
Filament Current	3.25 amperes
Average Characteristics With	
Plate Potential of 1250	
Volts, Plate Current of	
64 Milliamperes and Filament Potential of 10 Volts, dc	
Amplification Factor	4.8
Plate Resistance	1900 ohms
Grid to Plate Transconductance	2500 micromhos

AVERAGE DIRECT INTERELECTRODE

CAPACITANCES	
Grid to Plate	8.3 $\mu\text{f.}$
Grid to Filament	6.0 $\mu\text{f.}$
Plate to Filament	5.6 $\mu\text{f.}$

MAXIMUM RATINGS

Maximum Direct Plate Voltage	1250 volts
Maximum Plate Current	150 milliamperes
Maximum Plate Dissipation	85 watts

MOUNTING

This vacuum tube employs a standard four prong base with bayonet pin, suitable for use in a Western Electric 145A, 148A or similar type socket.

In replacing the 284B tube with the 284D, the grid connection must be made to the proper socket terminal when it is not already part of the circuit wiring. The flexible grid lead for the 284B tube should be removed or insulated from all voltage supplies.

During the use and installation of this tube it should be subjected to the least possible vibration. It may be mounted in either a vertical or horizontal position, although the vertical position is preferable. If mounted in a horizontal position, the plane of the filament must be vertical. There should be a free circulation of air around the tube and no object should touch the glass bulb.

OPERATING CONDITIONS

Whenever possible, the filament should be lighted with alternating current and the plate and grid circuit returns should be connected to the center tap on the secondary of the filament transformer.

Conservative values of plate voltage and dissipation will increase the life of the tube. The filament is to be operated at the rated voltage measured at the filament terminals.

In the table below are shown a series of operating conditions.

TABLE

CLASS A OPERATION

	Plate Volts	Plate Current Milliamperes	Plate Dissipation Watts	Grid Bias Volts
Recommended	750	100	75	-104
Conditions	1000	80	80	-161
Maximum	1250	68	85	-218
Conditions				

1759852 1984992 PATENT 2019484 2141378 1673008

284D-7

PRINTED IN U.S.A.

Fig. 1 : Caractéristiques principales de la triode à chauffage direct Western Electric WE 284D. Commercialisée en 1937, c'est la version améliorée des triodes WE 284A et WE 284B.

réactionné conçu avec une petite marge de sécurité au niveau de l'étage driver.

Pour obtenir encore plus de puissance, entre 60 et 120 W par exemple, on peut monter en parallèle plusieurs tubes, toujours en étage de sortie "simple", comme sur les réalisations des firmes Audio Note ou Bel Canto. Mais il n'est guère possible de monter plus de quatre tubes en parallèle, car le courant de repos total devient trop important. Avec une seule triode 845, pour une tension plaque de 1 250 V et une polarisation grille de -209 V, le courant de repos est de 52 mA. En montant 4 triodes 845 en parallèle, le courant de repos total passerait à quelques 208 mA. Il ne faut jamais perdre de vue qu'il s'agit d'un montage simple étage avec passage unilatéral du courant continu dans l'enroulement primaire du transformateur de sortie. Il en résulte un effet de magnétisation des tôles que l'on minimise en aménageant un entrefer dans le circuit magnétique (on sépare généralement les parties "E" des parties "I" sur les structures baptisées "EI", à l'aide d'une feuille de carton bakérisé). Dans le cas d'une modulation à 100% ramenant provisoirement la polarisation grille à 0 V, le courant total atteindrait près de 1,6 A pour quatre 845 montées en parallèle. Les conséquences seraient une chute de tension dans l'enroulement primaire (due à sa résistance parasite série) ainsi qu'une chute sensible de la réponse aux fréquences graves. On peut illustrer ce phénomène en prenant un transformateur de sortie simple étage dont l'inductance primaire est de 25 H à 50 Hz comme aux fréquences supérieures pour un courant primaire de 200 mA. Sous un courant primaire de 1,6 A et à condition que l'enroulement puisse le supporter, l'inductance primaire pourra passer à 5 H seulement à 50 Hz, tandis que la valeur d'induc-

tance initiale de 25 H sera conservée au-dessus de 100 à 150 Hz. On minimise au mieux ce phénomène en surdimensionnant le circuit magnétique mais on devra s'attendre malgré tout à une chute de la réponse aux fréquences graves à pleine puissance. Pour donner un aperçu de la taille d'un transformateur de sortie 30 watts simple étage de qualité pour triode 845, ses dimensions atteignent facilement celles d'un transformateur push-pull calculé pour une puissance de 250 W environ. C'est dire combien le "watt de qualité" peut revenir cher dès l'instant où l'on recherche une puissance égale ou supérieure à 30 watts.

Il est possible de passer, toujours en configuration simple étage, à des puissances supérieures, mais ce n'est pas sans difficultés. Le tube anglais DA 250 fait partie des plus intéressants, car on obtient avec 2 500 V de tension plaque et

100 mA de courant de repos pour une polarisation grille de -134 V, une puissance voisine de 80 W "seulement". A partir d'un montage à triode de sortie unique, la puissance est à ce prix.

Parmi les versions américaines citons une version proche, la 212E (4212E chez STC en Grande-Bretagne) ou bien la version anglaise Ediswan ES275 (figure 2). Ces différents tubes peuvent encore travailler en milieu ventilé. Ils possèdent un diamètre compris entre 10 et 11 cm et une hauteur comprise entre 33 et 36 cm. Il va sans dire qu'au niveau de l'enroulement primaire du transformateur de sortie, la tension plaque, de 2 500 V au repos, varie dans une plage comprise entre 50 V environ (polarisation nulle) et près de 4 000 V (cut-off de grille) en fonction de la modulation, ce qui nécessite une fabrication particulièrement étudiée de

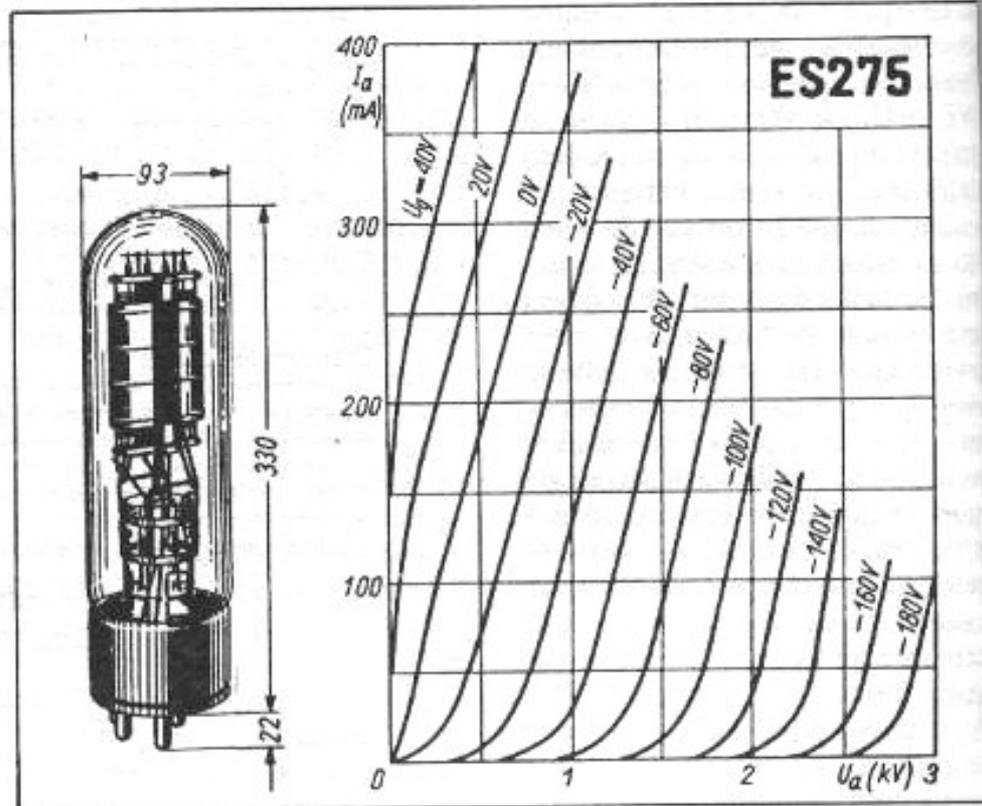


Fig. 2 : Triode à chauffage direct Ediswan ES275. La dissipation plaque atteint 275 W, ce qui permet d'obtenir quelque 80 W de puissance avec un seul tube. Cependant, le courant grille n'est pas nul, même pour une valeur de polarisation grille fortement négative (-80 V par exemple) et les tensions élevées en jeu rendent difficile la réalisation d'un transformateur de sortie très performant.

point de vue isolement. Cela va à l'encontre d'une faible perte d'insertion primaire-secondaire. Sur les meilleurs transformateurs de sortie elle peut se situer entre 0,25 et 1 dB, tandis que dans le cadre de l'utilisation que l'on vient de citer, elle serait nettement supérieure. L'intérêt majeur de ce type de montage pourrait de la sorte disparaître sous la contrainte d'un transformateur de sortie à très fort isolement électrique.

A la recherche des grandes puissances

Dans la gamme des tubes triodes proposés autrefois aux U.S.A. par la Western Electric, il existait d'autres versions encore plus puissantes. On obtenait avec la WE 363A (tension plaque 2 000 V, filament 10 V/10 A) près de 100 W en sortie. Avec la WE 228A (filament 21,5 V/41 A, tension plaque 6 000 V), on obtenait 228 W. Les records étaient détenus par les WE 343A et WE 220C, mais il fallait disposer d'une tension plaque de 12 500 V (!) et le filament était alimenté sous 21,5 V et un courant de 57 A! Dans ces deux derniers cas, la puissance atteignait respectivement 650 W et 760 W!! Ces chiffres et ces références nous révèlent que l'on était parfaitement capable de réaliser, dès les années 40, des amplificateurs basse fréquence à étage de sortie unique de très grande puissance. Ces détails d'ordre historique éviteront peut-être à des spécialistes de l'amplificateur à triode de sortie unique de parler "d'exploit du siècle" avec une trentaine de watts en sortie.

Haute tension et fiabilité des composants

Obtenir 30 watts dans cette configuration reste malgré tout un bel exploit. N'oublions pas que la fiabilité doit faire partie des critères principaux lors de la conception de

ce type d'amplificateur. De grandes marges de sécurité doivent être prévues au niveau de la tension d'isolement des composants. Ces marges concernent les transformateurs, les selfs de filtrage, les supports de tubes, les composants passifs. Elles concernent également les gaines d'isolement des fils de liaison utilisés pour le câblage. Le vieillissement, un échauffement excessif prolongé ou un fort degré d'hygrométrie de l'air peut les rendre vulnérables. Les circuits imprimés recouverts d'un vernis ou bien les supports de tubes sont, entre autres, sujets à des problèmes d'isolement pour les mêmes raisons. La chaleur émise par les tubes augmente les pertes diélectriques, ce qui se traduit par un échauffement de la matière isolante et une accentuation des pertes diélectriques. Au-delà d'un seuil donné, la matière isolante commence à se carboniser, la phase terminale étant l'amorçage. Les supports en stéatite sont excellents du point de vue isolement et résistance prolongée à la température, mais ils peuvent être poreux. Ils vont alors se comporter comme de vraies éponges absorbant l'humidité ou d'éventuelles projections d'huiles légèrement conductrices provenant d'aérosols dits "restaurateurs de contacts électriques" (leur utilisation est formellement déconseillée sur ces montages). Après un certain temps d'utilisation, ces composants pourront devenir prédisposés à l'amorçage ou aux fuites diélectriques. Un signal impulsionnel de forte amplitude peut se superposer à une tension continue élevée, de sorte qu'une tension résultante très élevée peut apparaître aux bornes d'une résistance ou d'un condensateur. Rappelons qu'elle peut même excéder largement la valeur de la haute tension en certains points du circuit. Avec une triode 845 alimentée sous une tension filament-plaque de 900 V par exemple, la tension plaque peut varier en fonc-

tion de la modulation entre une cinquantaine de volts et plus de 1 800 V. Il est impératif d'en tenir compte et de prendre toutes les précautions nécessaires.

Les résistances à couche de carbone peuvent produire des phénomènes d'amorçages intermittents. Celles de forte valeur ohmique à couche métallique ne supportent généralement pas plus de 250 V à leurs bornes. Sur ces résistances, la couche d'oxyde métallique est formée de spires très serrées nécessaires à l'obtention de la valeur ohmique correspondante (820 k Ω par exemple). Il peut de ce fait se produire un phénomène d'amorçage entre les spires au-delà de 300 ou 350 V. Ce phénomène est parfois sournois, car la panne franche peut faire place à du bruit de fond, à des crépitements, à des grésillements aléatoires qui rendent le composant en cause difficile à localiser. Lorsque des condensateurs électrochimiques sont montés en série avec, en parallèle sur ceux-ci, des résistances servant à l'équilibrage des tensions réparties, on peut estimer comme "sans risque" l'emploi de modèles dont la tension de service est par exemple de 480 V, soit 960 V pour un montage série sur une alimentation haute tension de valeur nominale 900 V. En fait, les risques sont tout de même présents : au moment de la mise sous tension et avant que le filament du tube de puissance atteigne sa température de "croisière", la consommation en courant est faible et la valeur de la haute tension peut excéder les 1 000 V, ne serait-ce que pendant les quelque 6 à 8 secondes après la mise en route. D'autre part, il faut savoir que sur un condensateur électrochimique, il n'est pas toujours possible de faire totalement confiance à la valeur de tension de service indiquée par le constructeur. En plus, un condensateur électrochimique neuf comme usagé non utilisé pendant plusieurs mois, voire plusieurs années, peut

se dessécher (électrolyte), "s'auto-détériorer", changer de valeur ou devenir incapable de supporter la tension de service indiquée. Il peut en résulter des surprises "éclatantes", car les modèles anciens ne sont pas forcément équipés d'une valve de sécurité.

Un autre phénomène à retenir est que la tension de service est, en plus, largement dépendante de la température. Sous 20°C, le condensateur pourra effectivement supporter 480 V en service permanent, mais un fonctionnement sous une température ambiante plus élevée comme 60°C pourra abaisser la valeur de tension de service vraiment fiable à 350 V seulement, voire moins. A ce niveau, la règle d'or est de ne jamais disposer les condensateurs de filtrage trop près des valves de redressement ou des tubes de puissance et d'étudier l'aération, la dissipation de la chaleur au niveau du châssis :

- châssis aéré, muni de perforations autour des tubes.
- fond perforé ou grillagé.
- espace aménagé entre les supports de tubes et le châssis pour faciliter l'aération des tubes de puissance ou de valves de redressement.
- mise en place de l'appareil dans un milieu bien ventilé.

Ces précautions s'appliquent aussi aux transformateurs d'alimentation et aux selfs de filtrage, car la tension de claquage dépend du type de fil émaillé utilisé pour les bobinages. Si l'émail est une base classique à combinaison polyamide-polyuréthane, les pertes diélectriques et les risques d'amorçage augmentent rapidement au-dessus de 90 à 110°C. Plus rares sont les modèles de transformateurs qui utilisent du fil de cuivre recouvert d'un vernis résistant mieux à haute température, genre polyesterimide modifié THEIC (isocyanurate) ou polyimide (ce dernier existe aussi sous l'appellation commerciale Nomex) : ils résistent à des températures supérieures à 180°C, mais ils sont vraiment très

difficiles à dénuder à l'aide de solvants traditionnels non nuisibles à l'environnement. Le transformateur d'alimentation comme la self de filtrage doivent être correctement dimensionnés. Ils ne doivent pas subir d'échauffement excessif par dissipation thermique propre à leur utilisation ou bien en raison de la proximité immédiate des valves de redressement ou des tubes de puissance. A remarquer qu'à consommation égale en VA, des transformateurs d'alimentation "identiques", mais d'origine et de technologie différentes, n'atteignent pas forcément la même température de service. Ces différences peuvent provenir de la valeur d'induction choisie par le constructeur, de la qualité des tôles (M6X par exemple), de la précision de fabrication du bobinage et d'imprégnation et même de la qualité de découpe des tôles. Un mauvais rendement s'accompagne généralement d'un échauffement excessif, de vibrations parasites audibles et d'un rayonnement magnétique parasite difficile à éliminer. Un capot de blindage en métal ferro-magnétique coiffant le transformateur pourra réduire le rayonnement magnétique parasite et, en contrepartie, amplifier les vibrations parasites du transformateur par couplage magnétique. Ce phénomène se remarque souvent au moment de la mise sous tension de l'appareil. Sur un châssis de dimensions conventionnelles, ce rayonnement magnétique parasite peut s'étendre jusqu'à l'étage d'entrée de l'amplificateur. Il peut d'autre part se propager à travers tout le châssis lorsque celui-ci est composé d'un métal ferreux. Dans ce cas on constate une augmentation du bruit de fond (de composante 100 Hz et harmoniques) avec impossibilité de réduire celui-ci à l'aide des méthodes classiques (blindages locaux, fils blindés, augmentation de la valeur des condensateurs de filtrage de l'alimentation haute tension). La solution qui consiste à placer le

transformateur d'alimentation sur un châssis séparé élimine ce problème pour en créer un autre, celui des liaisons haute tension par fils spéciaux haute tension, via des connecteurs et prises haute tension quasi-introuvables. Lorsque les meilleures conditions sont réunies on peut parvenir à un bruit de fond quasi-inaudible, même lorsque le tube de puissance est une triode à chauffage direct.

A propos du chauffage filament

Ce qui précède n'est toujours valable que pour les triodes à chauffage direct dont la tension filament n'excède pas 50 à 60 V. Dans le cas de la 211/VT4 ou de la 845, un chauffage en courant continu s'impose. Ce n'est certes pas la condition idéale, car il serait souhaitable qu'entre n'importe quel point du filament et le plan formé par la grille de contrôle on obtienne exactement la même valeur de polarisation. Sur ces triodes, l'absence de cathode et le principe du chauffage direct nous laissent que deux possibilités, le chauffage en courant alternatif ou le chauffage en courant continu. Dans le premier cas on superpose au potentiel de polarisation négative de grille une fluctuation de ± 5 V à la fréquence de 50 Hz. La suppression du ronflement résiduel est obtenue au moyen de la recherche d'un point milieu filament "fictif". On l'obtient au moyen d'un rhéostat (une centaine d'ohms en moyenne) dont le curseur est dirigé soit vers la résistance de polarisation (polarisation automatique) soit vers la masse (polarisation fixe avec potentiel négatif appliquée à l'extrémité de la résistance de fuite de grille). Les composantes alternatives présentes aux extrémités du filament se trouvent ainsi en opposition de phase, ce qui conduit à l'annulation du ronflement, du moins en majeure partie. Un petit résidu alternatif

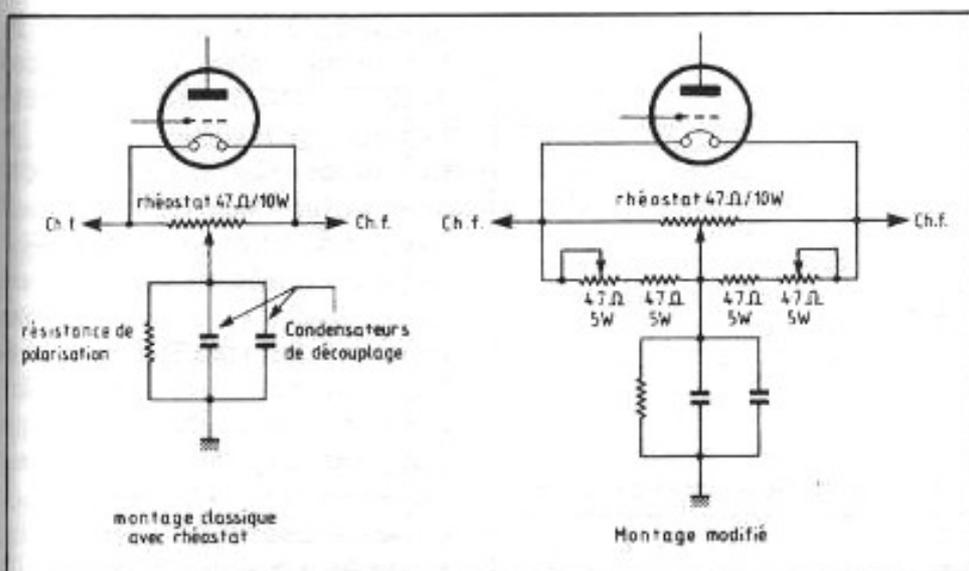


Fig. 3 : Lorsque le filament de la triode à chauffage direct est alimenté en courant alternatif, la suppression totale du ronflement à l'aide du rhéostat n'est pas toujours possible. Une variante du montage consiste à utiliser deux rhéostats supplémentaires permettant de mieux affiner l'annulation des ronflements.

subsiste et ses origines sont diverses. L'alimentation en courant alternatif entraîne en premier lieu une légère vibration mécanique du filament, de sorte que les signaux alternatifs présents aux extrémités du filament ne sont plus ni en opposition de phase parfaite ni parfaitement symétriques. Il existe ensuite une petite dispersion courant/tension pour chaque "moitié du filament" à partir du point milieu fictif, car le point milieu électrique ne coïncide pas forcément avec le point milieu physique. Un résidu de ronflement 50 Hz apparaît alors. Le ronflement peut toutefois provenir de l'alimentation haute tension elle-même, lorsque celle-ci n'est pas parfaitement filtrée. Mais il est toutefois de nature différente car il ne s'agit pas d'un ronflement de composante 50 Hz facile à visualiser à l'oscilloscope, mais d'un résidu en "dents de scie" de fréquence 100 Hz. En pratique, l'analyse du ronflement résiduel fait apparaître à l'analyseur un spectre de fréquences avec prédominance à 50 Hz suivie d'une série d'harmoniques situés à 100, 150, 200 et 250 Hz sous des amplitudes variant très sensiblement d'un

amplificateur à l'autre. Sur certains tubes comme le WE 300B le filament accessible à partir de ses deux broches est en fait constitué de deux filaments reliés en parallèle. Si le point milieu fictif de ces deux filaments (en forme de double "M") n'est pas rigoureusement le même, il peut en résulter un ronflement résiduel dont l'élimination ne sera pas possible au moyen du rhéostat. Pour l'éliminer, il faudra tenter le remplacement du tube, soit encore avoir recours au chauffage filament en courant continu parfaitement filtré. Un "truc" existe cependant et consiste à remplacer le simple rhéostat par trois rhéostats, comme le montre la figure 3. La présence des deux rhéostats supplémentaires, que l'on pourra remplacer par la suite par des résistances fixes de valeur équivalente permet de mieux affiner l'annulation du ronflement. La moitié de la valeur du rhéostat se trouvant insérée entre les extrémités du filament et le point chaud de la résistance de polarisation, le découplage par condensateurs ne s'effectue que sur cette dernière.

Les rapports entre la partie découplée et non découplée étant de

l'ordre de 20, l'influence de la section non découplée sur le son est faible. Elle n'est pas inaudible pour autant dans le bas de la bande audio. Un découplage partiel des parties terminales du filament est possible au moyen du schéma de la figure 4. Le chauffage filament en courant alternatif ne permet pas de dépasser 10 μF pour ces deux autres condensateurs qui doivent être soigneusement appariés au capacimètre. L'amélioration audible qui en résulte, concerne en fait la finesse de restitution et le pouvoir d'analyse, l'origine étant sans doute un effet de filtrage des parasites. Un oscilloscope relié aux bornes du circuit filament montre en effet que la sinusoïde 50 Hz est déformée et qu'il s'y ajoute une certaine quantité de parasites. On peut insérer dans le circuit filament, entre l'enroulement secondaire du chauffage filament du transformateur d'alimentation et le tube un filtre antiparasite composé soit d'une double self, soit d'un enroulement bifilaire sur noyau torique, comme sur la figure 5. L'amélioration est audible et il est possible d'y ajouter la modification de la figure 4. Rappelons enfin que le câblage filament en courant al-

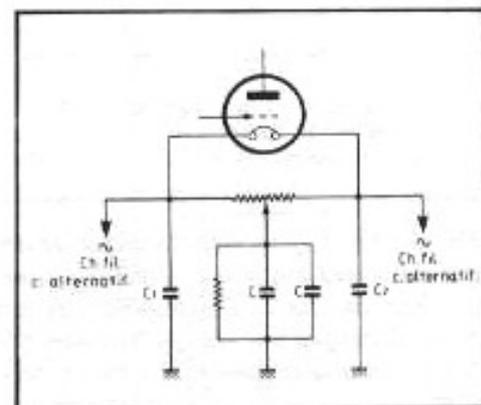


Fig. 4 : En polarisation automatique avec chauffage filament en courant alternatif, on peut compléter le découplage C de la résistance de polarisation par un découplage partiel des extrémités du filament à l'aide de C_1 et C_2 . Ces condensateurs doivent être non polarisés (polypropylène par exemple), ils doivent avoir exactement la même valeur et ne pas dépasser 10 μF environ.

