

# La technologie WST : sculpture du front d'onde

**Stéphane Gramondo,**  
**Christian Heil,**  
L-ACOUSTICS,  
Parc de la Fontaine de Jouvence,  
91462 Marcoussis,  
Tél. : 01 69 63 69 63,  
Fax : 01 69 63 69 64,  
e-mail : stephane.gramondo@hotmail.com

Une mission essentielle de l'ingénieur du son ou du consultant audio consiste à spécifier un système de sonorisation en fonction non seulement de l'audience à couvrir mais aussi du type d'application, des caractéristiques acoustiques du lieu à sonoriser, de contraintes techniques, légales, etc.... Du fait que les techniques de mesure progressent et que les systèmes de sonorisation deviennent plus performants, les exigences en matière de niveau sonore, d'intelligibilité, de clarté et de définition deviennent de plus en plus importantes. Dans un même temps, les lieux à sonoriser sont plus vastes et nécessitent des dispositifs acoustiques capables de diffuser un message clair et intelligible sur de longues distances.

Ces considérations entraînent inévitablement une multiplication du nombre d'enceintes. La méthode la plus classique consiste à regrouper plusieurs enceintes en clusters ou en colonnes en adaptant leur nombre au niveau sonore requis. Cette méthode conduit généralement à des résultats décevants en terme de qualité sonore et d'intelligibilité, dans la mesure où les couplages entre les multiples sources sonores ne sont pas maîtrisés.

Dans un assemblage en cluster, les ondes rayonnées par chaque enceinte, qui utilisent généralement des transducteurs chargés par un pavillon conventionnel, ne se couplent pas de manière cohérente et produisent des interférences qui vont dépendre de la fréquence et de la position de l'auditeur et ainsi provoquer une couverture sonore irrégulière, une courbe de réponse accidentée et une portée limitée. Le mauvais couplage de ce type d'assemblage entraînant une perte importante d'énergie, il est nécessaire, pour obtenir un même niveau sonore, d'installer davantage de haut-parleurs qu'il n'en faudrait théoriquement si l'ensemble de ces sources sonores était réuni en une source unique et cohérente.

Les phénomènes physiques qui se produisent peuvent s'illustrer de la manière suivante : il suffit d'imaginer un lancer de cailloux dans une étendue d'eau. Le jet d'un seul caillou provoque une onde circulaire progressive, émise à partir du point de chute du caillou. Si l'on en jette une poignée, on peut matérialiser un réseau interférentiel. La surface de l'eau est ridée et ne permet plus de déceler

la forme de l'onde progressive : on est dans un champ sonore chaotique. Si l'on rassemble les cailloux dans un sac que l'on jette à l'eau, on trouve à nouveau une onde circulaire progressive mais de plus grande amplitude.

L'idée qui a conduit au développement des principes de la WST (« Wavefront Sculpture Technology » ou sculpture du front d'onde) était de trouver les conditions physiques pour qu'un système comprenant plusieurs haut-parleurs soit assimilable à une source sonore unique de grande dimension capable de produire un front d'onde continu. Dans de telles conditions, ce système de haut-parleurs pourrait être morcelé, pour des raisons pratiques de transport, en un ensemble d'enceintes identiques, pouvant être assemblées, de manière à satisfaire les critères WST. Cet exercice visait donc à réaliser une source sonore unique totalement cohérente et à directivité maîtrisée à partir d'un ensemble modulaire ajustable.

Avant d'aborder les différents critères de la WST, attardons-nous un instant sur le problème des interférences produites lors d'un assemblage de sources sonores.

## Le problème des interférences

Lorsque deux sources physiquement séparées rayonnent simultanément, la différence des temps d'arrivée des fronts d'onde provenant de chaque source provoque, en un point d'observation donné, des interférences dépendant de la fréquence, de l'espacement entre les haut-parleurs et de la position du point d'observation.

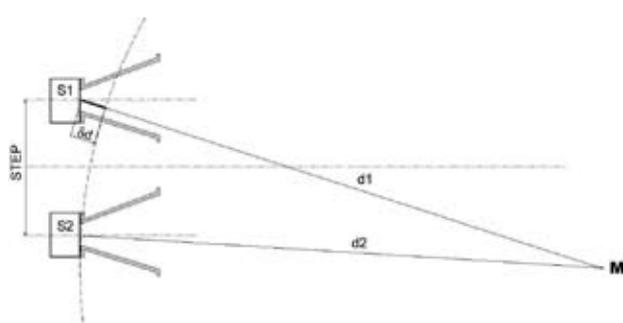


Fig 1 : La différence de trajet  $\delta d = d1 - d2$  entre les ondes émises par les sources S1 et S2 crée des interférences au point M

Dans certains cas, les ondes émises s'additionnent et on parle d'interférences constructives qui se traduisent par un gain de 6 dB. Dans d'autres cas, elles s'annulent et donnent lieu à des interférences destructives.

Dans tous les cas, elles entraînent des accidents :

- dans la courbe de réponse, communément appelé filtrage en peigne par les ingénieurs du son. A titre d'exemple, lorsque  $\delta d = 0,33$  m (ce qui correspond à  $\delta t = 1$  msec), les annulations dans la courbe de réponse apparaissent à 500 Hz, 1 500 Hz, 2 500 Hz. Ces accidents entraînent des colorations d'autant plus audibles qu'ils sont espacés, avec des variations importantes ( $> 3$  dB) et sur une bande de fréquence suffisamment large ( $> 1/3$  d'octave), le problème majeur étant qu'ils apparaissent à des fréquences dépendant de la position de l'auditeur ( $\delta d$  dépend de la position du point M).

dans la directivité du système de haut-parleurs : apparition de lobes de directivité dont le nombre et la largeur dépend du nombre de sources, de l'espacement entre sources et de la fréquence.

