

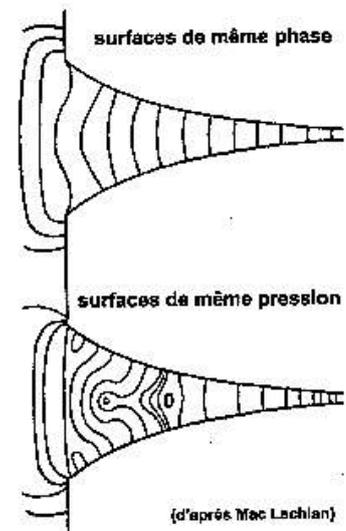
Calcul des pavillons par éléments discrets (méthode Jean Michel Le Cléac'h)

Synthèse de l'article publié dans *Musique & Technique* n°6.

Pour minimiser les distorsions (harmoniques et temporelles), grâce à un pavillon, et cela, dans une bande de fréquences données, 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 dans un pavillon, sujet sans doute jugé trop futile. Aujourd'hui encore, la conception de la plupart des pavillons se base sur les solutions à l'[équation de Webster](#) une équation différentielle qui définit la propagation des ondes sonores. La solution la plus générale à cette équation donne ainsi naissance à la grande famille des pavillons hyperboliques dont le pavillon exponentiel est le membre le plus connu.

Intuitivement un front d'onde est la surface reliant l'ensemble des points atteints (à un instant t) par une onde émise à la gorge à $t = 0$. On le définit donc comme la surface de pression et de phase constantes. Or si effectivement les surfaces de même pression et même phase sont confondues à proximité de la gorge, il n'en est rien près de la bouche, dans le cas d'un pavillon exponentiel classique. Ce défaut est généralement attribué à une expansion trop rapide, créant des réflexions partielles à la bouche et des turbulences. Cependant, certains pavillons plutôt courts comme le Tractrix de l'Allemand Voigt (1927) possèdent une embouchure plus évasée et sont moins sujets à ce type de problème. La recherche d'une réduction de l'effet des ondes réfléchies à l'embouchure peut aussi être réalisée par une adaptation progressive de l'impédance de l'air depuis l'intérieur du pavillon à la salle d'écoute, par un système de couplage progressif utilisant des fentes (méthode Iwata) ou en incurvant les parois à l'embouchure pour qu'elles forment un angle de 90° ; par rapport à l'axe du pavillon (méthode KlangFilm). Si l'on se contente d'examiner la formule d'expansion classique de la famille des pavillons hyperboliques, le calcul d'un pavillon apparaît facile, mais une difficulté réside dans le fait que nous ne connaissons pas la forme des fronts d'onde, qui est fondamentale dans la conception d'un pavillon.

En effet, les solutions de l'équation de Webster ne sont valables, comme cela est classique avec les équations différentielles, que pour des volumes infiniment petits. Pour un tel élément infinitésimal, on peut considérer le front d'onde comme plan. Cependant la méthode traditionnelle de calcul d'un pavillon généralise cette considération de fronts d'onde plans à l'ensemble du pavillon réel. On peut justement se méfier d'une telle approche puisque des fronts d'ondes plans ne peuvent être perpendiculaires aux parois. D'autre part, les visualisations, effectuées en laboratoire, des fronts d'ondes dans des pavillons montrent que si ceux-ci sont plutôt plans à la gorge, il n'en est rien à la bouche (Mac Lachlan).

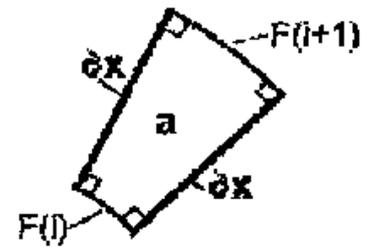
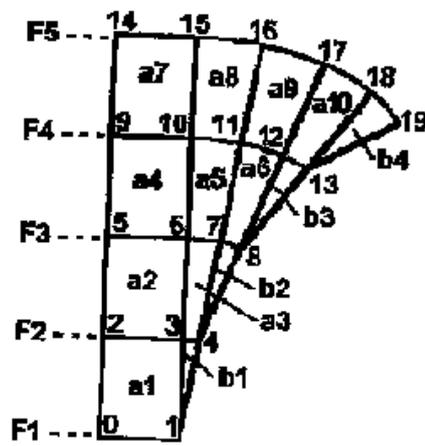