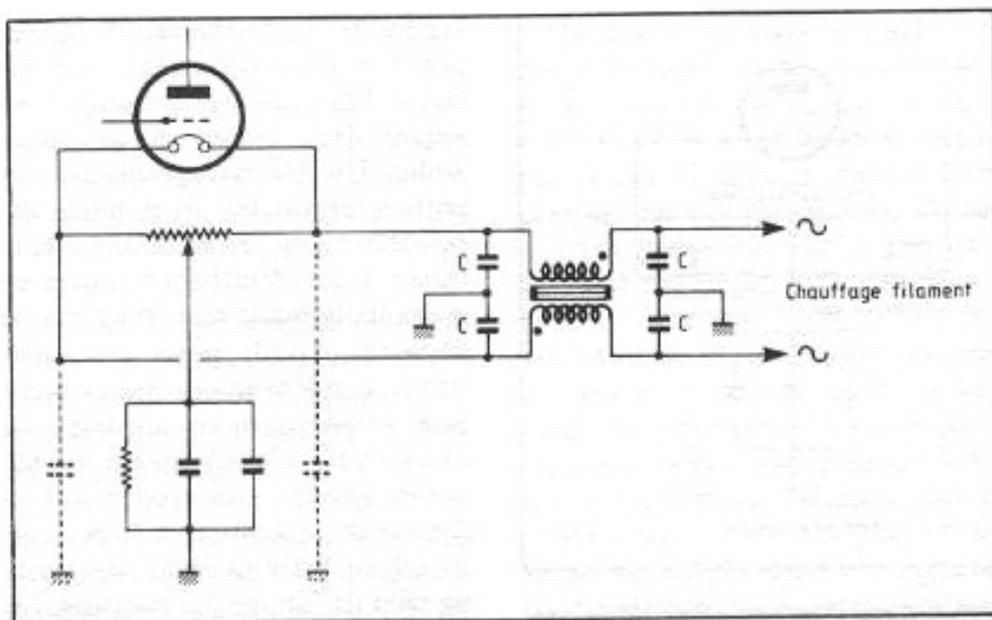


Fig. 5 : Le schéma de la figure 4 peut se compléter d'un filtrage antiparasite par double self ou par self à enroulement bifilaire sur tore ferrite. Les condensateurs C sont de petite valeur (0,47 μ F) et destinés à améliorer la réjection des parasites provenant de l'enroulement de chauffage filament du transformateur d'alimentation.

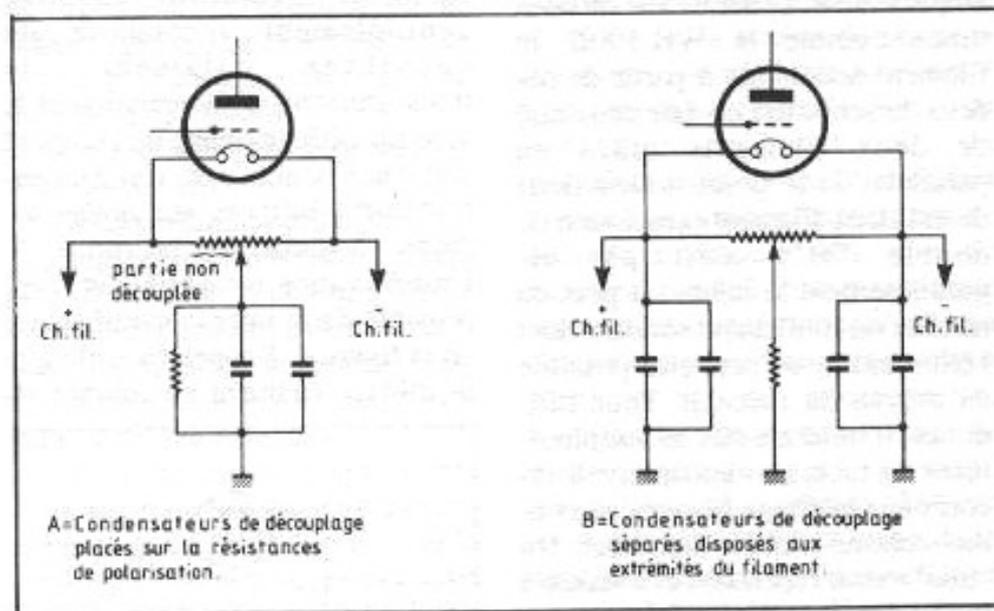


Fig. 6 : En A, procédé classique de découplage de la résistance de polarisation par des condensateurs. Il subsiste une partie non découplée due à la présence du rhéostat. En B, l'ensemble rhéostat + résistance de polarisation est entièrement découplé par les condensateurs placés aux deux extrémités du filament. Il ne peut s'appliquer que dans le cas d'un chauffage filament en courant continu.

ternatif doit toujours être réalisé en fil torsadé de section suffisante. Ajoutons enfin que sur les montages anciens, l'enroulement filament du transformateur d'alimentation est parfois muni d'une prise médiane, laquelle fait office de point milieu filament "fictif". Il interdit toutefois la possibilité de ré-

glage du niveau de ronflement résiduel.

Dans le cas d'un chauffage en courant continu, prenons le cas de la triode 845 utilisée sous une tension plaque de 1 000 V avec une polarisation grille de -155 V. Le chauffage en courant continu à point milieu fictif polarisé à -155 V

procurera à une extrémité du filament une valeur de polarisation grille de -150 V tandis que l'autre extrémité sera portée à -160 V. Un traceur de courbes fait apparaître dans ce cas des caractéristiques U_p/I_p aux extrémités "dédoublées" rappelant quelque part celles d'une triode dont les électrodes ne sont pas tout à fait parallèles. Le chauffage filament en courant continu d'une triode à chauffage direct comporte donc avantages comme inconvénients. Un bon filtrage (condensateurs de forte valeur, filtres en π à éléments RC ou LC) est souhaitable sans quoi les pics de commutation générés par le pont de diodes silicium seront amplifiés par le circuit. Cette fois, le chauffage en courant continu facilite la mise en place de condensateurs de filtrage aux deux extrémités du filament, comme le montre l'exemple de la figure 6. Le montage B permet ainsi l'élimination du condensateur de découplage placé d'ordinaire en parallèle sur la résistance de polarisation.

Une troisième possibilité de chauffage filament existe, celle du chauffage sous haute fréquence, mais elle est la cause d'autres problèmes comme celui du rayonnement H.F. parasite.

Caractéristiques du tube 845

Les caractéristiques principales du tube 845 sont regroupées sur le tableau de la figure 7. Le tube mesure 190 mm de hauteur avec un diamètre de 60 mm. Son embase identique à celle des tubes 211/VT4C est au standard américain "Jumbo 4 pins". Les broches du tube mesurent 6 mm de hauteur seulement. Elles sont montées sur un isolant stéatite cerclé d'une bande d'aluminium. Le support "Jumbo" autrefois fabriqué aux U.S.A. par différentes firmes l'a été par la suite au Japon chez de nombreuses firmes comme Toshiba, Hitachi

puis auprès de spécialistes du support de tubes comme Azuma Electric. Aujourd'hui, ces supports sont devenus rares mais les demandes incessantes de la part des consommateurs ont persuadé le fabricant américain le plus célèbre pour ce type de support, la firme Johnson, de se lancer de nouveau dans une fabrication en petite série. De longues années durant, ce support était disponible chez les grossistes du tube et dans certains surplus américains. Ce support est en stéatite, la "cheminée centrale" en métal nickelé servant à guider le tube et à le bloquer au moyen d'une baïonnette.

La 845 est une triode à chauffage direct conçue pour l'amplification audio en classe A ou AB. En audio, la 845 est généralement utilisée en sortie simple étage, la puissance de sortie obtenue se situant entre une douzaine de watts et 30 W environ. Le montage push-pull se rencontre plus rarement parmi les réalisations d'amateurs ou de petite série. Ceci est regrettable, car on obtient sans trop de difficulté entre 70 et 100 W

en classe AB et 150 W environ en classe B.

La 845 peut s'utiliser également en émission, sur des étages modulateurs classe A. Elle a été réalisée également en versions militaire et professionnelle sous les appellations JAN-845 (JAN signifiait Joint Army-Navy) et 845W (le suffixe W s'applique aux versions professionnelles à haute sécurité). En Suisse, la firme Brown Boveri a commercialisé autrefois un équivalent baptisé T110-1.

Les caractéristiques U_p/I_p en fonction de la polarisation grille sont représentées sur la figure 8. Elles sont d'une linéarité exceptionnelle et surclassent sur ce point la majorité des triodes à chauffage direct connues.

Exemples d'étages driver pour triode 845 en montage simple étage

La 845 fait partie des triodes audio à haute linéarité les plus "trans-

parentes", les plus parfaites que l'on puisse trouver actuellement. En extraire la quintessence est une autre affaire car les résultats d'écoute dépendent de nombreux paramètres :

- performances du transformateur de sortie
- caractéristiques de l'alimentation
- performances de l'étage driver
- performances du montage
- performances techniques et subjectives des composants passifs utilisés
- puissance de sortie de montage choisi.

Les caractéristiques de la figure 7 montrent qu'en configuration simple étage, la triode 845 permet d'obtenir une puissance comprise entre 24 et 30 watts pour des tensions plaque U_p comprises entre 1 000 et 1 250 volts. Pour atteindre ces valeurs qui sont de deux à trois fois supérieures à celles des amplificateurs courants on est contraint de faire appel à des composants spéciaux. Sur un transformateur de sortie classique la tension d'isolement primaire secondaire ou primaire-châssis est donnée en général pour 1 800 à 2 000 V en mode test tandis qu'en régime permanent il faut se garder de dépasser 800 à 900 V. Sans ces composants spéciaux haute tension, la fiabilité n'est plus garantie, les performances non plus. Le condensateur de liaison grille de la 845 doit lui-même être fortement isolé (2 500 à 3 000 V est souhaitable). Idem pour d'autres composants. Pour les circuits de haute tension, il est tout à fait conseillé d'utiliser des fils de câblage isolés à plus de 5 000 V. La 845 peut s'utiliser sous des tensions plus basses mais la puissance de sortie diminue sensiblement, le taux de distorsion augmente et le point de repos prend place à un endroit où le courant grille, aussi infime soit-il, est plus élevé que dans les conditions normales, ce qui se traduit à l'écou-

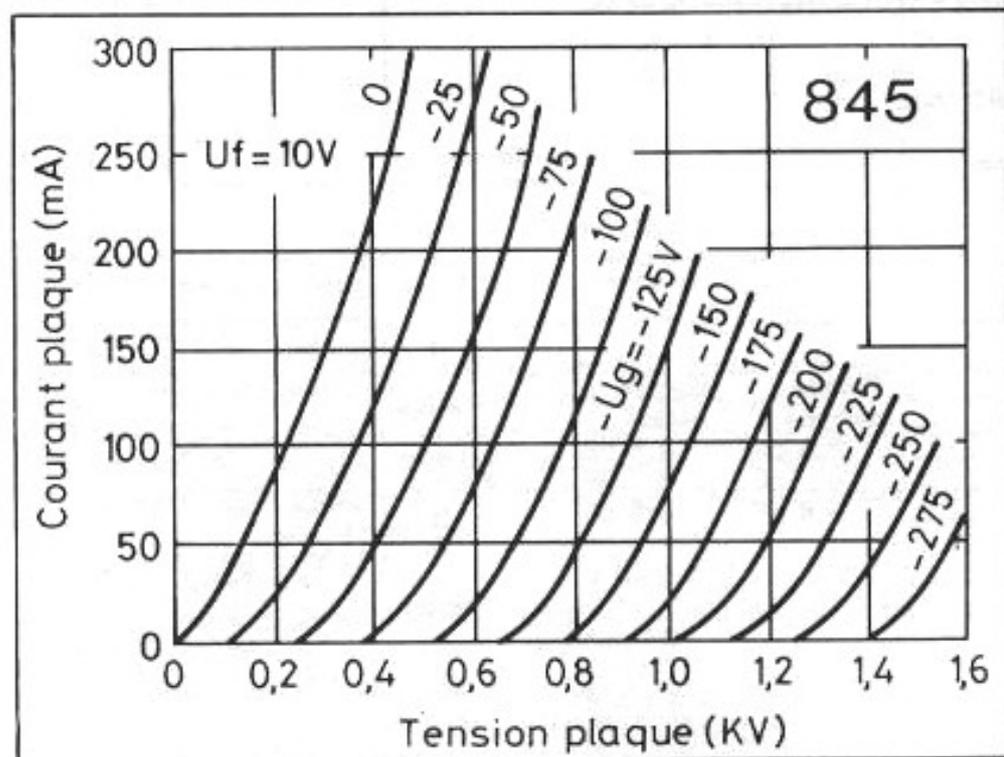


Fig. 8 : Caractéristiques U_p/I_p en fonction de la polarisation grille de la triode 845. La linéarité des caractéristiques est exceptionnelle. Cette triode est en contrepartie difficile à utiliser en raison de la tension plaque très élevée (entre 800 et 1 250 V) et du fort recul de grille (-100 à -150 V) nécessitant l'élaboration d'un étage driver très performant.

par une perte sensible de qualité. Sous 750 V, on obtient une quinzaine de watts et 9 à 10 watts seulement sous 500 V. Mais tout est relatif car dans la même plage de puissance, le résultat d'écoute sera malgré tout nettement supérieur à celui de la plupart des électroniques à tubes ou à transistors. Dans sa série d'articles intitulés "A la recherche des sonorités perdues", l'audiophile japonais Susumu Sakuma (voir *L'Audiophile* n° 28) a réalisé un grand nombre d'amplificateurs conçus selon deux idées directrices : des circuits ultra-simples et une mise au point réalisée presque essentiellement "à l'oreille", ne serait-ce que pour reprendre la citation de Jean Cocteau : "Je ne veux pas être l'esclave de la mesure". Ce passionné a été le seul à concevoir un amplificateur que tout audiophile-électronicien sérieux n'aurait jamais osé réaliser : monter deux triodes 845 en cascade (!) avec transformateurs intermédiaires (figure 9) et une alimentation haute tension de 500 V seulement. Malgré cette configuration de circuit quelque peu "loufoque", des démonstrations publiques de ces amplificateurs ont mis en évidence des qualités sonores surprenantes, pour ne pas dire "vexantes" vis-à-vis de chercheurs qui s'acharnent parfois plusieurs années de suite sur un montage ultra-complexe sans avoir osé expérimenter une seule fois ces montages triodes ultra-simples. En effet, le pouvoir d'analyse est une chose qui ne s'invente pas, la différenciation entre quatre notes qui se suivent non plus. La haute-fidélité doit cependant se construire selon une synergie performances d'écoute-performances de mesure équilibrée. Dans le cas de la 845, la plus grosse difficulté à surmonter est celle de la conception d'étages d'entrée et driver aussi "transparent" que possible à l'écoute. Ces étages doivent offrir un gain suffisant (de l'ordre de 45 à 55 dB), une large bande passante, un faible taux de distorsion et un signal de sortie

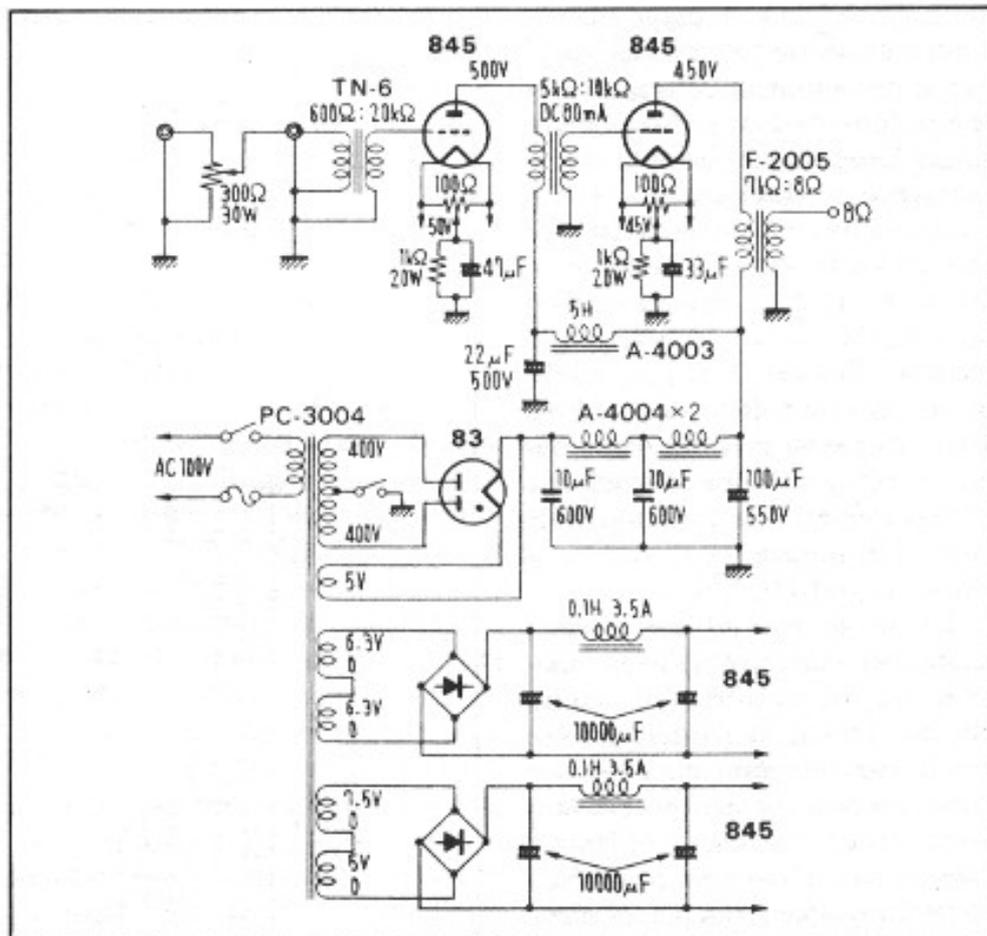


Fig. 9 : Amplificateur monotriode 845 proposé par Susumu Sakuma (*MJ Audio Technology*, juillet 1993). Dans ce montage d'une simplicité élémentaire, la triode 845 est précédée d'un étage driver équipé du même tube (!) et les deux tubes sont alimentés sous une tension de 500 V seulement.

dont l'amplitude doit atteindre quelque 200 V (!) sans écrêtage, avant application d'une éventuelle contre-réaction. La majorité des montages proposés ne satisfont qu'en partie à ces différentes exigences. On obtient alors une quinzaine de watts seulement (car au-delà la distorsion augmente brutalement), la réponse en fréquence commence à chuter sensiblement au-dessus de 15 kHz et le taux de distorsion harmonique frise les 10% à pleine puissance. Malgré ces limitations, ces montages restent très appréciés des audiophiles et des mélomanes. L'important est de reconnaître que très peu de montages sont parvenus à extraire la quintessence des "impossibles" 845. Cette constatation s'applique aussi aux triodes plus classiques du genre 300 B, mais sans les contraintes de réalisations dues aux tensions d'alimentation élevées.

Exemples d'étages driver

En 1966, l'amateur japonais Atarashii (qui était à l'époque ingénieur du son chez Denon Columbia) fit partie des premiers audiophiles à réaliser des amplificateurs "monotriodes" équipés de 845. Son circuit comportait 3 étages avec EF 86 montée en pseudo-triode en entrée, la 6GA4 en étage driver (c'est une triode à chauffage indirect qui n'a été disponible que sur le marché japonais). La 845 était alimentée sous 800 V et une puissance de 16 watts était obtenue. Le montage était légèrement contre-réactionné (9 dB). L'étage driver était chargé par une self (20 H, 100 mA). Un condensateur de liaison (papier huilé, 4 mF/1500 V) reliait la sortie de l'étage driver à un transformateur de sortie, le Tamura F682, dont l'impédance primaire

était de 3,5 k Ω . L'étage driver chargé en sortie par une self ainsi que le condensateur de liaison vers le transformateur de sortie introduisaient une chute sensible de la puissance au-dessous de 100 Hz. La quasi-totalité de la puissance soit 16 watts, était délivrée entre 90 Hz et 16 kHz environ tandis qu'à 30 Hz il était obtenu seulement 4,7 W (sans C.R.) ou 8,2 W (avec 9 dB de C.R.). Plus tard, en 1971, Atarashii modifia son montage : l'étage driver devint une EL 34 montée en pseudo-triode (voir "Initiation aux amplis à tubes", page 103).

La mode des "grosses triodes" incita différents spécialistes japonais du transformateur audio (Tango, Tamura en particulier) à se lancer dans la commercialisation de transformateurs de liaison et de sortie performants adaptés à ces tubes. Avec le transformateur driver NC-16 de Tango par exemple, la chute de niveau n'était que de -2,5 dB à 20 Hz pour une impédance primaire de 7 k Ω traversée par un courant unilatéral de 7 mA. Un chercheur japonais connu, K. Anzai, en fit usage en association avec, entre autres, la double triode 6SN7: tension plaque 134 V avec charge de plaque de 30 k Ω sur la première triode, 285 V de tension plaque, 7 mA de courant de repos pour la seconde triode chargée par l'enroulement primaire du transformateur de liaison Tango NC-16 (primaire 7 k Ω , rapport 1:2, courant primaire 15 mA, inductance primaire 70 H).

Avec 936 V de tension plaque sur la 845, K. Anzai obtenait 18 watts avec 7% de distorsion harmonique (sans contre-réaction) et une bande passante couvrant 20 Hz à 20 kHz à ± 2 dB près. La figure 10 regroupe les principaux types d'étages drivers adaptés à la triode 845. On a :

- en A, un montage avec transformateur de liaison, genre Tango NC-16 avec enroulement primaire 7 k Ω chargeant les deux éléments

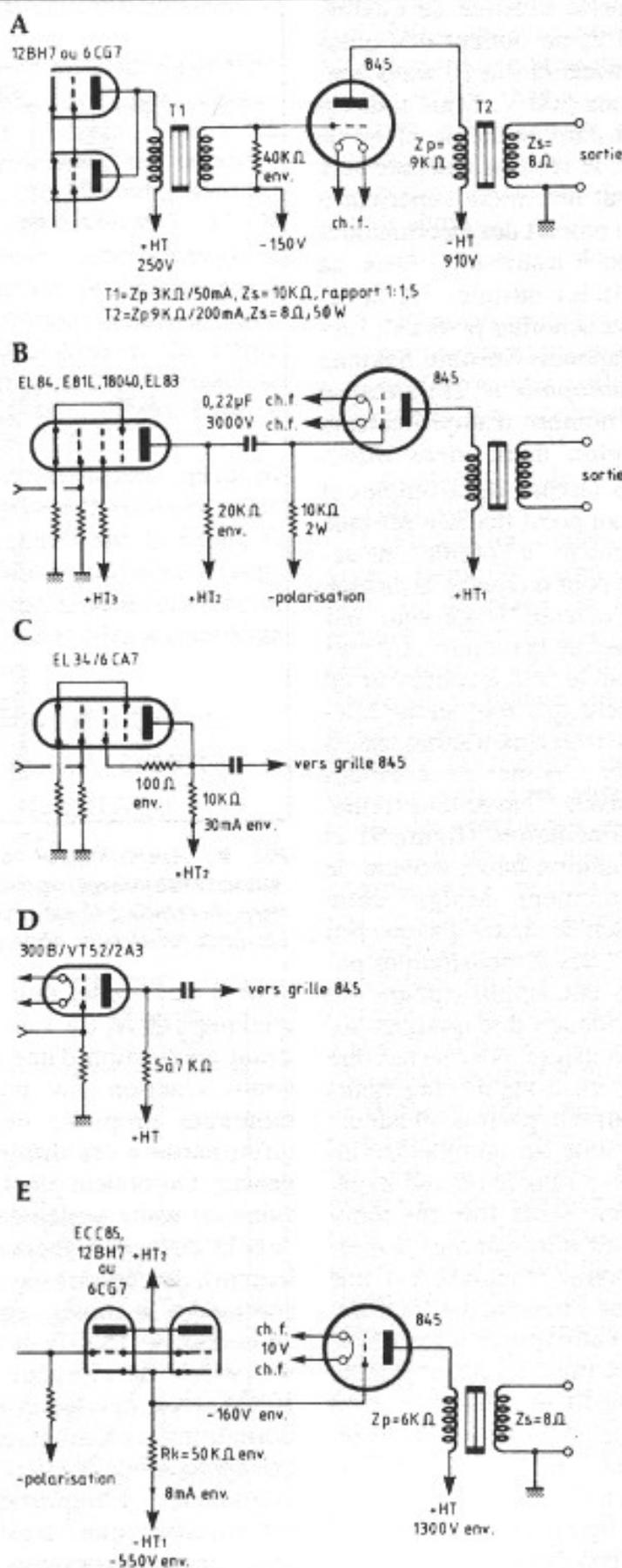


Fig. 10 : Quelques exemples d'étages drivers pour la 845 montée en triode de sortie unique. A : couplage par transformateur de liaison. B : étage driver avec pentode de petite puissance. C : étage driver avec pentode de puissance montée en pseudo-triode. D : étage driver avec triode de puissance à chauffage direct. E : étage driver avec double triode avec éléments montés en parallèle et charge cathodique en couplage direct avec la 845.

montés en parallèle d'une double triode 12BH7 ou 6CG7/6FQ7. On peut également utiliser la 6SN7GT en brochage octal. Si le transformateur de liaison le permet, le courant de repos total peut avoisiner les 12 à 14 mA. Dans cette configuration, le gain total procuré par l'étage driver suivi du transformateur de liaison est suffisant pour qu'il soit possible d'introduire une petite contre-réaction locale entre les plaques du premier et du second tube (250 k Ω) de sorte qu'il soit possible d'obtenir 18 watts en sortie pour un signal d'entrée de 0,6 V. La réponse niveau/fréquence est liée aux possibilités des deux transformateurs. Parfois, la résonance haute du transformateur de liaison est ramenée à une fréquence relativement basse, 30 kHz par exemple. Cette résonance, amortie par la présence de la résistance de charge sur l'enroulement secondaire, peut atteindre +4 à +5 dB, ce qui peut compenser habilement une chute de réponse en fréquence du montage non contre-réactionné au-dessus de 15 kHz. Si le transformateur de liaison n'est pas conçu pour accepter le passage de courant continu dans son enroulement primaire, la solution courante, qui comporte plusieurs variantes, consiste à faire suivre l'étage driver (chargé par une résistance de plaque) d'un condensateur de liaison. On peut de la sorte augmenter sensiblement la valeur de l'inductance primaire du transformateur de liaison (150 H par exemple) et augmenter également la valeur du condensateur de liaison de façon à étendre la réponse grave jusqu'à au moins 20 Hz ;

