

Conception des pavillons acoustiques HYPEX

Si les porte-voix, comme les cornets acoustiques de nos aïeux, ainsi que les premiers pavillons utilisés dans les téléphones et gramophones, sont souvent coniques, c'est qu'ils n'avaient pas besoin de posséder une réponse en fréquence bien large.

En téléphonie, on considère, dans le meilleur des cas, que la bande 300Hz à 3400Hz permet à la voix humaine d'être bien comprise. Le problème est bien entendu fort différent en haute-fidélité, où la bande à reproduire est 10 fois plus étendue.

Mais à quoi sert un pavillon ? Un pavillon agit comme un transformateur d'impédance acoustique. Ceci signifie qu'entre la gorge et la bouche du pavillon, le rapport des pressions est inversement proportionnel au rapport des surfaces :

$$\frac{\text{pression à la gorge}}{\text{pression à la bouche}} = \frac{\text{surface de la bouche}}{\text{surface de la gorge}}$$

Cette adaptation d'impédance acoustique permet, avec des chambres de compression chargeant des pavillons longs, d'atteindre des niveaux acoustiques élevés avec un rendement dépassant généralement 30% (Dinsdale, page 19). Certains pavillons commercialisés par Western Electric voisinent même 50% (Hiraga page 186) et quelques pavillons expérimentaux approchent 80%.

Ce rendement élevé est à comparer au très faible rendement, généralement compris entre 0.3% et 3% (Rossi, page

295), fournit par un haut-parleur électrodynamique classique monté en bass-reflex. Il tombe à moins de 1%, lorsqu'il est utilisé en enceinte close (Dinsdale page 19). Avec un pavillon, en utilisant des moteurs à grande efficacité (chambres de compression par exemple), on peut ainsi atteindre des rendements de plus de 105dB à 1 mètre pour 1 watt électrique alors qu'il est difficile de dépasser 95 dB/1W/1m avec des haut-parleurs électrodynamiques chargés en enceinte close ou bass-reflex.

La pression acoustique élevée régnant au niveau de la membrane d'une chambre de compression chargée par un pavillon permet d'autre part d'atteindre ces niveaux acoustiques élevés avec un très faible débattement de la membrane du haut-parleur et donc un très faible niveau de distorsion. Les deux principaux arguments qui justifient l'intérêt pour l'audiophile d'utiliser des pavillons sont le **très haut rendement** (autorisant des amplis de petite puissance à structure très simple, très transparents et naturels) et la **faible distorsion**.

En usage professionnel, les niveaux sonores reproduits sont supérieurs de plus de 20dB à ceux atteints en écou-

te audiophile. On ne peut non plus négliger la non linéarité de l'air au-dessus de 130dB. C'est l'une des explications, mais pas la seule (encombrement, forme trop agressive, mauvais critère d'acceptabilité féminine ou W.A.F. = "wife acceptance factor" en anglais ...), de la mauvaise réputation des pavillons chargeant des chambres de compression.

Très peu de théorie

Pour minimiser les distorsions (harmoniques et de temporelles), grâce à un pavillon, et cela, dans une bande de fréquences, on recherche deux caractéristiques essentielles: une résistance acoustique la plus constante possible et une réactance acoustique négligeable, à l'intérieur de cette bande.

Il faut bien constater que depuis A.G. Webster en 1919, bien peu de physiciens se sont intéressés à la théorie de la propagation des ondes sonores dans un pavillon, sujet sans doute jugé trop futile. Lorsqu'ils se sont frottés à ce problème, ils ont fréquemment dû faire des approximations comme celles des fronts d'ondes plans qui n'est pas vérifiée expérimentalement (Webster, Mac Lachlan...). Nous en sommes toujours aujourd'hui à concevoir et réaliser les pavillons par tâtonnements, (méthode par essais et erreurs) et cela entraîne bien entendu des parti pris. Certains sont partisans des pavillons tractrix (Edgar), d'autres des pavillons exponentiel (Le Dauphin) et d'autres encore des hypex (Iwata).