Si l'on s'en tient à une interprétation simple et plus rigoureuse de l'équation de Webster et de ses solutions la conception d'un pavillon doit répondre à 4 exigences:

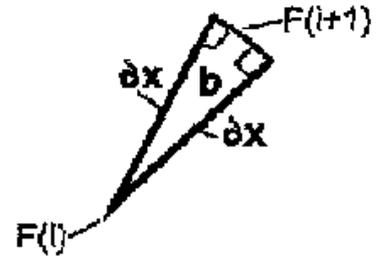
- Les fronts d'onde sont parallèles entre eux.
- Les fronts d'onde sont perpendiculaires à l'axe du pavillon.
- Les fronts d'onde sont perpendiculaires aux parois du pavillon
- La surface d'un front d'onde à distance x est calculée suivant la formule d'expansion classique des pavillons hyperboliques qui est solution de l'équation de Webster.

La méthode de calcul, dite méthode Le Cléac'h, employée ici, est inspirée des méthodes utilisées pour la résolution de certains problèmes de résistance des matériaux ou de dynamique des fluides ..., il s'agit de la méthode par éléments discrets. Le volume interne du pavillon est découpé en petits volumes élémentaires de forme simples, dont chacun obéit à l'équation de Webster. La précision est donnée par la multiplication des éléments, la vitesse de calcul des ordinateurs personnels permettant de traiter plusieurs millions d'éléments. Un coefficient d'expansion variant de 0 à 1 permet de choisir le type de progression (hyperbolique, hypex, exponentiel).

La forme finale du pavillon pourra être choisie indifféremment ronde ou carrée. En contrôlant la valeur des paramètres élémentaires du calcul par la méthode Le Cléac'h on peut retrouver un pavillon carré dont le profil suit assez précisément le profil d'un Tractrix, les 2 sont quasiment identiques sur plus des 3/4 de la longueur, le pavillon Le Cléac'h s'évasant plus rapidement vers la bouche pour atteindre et même dépasser une ouverture de 180°. Des comparaisons on également été faites par rapport à un pavillon Eurodyn, et on a pu superposer, avec une précision meilleure que le millimètre, un profil Le Cléac'h au profil Eurodyn.



Elément de type a



Elément de type b

On peut en conclure que certaines méthodes de conception anciennes étaient vraiment étonnantes puisque elles trouvent aujourd'hui une vérification et que la méthode de calcul mise au point par Jean Michel Le Cléac'h est réellement très pertinente puisque qu'elle permet de retomber sur des solutions réputées pour leur qualité sonore et employées avec succès par le passé.

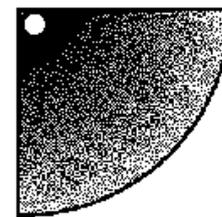
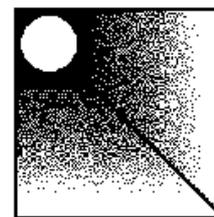
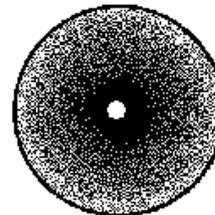
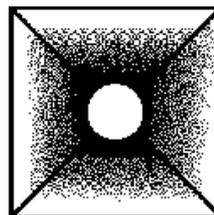
[Pour voir des exemples de réalisations](#)

Jean Michel Le Cléac'h met à disposition des courageux bricoleurs ses feuilles de calculs (Excel).

2 familles de pavillons:

La version **Horn-axial** est destinée aux pavillons à section carrée ou circulaire, c'est à dire symétrique autour d'un axe. Les pavillons dits Tractrix sont de bons exemples de cette géométrie.

Du fait de cette symétrie, on peut aussi utiliser cette feuille pour calculer des pavillons places dans le coin d'une pièce, c'est à dire utilisant 2 murs de la pièce.



[Téléchargement](#)



(169ko)

La version **Horn-cylind** est destinée aux pavillons dont deux parois sont parallèles, l'expansion se fait donc uniquement dans un plan. (On pourrait aussi appeler ces pavillons: pavillons radiaux). Le pavillon de grave de M. Roggero est un pavillon de ce type. Une option permet d'utiliser un mur de la salle d'écoute comme élément de symétrie, c'est ce qui conduit aux pavillons d'extrême grave les plus courts.

[Téléchargement](#)



(79 ko)