- en B, un montage à deux étages comportant en entrée un tube pentode amplificateur de petite puissance à gain élevé mais aussi linéaire que possible. A titre d'exemple, la WE 310A (pentode amplificatrice de tension) souvent utilisée pour l'attaque de la 300 B

ne conviendrait pas : impossibilité d'utiliser une charge de plaque inférieure à 50 k Ω , trop de distorsion, gain insuffisant, courant de repos trop faible. La classique EL 84 peut convenir mais elle doit être précédée d'un étage d'entrée. Les pentodes à grand gain, genre Philips 18040, genre E 81L ou EL 83, pourraient convenir mais il faudrait malgré tout utiliser un transformateur d'entrée (rapport 1:2 par exemple) pour obtenir une sensibilité d'entrée standard (environ 1 V pour 18 à 20 watts en sortie). L'intérêt du montage réside dans le courant de repos élevé associé à une faible impédance de charge (15 à 20 k Ω). La configuration à deux étages rend possible une optimisation des points de fonctionnement, des valeurs des droites de charge en vue d'un effet de compensation de la distorsion produite dans le deuxième étage par celle engendrée dans le premier. Dans les meilleurs cas, la distorsion s'atténue de 15 à 30% par rapport à une valeur non compensée ;

- en C, un montage avec EL 34 montée en pseudo-triode chargée par une résistance de 10 k Ω , est une autre solution. Une large bande passante est obtenue mais cet étage driver doit être précédé d'un étage d'entrée. C'est une solution qui procure de très bons résultats. Beaucoup de variantes sont possibles au niveau de l'étage d'entrée et des contre-réactions locales à boucles simples ou multiples. Cet étage driver étant un véritable petit étage de puissance, il est possible de moduler à fond la triode 845, même dans les régions critiques où la polarisation grille avoisine les 0 V. Il ne faut pas perdre de vue qu'en classe A, la polarisation grille fluctue normalement entre le cut-off (blocage du tube obtenu à l'aide d'une polarisation grille fortement négative située en-deçà de -250 V) et 0 V mais qu'une surmodulation peut entraîner la grille de la 845 dans la région positive. En régime

transitoire, ce tube le permet jusqu'à +20 V environ. En revanche, le courant grille augmente brutalement et passe ainsi d'une valeur quasi-insignifiante (polarisation négative de grille) à plus de 15 mA (valeurs supérieures à +20 V). Il peut en résulter un effet de blocage très dangereux pour la 845 (qui se transforme alors en diode jusqu'à son auto-destruction). Il est bien entendu possible d'introduire des circuits limiteurs pour éviter ces risques en cas de surmodulation (séries de diodes Zener calibrées, par exemple) sans effet secondaire sur la qualité du signal ;

- en D, un montage avec étage driver constitué d'une triode à chauffage direct et à faible coefficient d'amplification, genre 300 B, 2A3, ou VT 52. C'est la solution la plus intéressante sur le plan de la distorsion et aussi de la qualité sonore. L'inconvénient est un manque de gain qui implique de faire précéder cet étage driver triode de deux étages ou bien encore d'un étage d'entrée amplificateur de tension à grand gain (un gain de 400 à 600 est souhaitable) ;

- en E, un montage à couplage direct semblable à celui de la figure A mais à charge cathodique et sans transformateur de liaison. C'est un excellent montage, car on supprime les constantes de temps et autres colorations conséquentes au condensateur de liaison. En contrepartie, ce montage n'est pas à l'abri d'éventuels problèmes tels que la rupture de la résistance de charge de l'étage driver (la grille de la 845 se retrouve alors "en l'air") ou bien encore les variations de polarisation grille conséquentes aux dispersions des caractéristiques du tube driver. Il implique par ailleurs la mise en place d'une alimentation négative dont la valeur augmente très sensiblement dès l'instant où l'on est à l'affût de charges cathodiques de faible valeur. Le couplage direct peut s'effectuer également avec charge anodique du

côté de l'étage driver : montage en parallèle de triode du genre 6CG7, triode 3A/167M, pentode de petite puissance montée en pseudo-triode. La solution de luxe introduit à nouveau les triodes à chauffage direct de moyenne puissance (300 B, 2A3, VT 52, etc.) On peut à ce titre se reporter au montage très sophistiqué de M. Roggéro décrit dans ce numéro. Rappelons au sujet de ces différents montages que le meilleur résultat de mesure ne correspond pas forcément au meilleur résultat d'écoute et que chaque essai s'effectue dans un contexte particulier. Il est de ce fait risqué de porter un jugement sur le "son" de tel ou tel montage suite aux essais effectués sur un, voire deux montages, même s'il existe des tendances évidentes ayant un rapport direct avec une bande passante écourtée, dans une configuration de circuit à deux ou trois étages.

La figure 11 représente un autre type d'étage driver adopté sur une réalisation commerciale, l'amplificateur Orfeo 30 de la firme américaine Bel Canto. Sur cet amplificateur présenté en bloc mono (se reporter aux photos de la figure 12), la 845 est alimentée sous 1 200 V et le circuit comporte deux étages seulement avec, en tête, un transformateur d'entrée (commutable symétrique/asymétrique) suivi d'un montage S.R.P.P. parallèle

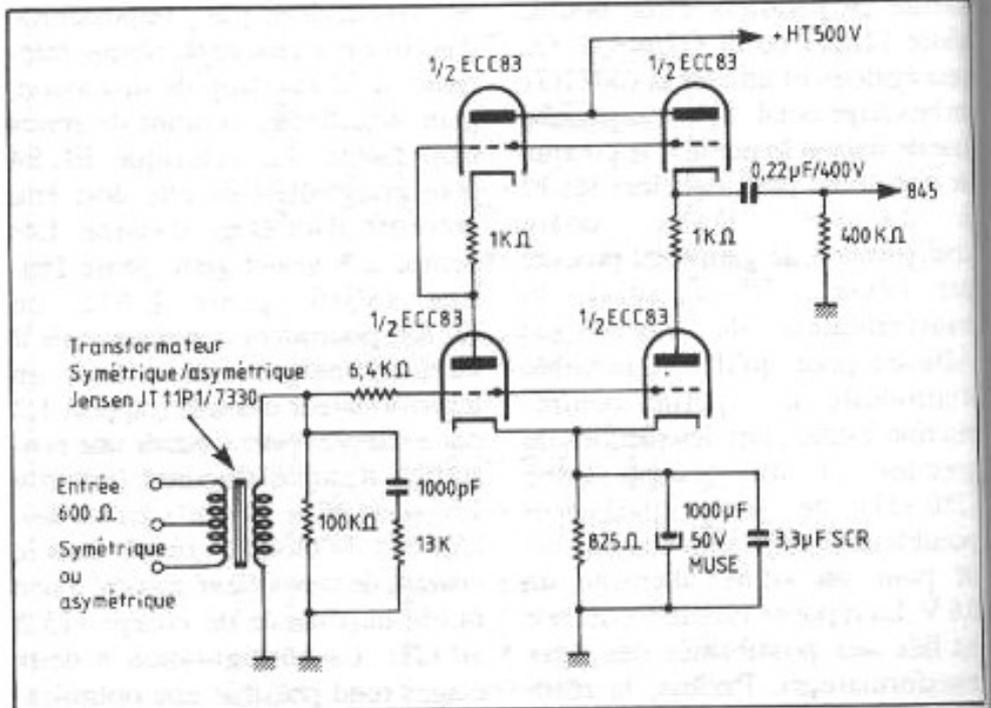


Fig. 11 : Etage driver de type double S.R.P.P. modifié, utilisé sur l'amplificateur américain "Orfeo 30" de la firme Bel Canto Inc. Il est à la fois simple et performant.

modifié (au niveau des liaisons intermédiaires plaques-cathodes). L'utilisation des tubes ECC 83/12AX7 assure un gain suffisant pour attaquer la grille de la triode 845 en association avec le transformateur d'entrée (Bel Canto utilise un modèle américain, de marque Jensen, référence JT 11P1/7330). Ce montage simple et performant offre une sensibilité d'entrée de 1,5 V environ pour 24 watts en sortie. En France, des amateurs comme M. André-Gilles

Lizounat, consacrent parfois des mois, voire plus, pour la mise au point d'amplificateurs équipés de triodes de sortie 845 (voir figure 13). La recherche des ultimes perfectionnements peut conduire à des résultats d'écoute tout à fait hors du commun et également à des réalisations imposantes dont la commercialisation semble a priori impossible. L'écoute d'un amplificateur de ce genre (se reporter à L'Audiophile n°28, page 75) est une expérience inoubliable car elle

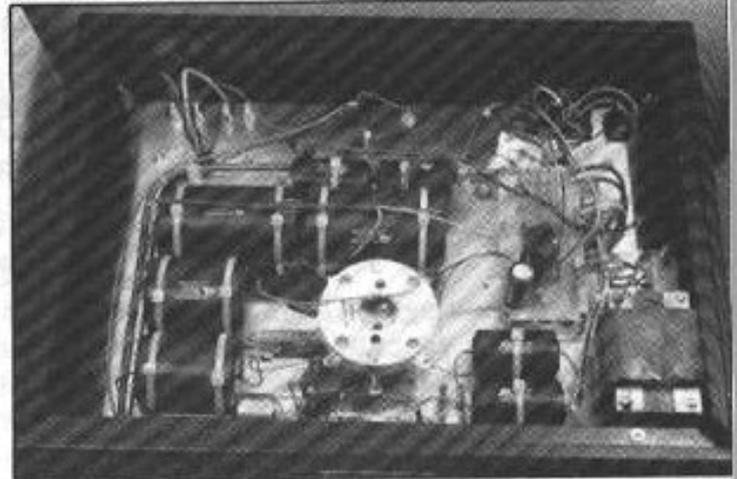
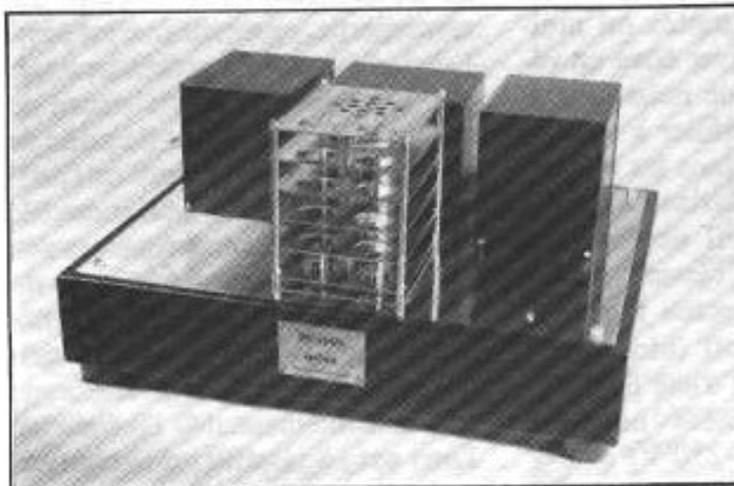


Fig. 12 : Amplificateur Orfeo 30 de la firme américaine Bel Canto. Sur ce bloc mono, la triode 845 est protégée par un radiateur lamellaire en inox. Le câblage est réalisé sans circuit imprimé.

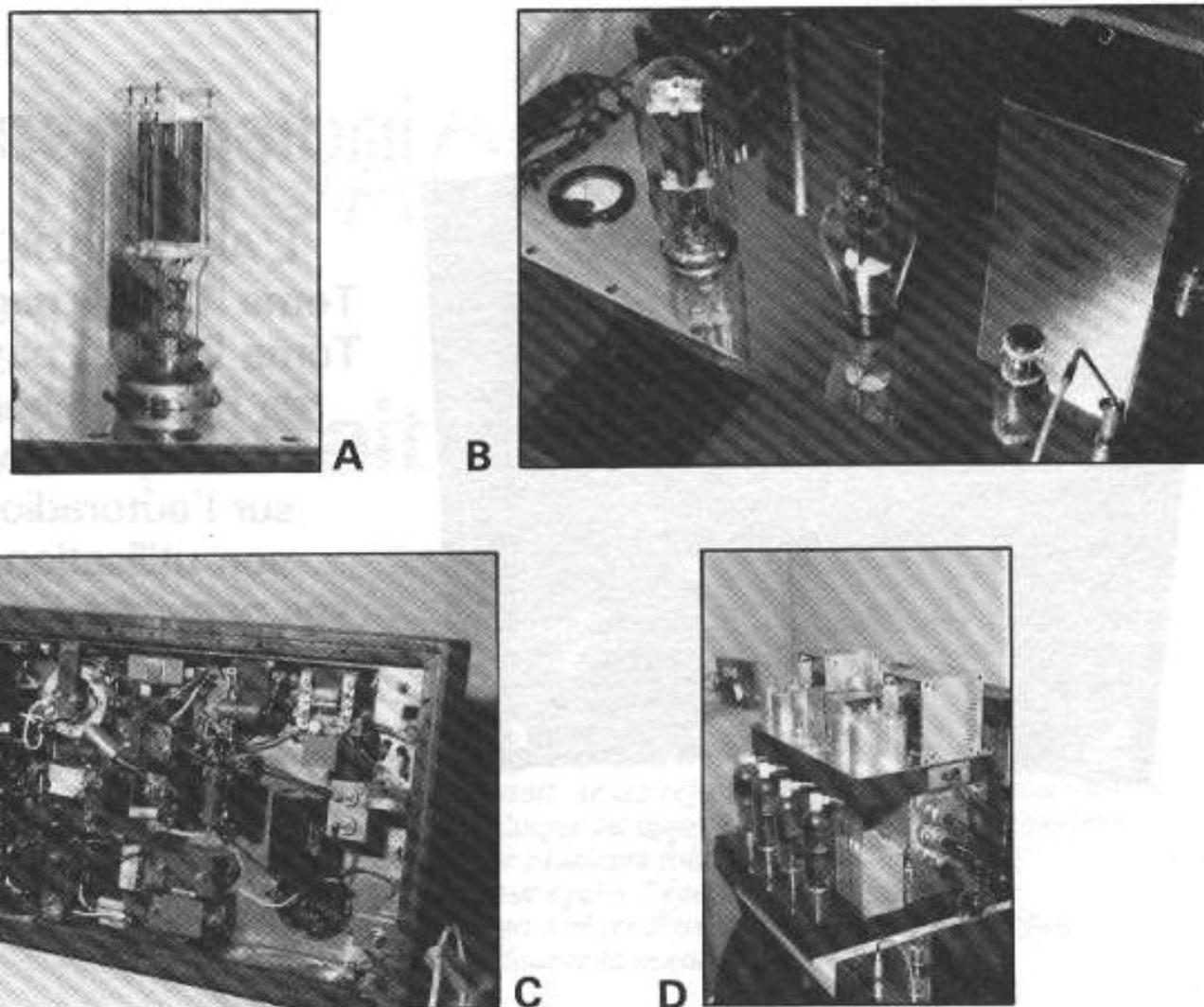


Fig. 13 : Exemple de réalisation très sophistiquée d'un amateur parisien, M. André-Gilles Lizounat. A : Tube 845. B : Amplificateur, vu de dessus, où l'on voit l'étage driver (WE 300 B). C : Amplificateur, vu de dessous. D : Alimentation, avec valves redresseuses haute tension (réalisation A.G. Lizounat).

place la 845 à la hauteur de ses vraies possibilités.

Les montages hybrides transistors-tubes n'ont pas été abordés mais beaucoup de possibilités existent de ce côté également. Le choix au niveau des transistors MOS-FET haute tension, (ex: version Pi-MOS-II de Toshiba) s'est multiplié et le V_{DDs} de ces transistors atteint facilement des valeurs comprises entre 400 et plus de 900 V. Différentes versions en canal N ou P s'ajoutent à d'autres technologies comme les versions hybrides bipolaires/effet de champ surnommées IGBT (transistor bipolaire à gate isolée). Aux U.S.A., Audio Research fait partie des rares à s'aventurer dans cette voie nouvelle dont toutes les possibilités sont encore loin d'être explorées.

Conclusion

L'ensemble de ces problèmes n'ont été que survolés. Il n'a pas été question des alimentations, du câblage des composants et du choix de ceux-ci en fonction de critères techniques et subjectifs. Au-delà des très nombreuses variantes possibles au niveau des circuits, il semble bon de faire état des possibilités offertes par les réalisations conçues jusqu'à présent par les amateurs comme par les professionnels. Une meilleure vision d'ensemble pourrait ainsi éviter à des concepteurs passionnés de l'audio de "redécouvrir" ce que d'autres avaient expérimenté 25 ans auparavant. Les audiophiles mélomanes n'étant pas forcément des excellents câbleurs ou des férus d'électronique à tubes, la des-

cription complète d'un montage serait bienvenue mais s'étendrait sur un grand nombre de pages et conviendrait mieux à un ouvrage spécialisé (une douzaine de réalisations nécessiteraient un travail très important et onéreux). Dans cette attente, différentes réalisations existent mais ne sont principalement disponibles qu'au Japon. Les tensions de service sur ce type d'appareil sont très élevées. Une éventuelle électrocution n'est pas dangereuse mais mortelle. Précisons encore que des tensions très élevées peuvent subsister plusieurs minutes après extinction de l'appareil, même lorsque la prise secteur est débranchée, et que différentes précautions doivent être prises dans ce sens.

**Page non
disponible**

PSYCHOACOUSTIQUE

L'imparfait du dispositif

L

Claude Bailblé

orsque la musique est bien jouée, dans une acoustique appropriée, l'auditeur en recueille les moments les plus émouvants, se les rejoue en mémoire, sans pour autant les retrouver totalement. L'enregistrement sur disque lui apporte la possibilité de les revivre auditivement, et même de se les rejouer plusieurs fois, si le cœur lui en dit.

Mais la restitution stéréophonique ne peut égaler l'écoute directe en concert, pour de multiples raisons. Et l'on se prendrait à rêver d'un dispositif moins imparfait, capable de mieux redonner la musique.

L'écoute directe

Dans la salle de concert, l'auditeur se trouve placé à bonne distance (une quinzaine de mètres) de l'orchestre et, cependant, l'écoute est claire, esthétiquement plaisante. Les timbres sont suffisamment fondus, sans être noyés, les solistes se détachent de l'accompagnement, la réverbération donne sa plénitude au son. Et pourtant, à une telle distance, les deux tympans reçoivent principalement les ondes venues des parois de la salle et, secondairement, l'onde première, mineure, venue du podium. Le mélange tympanique est ainsi dominé par les ondes réfléchies, en retard sur l'onde directe. On ne devrait entendre qu'un son cafouilleux, brouillé, fortement réverbéré et flou. De fait, le *grossissement* (G), qui mesure le rapport entre l'énergie directe et l'énergie indi-

recte (réactive) rabattue par les murs, est très petit.

$$G = \frac{\text{direct}}{\text{indirect}} = \frac{13,8 V}{4\pi c d^2 T}$$

avec V le volume de la salle en m³ ; T le temps de réverbération en secondes ; d la distance aux pupitres en mètres ; c la vitesse du son.

Ainsi, un auditeur placé à 12 mètres des solistes dans la *Grosser Musikverein* de Vienne (Tr=2,2 s... V=14.600 m³) reçoit 5 fois plus d'énergie indirecte (retardée) que d'énergie directe en provenance des sources (G=0,2). Les derniers pupitres, placés à 20 mètres, ne lui donnent en droite ligne qu'un vingtième de l'énergie reçue (G=0,05). Le fauteuil idéal se trouve donc placé bien au-delà de la *distance critique* pour laquelle onde directe et ondes indirectes

égalisent leurs énergies en donnant un grossissement moyen (G=1). La balance y est objectivement très floue, le mélange très disproportionné. Il en va de même dans de nombreuses salles de concert, toutes aussi réputées. Mais qui s'en rend compte ?

L'auditeur continue d'écouter la musique sans se soucier de cette incroyable disproportion, au demeurant peu accessible à son entendement. Le traitement auditif, tel le battement de cœur, se fait tout seul, sans passer - cela se saurait - par la conscience. Le résultat s'impose comme naturel, directement issu des sources instrumentales.

Certes, le dispositif scénique, l'acoustique de la salle, la disposition des fauteuils (en gradins) jouent fortement avec l'appareil auditif en s'accordant exactement à ses possibilités. L'auditeur le pres-

sent, même s'il ne peut se l'expliquer tout à fait. Cela devient évident dès que l'acoustique, la disposition du podium ou des musiciens ne conviennent plus à la musique : salle trop petite ou trop grande, réverbération trop forte ou trop faible, instruments trop bruyants ou effectifs insuffisants. Cela s'entend immédiatement, et l'on vient à penser que toute musique exige un réglage pointu quant à sa diffusion : un lieu parfaitement adapté, en termes d'acoustique architecturale, en termes de lisibilité auditive (1).

En premier lieu, la scène orchestrale est placée face à l'auditeur-spectateur : il voit et entend les instrumentistes devant lui. C'est en effet en immobilisant continûment l'attention "droit devant" que se suspend la motricité corporelle, condition de tout spectacle ; c'est également dans le plan de front que l'œil réalise sa meilleure discrimination (une minute d'angle) et cela vaut pour le concert comme pour l'écran de cinéma, la scène de théâtre, le tableau des peintres ou l'affiche publicitaire. C'est aussi frontalement que l'audition est la plus précise, la plus discriminante (2° d'angle). Von Békésy a dénommé *cône de présence* la région de l'espace où l'oreille localise et sépare le mieux lorsqu'elle s'associe à la vue.

Ce cône de présence - le cadrage auditif - contient et englobe l'aire de balayage du regard, obtenue tête immobile quand l'œil explore le plan de front, tout en se donnant une image correcte. La fusion des deux images rétinienne accordées point à point, exige en effet la superposition exacte des pixels momentanément appariés ; ceci implique un réglage musculaire très pointu et, ce faisant, une obliquité modérée des deux axes visuels. Un regard trop de biais détériorerait la qualité de l'image fusionnée, aussi le balayage oculaire reste limité à un secteur compatible avec la précision requise par le double poin-

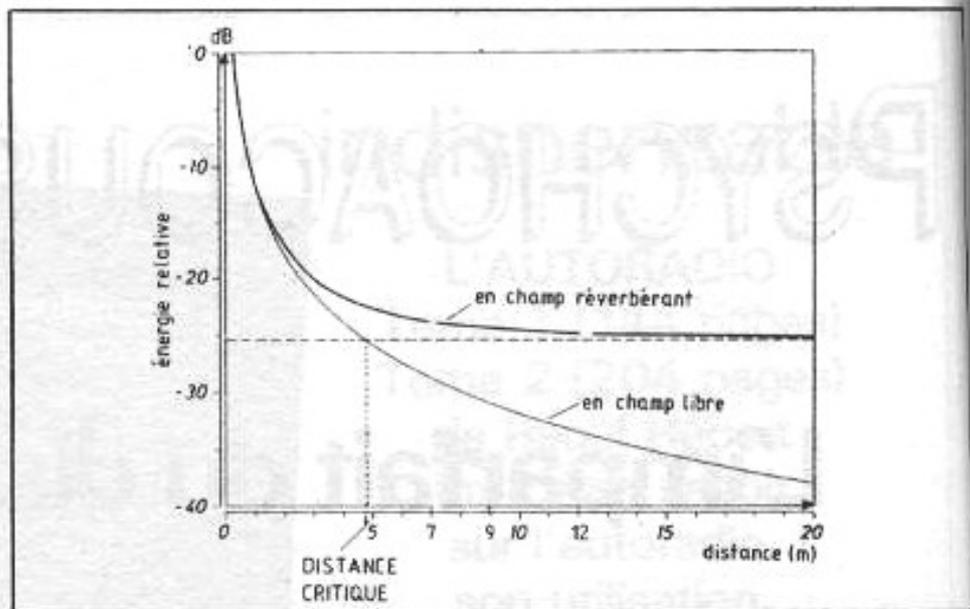


Fig. 1 : La distance critique. Niveaux d'énergie directe et d'énergie indirecte dans une salle de concert, en fonction de la distance à la source [d'après Meyer].

tage rétinien. Le cadrage auditif recouvre finalement la zone optiquement bonne, dessinée par un balayage oculaire préservant la qualité visuelle. S'il en est besoin, la tête tourne, entraînant dans un même mouvement les cadrages auditif et visuel.

L'inscription du regard à l'intérieur du cône de perception auditive indique clairement un champ d'appréhension focalisé vers l'avant calqué *de facto* sur le champ corporel : la vision, l'audition, la locomotion, la préhension font face aux objets qu'elles visent. Ainsi, l'attention visuelle et l'attention

auditive fonctionnent en parallèle de manière frontale et coaxiale et cela se lit dans les champs récepteurs (le territoire couvert par les neurones) des cortex de la vue et de l'ouïe. L'écoute droit devant, aidée par le regard, bénéficie alors d'une sélectivité accrue, d'un pouvoir séparateur augmenté.

Ne pouvant examiner tout en même temps, la perception a donc divisé l'espace en deux parties : l'une *frontale* où s'activent l'écoute et le regard, l'analyse fine et détaillée, l'attention soutenue ; l'autre *périphérique*, un peu effacée, atténuée comme telle dans la

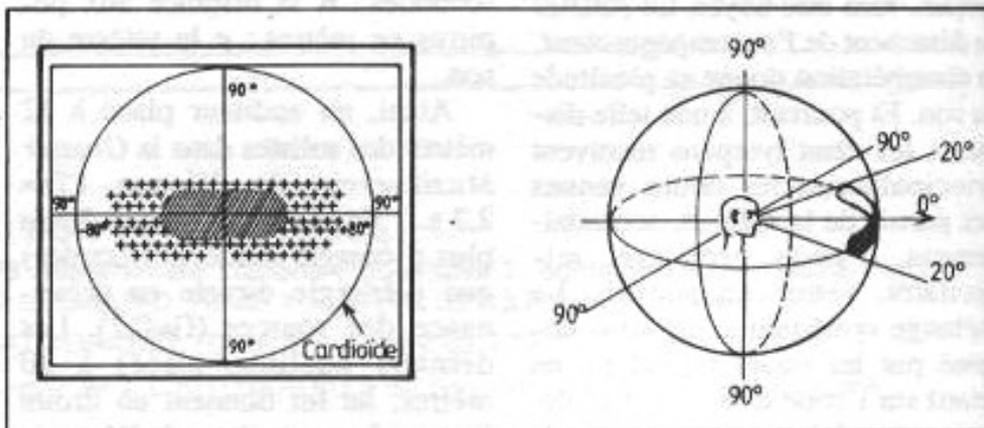


Fig. 2 : Le cône de présence. Le "cadrage auditif" serait préparé par une structure sous-corticale couvrant un large ovale (en +), tandis que le cône de présence s'étendrait à $\pm 20^\circ$ devant, dans le plan de front. Le microphone cardioïde couvre l'hémichamp frontal, à $\pm 90^\circ$ [d'après Buser et Imbert].