Si l'on n'est pas acousticien ou capable d'échafauder une meilleure théorie ou

capable de proposer de meilleures solutions, force est de constater que l'on doit accepter comme valides les solutions classiques à l'équation de la propagation des ondes dans un pavillon (équation de Webster, 1919). Comme rappelé par Rossi un ensemble de solutions à ce problème est donné par l'utilisation de divers pavillons appartenant à la famille des pavillons hyperboliques dont le pavillon exponentiel est le membre le plus connu (pour la solution de l'équation de Webster voir Rossi pages 167 et 168).

Cette famille des pavillons hyperboliques est caractérisée par une même formule générale d'expansion exprimant l'aire d'un front d'ondes en fonction de la distance à la gorge du pavillon :

$$S = S_g \cdot (\cosh (m \cdot x/2) + M \cdot \sinh (m \cdot x/2))^2$$

formule (1)

où :

- / divise
- . multiplie
- ^ exposant
- S_g est l'aire de la gorge
- x est la distance à la gorge
- m = 4 . π . Fc / c

avec :

- F_c la fréquence de coupure basse du pavillon (à -3dB)
- c la vitesse du son (dans une salle normale c = 341 m/s)
- M un coefficient de forme dépendant du type de pavillon particulier : caténoïdal (ou chaînette): M = 0
- hypex: M = 0.5
- hypex genre Iwata: M = 0.707
- exponentiel: M = 1

Le front d'ondes

Cette notion de front d'ondes doit être bien maîtrisée avant de vouloir entreprendre toute conception de pavillon en utilisant la formule d'expansion précédemment donnée.

Intuitivement, un front d'ondes est la surface reliant l'ensemble des points

atteints (à un instant t donné) par une onde impulsionnelle qui aurait été émise à la gorge du pavillon à l'instant t = 0. En réalité, la notion de front d'ondes peut tout aussi bien s'appliquer à une onde non impulsionnelle, un signal sinusoïdal, par exemple. On la définit alors (Rossi, page 166) comme la surface sur laquelle, à un moment donné, les grandeurs acoustiques sont constantes (pression et phase, notamment). On peut admettre que pour un pavillon bien conçu les surfaces de même pression acoustique et les surfaces de même phase devraient être confondues. En réalité, si cela est expérimentalement assez bien vérifié (figure 1) à proximité de la gorge d'un pavillon exponentiel calculé classiquement, et dans une moindre mesure, à l'extérieur du pavillon, lorsque les ondes se propagent dans la salle d'écoute. Cela s'avère complètement faux dans la plupart des cas dans la partie du pavillon située près de la bouche (Hiraga page 183).

Ondes réfléchies à la bouche du pavillon

On attribue généralement le défaut précédemment mentionné aux pavillons trop courts, pour lesquels la variation d'impédance acoustique entre l'air à l'intérieur du pavillon et l'air ambiant est trop rapide ce qui crée à la bouche du pavillon une réflexion partielle des ondes (réflexion qui dépend aussi de

la fréquence) qui interfèrent avec les ondes émises et provoquent la formation de noeuds et de ventres respectivement à basse pression et à forte pression acoustique à l'intérieur du pavillon (Olson page 111, 112, Hiraga page 185).

Le Pavillon Tractrix

Cependant, certains pavillons comme le **tractrix** sont très courts, mais ils ont la particularité de posséder une bouche plus évasée et ils présentent moins ce problème. On imagine que la longueur n'est pas l'unique explication. Il faut donc admettre que la méthode classique de conception de la forme des pavillons n'est pas optimale, notamment pour le dessin du contour à proximité de la bouche.

Les études réalisées vers 1924 par Hanna et Slepian leur avaient fait comprendre que les ondes réfléchies sont minimales dans un pavillon exponentiel quand la bouche se termine en faisant un angle d'ouverture de 90°. Chaque paroi étant à 45° par rapport à l'axe du pavillon. Le périmètre correspondant de la bouche est alors égal à la longueur d'onde à la coupure acoustique basse du pavillon (Dinsdale page 22). Olson a légèrement modifié cette vision du problème des ondes réfléchies en étudiant de façon plus systématique l'influence des dimensions du pavillon et en montrant que les ondes réfléchies sont d'autant plus réduites que le pavillon est long. En pratique, on considère un pavillon circulaire comme quasi infini lorsque son diamètre est égal à la longueur d'onde, à la coupure acoustique (Olson page 111).