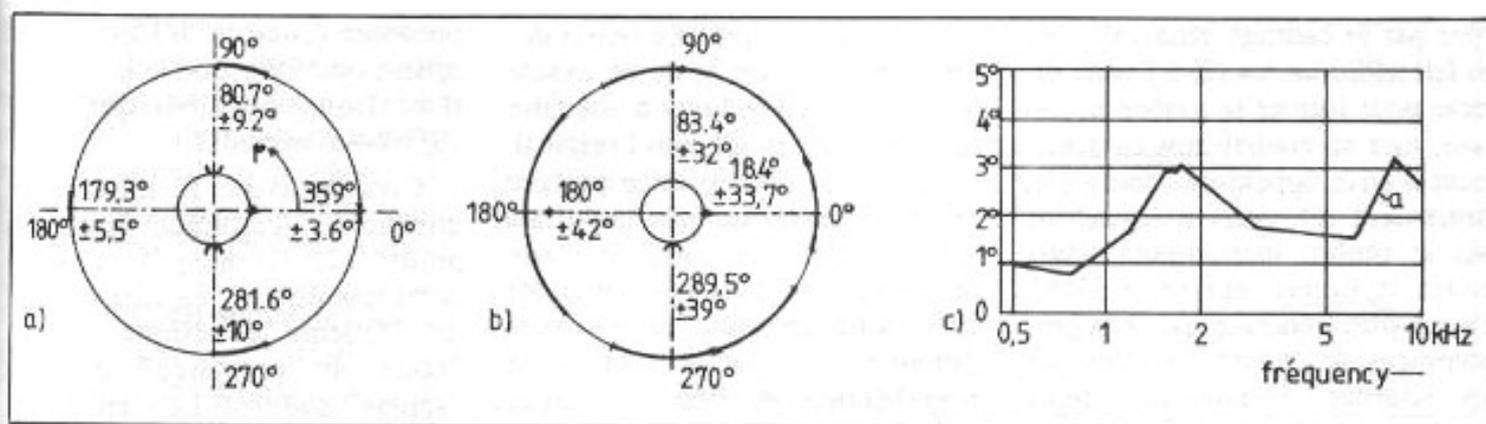


Fig. 3 : Le pouvoir séparateur de l'oreille. En a, pouvoir séparateur angulaire de l'appareil auditif dans le plan horizontal ; en b, le même, avec une seule oreille (les positions réelles des sources sont indiquées par des flèches ; les positions estimées par des cercles ; les segments donnent les écarts types ; en c, variation du MAA (minimum d'angle audible) dans l'incidence 0° , droit devant, selon la fréquence [d'après Blauert J. in "Spatial Hearing", M.I.T., 1983].

conscience, détachée comme ambiance peu présente. Ne s'y signalent que les mouvements, les bruits ou silences soudains, les sautes de lumière, les clignotements et autres scintillements. L'attention n'est attirée en fait que par les signaux transitoires présentant une dérivée non nulle, c'est-à-dire un changement, une fluctuation, une brusque modification. Quelle économie ! Les éléments inertes ou stationnaires - les plus nombreux - nous laissent de marbre, alors que tout ce qui bouge, craque, cliquette, grésille, tinte ou crépite, nous alerte fortement. Quelle efficacité aussi ! Toute variation alentour attire l'attention sur elle, déclenchant une réaction d'orientation dans sa direction. Tout événement sonore muni d'un front d'onde abrupt (dérivée importante) constitue donc un point d'appel irrépressible immédiatement collimaté

Cette répartition facilite le travail de l'attention frontale (neurones toniques, continûment actifs) sans pour autant abandonner le contrôle de l'environnement immédiat (neurones phasiques, omnidirectionnels, seulement sensibles aux changements, aux dérivés telles que dI/dt , dF/dt). La plupart des dispositifs scéniques - y compris la restitution stéréophonique - sont évidemment adaptés à la polarisation frontale du champ.

Tout son "hors-cône" (porte qui grince, cellophane qui crisse, gens qui toussent) déclenche une distraction inutile et parfois agaçante parce que vide de sens, ou bêtement réflexe, non maîtrisable.

Ainsi se répartissent le *in* et le *off* dans la perception : le plan de front est à la fois très précis et très "présent" tandis que la périphérie reste floue, indistincte et relativement amorphe, peu "présente" dans la conscience. Cela veut dire qu'au concert, la réverbération réelle (périphérique) est fortement atténuée, qu'elle se signale peu à l'entendement (dérivée quasi-nulle, sauf dans le cas d'un écho détaché) alors que le podium (frontal) est investi des pouvoirs discriminants de l'oreille et de l'œil. Au total, le cadrage binaural privilégie la scène et pondère l'effet de salle.

Ainsi, l'intelligibilité se trouve augmentée par la vision directe des sources, par la sélectivité accrue du plan de front, tandis que le masquage son sur son est minimisé, en raison même de l'atténuation apparente du champ réverbéré, spatialement désinvesti.

En second lieu, l'acoustique des salles est soigneusement étudiée : elle se fait surtout entendre à travers les réflexions précoces, celles qui surgissent dans les quarante premières millisecondes, juste derrière le son direct. En effet, ces ré-

flexions - les plus énergétiques - ont la propriété de se contracter sur l'onde initiale, de fusionner avec elle, et donc de se fondre sur le lieu origine (le podium tout en participant grandement (à 90%, sinon davantage) à la sonorité. Ces réflexions hâtives, loin d'être inhi-

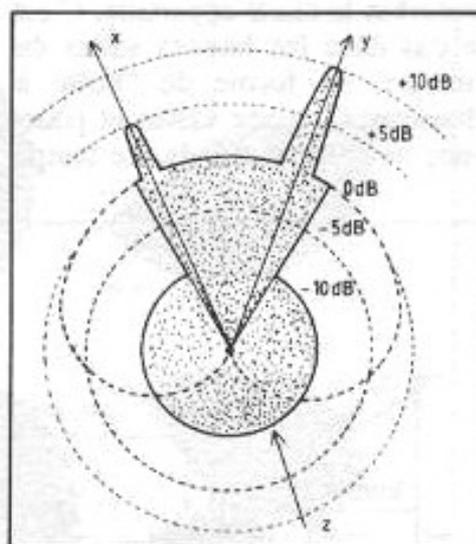


Fig. 4 : Le cadrage binaural. En z, l'inhibition statique du champ périphérique. En x, hausse transitoire de la clarté. En y, hausse permanente de l'intelligibilité due au pointage visuel et auditif. Les gains (dB) ne sont que des ordres de grandeurs. (On se reportera utilement aux notions scientifiques de BMLD - binaural masking level difference - pour l'inhibition statique, et de BILD - intelligence level difference - pour le pointage visuo-moteur.) En pointillés, la courbe de réponse d'un microphone cardiode.

bées par le cadrage binaural, sont en fait additionnées (2) à l'onde directe pour former le *timbre apparent*, tout en contribuant au sentiment d'enveloppement sonore (3). Autrement dit, nous n'entendons pas le timbre instrumental mais plutôt le timbre moyen réfléchi, c'est-à-dire l'énergie ramenée précocement des parois excitées par les sources. Néanmoins, nous continuons à localiser selon leur provenance, à même le podium (loi dite du *premier front d'onde*; Cremer, 1948). C'est l'effet d'antériorité précisé par Haas en 1951.

Les réflexions secondes (de 50 à 1 500 millisecondes), détachées comme telles, participeraient au contraire à la confusion et au massage son sur son : une série d'images floues en surimpression sur l'image nette. Même si elles se trouvent atténuées par le cadrage binaural, il importe que leur niveau soit suffisamment bas pour ne pas perturber la clarté apparente. C'est le cas dans les bonnes salles de concert, en forme de "boîte à chaussures", assez vastes et pourvues de hauts plafonds. Le temps

de décroissance précoce (*early decay time*) mesure la durée exacte que met le son indirect à atteindre un niveau de -10 dB sous l'original. La pente de décroissance précoce est donc un critère très important d'intelligibilité sonore, de clarté auditive. A ce niveau (-10 dB), les réflexions secondes sont moins gênantes et participent à la réverbérance du lieu. Les salles polyvalentes (béton et moquette) sont souvent loin du compte.

Les réflexions tardives (très affaiblies) ajoutent à la musique un halo, un enveloppement diffus très agréable, une couleur qui correspond au spectre d'extinction acoustique de la salle. On peut représenter l'ensemble du champ indirect par un échogramme.

Le microphone bien tempéré

Que se passe-t-il lorsqu'on plante un couple de microphones au "fauteuil idéal" ? Le timbre est bon, mais noyé dans une caverne, pris dans une réverbération excessive. La sélectivité spatiale du microphone ne recopie ni le cône de

présence (environ 1/30ème de la sphère omnidirectionnelle), ni l'atténuation périphérique (les 29/30èmes restants).

Concrètement, le microphone directionnel (cardioïde) favorise la moitié (15/30èmes) de l'espace omnidirectionnel, en lieu et place du 1/30ème sélectionné par le "cône de présence" dans la "sphère" auditive. Le champ indirect dû à la salle domine : il y a trop de halo, de réverbération.

Il faut alors rapprocher le micro du podium pour obtenir un plan apparent, une perspective proche de ce que l'on entend habituellement. Dans cette manœuvre, la balance de profondeur évolue favorablement. Le champ indirect se trouve réduit tandis que le champ direct est comme revitalisé : les ondes venues des instruments sont amenées au niveau des réflexions de la salle. Mais si l'on approche encore les micros, c'est le champ direct de quelques instruments qui va dominer, créant un gros plan partiel sur l'orchestre, une perspective au grand angle, en quelque sorte, avec une profondeur faussée, démesurée. Le pouvoir séparateur du microphone - par pure proximité avec telle ou telle source - va ruiner l'impression d'ensemble en favorisant un timbre ou des détails que l'oreille ne retient pas d'ordinaire, puisque masqués par l'éloignement ou par l'alliage des sonorités. On doit placer les capteurs suffisamment loin pour éviter ce type de distorsion. Mais ceci n'est possible que dans une salle acoustiquement adaptée.

Cependant, les premiers plans seront encore trop nets, les arrière-plans trop flous comme dans une perspective "accélérée". C'est que l'énergie directe décroît avec le carré de l'éloignement alors que l'énergie indirecte reste à peu près constante. L'étagement des plans sonores dans la distance suit effectivement la décroissance de l'énergie directe et cela entraîne un es-

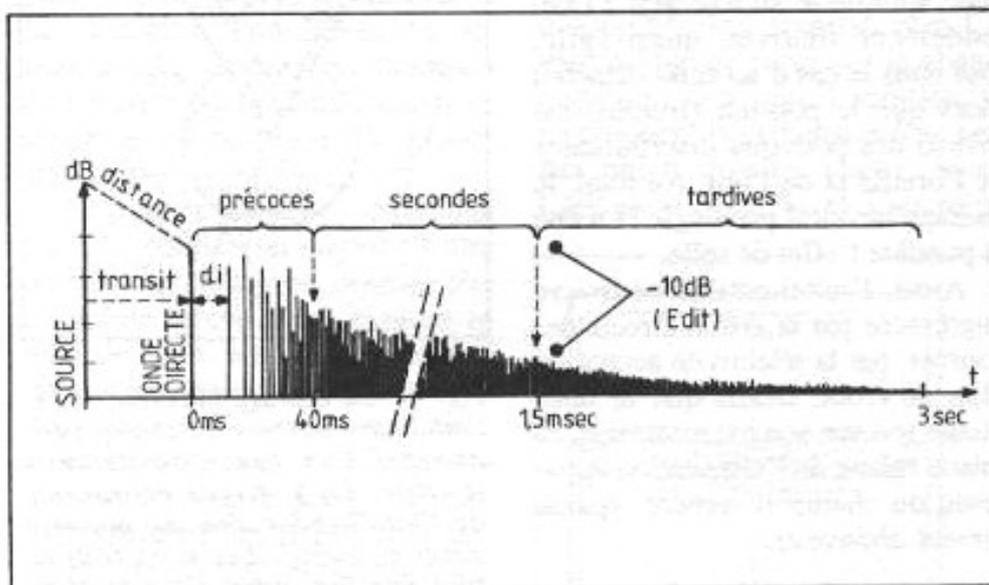


Fig. 5 : Echogramme d'une salle. Après un temps de transit, l'onde directe atteint l'auditeur (premier front d'onde) ; suit le délai avant la première réflexion précoce (délai initial) aussitôt complétée par ses semblables (jusqu'à 40 ms), toutes fusionnées sur le premier front d'onde. Viennent alors les réflexions secondes (jusqu'à 1.500 ms) suffisamment décroissantes (-10 dB, selon EDT) pour ne pas être gênantes et enfin, les réflexions tardives de la réverbération finissante et colorée (jusqu'à 3 s et plus).

pace "dilaté" avec des "fuyantes" exagérées. La *profondeur de champ* (ou d'égale mise au point) est donc très courte, elle ne peut couvrir toute la *profondeur du champ* (le podium) beaucoup plus importante. Il faut "tasser" la profondeur pour éviter l'étrange dilatation spatiale. A cet effet, on élève le couple microphonique afin de "compresser" les distances pour réduire l'étagement sonore entre les premiers et les derniers pupitres.

On peut aussi pratiquer la prise de son *multimicros*, en proximité. La balance sera faite plus tard, au mixage, et on ajoutera de la réverbération naturelle (micros lointains) ou numérique (processeur temporel). Avec le risque de dénaturer tous les timbres et de les nimer d'espace artificiel. Le gros plan pose de toute façon de nombreux problèmes.

En champ rapproché, le microphone capte surtout les ondes di-

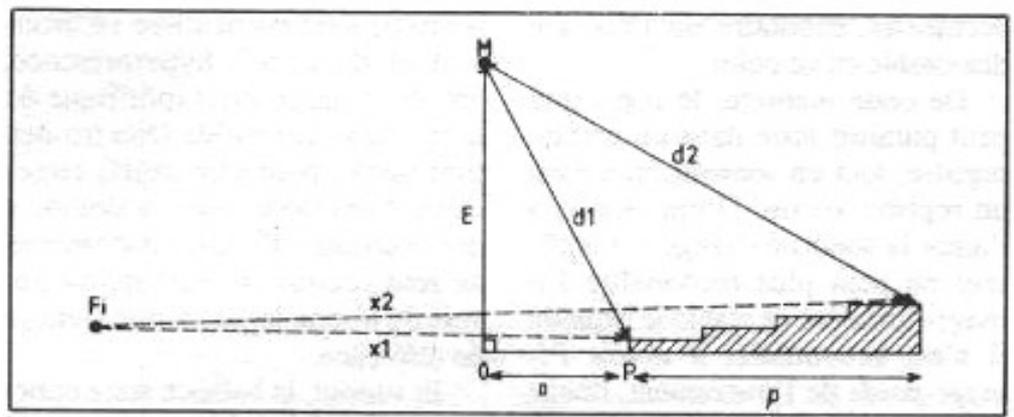


Fig. 6 : La **perspective retrouvée**. L'élévation *E* des micros (*M*) au-dessus du podium (*p*) réduit l'écart de distance (d_2-d_1) entre les premiers et derniers pupitres. Une implantation au "fauteuil idéal" donnerait une perspective au grand angle, tandis qu'une "vue de dessus" donnerait une perspective trop "tassée". La *profondeur de champ* (d'égale mise au point) est de toute façon très courte, à savoir : le 1/20ème de la distance critique... la bien nommée.

rectes émises par l'instrument. Dès lors, la captation est soumise au rayonnement inhomogène de l'émetteur sonore (rayonnement anisotrope). La plupart des instruments rayonnent en effet différemment leurs "formants" selon la note jouée, distribuant inégalement

l'énergie (grave, médium, aigu) dans les différentes directions de l'espace. Captées d'un seul point, certaines notes "aboient", deviennent "criardes" ou au contraire paraissent "en retrait", comme détimbrées. Le microphone - quasi-ponctuel - ne capte donc qu'un timbre

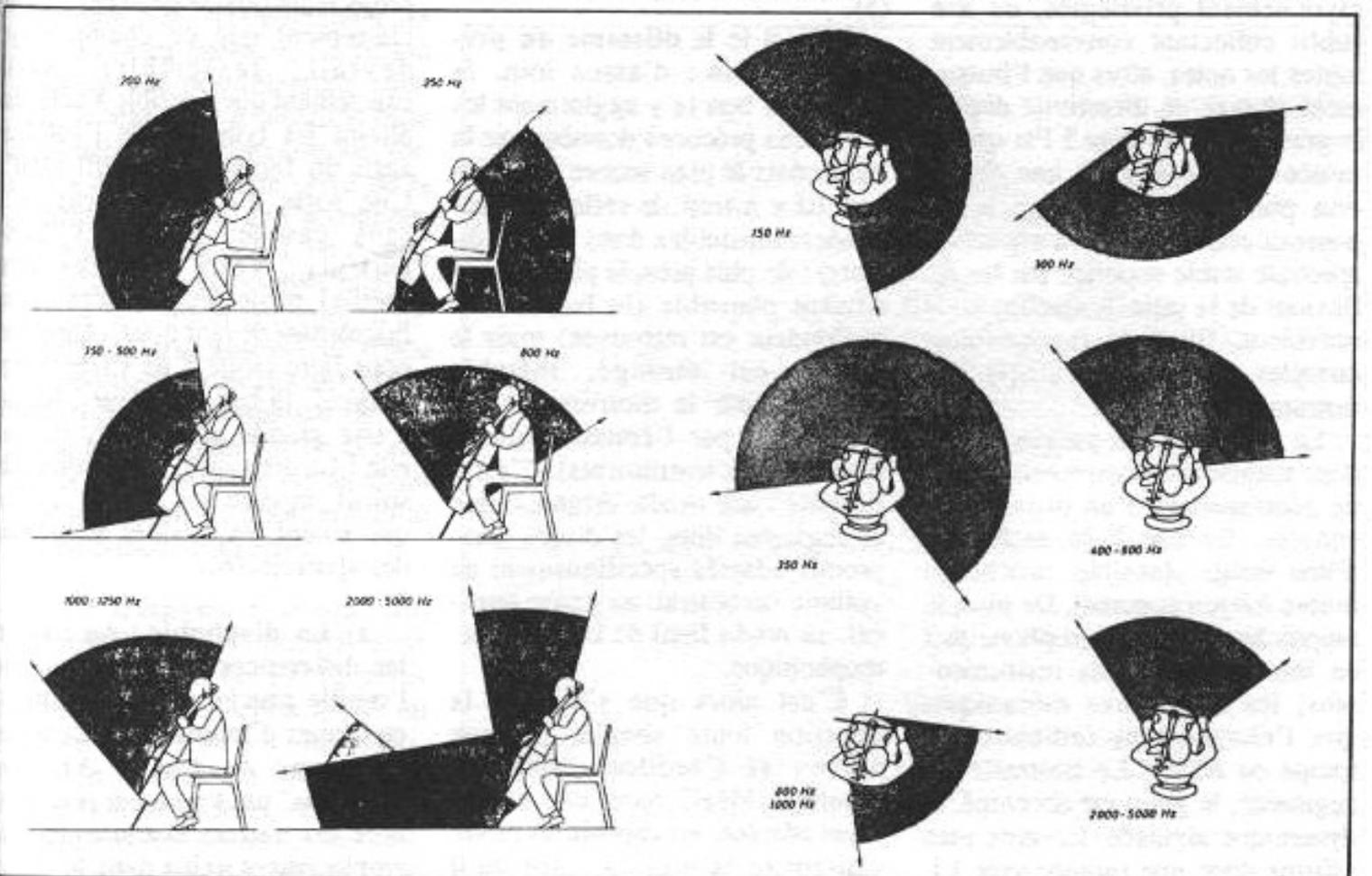


Fig. 7 : Le rayonnement (invisible) des instruments - ici le violoncelle - disperse inégalement les notes selon les hauteurs. Sous quel axe faut-il donc placer le micro pour recueillir un timbre plausible, une image de la bonne couleur ? [d'après Meyer].

accidentel, tributaire de l'énergie disponible en ce point.

De cette manière, le son capté peut paraître juste dans un certain registre, tout en sonnait faux dans un registre voisin. D'une octave à l'autre la sonorité change et l'auditeur ne peut plus reconnaître l'image familière et stable à laquelle il s'est accoutumé, à savoir l'image-poids de l'instrument, image venue - pour l'essentiel - des réflexions précoces de la salle. La dite salle recueille en effet l'énergie émise - de tous côtés - par les instruments, avant de la renvoyer - timbre moyen apparent (4) - aux auditeurs. Certes, on peut toujours espérer qu'en plaçant le microphone d'une manière très étudiée, il va peut-être se trouver un point de capture, un "angle d'attaque" favorable approchant le timbre de référence, mais rien n'est moins sûr. Pour quelle raison (magique, peut-être) devrait-il exister une zone de rayonnement privilégiée, un axe subtil collectant convenablement toutes les notes, alors que l'instrument change en directivité depuis le grave jusqu'à l'aigu ? Par quelle astuce (géométrique ?) une captation ponctuelle très rapprochée pourrait-elle intégrer la signature spectrale stable apportée par les réflexions de la salle, lesquelles nous renvoient, filtré, le rayonnement complet (multidirectionnel) des instruments ?

La captation de proximité est donc toujours un compromis, assortie généralement d'un filtrage à la console, filtrage à la recherche d'une image plausible, proche du timbre moyen apparent. De plus, le rapprochement du microphone met en lumière les bruits instrumentaux, les transitoires mécaniques que l'éloignement ordinaire estompe ou efface. Le contraste est augmenté, le grain est accentué, la dynamique aiguës. Le gros plan affirme donc une rupture avec l'image acoustique de référence et, pour certaines musiques, ce sera l'occasion d'exprimer une sonorité

instrumentale particulière (accroissement du détail, hyperprésence, timbre rechargé, etc.) spécifique de la musique électrifiée (électro-instrumentale, pour être exact) largement dominante dans le domaine des "variétés". Certains instruments ne sont connus du reste qu'au travers du micro, lequel fonde l'image de référence.

Et surtout, la balance reste entièrement à refaire. L'enregistrement multimicros brise *de facto* le mixage acoustique naturel, l'impression d'ensemble ; il faut donc reconstituer la scène musicale voulue par le compositeur avec ses alliages de timbres, tout en rendant justice à l'interprétation, avec ses nuances, sans trahir outre mesure l'acoustique donnée par la salle. Le mixage constitue donc une étape délicate où le sens musical, la sensibilité auditive entrent en jeu, au même titre que le savoir procédural, la mise en espace et en niveaux (5).

Tel est le dilemme du preneur de son : d'assez loin, le timbre est bon (s'y agglutinent les réflexions précoces données par la salle) mais le plan sonore est mauvais (il y a trop de réflexions secondes, insolubles dans l'onde directe) ; de plus près, le plan sonore devient plausible (la balance de profondeur est retrouvée) mais le timbre est étrange, instable (perturbé par le mouvement des musiciens, par l'émission directionnelle des instruments). C'est à l'oreille - une oreille affûtée - que se régleront donc les divers compromis adaptés spécifiquement au volume orchestral, au genre musical, au rendu final de la scène stéréophonique.

C'est alors que s'insinue la question toute simple, presque naïve : si l'auditeur, assis au "fauteuil idéal" dans une acoustique adaptée, est capable de suivre clairement la musique bien qu'il reçoive principalement de l'énergie indirecte retardée, c'est que le cadrage auditif, l'écoute et la vision

frontale lui redonnent une image claire de la scène orchestrale. Pourquoi n'en ferait-il pas autant devant la scène stéréophonique ? A-t-il donc perdu ses facultés auditives ? Ne peut-il restaurer, comme au concert, la clarté ordinaire de l'écoute ? Pourquoi alors s'embarasser de toutes ces précautions microphoniques ?

La restitution stéréophonique

Si l'écran stéréophonique ressemble à la scène du concert, c'est surtout grâce aux précautions prises pendant l'enregistrement ! Car, pour l'essentiel, le dispositif de restitution - très imparfait - est loin de ressembler à un orchestre. Et pour cause : la projection stéréophonique ne restitue qu'un champ-image (un projecteur pour chaque tympan sans reconstituer le champ-objet originel en son entier (autant de projecteurs que de sources). Disons clairement que ce champ-image devrait ressembler aussi exactement que possible à celui qui atteint les tympans de l'auditeur assis au fameux "fauteuil idéal". Une sorte d'écoute au casque... sans casque, avec des haut-parleurs ! Voici donc ces deux (petits) projecteurs placés ici et maintenant devant nous, chargés de nous faire croire à un vaste champ musical, là-bas et ailleurs, baigné d'une grande acoustique. Pas facile ! Le dispositif, aussi commode soit-il, montre ses limites quelle que soient les qualités techniques des appareils (6).

a) **La diaphonie** : Au concert les différences de captation entre l'oreille gauche et l'oreille droite en termes d'intensité Δi , en termes de temps de transit Δt , sont "utilisées" par l'auditeur pour attribuer aux sources instrumentales un emplacement exact dans le champ frontal (l'orchestre, centré par le cône de présence) et à la réverbération un enveloppement atténué

sans localisation précise.

Ici, l'image sonore venue du haut-parleur de gauche atteint aussi l'oreille droite, avec un léger retard ($-\delta t$) et une légère atténuation dans les aigus ($-\delta i$) ; idem pour le haut-parleur de droite. La diaphonie est alors masquée en exagérant les différences interaurales, en augmentant sur les micros (ou à la console) ΔI et ΔT , les deux données fondamentales de la spatialisation et, ce faisant, de l'impression de réalité.

Mais cet artifice laisse apparaître des résidus, des images fantômes, un manque de netteté. La discrimination sur la scène stéréophonique se fera à 5° près (et non plus à 2°). On ne peut espérer séparer, sur les 60° du plan de front stéréophonique, plus de 12 directions ou provenances instrumentales. Ce qui n'est déjà pas si mal !

Il n'empêche. Coexistent deux projections, une principale ciblant les bonnes oreilles (ΔI , ΔT), une secondaire ($-\delta i$, $-\delta t$) atteignant les oreilles contra-latérales. La fusion binaurale est possiblement entamée ; le sentiment d'insertion dans un véritable espace acoustique, fortement dilué ; on reste privé de la précision ordinaire, de l'accommodation sur l'objet perçu, posé droit devant soi. L'espace-objet restitué manque de confort perceptif, d'assise spatiale transparente, de rendu spontanément convaincant. Une bonne part de l'impression de réalité ne provient-elle pas de la possibilité de spatialiser, de localiser sans hésitation ni approximation l'emplacement d'un son ?

b) **Le triangle** : L'attaque des deux pavillons de l'oreille, sous l'incidence figée de 30° (à partir des deux projecteurs ponctuels - ou presque - que sont les enceintes), contredit l'étalement objectif des sources sur le podium, contrevient aussi à l'enveloppement nécessairement omnidirectionnel de la réverbération. Les pavillons externes de l'oreille ont en effet une courbe de réponse spatiale précise, à la-

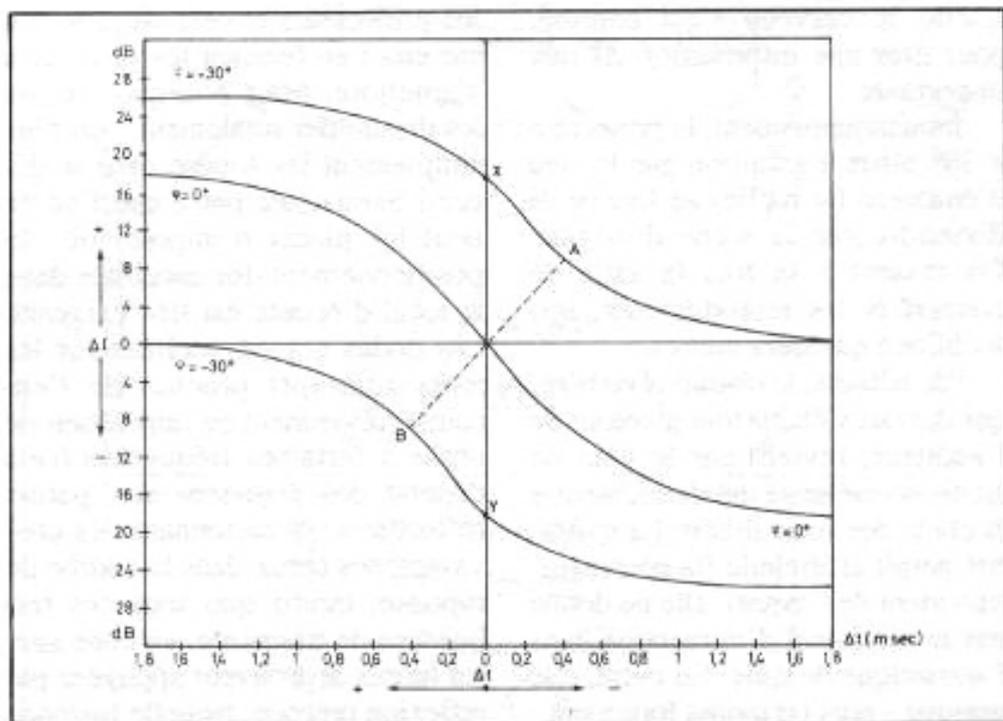


Fig. 8 : L'anamorphose. Alors que l'écoute binaurale directe localise à 30° un son présentant un ΔI de 4 dB combiné à un ΔT de $300 \mu s$, l'écoute stéréophonique nécessite une combinaison d'écarts plus importants [d'après Carl Ceoen]. L'anamorphose à l'enregistrement est compensée lors de la restitution diaphonique.

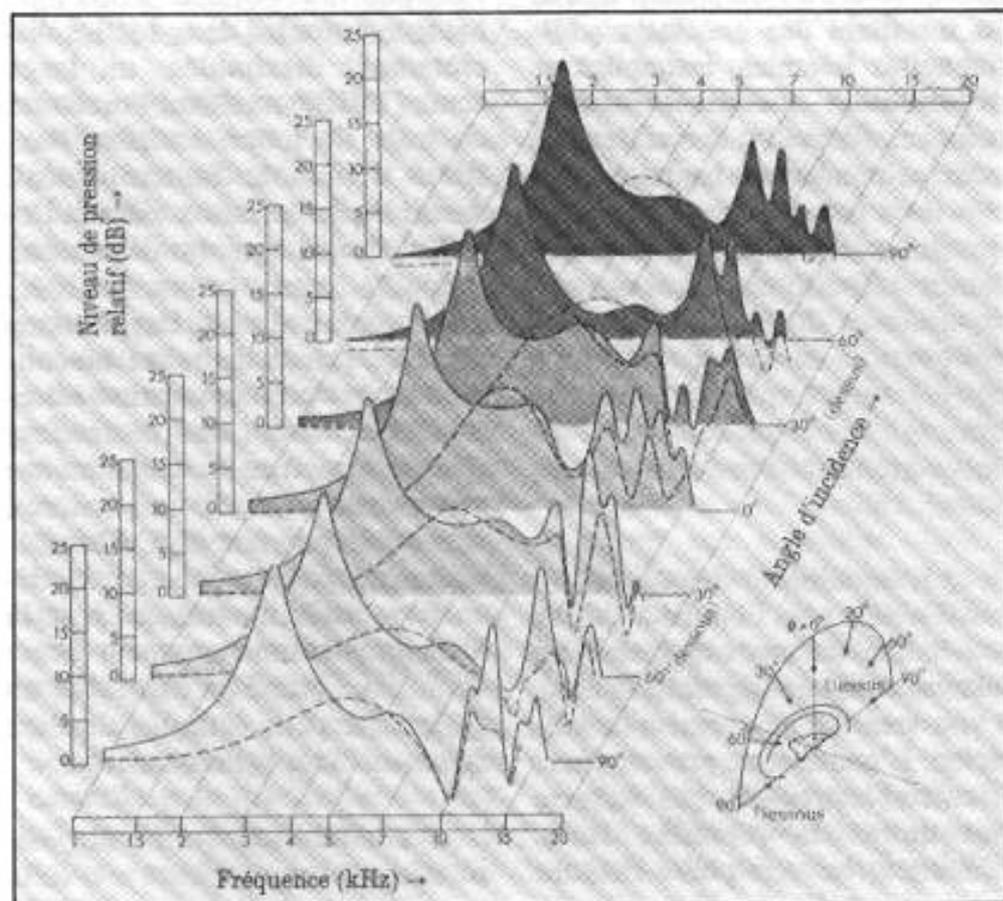


Fig. 9 : Action du pavillon. Niveau de pression acoustique dans le conduit auditif en fonction de la fréquence, pour diverses incidences [d'après Shaw et Teranishi] cités par Georges Canévet, in "Psychoacoustique et perception auditive", éd. INSERM, 1989.

quelle le cerveau s'est habitué, pour tirer une information ΔI très importante.

Immanquablement, la projection à 30° attire l'attention sur le lieu d'émission (le baffle) au lieu de se dissoudre sur la scène d'origine. On ressent à la fois la salle de concert et les reproducteurs, immobiles à quelques mètres.

Par ailleurs, le champ réverbéré, qui devrait s'étaler tout alentour de l'auditeur, revient par le plan de front, se mélangeant inutilement à la clarté des sons directs. La spatialité paraît artificielle (la réverbération vient de l'avant), elle ne donne pas le sentiment d'immersion dans l'acoustique de salle. En outre, elle masque - plus ou moins fortement - la lisibilité des sons instrumentaux. Tout se passe comme si l'on ajoutait, par dessus une image nette, une seconde image identique, mais floue... et légèrement décalée...

D'où l'idée de dissocier le champ réverbéré du champ frontal en installant des enceintes additionnelles latérales, lesquelles ne diffuseraient que des réflexions précoces filtrées et des réflexions tardives pondérées, tandis que les enceintes frontales ne donneraient que des ondes directes mêlées aux seules réflexions précoces, soigneusement dosées. C'est tout à fait possible en diffusion mais n'a pas été encore résolu à l'enregistrement ! Comment séparer les divers ingrédients d'une telle prise de sons ?

c) L'invisibilité des sources : L'œil n'aide plus l'oreille à choisir son écoute, à situer exactement les instrumentistes, à apprécier la salle, à voir venir un mouvement de musicien. L'auditeur ne prévoit plus : il entend autrement, par surprise (au moins la première fois). L'auditeur ne voit plus : l'espace musical est flou, moins sélectif, imprévisible. Les sons sont moins détachés, moins isolés les uns des autres.

Par contre, l'œil ne voit que trop

les projecteurs et cela attire le son sur eux : en fermant les yeux, cela s'améliore. Mais pourquoi ne pas les dissimuler totalement ? ou plus simplement les fondre dans le décor ? Sans doute parce que l'on ne peut les placer n'importe où : le positionnement des enceintes dans le local d'écoute est très exigeant. Les ondes graves, repliées sur les murs adjacents proches de l'enceinte, reviennent en opposition de phase à certaines fréquences (cela dépend des distances aux parois réfléchissantes) occasionnant des crevasses, des creux dans la courbe de réponse, tandis que sous ces fréquences de transition, au contraire, les basses se trouvent appuyées par réflexion précoce, laquelle fusionne parfaitement avec l'onde émise (7).

Idéalement, pour une émission hémisphérique régulière, les haut-parleurs devraient affleurer à la surface d'un mur de front, lui-même traité acoustiquement, et l'on pourrait disposer à quelque hauteur, entre les deux baffles discrètement dissimulés, un large écran (TVHD) montrant l'orchestre en train de jouer, en plan fixe, filmé depuis le fauteuil idéal. Ainsi, l'œil séparateur aiderait l'oreille flouée par la diaphonie. L'écoute serait certes facilitée, mais que dire alors de l'exploration visuelle, privée du relief binoculaire et de l'accommodation sélective ? Une image sans profondeur (l'écran visuel) au secours d'un son vaguement étalé (l'écran sonore), cela existe pourtant déjà, à la télévision, même en mono avec un découpage multicaméras qui pose la difficile question : comment filmer la musique quand on doit coller un timbre (le petit écran) au milieu d'une enveloppe (l'orchestre) ?

d) L'effet-hublots : Le dispositif stéréophonique réalise une sorte de projection paradoxale presque incroyable. C'est à la fois un projecteur ($2 \times 60 \text{ W}$?) et un écran sans support autre que l'air (entre les deux baffles). Depuis quand re-

garde-t-on une projection en tournant vers l'objectif du projecteur ?

En réalité, vision et audition diffèrent totalement sur ce point.

Le véritable écran visuel est la rétine où s'imprime par projection conique - depuis l'iris - une image recueillie au fond du globe oculaire, image issue d'un écran relatif éclairé également par projection conique, depuis l'objectif d'un projecteur placé dans un local suffisamment obscur. La projection conique restitue donc la largeur et la profondeur du champ en étalant la lumière sur la mosaïque des cônes rétinien. L'espace est donc restitué à même le capteur, par la physique lumineuse de l'optique oculaire.

Tandis que le véritable écran auditif est le tympan où l'onde aérienne se transforme en vibration tangible. On devrait dire *les* ondes aériennes car il en vient de tous côtés, se résout en une seule équation vibrante, celle de la membrane tympanique. L'espace n'est donc pas reconstitué sur le capteur, mais beaucoup plus haut, après traitement cortical des disparités gauche-droite, dans une "rétine auditive" neuronale. Pour un tympan isolé comme pour un microphone monophonique, il n'y a en effet qu'une seule dimension spatiale : la profondeur, laquelle s'apparente à une perspective sommaire réduite à la *profondeur de temps*. La dimension "largeur de champ" n'apparaît qu'après de nombreux traitements corticaux portant sur deux signaux différents mais corrélés. Ces différences et cette corrélation ne dépendent pour ainsi dire que de l'emplacement physique (immuable) des tympanes sur la boîte crânienne : la disposition et la forme des oreilles - mine de rien - installent un prétraitement "topologique" qui conditionne le travail neuronal subséquent. Pour ce qui est de l'écoute humaine, n'y a en définitive qu'un seul sys-

ème de prise de sons : deux membranes écartées de 17 cm (ΔT) et orientées à 180° (ΔI).

Pour des raisons pratiques bien compréhensibles, on a inventé une restitution stéréophonique à deux projecteurs (il y a en effet deux tympans) alors que l'écran neuronal interne (le champ-image auditif) comporte des centaines de *champs récepteurs*, chacun en correspondance directe - comme les cônes de la rétine - avec une petite partie de l'espace extérieur (le champ-objet). Ces différents champs récepteurs dessinent la "coupole auditive", forme obligée et naturelle de la perception de l'espace sonore. Chacun d'entre eux nécessiterait - dans l'absolu - un haut-parleur simulant l'énergie venue de cette petite région de l'espace environnant. C'est tout à fait impossible, sauf peut-être en laboratoire (*holophonie*), mais à quel prix ! L'espace auditif doit donc se faufiler au travers de deux écouteilles, de deux hublots, et apporter aux tympans les deux signaux *ad hoc*, proches des originaux entendus au concert, mais corrigés ou compensés des défauts inhérents au système stéréophonique (*diaphonie*, *triangle*, etc.) (8).

Si la prise de son ne tient pas compte de la captation binaurale ($\Delta I/\Delta T$), si l'enregistrement (*multimicros*) ne cherche pas à restituer ces différences corrélées et compensées, alors l'entreprise acoustique devient périlleuse. Si l'on s'imagine que les deux haut-parleurs jouent comme des sources vraies placées dans un champ-objet, on fait de la *biphonie* : il faut réécrire toute la musique pour deux instruments, sinon réduire le répertoire aux seuls *duos*, ou alors accepter de placer l'auditeur face à deux hublots creusés dans un mur, deux hublots donnant ouïe sur la scène d'origine. Impossible !

D'où le *pan-pot* qui, en stéréophonie d'intensité, cherche à rétablir l'illusion d'une scène continue, par le biais d'une largeur artifi-

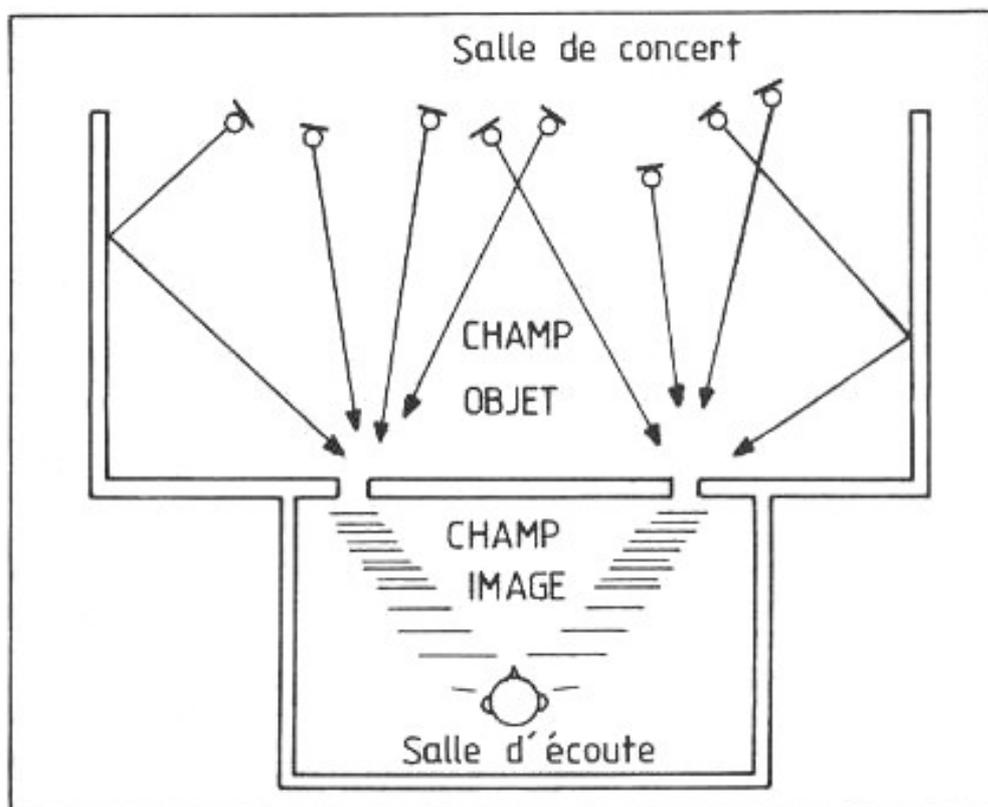


Fig. 10 : La biphonie. L'émission de deux signaux non corrélés (*biphonie*) réduirait la stéréophonie à deux goulots acoustiques en lesquels s'étranglerait toute l'étendue spatiale, soudain privée des $\Delta I/\Delta T$ indispensables à l'étalement de l'image, tant en largeur qu'en profondeur. Conglomerés entre eux, les sons se masqueraient les uns les autres par surimpression destructive, par impossibilité de se dénouer, de se séparer spatialement.

cielle, redoublée par une mise en profondeur qui ne l'est pas moins (*multiophonie dirigée*). Tout se règle à l'oreille, mais l'on ne peut jamais obtenir une perspective cohérente, auditivement centrée. Cela ne semble pas déranger outre mesure les éditeurs de disques, car la plupart des musiques commercialisées n'ont pas pour premier objectif de recomposer l'espace acoustique mais de donner une image agréable, voire volontairement accrocheuse, d'une scène musicale qui, d'un genre à l'autre, a déjà acquis ses propres conventions. De nombreuses musiques - sonorisées, pour la plupart - se sont échappées depuis longtemps de l'acoustique naturelle, pour développer des électro-acoustiques particulières dont le rendu - onirique, planant, superspatial, mirobolant, intimiste ou percutant - ne vise qu'à instaurer un espace imaginaire, délivré de l'impression de réalité orienté vers le rêve, la piste de danse ou l'atmo-

sphère de cabaret. La musique à effets ouvre clairement sur une spatialité qui fait reculer les murs et bouger les sons, en insérant le corps dans un lieu virtuel, lieu où chacun est invité à trouver place, si bon lui chante.

La dimension électrospatiale fait donc désormais partie de l'écriture musicale, surtout depuis l'invention de l'enregistreur multipistes (début des années 70). Chaque genre a élaboré ses formules, tout en cherchant des extensions, des innovations, des plus-values esthétiques contournant - d'une manière ou d'une autre - l'effet-hublots.

e) **L'acoustique de la salle d'écoute** : Comment faire entrer une grande salle dans un living ? Telle sera notre dernière question concernant la restitution stéréophonique. Idéalement, la salle d'écoute devrait être conçue comme une *camera muta*, c'est-à-dire l'é-

quivalent acoustique des *camera oscura* que sont les salles de cinéma. Il n'en est rien, évidemment : l'espace domestique est semi-réverbérant.

Les ondes stationnaires (30 à 350 Hz) perturbent la courbe de réponse apparente des transducteurs tandis que les réflexions précoces (nombreuses et assez intenses) dans les locaux de dimensions moyennes (30 m²) ajoutent leurs énergies au signal transmis, en particulier dans le grave. A ce sujet, le couple béton-moquette est redoutable.

Le positionnement des enceintes est rarement optimal, pour des raisons qui tiennent à la dimension des appartements, à l'esthétique visuelle, à l'encombrement : le lieu d'écoute n'est pas un auditorium... Les réflexions au bord des baffles ajoutent donc un filtrage en peigne dans le haut-grave, tout en renforçant les basses, au-dessous d'une fréquence limite qui est souvent déterminée par la distance haut-parleur-plafond.

Par ailleurs, la directivité des haut-parleurs se resserre dans les octaves supérieures, en sorte que l'énergie réfléchie (et fusionnée) diminue du grave à l'aigu. S'ajoute à cela une réverbération plus grande dans le bas que dans le haut du spectre, les aigus sont facilement absorbés par les tapis, moquettes, livres (etc.), tandis que les basses se réfléchissent plus longuement, faute d'absorbants efficaces. La balance spectrale apparente s'en ressent.

Encore n'a-t-on pas abordé d'une part le problème du bruit de fond urbain - lequel oblige à remonter les *pianissimi* à un niveau confortable - et, d'autre part, le problème du bon voisinage - lequel incite à modérer les *fortissimi*, à pondérer l'excursion vers les forts niveaux. La compression de dynamique est inévitable : un rapport de 50 dB apparaît comme largement suffisant, voire trop important, pour la plupart des musiques enregistrées, diffusées sur de petites am-

plifications. Dans bien des cas, la dynamique tient sur 10 dB et peut-être même moins. On tend vers une musique laminée, à relief minimal audible sans accommodation aucune, diffusée à niveau modéré (70 dB) ou moyen (85 dB) (9).

L'écoute domestique ressemble de plus en plus, il est vrai, à une *climatisation*. On y souffle l'air frais ou tiède selon la saison ou l'humeur. Le fond sonore tonique ou rêveur laisse place à toutes sortes d'activités sans empiéter trop directement sur elles. L'air est entendu et reconnu, il flotte dans la sensibilité en une sorte de zapping intermittent compatible avec la lecture ou la conversation. Pas de brusques écarts thermiques, pas d'éclats sonores : ne pas déranger le réglage auditif adapté à ce climat. Eviter les contrastes, rester sur une fourchette compatible. Pourquoi pas ? De fait, l'écoute purement musicale se fait sans doute plus rare. Elle nécessiterait un investissement auditif et émotionnel particulier, reléguant au rang de bruit de fond les autres activités de la maison.

Or, cette écoute aurait besoin d'une dynamique adéquate aux fins de préserver l'esthétique musicale, l'étagement des plans sonores, le dégagement des nuances, sans lesquels l'émotion se perd. On remarquera en passant qu'une forte compression aplatit la "lisibilité" musicale, entame l'esprit ou l'interprétation d'une œuvre... Le masquage entre instruments est accentué, les alliages et mélanges de timbres se multiplient, le phrasé perd de sa vigueur, de son élan. La vie musicale y perdrait probablement beaucoup si l'on devait contraindre les enregistrements à n'être que de pâles copies - certes bruyantes mais sans relief - et, ce faisant, des ersatz, des sons-témoins "climatisés". Heureusement, beaucoup résistent encore à ce ramollissement, à cet aplatissement dommageable.

La restitution stéréophonique a ses limites. L'ingénieur du son les anticipe, les contourne, par un savoir-faire instrumental, une écoute attentive et maîtrisée du rendu sonore. La prise de son est donc un art dans le sens où, luttant contre l'imparfait du dispositif, elle rétablit - en attendant de nouveaux progrès techniques - le présent de la musique.

La chaîne la plus fidèle, c'est peut-être finalement celle qui relie le facteur d'instruments, l'architecte, le compositeur, les interprètes, l'ingénieur du son, le constructeur d'appareils et le mélomane. Tous ont leur part dans la création ou la recréation de l'émotion musicale.

(1) Cf. article in *L'Audiophile* n°10 et 12 "Musique et architecture" à propos des qualités requises pour les salles de concert : l'impression de volume spatial, le relief, la clarté, l'amortissement, la texture, la diffusité et la couleur sonore.

(2) L'addition "transparente" de ces réflexions sur l'onde directe évite la prise en compte de nombreuses sources fantômes renvoyées par les murs environnants et, de ce fait, localisées sur les parois. 40 ms constituent donc pratiquement "l'épaisseur du présent" auditif, épaisseur sans laquelle nous serions des "chauves-souris" assaillies d'échos rapprochés et spatialement détachés.

(3) Il n'y aurait rien de pire qu'une chambre sourde pour écouter un instrument : le timbre y paraîtrait squelettique, dépourvu de corps, une sorte de figure noire et blanche posée sur un fond vide.

(4) Cf. les travaux d'Arthur Benade, mentionnés in *L'Audiophile* n°23 "La musique sur un triangle" (V)^b : p. 62 et sq.

(5) Cf. "La musique sur un triangle" (IV)^c in *L'Audiophile* n°21. Il faut re-

trouver les équilibres de niveaux, de timbre, de présence, voulus par le compositeur et assemblés par les interprètes.

(6) La perception coplanaire (2D) ne peut égaler la perception en volume (3D). Jamais peinture ne sera sculpture. "On a constaté qu'avec deux voies, écrit Günther Thiele (dans la Revue de l'UER, n°s 241-242, juin-août 90), les améliorations de l'image spatiale se réduisent essentiellement à une meilleure présentation bidimensionnelle de la perspective dans le plan image, entre les haut-parleurs de droite et de gauche. Il est en principe impossible d'obtenir une impression réaliste d'espace et de profondeur..." L'auteur ajoute que "l'environnement acoustique de l'auditeur est exclusivement déterminé par les réflexions et la réverbération du local d'écoute"... p. 100.

(7) Voir *L'Audiophile* n°s 11, 12, 13, les articles de Roy Allison sur le local

d'écoute et l'emplacement des haut-parleurs.

(8) Pour obtenir une simulation optimale de l'espace, il importe que les deux signaux des deux haut-parleurs représentent la corrélation interauriculaire la plus naturelle possible, en évitant l'attaque figée à 30°. D'où l'idée des "têtes artificielles" et autres "microphones sphériques", lesquels recomposent et enregistrent les disparités de capture entre les oreilles, sans se contenter du simple ΔI classique... Il importe aussi que le filtrage réactif des enceintes (selfs, condensateurs) ne perturbe pas outre mesure le ΔT dans la bande 150-1.500 Hz, là où l'oreille est très sensible aux mouvements de la phase ; pas plus que le ΔI , dans la bande 600-12.000 Hz, là où l'information ΔI est essentielle à la spatialisation. Le hublot serait alors "déformant", facteur de distorsion spatiale ou de décorrélation.