Une autre approche revient à couper électriquement le moteur couplé au pavillon à une fréquence plus élevée que la coupure acoustique. Rossi dit que pour les dimensions usuelles des pavillons exponentiels, l'adaptation n'est véritablement effective qu'à partir d'un rapport: fréquence de coupure électrique / fréquence de coupure acoustique supérieur à 2. Cette adap-



tation est quasiment parfaite pour un rapport dépassant 4. (Rossi, page 173)

On peut aussi chercher à réduire l'effet des ondes réfléchies à la bouche du pavillon en permettant sur une courte distance, la diminution progressive de l'impédance de l'air dans le pavillon à l'air dans la salle d'écoute. Cela peut se faire en équipant les parois de la bouche du pavillon de perforations, à la manière des silencieux d'armes à feu, de fentes longitudinales ou transversales (méthode Iwata décrite dans Hiraga page 192) ou encore en incurvant les parois de telle sorte qu'elle forment rapidement un angle de 90° par rapport à l'axe du pavillon (méthode Siemens Klang Film).

Critique de la méthode traditionnelle de conception des pavillons

Si l'on se contente d'examiner la formule (1), le calcul d'un pavillon apparaît facile, en première approche. Il n'en est rien. En effet, nous ne connaissons pas la forme des fronts d'ondes et c'est là une pierre d'achoppement de toute conception d'un pavillon. La méthode traditionnelle de calcul prend en considération des fronts d'ondes plans. On doit se méfier de cette approche pour deux raisons :

- tout d'abord, les fronts d'ondes plans ne peuvent pas être perpendiculaires aux parois d'un pavillon,
- d'autre part, les mesures réalisées en laboratoire, dès 1934 par Mac Lachlan, montrent que si les fronts d'onde sont approximativement plans à la gorge, c'est faux à la bouche du pavillon.

Plusieurs concepteurs de pavillons ont tenté de contourner le problème, citons notamment Wilson qui en 1929 recalculait les pavillons exponentiels de ses phonographes sur la base de fronts d'onde sphériques (mais se limite à un angle d'ouverture à la bouche de 90°) et Voigt qui introduit en 1927 son fameux contour Tractrix. Lequel, d'après son brevet permet aux fronts d'ondes d'être perpendiculaires aux parois du pavillon. Plus récemment,

un certain nombre de pavillons (Fostex, Iwata, etc...) semblent avoir pour base de calcul des fronts d'ondes cylindriques.

Dinsdale (1974) montre que le pavillon Tractrix est semblable à un pavillon exponentiel classique sur une bonne moitié de sa longueur et que la courbure des parois s'accroît progressivement jusqu'à la bouche, où l'ouverture du pavillon atteint 180° ce qui permet une réduction très efficace des ondes réfléchies, tout en réduisant la longueur par rapport à un pavillon exponentiel.

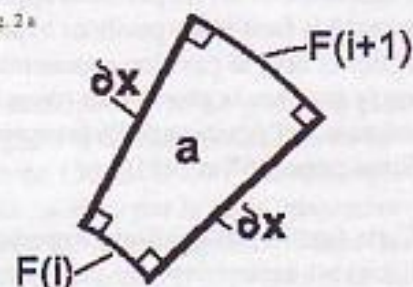
Proposition d'une nouvelle méthode de calcul des pavillons

En dynamique des fluides, un grand nombre de problèmes pour lequel il est actuellement impossible de trouver une solution analytique, sont traités par des méthodes numériques telles que les méthodes dites " par éléments finis " ou " par éléments discrets ". L'idée d'appliquer la méthode des éléments discrets au problème de la conception d'un pavillon acoustique paraît donc naturelle. Concevoir un pavillon par élément discret, c'est un peu comme concevoir une maison en utilisant des briques de Lego. La forme parallépipédique des briques influe beaucoup sur la forme générale de l'ouvrage qui tend généralement lui aussi à être parallépipédique. Le choix de la forme des éléments discrets est donc primordial. Il est préférable que cette forme respecte la forme générale du pavillon qui bien qu'inconnue doit répondre à 4 exigences :

1. Les fronts d'ondes sont parallèles entre eux.
2. Les fronts d'ondes sont perpendiculaires à l'axe du pavillon (notre pavillon est symétrique par rapport à son axe).
3. Les fronts d'ondes sont perpendiculaires aux parois du pavillon.
4. La surface d'un front d'onde coupant l'axe du pavillon à la distance x est calculée grâce à la formule 1.