(9) Sur le niveau d'écoute et la dynamique, voir l'article de Pierre Loyez in *L'Audiophile* n°s 16 et 17. Idéalement, la dynamique du programme de-

vrait être adaptée aux conditions d'écoute (environnement calme ou bruyant, niveau d'écoute élevé ou faible, voisinage et horaire). L'auditeur qui écoute un concert à volume important dans une maison relativement isolée, peut désirer une dynamique de 55 dB (celle de l'orchestre). A niveau modéré, 35 dB suffiront, tandis qu'en milieu bruyant (la ville en est un) 25 dB seront appropriés. En voiture, pour ne pas masquer certains bruits utiles, une dynamique de 10 à 15 dB sera raisonnable. Cela n'a rien à voir évidemment avec la compression type "radio libre" à 5 dB, compression parfaitement utilitaire : une musique "audimate" encadre les annonces publicitaires et sert d'accompagnement tonique, incitatif et lisse ; c'est alors une musique de fond et de commerce. Compression, compresse, cataplasme, cette même musique (beauté laminée) peut atténuer (ou rendre supportable) la violence du travail ou des transports, et servir de *Tranxène* à la fuite des jours, à la rage "automobilique" des bou-chons.

**Page non
disponible**

INSTRUMENTS DE MUSIQUE

LES COMPOSITES : DE NOUVEAUX MATERIAUX POUR LES LUTHIERS



Maxime et Florian Louineau

Le bois, en lutherie acoustique, reste grâce à ses qualités multiples le matériau privilégié des facteurs d'instruments, tant pour le haut de gamme que pour les instruments les plus diffusés, produits en grande série. Il n'y a guère que le domaine de la lutherie électrique - guitares et basses - pour échapper à cette règle et faire appel de façon régulière aux produits de la haute technologie. Il faut dire que les musiciens classiques sont un tantinet conservateurs et il n'est pas impossible qu'a priori l'idée de jouer sur un violon ou une contrebasse en carbone en offusque plus d'un... Pourtant certains luthiers ont à cœur de proposer des solutions nouvelles, partant du principe que l'on peut concilier tradition et révolution : les composites, une fois maîtrisés, peuvent fort bien s'employer en lutherie. L'un de ces novateurs construit dans la région de Douai des instruments en composite, violon, alto, violoncelle et contrebasse : un quatuor en carbone. Nous avons rencontré ce luthier pas comme les autres.

Carbone ou épicea ?

Composites et Instruments Pierre Laurence, comme son nom l'indique, est une société dont la vocation première est d'introduire les matériaux composites dans le domaine de la facture instrumentale. Des premières études à la réalisation concrète, quatre années de recherches furent nécessaires, menées en partenariat avec le "Centre de recherches des Mines de Douai". Ces études concernaient bien entendu l'architecture de l'instrument mais surtout la mise en œuvre des procédés de

fabrication dont l'élaboration n'avait rien d'évident. Si le travail des composites, et du carbone en particulier, n'est pas une pratique inédite puisque nombre d'industries y font appel, il s'agissait là d'adapter ce savoir-faire à un domaine bien différent. Ainsi, pour le violon par exemple, le résultat devait obligatoirement posséder de très bonnes qualités acoustiques mais aussi une grande insensibilité aux chocs, aux changements de température... et un coût de fabrication raisonnable, ne serait-ce que pour justifier l'utilisation de nou-

veaux matériaux. Voyons ce qu'en pense P. Laurence, principal animateur de CIPL.

Un instrument un peu magique

Avez-vous toujours voulu appliquer les technologies des composites à la fabrication d'instruments de musique ?

C'est une démarche toute simple : depuis ma plus tendre enfance, j'ai toujours eu de l'intérêt pour les instruments de musique mais, en même temps, je constatais leur fragilité consternante et surtout

leur manque de fiabilité sur le plan de la fabrication. Je veux dire par là que tailler un morceau de bois, même avec tout le talent imaginable, c'est... aléatoire, on n'est jamais certain des résultats dans le temps. Il y a toutes les difficultés liées à un artisanat très subtil, très intéressant, mais avec les incertitudes résultant d'un matériau très fragile et très sensible à son environnement : humidité, chaleur, etc. Donc, ayant découvert au travers d'une pratique d'architecte l'intérêt de l'utilisation des composites, notamment dans le bâtiment puis dans l'industrie, l'aviation, et puisque je m'intéressais aussi aux instruments de musique, il m'est apparu fort difficile de ne pas songer à utiliser ce type de matériau en lutherie. La première idée, c'était d'essayer de faire des instruments plus fiables que les instruments traditionnels et qui soient en même temps plus abordables sur le plan financier. Des instruments de qualité que la majorité des gens pourraient s'offrir sans trop de sacrifices. Alors qu'à l'heure actuelle, il est évidemment possible de s'acheter un bel instrument - les luthiers en font de remarquables - mais il faut en revanche mettre beaucoup d'argent. L'impératif financier me semble un obstacle au développement de la pratique musicale.

Plus concrètement, de quelle manière votre formation d'architecte a-t-elle nourri votre conception de la lutherie ?

S'il peut paraître surprenant que je sois devenu facteur d'instruments avec une formation d'architecte, ce parcours me semble presque normal. L'architecture est vraisemblablement l'une des seules formations où l'on s'intéresse à la notion de concept et aux méthodologies qui favorisent la concrétisation des idées. Cela m'a permis d'aborder le métier avec une totale absence d'a priori, d'avoir une vision large des choses.

A propos de concepts, qu'en est-il des concepts qui définissent

le violon, on entend beaucoup de choses à ce sujet : méthodes de calcul ancestrales, proportions idéales, on parle même de nombre d'or..., comment avez-vous abordé ces questions ?

Ce que l'on peut dire, déjà, c'est que beaucoup de scientifiques et du plus haut niveau se sont intéressés aux mathématiques du violon. Pourquoi ? Tout d'abord parce que c'est un instrument un peu magique et, a posteriori, on peut comprendre qu'il fascine : il est réellement parfait. Nous nous sommes bien entendu posés la question de cette perfection et pris au jeu nous n'avons pas pu faire autrement que d'y répondre. Il faut préciser qu'à l'origine je m'intéressais aux applications de ces matériaux à la facture de pianos. Et entre temps j'ai développé le matériau destiné aux clarinettes pour Buffet Crampon, cela fut un grand plaisir de travailler avec des gens qui avaient 150 ans de savoir-faire derrière eux.

Les bons bois ont déjà disparus

Ces instruments utilisent un composite à base d'ébène, non ?

Effectivement. En ce qui concerne Buffet Crampon, le problème posé était le suivant : les bons bois ont déjà disparus dans certains pays d'Amérique du sud et il est à craindre que dans un avenir relativement proche, l'approvisionnement en matière première de bonne qualité pose problème. Pour prendre un exemple, le commerce des palissandres d'Amazonie est désormais illégal. De plus, le taux de rejet de matières premières dans une société comme Buffet est très élevé, beaucoup de lots sont refusés car ils ne présentent pas les qualités requises. Le problème est le même pour tous les facteurs : de nos jours, personne ne peut garantir le bois et cela n'ira pas en s'arrangeant. C'est pourquoi Buffet m'a contacté dans l'optique suivante : développer un matériau composite

qui viendra à terme se substituer à l'ébène. J'avais au début envisagé une démarche à base de matériaux de synthèse et un jour, en visitant l'usine Buffet, je vois cette montagne de copeaux merveilleuse, une farine d'ébène et, tout de suite, je me suis dit : c'est de l'or noir !

C'est là que vous avez eu l'idée d'intégrer l'ébène comme charge dans un composite ?

Attention, il ne faut pas se tromper. La vision des déchets d'ébène chez Buffet Crampon m'a effectivement donné le déclic, pourrait-on dire, mais dans le procédé que j'ai mis au point et breveté, l'ébène n'est pas une charge, il constitue le matériau principal. Il faut savoir que l'ébène contient naturellement les résines suffisantes à son autopolymérisation. C'est-à-dire que vous faites chauffer de l'ébène à 100° et vous allez en tirer un jus qui va durcir au refroidissement. Ce jus, c'est de la résine. C'est quasiment un thermoplastique. Il est intéressant de pouvoir agglomérer des copeaux d'ébène sans apport, uniquement par cuisson et par frittage. On en fait un matériau qui va s'autofixer mais comme tous les matériaux obtenus par frittage il va risquer d'être cassant. J'ai donc eu l'idée, fort simple par ailleurs, d'y mettre des fibres et d'utiliser des déchets de production de fibres de carbone. La taille de ces fibres est bien sûr calibrée, 3 mm de long pour 7 µm de diamètre. Intervient ensuite tout un savoir-faire au niveau du dosage, de l'intégration de la fibre dans la poudre, qui n'a rien d'évident. Une fois que l'on a acquis cette expérience, il en ressort un matériau magnifique qui permet de faire, comme c'est le cas pour Buffet Crampon, des instruments haut de gamme. Avec cet ébène reconstitué, les instruments ne se fendent plus.

Y a-t-il un apport de résine supplémentaire dans ce matériau, par exemple pour aider à la fabrication ?

On procède effectivement à un ajout de résine mais pour aider à la dispersion du carbone, qu'il est très difficile d'intégrer par voie sèche. Nous avons donc opté pour une intégration par la voie humide, avec une résine très fluide qu'on utilise à un certain gradient de température ce qui permet une diffusion très large du carbone dans l'ébène. On fixe ensuite cette résine en la polymérisant, ce n'est pas utile de l'extraire, sa présence n'altère pas les qualités du matériau.

D'où provient la résistance de votre composite ; de cette résine, justement, des fibres de carbone ou de l'ébène en lui-même ?

C'est très simple, le module de la résine contenue dans l'ébène à l'état naturel est le même que celui des résines époxy, autour de 600 décanewtons. C'est de toute façon inférieur au module d'un matériau sans adjonction de résine. Ce qui fait donc le module du matériau, c'est finalement la fibre qui devient de fait la structure mécanique. Sinon, bien évidemment, le module de la résine n'est rien par rapport à celui de la fibre, la résine n'est là que pour assurer une cohésion et, dans le cas présent, uniquement pour introduire un matériau.

Envisagez-vous d'autres applications que la clarinette pour ce composite ?

J'ai cédé les droits d'exploitation de ce produit pour la clarinette, le hautbois et le basson, à part cela je suis libre de tenter d'autres applications et j'ai, par exemple, la ferme intention de faire des flûtes. Nous en avons déjà construit une qui, assez curieusement, est déjà vendue. Il s'agissait en fait d'un prototype de flûte à bec et, lors d'une exposition, une personne est arrivée, l'a essayée et nous a tout de suite demandé le prix. Ne voulant pas la vendre, nous avons annoncé un prix très élevé ; la personne a sorti son chèque et est partie avec l'instrument : il faut croire qu'il lui plaisait. Indépendamment de cela, il y a à mon sens

sur le marché de la flûte à bec un problème de qualité, la plupart des instruments qu'on trouve sont assez mauvais. Nous aurons à l'avenir des choses assez intéressantes à proposer dans ce domaine.

Stradivarius avait une approche scientifique du violon

Pour en revenir au violon et aux mathématiques...

En effectuant des recherches à ce propos, nous avons fait ce que toute personne s'intéressant de près au sujet fait obligatoirement, c'est-à-dire appréhender les subtilités de la géométrie de l'instrument. Après diverses recherches bibliographiques, nous nous sommes bien sûr rendus compte que beaucoup de monde avait travaillé sur le sujet. Mais il semblerait - c'est du moins mon opinion - que la personne qui ait produit la réflexion la plus "percutante", la plus féconde, c'est Stradivarius. Son approche de l'instrument avait une réelle dimension théorique. Encore une fois c'est la notion de concept qui prime et qui est si présente chez Stradivarius, tant en ce qui concerne la géométrie de l'instrument que pour les matériaux eux-mêmes. Contrairement à ce que l'on peut penser, du bois il faisait un matériau. Le vernis, le durcissement du bois, tous ces paramètres ont été étudiés par Stradivarius qui avait bien conscience du caractère véritablement stratégique du choix de certains matériaux dans la conception même de l'instrument. Je pense que s'il avait connu les composites, il en aurait fait usage, sans aucun doute. Il faut d'ailleurs se rappeler que Stradivarius a utilisé plusieurs essences de bois pour faire ses instruments, en ajustant les paramètres de fabrication pour s'adapter aux différents matériaux et obtenir un résultat à peu près constant. En cela, il avait une grande compréhension de ces critères de matériau. Stradivarius reste



Contrebasse en fibres de carbone. Conception et fabrication CIPL.

assez unique parmi les grands maîtres. Lui, il n'a pas fait ce que faisait son maître, comme la plupart des luthiers. Il avait vraisemblablement une démarche méthodologique et je crois que son approche était celle d'un scientifique. Pour ce qui nous concerne, nous nous sommes attachés à la géométrie de l'instrument qu'il a développé, et aux croquis qui lui sont attribués. Nous avons, sans prétention aucune, analysé et vérifié mathématiquement ces croquis, pour aboutir à des constatations parfois surprenantes. Ainsi, par exemple, quand sur un croquis il y a deux arcs tangentiels, on s'est rendu compte que la précision de raccordement de ces arcs était quasi absolue. En tout cas, nous l'avons contrôlée à la 17ème décimale. Avec un compas, une règle et un crayon, cela laisse rêveur... Nous avons travaillé sur cette base géométrique à laquelle il

n'y a pas grand chose à redire, nous l'avons complétée et justifiée mathématiquement et nous sommes passés à la réalisation. Il faut se garder, à propos de l'emploi des matériaux composites, d'une vision simpliste et d'une certaine façon, ce serait absurde d'opposer bois et composites. Par sa réalisation même, un violon en bois est déjà une structure composite. Le bois de lutherie tel qu'il est mis en œuvre pour cette application, c'est une matrice cellulosique avec des fibres associées à plusieurs couches de vernis, imprégnées au maximum, sans compter les colles utilisées pour l'assemblage ; si ce n'est pas un composite qu'est ce que c'est ? (rires). Pour en revenir aux éléments géométriques du violon, nous en avons fait un programme informatique que nous avons paramétré pour tous les instruments du quatuor. Ce qui offre une gestion très souple de toute la gamme. Il a ensuite fallu définir les interfaces qui permettent de piloter les machines à commande numérique pour réaliser les différents moules. L'homme n'a pas à y mettre la main, l'homme n'a à y mettre que son cerveau.

Vous n'avez pas automatisé la phase d'assemblage des instruments ?

Non. On pourrait faire la folie de l'automatisation mais il faut avouer que le montage d'un instrument est tellement subtil, et amusant aussi, que ce n'était pas dans nos préoccupations. On ne tient pas à échapper au plaisir d'assembler l'instrument, de monter les cordes et de tirer le premier son du violon. Il y a toujours un moment d'anxiété et d'émotion quand l'instrument sonne pour la première fois.

Pourquoi avoir conservé le manche en bois ?

Parce que, sur un violon, le manche doit répondre à un cahier des charges très délicat, lié au système de réglage de la cheville. Il y a des caractéristiques contradic-

toires que l'on n'arrive pas, pour l'instant, à obtenir en composite. C'est plus subtil qu'un sommier de piano, par exemple, car la cheville se tourne à la main; il faut que ce soit très doux à la main du violoniste, mais cependant il faut que cela tienne l'accord. Nous en restons donc pour l'instant au bois. En revanche, les touches seront en composite d'ébène. Pour le violon, la pièce n'est pas de dimensions très importante, mais en ce qui concerne la contrebasse, où la touche a une taille beaucoup plus grande et demande donc une grande pièce d'ébène, cela devient très intéressant d'utiliser ce composite.

Toujours le problème de la pénurie et de la préservation du bois ?

Bien sûr. Je me sens très concerné par ce problème. Il faut bien avoir conscience que, pour des instruments tels que la clarinette, la matière première est amenée à disparaître à terme. Imaginez que, sur un ébène, il n'y a que peu de bois exploitable, le reste n'est pas utilisable en lutherie, c'est de l'aubier. On a donc déjà beaucoup de déchets à la coupe. Après débit, on obtient des carrelats, donc de section parallépipédique, à partir desquels vous voulez faire une clarinette. A l'étape finale, vous arriverez à une déperdition en copeaux impressionnante. Toutes ces pertes énormes, le procédé composite permet dans une certaine mesure de les juguler. Pour faire du composite ébène, on utilise tout l'arbre et il n'y a pas de pertes, ce qui peut diviser par 20 l'exploitation de l'ébène en matière d'instruments de musique, qui est le premier consommateur. C'est à mon avis le seul moyen de reconstituer le patrimoine d'arbres. A l'heure actuelle, on ne sait pas reproduire cet arbre, à la différence du sapin par exemple et dans des pays comme la Tanzanie, on chasse l'ébène : vous voyez le problème ?



Violon en fibres de carbone. Conception et fabrication CIPL.

Quel accueil reçoivent vos instruments en composite carbone, les violons notamment, dans le milieu quelque peu conservateur de la musique classique ?

Nous observons trois types de réaction. Les enfants ; enthousiastes, ouverts, très heureux en somme. Il y a un autre public, que je décrirais comme les musiciens confirmés, d'un certain âge; très positifs, eux aussi. Le public le plus grinçant, ce serait un peu les 18-20 ans. Musiciens déjà confirmés mais, comment dire, qui sont "complètement dans le mythe". Dans le mythe et du violoncelliste et, bien entendu, de la lutherie. Alors là, vous avez des types qui vous prennent de très très haut : "Je connais le carbone, ça sonne métallique" (rires), si vous voyez ce que je veux dire. N'étant pas totalement pétris de certitudes, nous avons, devant ce genre de réaction, organisé des tests en aveugle. Les résultats ont clairement montré qu'il n'y avait pas de signature sonore identifiable en ce qui concerne le matériau.

De quelle manière avez-vous résolu les problèmes d'imprégnation à cœur de la fibre ?

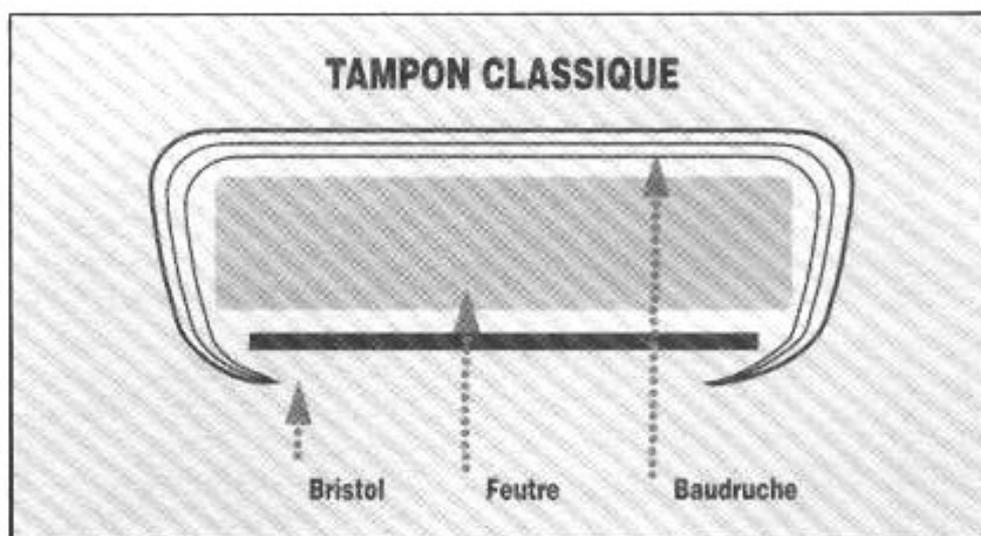
Le plus simplement du monde : avec des résines hautement fluidifiées et en utilisant conjointement le vide, la pression et la chaleur.

Justement, comment sont faites les tables d'harmonie : au moule ?

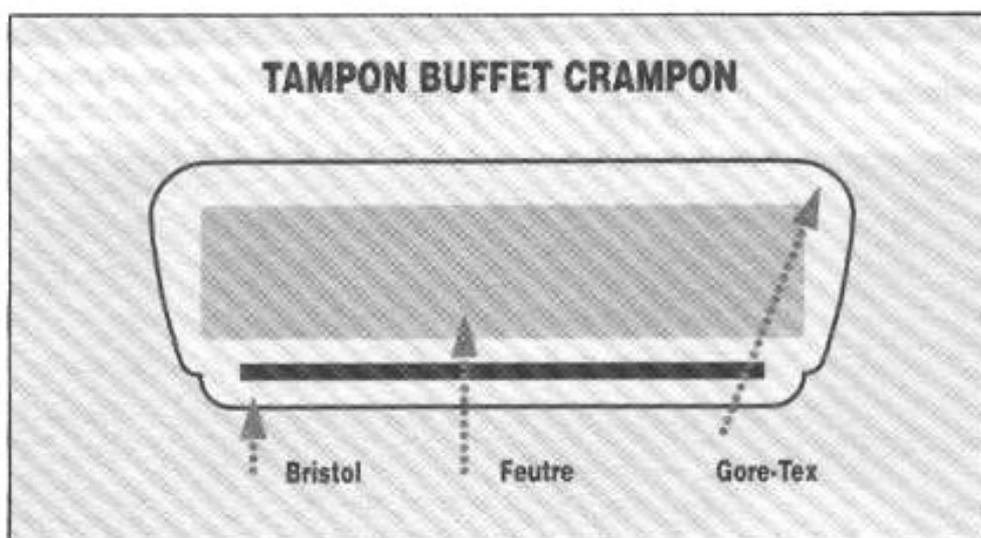
Non, pas seulement. Tout est fait à l'autoclave : nous avons un moule avec, derrière, une poche à vide et 7 bars de pression, à une température de 100 à 120°. Ce sont des techniques autoclaves classiques; on utilise la différence de potentiel créée par le vide et la pression. Il n'y a pas d'invention là-dedans puisque ces procédés existent depuis longtemps en aéronautique. Notre savoir-faire réside plutôt dans l'orientation des fibres et dans les innombrables petites astuces de montage. C'est pourquoi il n'y a pas eu de dépôt de brevet concernant le violon, puisqu'il n'utilise pas de technique ou de matériau nouveau, à l'inverse des instruments en ébène reconstitués qui font appel, comme on l'a vu, à un composite absolument inédit. En revanche, je pense que nous ferons, dans un proche avenir, une publication à caractère scientifique sur les mathématiques du violon. Même si le sujet est pointu, les quelques individus que cela intéresse dans le monde seront bien contents...de nous faire part de leurs observations !

Buffet Crampon : la tradition et l'avant-garde

Mais les composites intéressent aussi des facteur de dimension internationale : on a vu plus haut dans quelles circonstances P. Laurent avait mis au point le matériau à base d'ébène utilisé par Buffet Crampon. Née en 1825, cette firme a établi sa réputation grâce aux instruments à vent et particulièrement ceux de la famille des bois, bas-



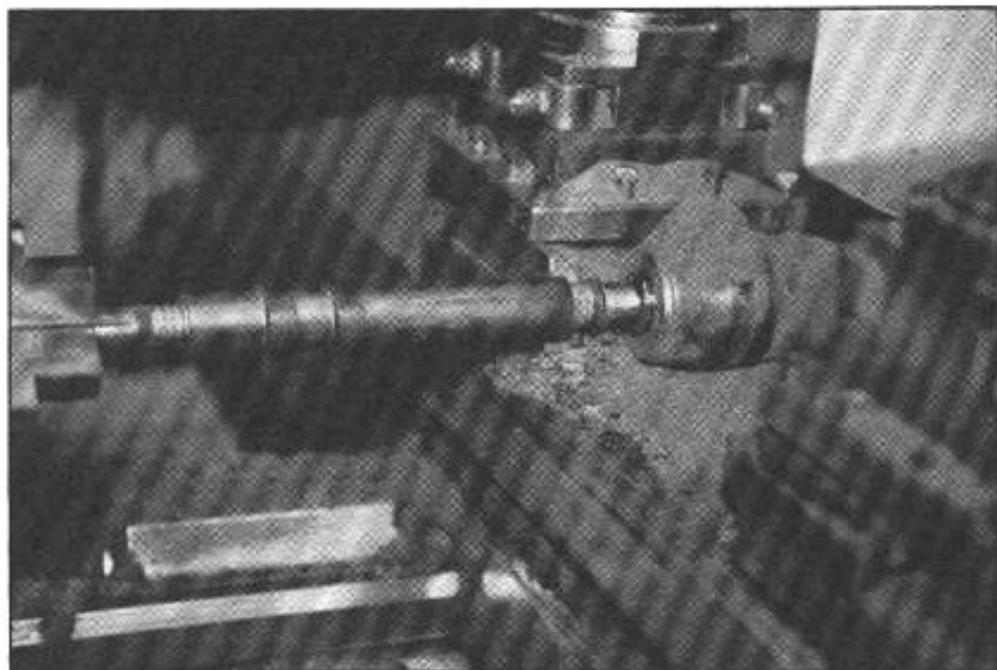
Tampon classique.



Tampon Buffet Crampon.

sons, hautbois et surtout clarinettes qui ont contribué à asseoir mondialement la renommée de la maison. Cet héritage n'empêche pourtant pas les gens de chez BC de se tourner vers l'avenir en recherchant des solutions nouvelles propres à améliorer les instruments. Performance, couleur sonore, mais aussi fiabilité et rapport qualité-prix sont concernés par ces recherches, même si dans ce domaine il est parfois difficile d'avancer à grand pas. Ces évolutions impliquent en effet des recherches longues et coûteuses et, par ailleurs, chaque bouleversement technique nécessite une adaptation de l'outil de production qui peut parfois se révéler très lourde financièrement. La première

application commerciale des matériaux composites mises en œuvre par BC fut assez discrète puisqu'il s'agissait de remplacer sur la clarinette Elite (sortie il y a six ans) les viroles traditionnelles par des viroles en fil de carbone. Cette petite révolution n'était qu'un premier pas vers une politique d'innovation beaucoup plus ambitieuse. Mais l'application de nouvelles technologies à des domaines tels que la lutherie demande un ensemble de compétences qui ne sont pas du seul ressort de la facture instrumentale, c'est pourquoi BC en est venu à développer des partenariats, entre autres avec des firmes comme W.L. Gore, des organismes publics



Tournage extérieur d'un corps du haut de clarinette.