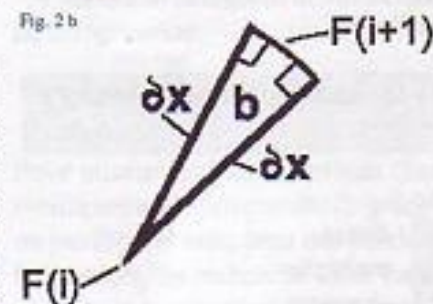
Comme vous le voyez aucune hypothèse ne porte sur la forme des fronts d'ondes eux-mêmes, c'est là une différence fondamentale avec les méthodes antérieures. Ces 4 exigences nous amènent à définir deux types d'éléments que nous appellerons élément a et élément b (voir figures 2).

Fig. 2 a



Élément de type a

Fig. 2 b



Élément de type b

dx est un incrément de distance à la gorge, fixé à l'avance (1/1.000 ème de la longueur axiale du pavillon)

$F(i)$ est la partie de l'élément appartenant au front d'onde correspondant à l'étape i du calcul.

$F(i+1)$ est la partie de l'élément appartenant au front d'onde correspondant à l'étape $i+1$ du calcul.

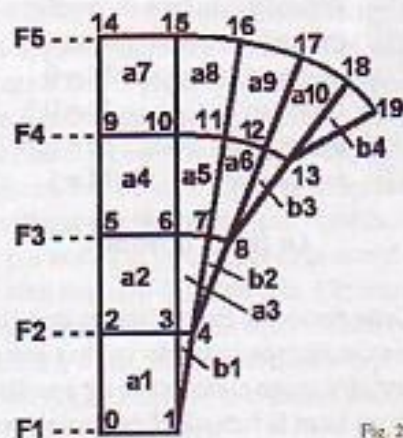


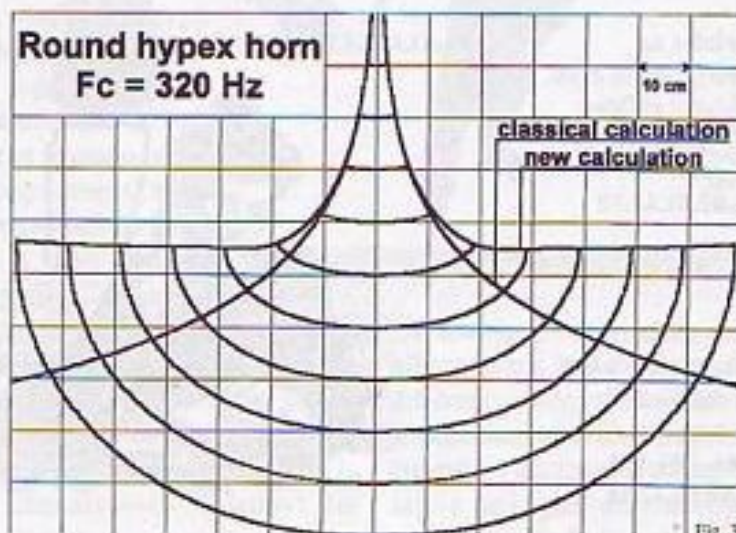
Fig. 2 c

La figure 2 montre également le principe d'assemblage des éléments qui se fait par couches successives depuis la

gorge vers la bouche du pavillon. Les couches successives sont parallèles au front d'ondes. Une couche est constituée par la juxtaposition d'éléments de type a depuis l'axe du pavillon jusqu'à la paroi du pavillon, sauf le dernier élément collé à la paroi du pavillon qui est de type b. Chaque nouvelle couche comporte 2 éléments de plus que la couche antérieure. La figure 2 ne représente que la moitié d'une couche, l'autre moitié étant symétrique par rapport à l'axe du pavillon. Le calcul de la position des noeuds d'un élément de type a est réalisé uniquement par extrapolation linéaire de la position des noeuds de l'élément situé immédiatement au-dessous. L'angle d'ouverture de l'élément b situé en bout de rangée est calculé de façon à ce que le nouveau front d'onde ainsi défini possède l'aire calculée par la formule d'expansion.