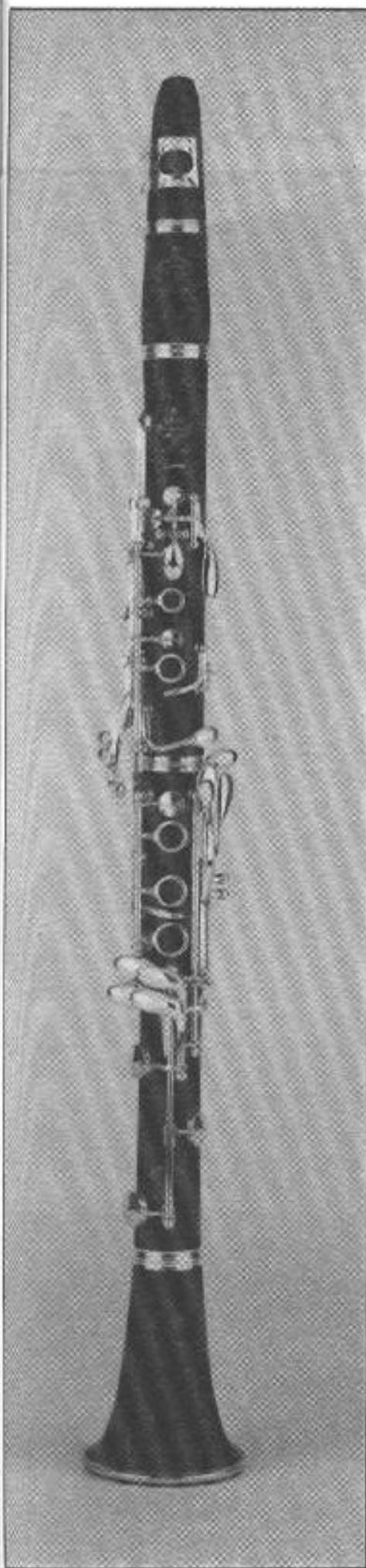


Dernier avivage des spatules de clés.

- Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement - ou enfin avec des spécialistes des composites tels que Pierre Laurence. Les fruits de la collaboration avec ce dernier sont apparus sur le marché de la clarinette depuis peu avec le modèle BC Green-Line qui, on l'aura compris, exploite le procédé initié par Pierre Laurence. A tous les avantages de ce nouveau matériau, en termes de

fiabilité, de fabrication et d'exploitation optimale des ressources naturelles s'ajoute une couleur sonore qui semble satisfaire la majorité des utilisateurs. Seul le prix ne semble pas avoir bénéficié de cette nouvelle approche technologique puisque le modèle Green-Line se positionne résolument dans le créneau des instruments haut de gamme. Bien sûr, ses qualités mécaniques aussi

bien qu'acoustiques l'y autorisent, tout au plus peut-on regretter que le recours à des technologies de pointe n'ouvre pas la voie à des instruments plus abordables financièrement parlant. Une autre innovation technologique majeure, encore que beaucoup plus discrète, est elle aussi le fruit d'une collaboration réussie : l'adoption de tampons en Gore Tex en lieu et place des traditionnels tampons de baudruche. Ces derniers présentent en effet des inconvénients jusqu'à ce jour incontournables. Constitués d'une feuille de bristol et d'une pièce de feutre recouvertes toutes deux d'une ou plusieurs couches de baudruche, ils possèdent une forte sensibilité à l'humidité, principalement due au mode d'assemblage du tampon. La baudruche, de l'intestin de bœuf ou de mouton, est mouillée afin d'être tendue sur le feutre. Elle se rétracte ensuite au séchage et de tend de façon homogène sur le tampon. Le revers de la médaille est que ses caractéristiques mécaniques ne sont pas stables dans le temps et sont fortement liées à l'hygrométrie. Les changements d'ambiance, les effets de la salive ne manquent donc pas, à long terme, de provoquer un phénomène d'usure du tampon entraînant des risques de gonflement du feutre, des bruits parasites et des effets de vibration. C'est au bout de deux années d'essais infructueux que le service R&D de Buffet Crampon, après avoir passé en revue un nombre impressionnant de matériaux (mousses, plastiques...) a trouvé la solution consistant à entourer le feutre et le bristol d'un film spécial en Gore Tex. La fabrication de ces tampons "high tech" a nécessité la mise au point d'un outillage adéquat, le résultat semble en revanche à la hauteur des espérances : le bouchage est constant, les phénomènes de vibration n'existent plus et les musiciens font état d'un confort de jeu remarquable. Le procédé est pour l'instant limité aux clarinettes et



Clarinete Green Line.

aux hautbois, mais Buffet Crampon affirme que des recherches sont en cours afin de l'étendre au reste des instruments de la gamme.

L'introduction de nouveaux matériaux dits "technologiques" au sein d'instruments de musique répond à différentes motivations de la part des luthiers. D'un côté, le fait que certaines matières premières soient en voie de disparition rend préoccupante l'étude et la mise en place de matériaux de remplacement aux caractéristiques proches de ceux en usage. De l'autre côté, l'amélioration des instruments et de leur fiabilité, par rapport aux coûts de fabrication, nécessite la substitution des composants dont on ne peut rien attendre de mieux d'un point de vue qualificatif. Ces derniers sont en général supplantés par des produits plus performants dont la mise au point est souvent récente, le Gore Tex et la fibre de carbone de la série Buffet Crampon Green-Line en sont l'exemple même. Quant aux instruments en carbone conçus par Pierre Laurence, on peut imaginer qu'ils ne séduiront pas facilement les musiciens plus sensibles à la beauté du bois qu'à l'esthétique sonore. Pour les autres, ceux qui n'écoutent que leurs oreilles, il est évident qu'une démarche comme celle de CIPL est liée à un désir tout simple : faire vivre la facture instrumentale. Ce désir se nourrit bien sûr de traditions, mais aussi et surtout d'une évidence qu'il faut bien admettre; ce qui reste à faire n'appartient pas toujours au passé.

Merci à Pierre Laurence (CIPL) et Barbara Le Bars (Buffet Crampon) pour leur collaboration. CIPL, 50 bd Bréguet, 59500 Douai. Tél. 27.99.74.40.

Buffet Crampon, 5 rue Maurice Berteaux, 78200 Mantes-la-Ville; Tél. 34.77.57.87.

Green-Line ®

**Page non
disponible**

RETOUR AUX HAUT-PARLEURS A RESONATEURS

Jean Hiraga



n janvier 1990, le n°8 de L'Audiophile décrivait dans la rubrique

"Musée imaginaire" un haut-parleur à résonateurs multiples ainsi que l'une de ses applications. Cet article a suscité l'intérêt de nos lecteurs et même des constructeurs à l'affût d'idées nouvelles.

La version de base remonte au début des années 30. Baptisé "Daltona" ou "Résonateur Dynharmonique" par la société Thomson qui le commercialisa dès 1935, ce curieux haut-parleur fut conçu pour différentes applications en sonorisation : usage domestique, halls d'hôtels, cafés, salles de spectacle. Nous avons décidé de revenir sur ce sujet car un passionné des "antiquités audio", M. Michel Tassili a pu le retrouver et le remettre en état.

Les haut-parleurs électrodynamiques classiques font appel à différents types de charge que l'on peut subdiviser en trois catégories principales : le baffle dit "infini", le coffret clos et l'enceinte dite "accordée" ou "Bass-reflex". Rappelons que la présence de ces charges est indispensable à la restitution des fréquences graves, sans quoi il se produirait un effet de "court-circuit acoustique" entre les émissions acoustiques frontales et dorsales en opposition de phase. Dans chacune des trois catégories de charges il existe bien entendu des variantes. On en connaît un grand nombre. On en découvre et on en redécouvre d'autres en prenant par exemple connaissance des idées proposés dans les revues spécialisées ou bien en consultant les brevets d'invention et les modèles déposés publiés un peu partout dans le monde.

Il avait été question, dans le numéro 8 (nouvelle série) de *L'Audiophile* d'une variante de la charge "Bass-reflex" baptisée "Multi-Duct Load Enclosure", ou "enceinte à accords multiples". Cette enceinte, dont la vue en coupe est représentée sur la figure 1, avait été décrite en 1936 dans la revue américaine *Radio Engineering* par ses trois auteurs, Caulton, Dickey et Perry. Il n'est pas très facile d'établir aujourd'hui si cette invention s'est inspirée ou non de la charge à résonateurs multiples (et non pas à accords multiples) proposée en 1930 par Edouard d'Alton sous l'appellation "Daltona". Dans le cas de la figure 1, il s'agit d'une enceinte accordée non pas à l'aide d'un seul évent tubulaire, mais à partir d'une série d'évents placés à l'intérieur de l'enceinte. Une des variantes est l'enceinte dite "double bass-reflex".

Une description de cette enceinte, qu'il ne faut pas confondre avec d'autres principes comme celui des charges à cavités accordées, a été abordée dans le numéro 12 de *L'Audiophile* (pages 132 à 135). Il existe une autre variante, d'origine française et plus récente (années 40), qui consiste à reprendre le principe de la figure 1, mais avec mise en place des séries d'évents tubulaires à l'extérieur de l'enceinte, comme sur la figure 2. Ces différentes solutions offrent pour principal avantage une plus grande souplesse au niveau de l'optimisation de paramètres comme l'étendue et la linéarité de réponse niveau/fréquence de l'enceinte dans le registre grave ou bien encore la possibilité de corriger, voir de "lisser" la caractéristique d'impédance en fonction de la fréquence. Récemment, en 1989, la firme japonaise Onkyo reprit cette idée

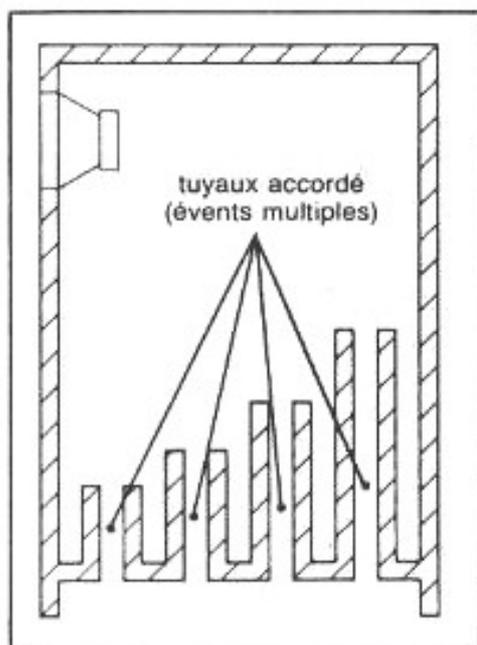


Fig. 1 : Principe de l'enceinte à accords multiples "Multi-Duct Load Enclosure". Sa première description remonte à 1936 (revue américaine Radio Engineering). Ses auteurs sont Caulton, Dickey et Perry de la firme R.C.A. Cette enceinte avait été baptisée "The Magic Voice" par ses concepteurs.

(sans s'en être inspirée forcément) lors de la réalisation d'un caisson grave, le SL-10. Son principe a été exposé dans le numéro 8 de L'Audiophile (nouvelle série). Sur ce caisson, les trois événements et leur équivalent électrique que l'on peut voir sur la figure 3 sont en fait remplacés par un seul événement laminaire composé de secteurs parallèles

avec la partie terminale biseautée, ce qui simplifie la fabrication en simulant un grand nombre d'événements tubulaires de longueur différente disposés côte à côte. L'idée est loin d'être inintéressante car ce petit caisson grave de 40 litres (il n'a pas été importé en France) aurait été capable de restituer la bande 35 Hz-100 Hz avec une grande linéarité.

Le principe développé par Edouard d'Alton en 1930 est différent. Il ne s'agit pas d'une enceinte à accords multiples mais à résonances multiples. Le principe rappelle quelque part celui de la figure 2, à la différence près que le haut-parleur est disposé cette fois verticalement, juste au-dessous des nombreux tuyaux résonateurs, comme le montre la figure 4. Au dessus de la membrane, une petite cavité, la "chambre supérieure", communique avec les résonateurs tubulaires de longueur et de diamètre donné. La "chambre inférieure" fait office de socle. Sous le haut-parleur prend place une pyramide qui participe à une meilleure diffusion du son dans la cavité. L'intérieur de la cavité est munie d'autre part de réflecteurs périphériques, le tout étant destiné à mieux renvoyer l'énergie acoustique dorsale vers les résonateurs tubulaires de plus gros diamètre. Cette disposition nous fait mieux comprendre le principe : le haut-parleur est chargé

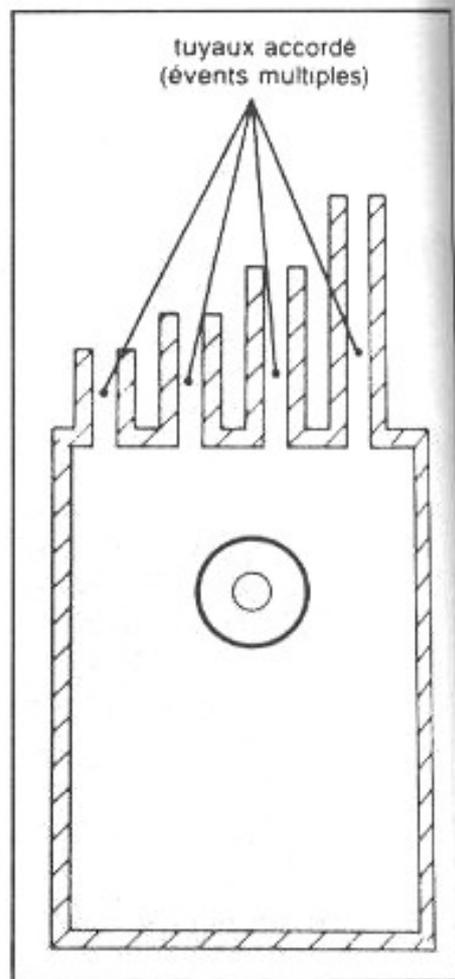


Fig. 2 : Variante du principe de charge à accords multiples représenté sur la fig. 1. Cette fois, la série d'événements tubulaires est disposée à l'extérieur, à la partie supérieure de l'enceinte. Le principe a été proposé en France vers 1940.

frontalement et dorsalement par deux cavités communiquant avec des tuyaux résonateurs de différentes tailles. Edouard d'Alton, inventeur de ce haut-parleur, a profité de la présence de nombreux haut-parleurs de diamètres et de hauteurs différents pour les aligner verticalement côte à côte en donnant au tout l'aspect d'un petit orgue. L'idée semble avoir "marché" car Edouard d'Alton réalisa de nombreux modèles pour le compte de la société Thomson. Les plus grands étaient des systèmes multi-voies et multi-amplifiés (déjà!) destinés aux premières applications du cinéma parlant. Les séries de tuyaux résonateurs étaient cette fois placés horizontalement, transformant ainsi un défaut inhé-

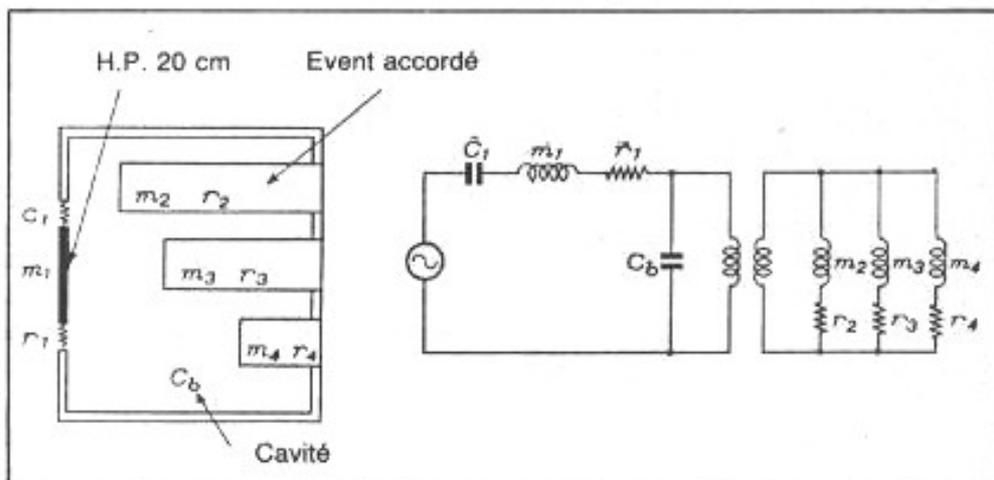


Fig. 3 : Caisson grave réalisé par Onkyo en 1989. Il reprend le principe de la charge à événements multiples. Les trois événements et leur équivalent électrique sont en fait remplacés par un seul événement laminaire (à secteurs parallèles) biseauté, simulant ainsi un grand nombre d'événements.

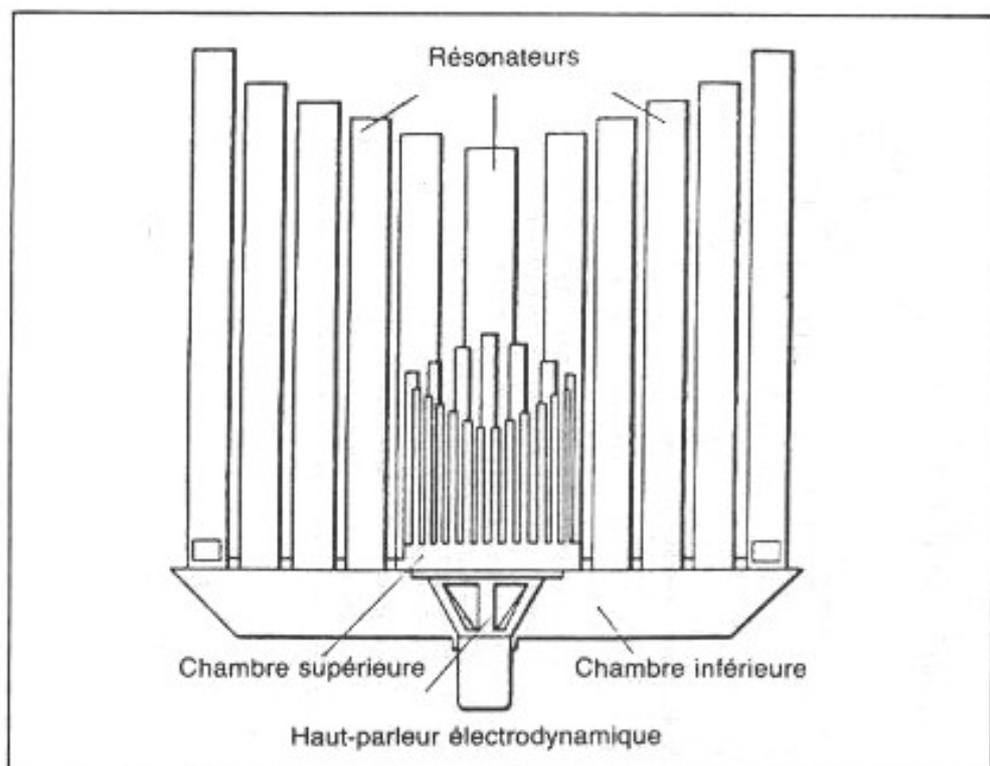


Fig. 4 : Coupe schématique de l'enceinte à résonateurs multiples frontaux et dorsaux conçue par l'ingénieur français Edouard d'Alton en 1930.

rant au principe en un système à "directivité contrôlée". On trouvera sur la figure 5 un exemple d'installation 3 voies conçu pour le cinéma parlant en 1933. Une autre extrapolation de ce principe fut l'élaboration d'un orgue "électro-acoustique", sorte d'ancêtre du syn-

thétiseur. Le principe consistait à capter le son produit par un harmonium à 24 jeux placé dans un petit volume acoustiquement étanche, à l'amplifier et à le restituer par l'intermédiaire de haut-parleurs à résonateurs multiples. Par rapport à un orgue conventionnel, Edouard d'Al-

ton gagnait sur "tous les tableaux". Il obtenait un niveau sonore imposant jusqu'aux fréquences les plus basses, soit 32 Hz, le prix de l'ensemble restait réaliste et le faible encombrement facilitait son installation. De plus, ce système avait plus l'aspect d'un orgue que d'un haut-parleur, ce qui était loin d'être un défaut. La conséquence est connue : un bon nombre d'églises dans lesquelles les orgues étaient soit inexistantes, soit à restaurer à grands frais s'équipèrent d'orgues électroacoustiques d'Alton. Ce phénomène est toujours d'actualité car les églises qui s'équipent en orgues électroniques ne manquent pas.

Revenons au système de haut-parleurs à résonateurs multiples. Thomson commercialisa plusieurs modèles, dont les 2 et 3 de la série 166. Les petites versions étaient destinées à un usage domestique. Le modèle 2, le résonateur Dynharmonique Thomson, "dernier mot de la technique électro-acoustique" s'intégrait parfaitement à un combiné radio-phonos. Les photos de la figure 7 montrent l'aspect de ce reproducteur sonore. Comme énoncé plus haut, son aspect est beaucoup plus proche d'un orgue

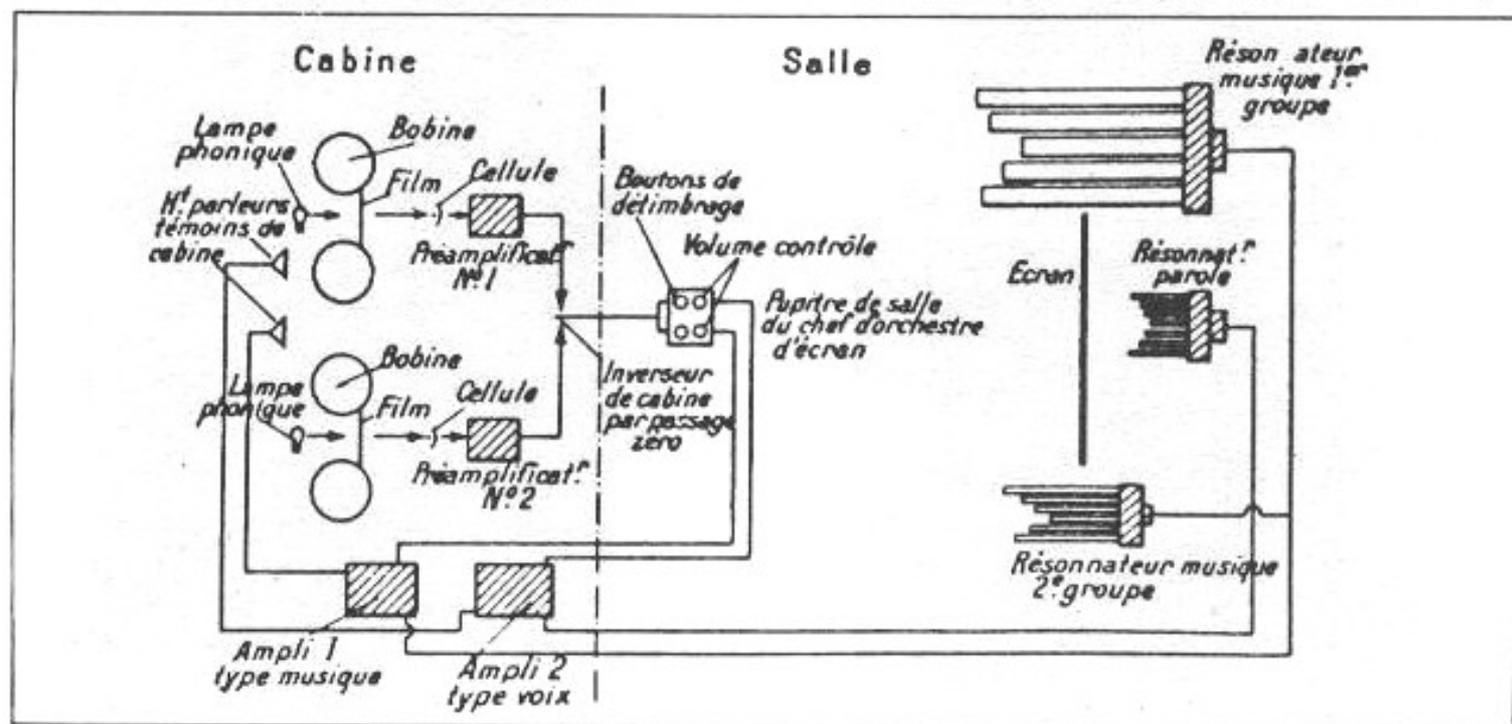


Fig. 5 : Exemple d'installation proposée en 1933 pour les applications du cinéma parlant. Les haut-parleurs à résonateurs multiples sont répartis en 3 voies dans un système multi-amplifié (d'après La Nature, août 1933).