Calcul d'un pavillon exponentiel circulaire par la méthode des éléments discrets

Du fait de sa symétrie, le calcul d'un pavillon circulaire revient à calculer une demi section axiale limitée: d'une part, par l'axe du pavillon; d'autre part, par la paroi et bien entendu par la gorge à une extrémité et par la bouche à l'autre. Nous avons calculé un pavillon circulaire exponentiel de fréquence de coupure 320Hz dont la demi section axiale comporte 500.000 éléments.



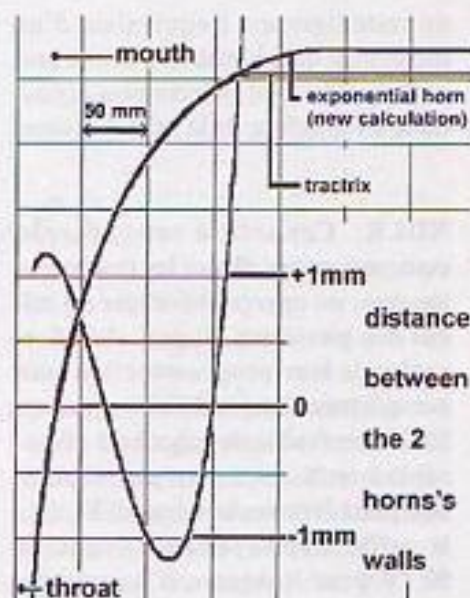
La figure 3 présente le profil du pavillon hypex de fréquence de coupure acoustique 320Hz, calculé par la nouvelle méthode proposée. Nous y avons superposé le profil d'un pavillon tractrix d'une embouchure de 17,8 centimètres de diamètre. On constate que la concordance est frappante entre les deux profils. Sur 98% de la longueur du profil du pavillon tractrix, la distance maximale au pavillon exponentiel nouvellement calculé est inférieure à 1,1mm.

La formule des pavillons tractrix s'avère donc être une excellente solution au problème difficile du calcul de la forme d'un pavillon exponentiel quand, à la différence des méthodes classiques, on désire prendre en compte des fronts d'ondes non plans.

Calcul d'un pavillon hypex circulaire par la méthode des éléments discrets. Nous avons calculé un pavillon circulaire hypex de coefficient de forme $M = 0,707$ de fréquence de coupure 320Hz, dont la demi section axiale comporte 500.000 éléments.

On a également fait figurer sur la figure 4 les fronts d'ondes à l'intérieur du pavillon dont la représentation est rendue très facile de part la méthode de calcul en éléments discrets utilisée.

On remarquera que la forme des fronts d'ondes est très comparable à celle donnée par les mesures réalisées par



Mac Lachlan ou par les laboratoires d'Hitachi. (Hiraga page 183 et 184). La figure présente également le profil d'un pavillon hypex de même fréquence de coupure mais calculé par la méthode classique (fronts d'ondes plans perpendiculaires à l'axe du pavillon). On remarquera que si la concordance est parfaite entre les deux profils près de la gorge, le pavillon calculé par la nouvelle méthode s'évase plus rapidement vers la bouche. Ainsi, pour le pavillon calculé par la nouvelle méthode, on constate qu'à partir d'une distance axiale de 45 cm, la paroi tend à former naturellement une embouchure à 180°, à la mode tractrix, laquelle s'étend latéralement assez loin, formant un véritable bafflage. On est amené à comparer ce bafflage naturel à celui du pavillon de médium dans les enceintes Siemens Eurodyn très réputées pour la qualité naturelle de leur reproduction sonore.

Calcul de pavillons hypex circulaires pour tweeters de diamètre 1 pouce
La figure 5 présente 21 profils de pavillons s'adaptant sur chambre de compression de diamètre 1 pouce (=25,4 mm) et de fréquence de coupure acoustique s'étalant de 1.000 Hz à 2.000 Hz par pas de 50Hz. La ligne droite oblique épaisse est le lieu où les profils passent par une ouverture de 180°. On peut considérer que la partie d'un profil quelconque située à droite

de cette ligne est l'équivalent d'un baffle plan qui aiderait à la bonne propagation du lobe de pression acoustique à l'intérieur de la salle d'écoute.