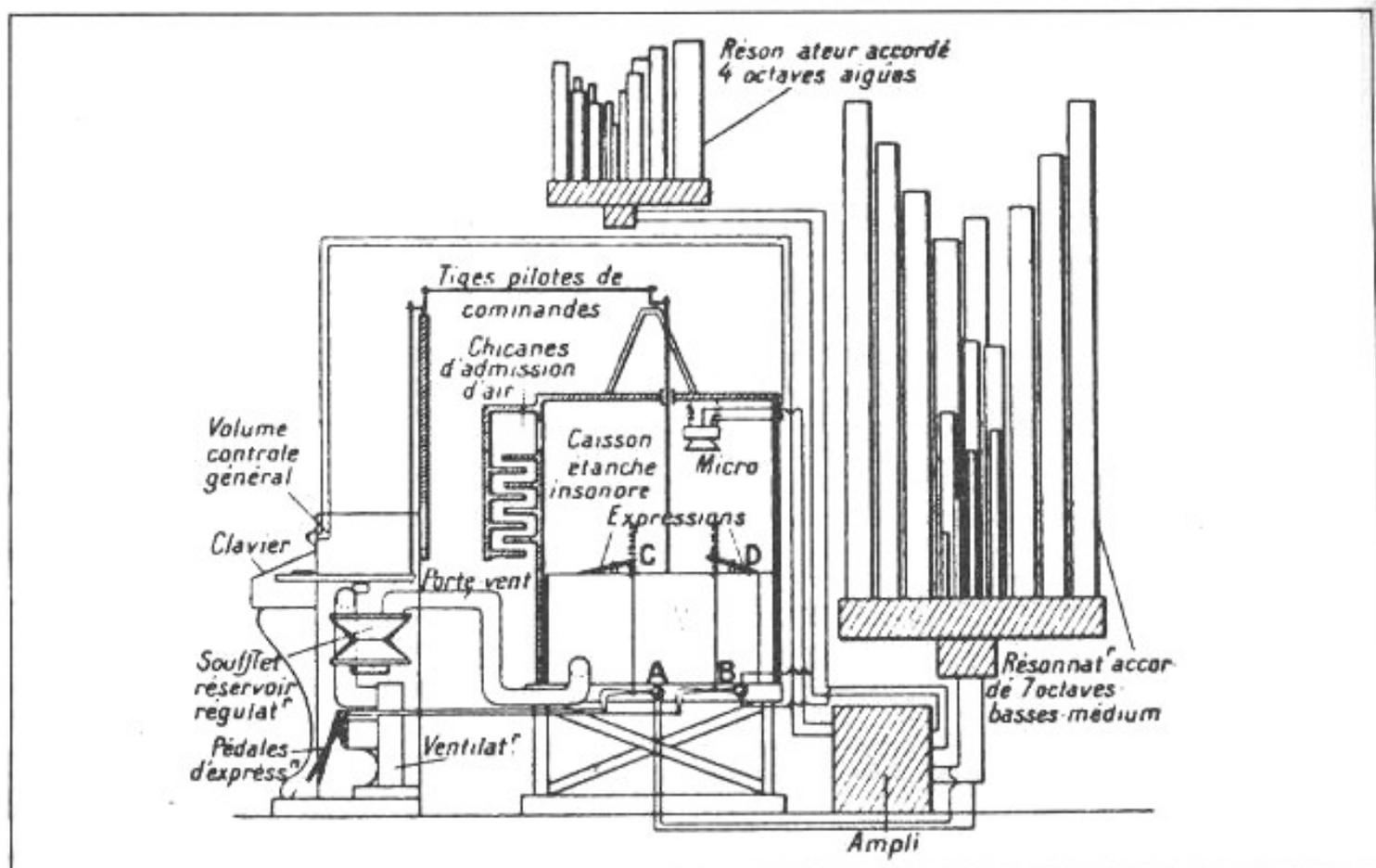


Fig. 6 : Principe de l'orgue électroacoustique conçu par Edouard d'Alton. Il permettait d'obtenir un niveau sonore très élevé, même sur des sons graves, sous un encombrement total restreint (les plus grands tuyaux mesuraient 2 m de longueur environ) (d'après La Nature, août 1933).

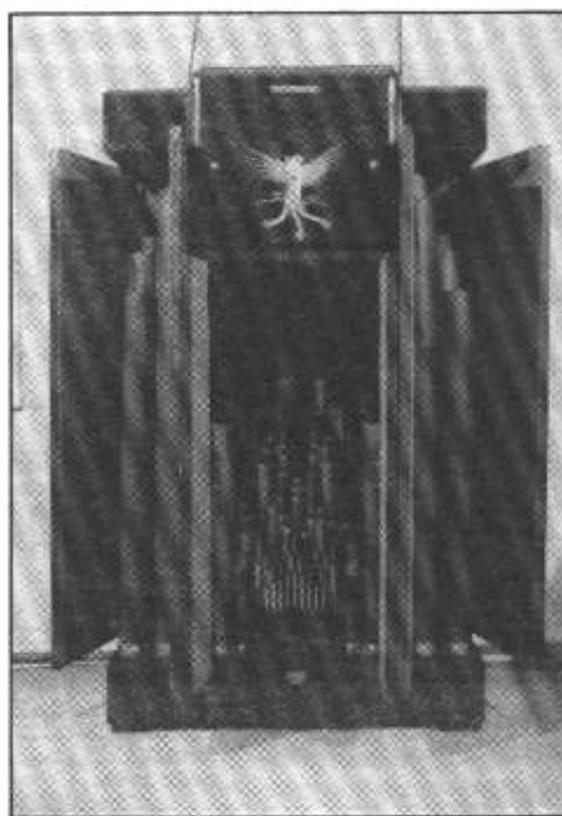
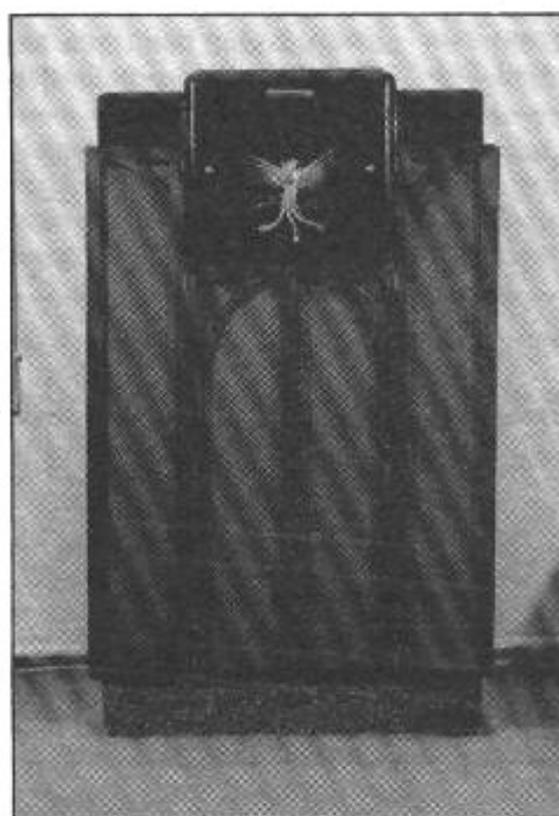


Fig. 7 : Aspect du combiné radio-phono équipé d'un haut-parleur à résonateurs multiples "Daltona" (collection de M. Michel Tassili). La partie supérieure centrale est réservée à la section radio-phono.

que celui d'un haut-parleur électrodynamique conventionnel.

Edouard d'Alton explique le principe de son haut-parleur en prenant pour base une expérience simple. Elle consiste à placer un diapason en action près du bord d'une éprouvette. En remplissant progressivement celle-ci, on raccourcit la colonne d'air et il se produit, pour une hauteur précise de la colonne d'air emprisonnée dans le tube, une forte amplification acoustique du son émis par le diapason. La résonance fondamentale d'une colonne d'air emprisonnée à l'intérieur d'un tube ouvert à ses deux extrémités dépend de plusieurs facteurs : la vitesse du son dans l'air en fonction de la température (331 m/s à 0°C, 344 m/s à 20°C), la longueur du tuyau et le diamètre de celui-ci, selon la formule de base : $f=C/2l$, avec f = fréquence en hertz, C = célérité du son dans l'air en cm/s et l = longueur du tuyau en cm. A longueur égale, un tuyau de forte section renforcera sensiblement la fondamentale tandis qu'un tuyau de petite section aura tendance à renforcer les harmoniques de celle-ci. La formule est simple mais le principe de la charge d'Alton fait intervenir d'autres paramètres. Le tuyau n'est pas réellement ouvert à ses deux extrémités car l'une d'elle communique avec une charge de petit volume combinée à un générateur acoustique. On peut alors interpréter l'expression de l'impédance acoustique Z_{A1} au niveau d'une extrémité du tube comme assimilable à celle de la gorge d'un tube de longueur déterminée. Cette considération nous fait revenir aux éléments d'acoustique décrits par Harry F. Olson en 1957 dans son ouvrage intitulé "Acoustical Engineering", que l'on trouvera sur la figure 8. On peut d'autre part assimiler le principe à un résonateur de Helmholtz (figure 9), dont le principe est décrit entre autres dans Les Techniques du Son, tome I. Cela

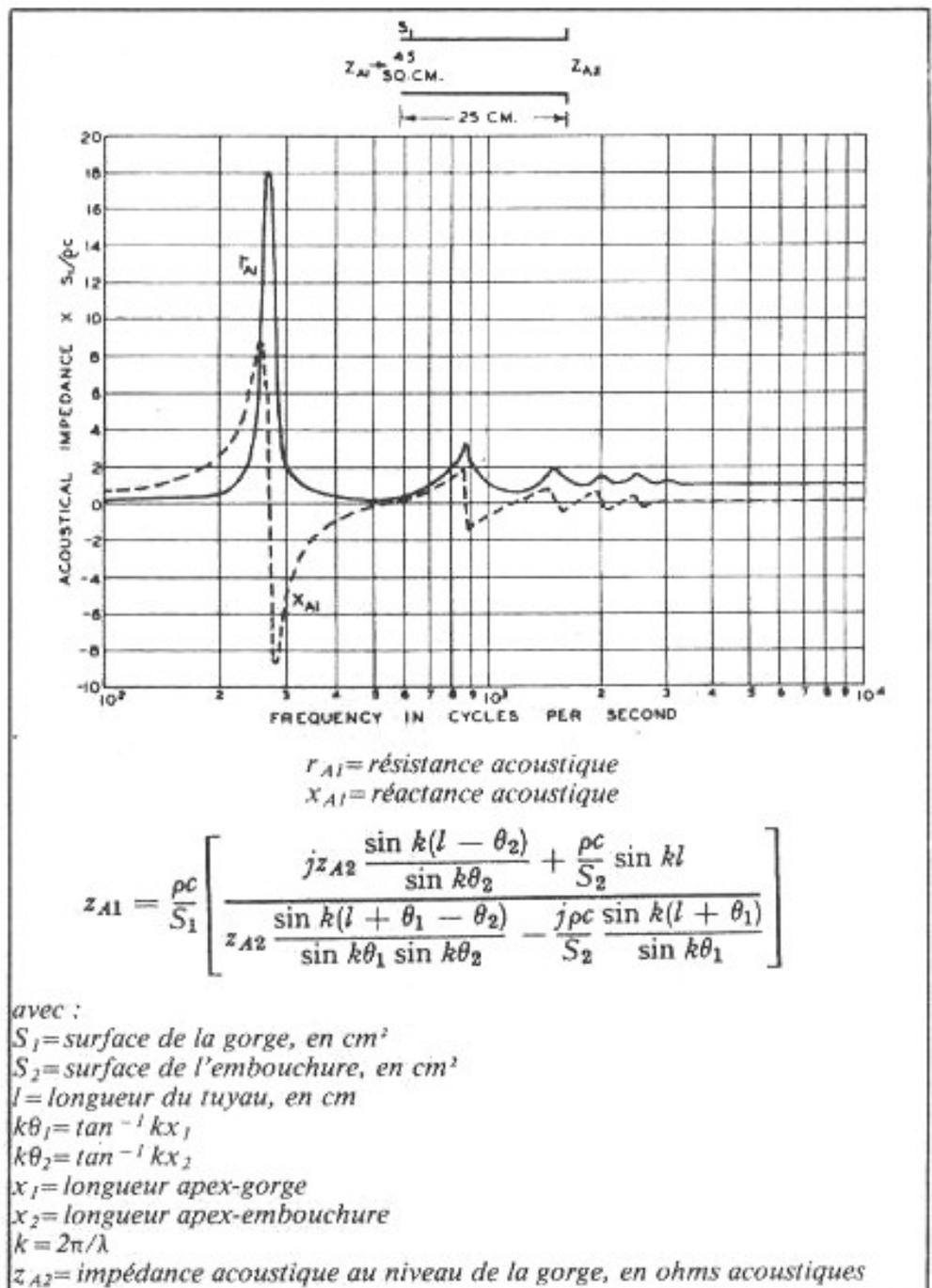


Fig. 8 : Caractéristiques de l'impédance acoustique d'un tube de longueur déterminée (d'après Harry F. Olson, Acoustical Engineering, Van Nostrand, 1957).

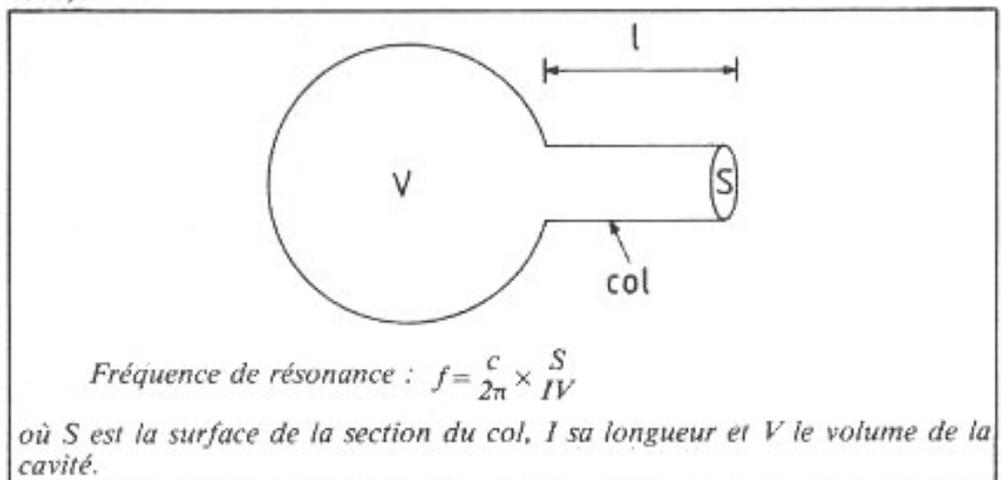


Fig. 9 : Principe du résonateur de Helmholtz.

revient à assimiler la "chambre supérieure" du haut-parleur à résonateur d'Alton au volume V du résonateur, l à la longueur du tuyau et S à la surface de la section de ce tuyau. Il faut toutefois ajouter l'effet du diamètre du tube sur la pureté spectrale de la résonance (la formule d'Helmholtz n'en fait pas état) et également tout phénomène lié à la distorsion et aux non-linéarités produites par le haut-parleur lui-même. Ce n'est donc pas si simple. Rien ne vaut l'expérimentation suivie de la vérification de l'exactitude des calculs.

Toujours est-il que ce curieux haut-parleur est doté d'un rendement élevé conséquent à une série de "résonances en peigne". Le principal problème à résoudre est l'optimisation de la linéarité de réponse amplitude/fréquence. Aux fréquences basses, des résonances de cavité apparaissent facilement et les résonateurs influent les uns sur les autres. En utilisant des tubes de fort diamètre et de hauteur inférieure à 2,50 m (donc compatibles avec les hauteurs de plafond en appartement) il est par contre possible de produire des fréquences très basses sous un niveau sonore élevé. On a cependant pour inconvénient un temps d'établissement non négligeable et un certain taux de traînage, car la vibration à l'unisson d'une colonne d'air est précédé d'un temps d'établissement et d'un temps d'extinction. Dans l'aigu, au-dessus de 4 kHz environ, le système tend à devenir de plus en plus directif. Comme pour une application de cinéma, on peut contourner le problème en adoptant un système multi-voies et une disposition horizontale des petits tuyaux résonateurs. La rigidité, la nature des matériaux utilisés pour la réalisation du socle, des parois, des tuyaux (carton, zinc, "étouffe", étain, etc), des éventuels matériaux amortissants, les dimensions des tuyaux et plus encore, celle des haut-parleurs ont une grande

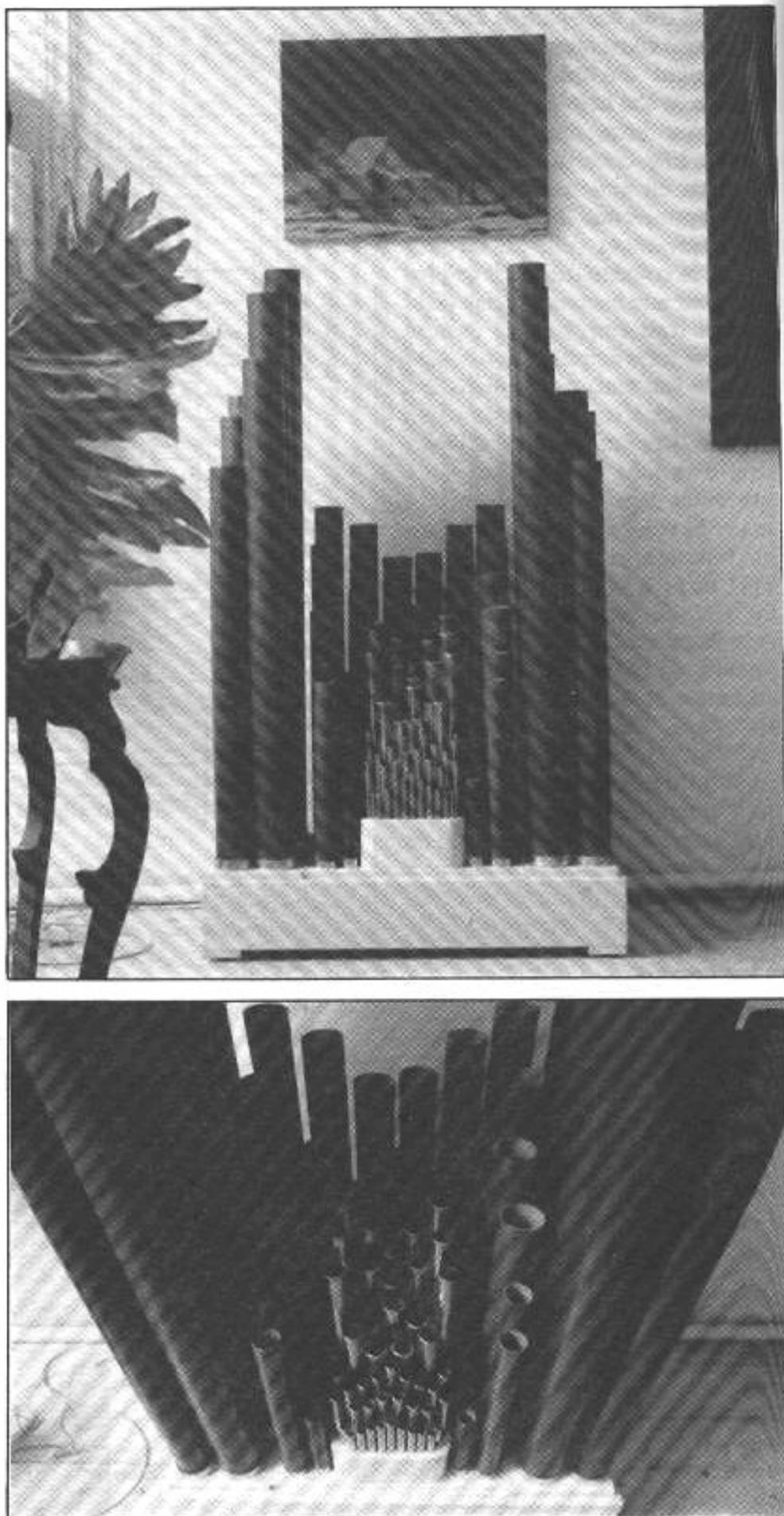


Fig. 10 : Réplique du haut-parleur à résonateurs multiples réalisé par M. Michel Tassili.

influence sur les résultats. La forme et le volume des chambres frontale et dorsale de même que la distance des tuyaux par rapport à la membrane font partie de points critiques.

M. Michel Tassili ne s'est pas contenté de restaurer ce curieux haut-parleur à résonateurs multiples dont il est l'heureux possesseur. Il travaille aussi en association avec d'autres chercheurs sur des haut-parleurs basés sur le même principe.

Ecoute

Nous avons eu l'occasion d'assister à l'écoute d'un prototype dont la conception est très proche de la version d'origine. Un haut-parleur large bande de diamètre 17 cm d'origine française a été utilisé. Il a été remarqué tout d'abord un rendement élevé et un effet spatial très différent de celui que procurent habituellement les haut-parleurs à rayonnement direct. Nous avons dû faire abstraction de quelques résonances qui semblaient provenir de la charge dorsale (manque d'absorbant?). Par contre, nous avons été très agréablement surpris par les conséquences subjectives apportées par le principe des résonateurs. De par son principe, chaque tuyau se met à vibrer à l'unisson dans une plage de fréquences déterminée en renforçant le son excitateur ou, plus exactement, celui qui est généré par le haut-parleur. La surprise a été de constater que des effets que l'on aurait pu estimer comme très gênants, à savoir le temps d'établissement des colonnes d'air et le traînage, n'ont pas été perçus comme tels. Ces effets combinés sont très différents de ceux qui résultent du rayonnement direct d'un haut-parleur électrodynamique produisant de la distorsion harmonique ou du traînage. Il rappelle en fait le phénomène de la note de piano qui tend à se "prolonger" plus que d'ordinaire dès l'instant où un diapason accordé à la même hauteur entre en action à

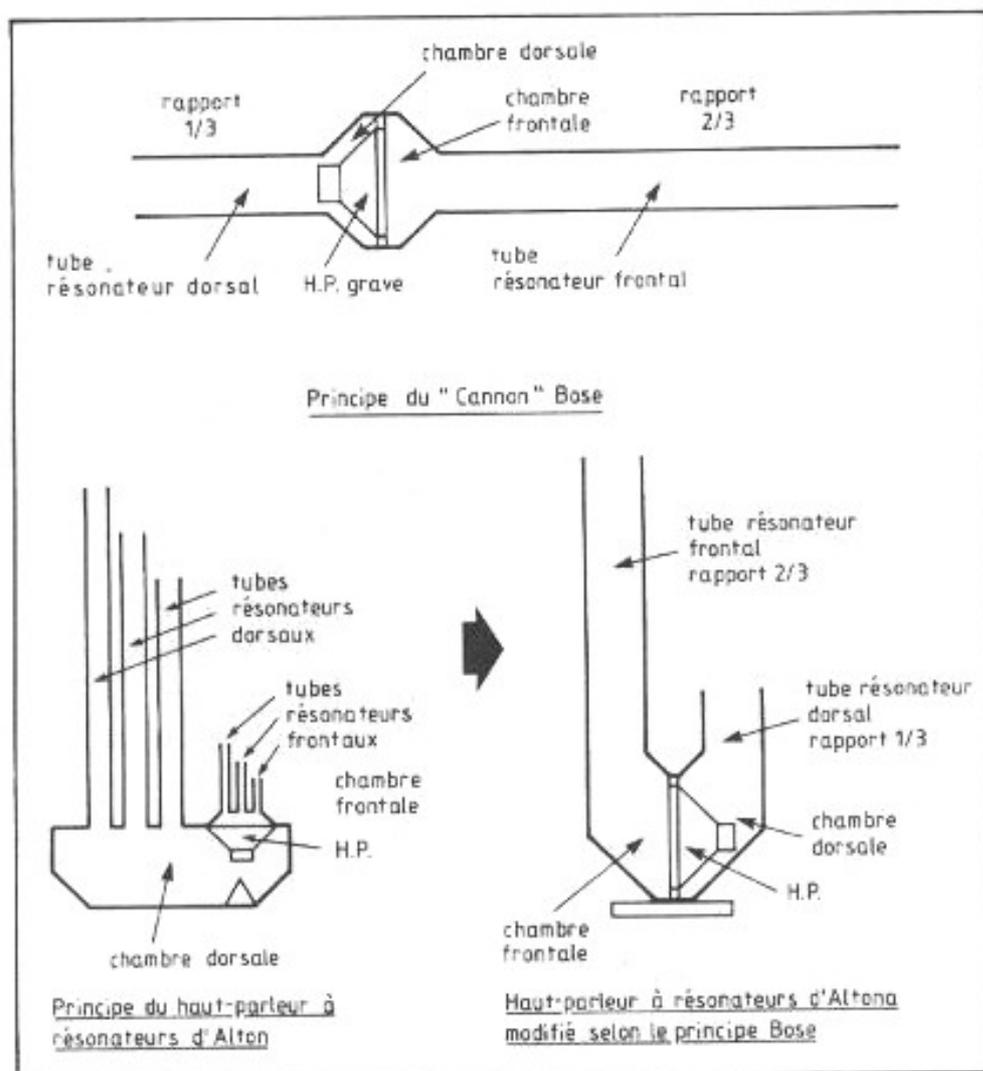


Fig. 11 : Principe du "Cannon Acoustic Wave" de Bose comparé à celui d'Edouard d'Alton. La ressemblance est frappante, bien que l'application soit différente. Une association des deux idées est possible et présente l'avantage d'un faible encombrement.

proximité de l'instrument. Dans ses articles, Edouard d'Alton surestime quelque peu (et même beaucoup trop) ces effets en parlant délibérément de "reconstitution des harmoniques manquants". Remarquons cependant que le système Daltona ne procure pas d'impression vraiment marquée "d'écho artificiel" ajouté au son d'origine. Une certaine part de "création musicale" produite par les résonateurs est fortement probable mais elle n'est par forcément désagréable ni marquée au point de transfigurer totalement le timbre des instruments. Tout est dans l'optimisation et seul le résultat compte. Par ailleurs, il semble tout à fait possible d'envisager la création de systèmes "hybrides" ou

multi-voies, combinant le rayonnement direct (dans l'aigu par exemple) et l'émission acoustique renforcée par les résonateurs multiples pour les fréquences graves. Comme énoncé plus haut, la plus grosse difficulté à surmonter consiste à "aligner" de façon homogène de nombreuses résonances disposées en "peigne". Le système expérimenté par M. Tassili ne compte pas moins de 102 tuyaux, ce qui lui laisse de quoi "raisonner".

Rappelons que, pour ce qui concerne la restitution des fréquences très basses sous des niveaux d'intensité sonore élevés, le fameux "Cannon Acoustic Wave" AWCS-1 fait partie des plus grosses réussites commerciales de

la société américaine Bose. Ce principe fait appel à un tuyau accordé, avec le haut-parleur situé au $1/3$ de sa longueur. La figure 11 démontre cependant qu'en repliant ce tube en deux parties verticales on obtient un haut-parleur à double résonateur d'Alton. L'invention de Bose (brevet américain n° 4628528) se situe au niveau du rapport existant entre les deux résonateurs, l'intérêt principal de l'invention étant ici un meilleur contrôle du débattement de la membrane, conduisant à l'obtention d'un niveau acoustique élevé. A partir du principe d'Alton, il serait donc possible d'obtenir des niveaux de pression acoustique intenses à des fréquences aussi basses que 30 Hz, le tout sous un encombrement minimal au sol. Il suffirait pour cela de placer côte à côte deux tubes de diamètre 28 cm mesurant respectivement 1,50 m et 2 m et de placer le haut-parleur entre ces deux résonateurs. Rappelons malgré tout que Bose associe ses caissons graves tubulaires à un filtre actif spécifique, le CN-SR, qui est particulièrement bien étudié.

L'idée de la charge Daltona n'est donc pas à rejeter lorsqu'elle est prise sous cet angle.