NDLR: Cet article vous fournit, comme souvent diront les mauvaises langues, un aperçu théorique du calcul des pavillons Hypex. Les formules de leur programmation sont compliquées, impubliables presque. Mais une feuille de calcul est disponible sur disquette ou par E-mail, elle peut être traitée sous EXCEL. Il suffit d'envoyer un chèque de 50 FF pour l'obtenir, il sera transmis à Jean-Michel, vous pouvez aussi le contacter directement par E-mail: lecleach@cgi.ensmp.fr

Références bibliographiques

Hiraga Jean

Les Hauts-Parleurs (3ème édition, 1998)

Editions Dunod, Série Electronique appliquée

ISBN 2 10 004114 2

Rossi Mario

Electroacoustique 1986

Editions Dunod, Traité d'Electricité d'Electronique et d'Electrotechnique

ISBN 2 04 016532 0

Olson Harry F.

Acoustical Engineering (édition 1991)

Professional Audio Journals, Inc., Philadelphie, Pennsylvanie, USA

lib.of congress : 91 075297

Dinsdale J. «Horn loudspeaker design»

1) *Wireless World*, March 1974 p.19-24

2) *Wireless World*, May 1974 p.133-138

3) *Wireless World*, March 1974 p.186-190

Wysoczanski Walter, «Ton and a quarter of sound»

Audio, January 1964, p.19-63

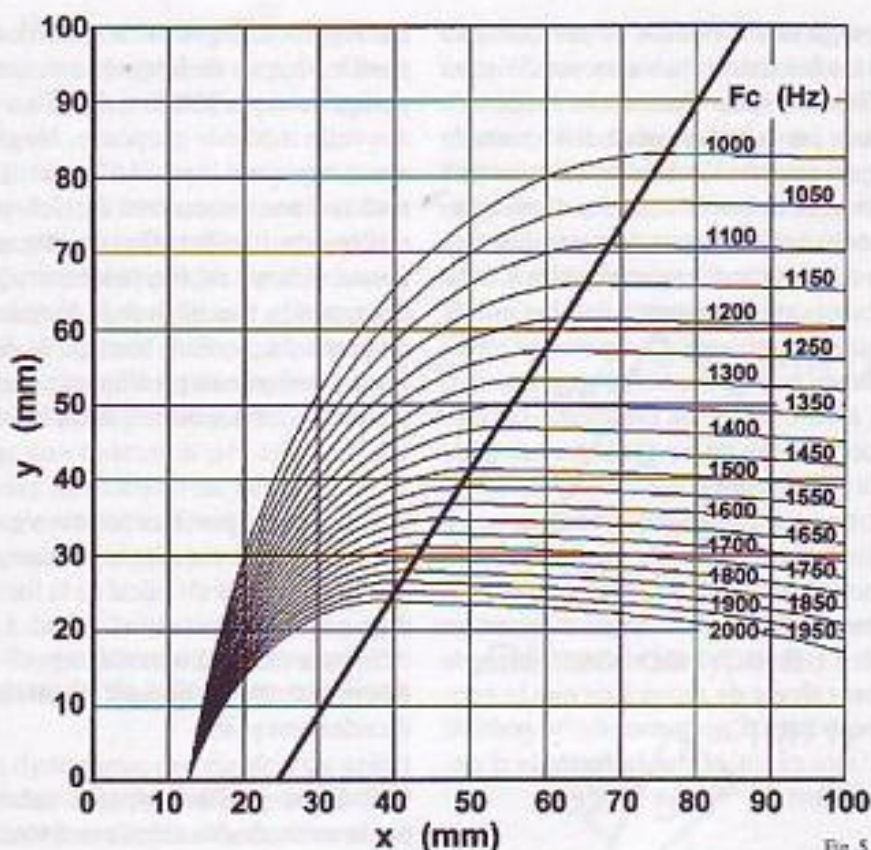


Fig. 5