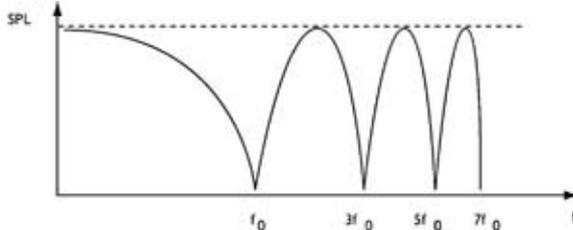


Fig. 2 : Filtrage en peigne de la courbe de réponse dû aux interférences. Pour une différence de temps de parcours de 1 ms,  $f_0 = 500$  Hz

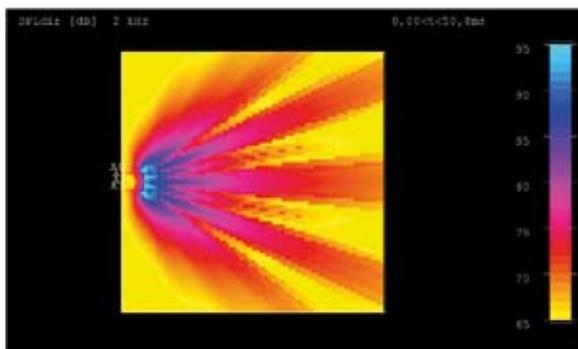


Fig. 3 : Un assemblage d'enceintes traditionnelles (ici 4 enceintes espacées de 50 cm) crée un front d'onde qui n'est pas cohérent provoquant ainsi une couverture sonore inhomogène

## L'approche de Fresnel

Afin de mieux comprendre comment un assemblage de sources sonores discrètes se comporte en fonction de la fréquence et de la position de l'auditeur, présentons maintenant l'approche basée sur l'analyse de Fresnel qui était déjà utilisée en optique au XIXe siècle. C'est principalement à partir de cette analyse qu'ont été définis les différents critères de la WST.

Considérons un réseau linéaire de sources sonores discrètes et supposons que le premier front d'onde de ce

réseau de sources parvenant au point M. est celui émis par la source  $i$ , son temps d'arrivée étant  $t_i = d_i/c$  (voir Figure 4).

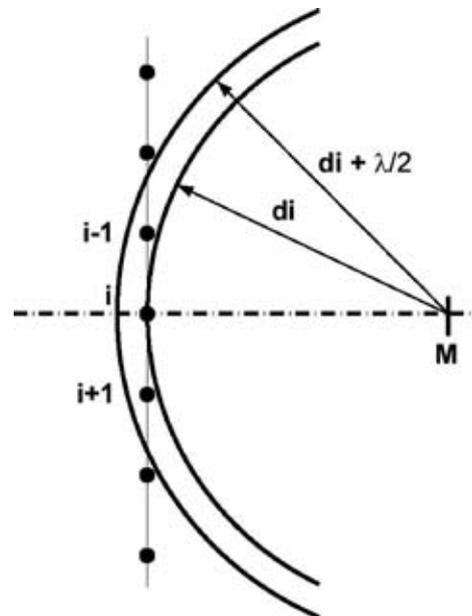


Fig. 4 : Premier anneau constructif au point M

Considérons un premier cercle de rayon  $d_i$  centré sur M. et passant par la source  $i$  et un second cercle de rayon  $d_i + \lambda/2$ .

Étant donné que la première annulation de pression apparaîtra lorsque la différence de trajet entre deux sources est égal à  $\lambda/2$ , on peut dire que, pour une fréquence donnée  $f = c/\lambda$ , les sources situées entre les deux cercles sont en phase. De ce fait, les sources situées dans cet anneau ne provoquent pas d'annulations et se couplent de manière constructive.

Si on considère maintenant les différents cercles dont les rayons sont incrémentés avec un pas de  $\lambda/2$  à partir de  $d_i$ , on peut distinguer les zones dites « constructives » et les zones dites « destructives », respectivement représentées en blanc et en gris dans la figure 5.

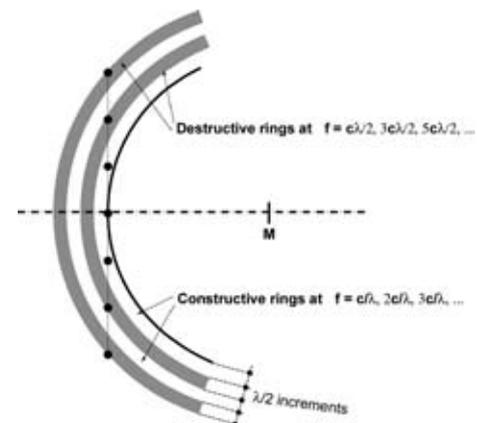


Fig. 5 : Anneaux constructifs et destructifs pour un réseau de sources et un point d'observation M. dans l'axe

Deux cas se présentent alors :

- Une zone dominante apparaît : le nombre de sources situées dans le premier anneau est important. Les sources situées hors de ce premier anneau sont successivement en phase et en opposition de phase et s'annulent les unes les autres. La pression sonore au point M. est essentiellement due à l'énergie rayonnée par les sources situées dans cette zone dominante. Il y a un champ sonore cohérent au point M.

- Il n'y a pas de zone dominante : le nombre de sources est identique dans chacun des anneaux. Les sources s'annulent alors les unes les autres. Le champ sonore au point M. est incohérent, ce qui se traduit par une pression sonore beaucoup plus faible que lorsque le champ est cohérent.

Ainsi, en déplaçant la position du point M. autour du réseau de sources et en répétant cette analyse, il est possible de séparer de manière bien distincte les zones où le champ sonore est cohérent de celles où il est incohérent et ainsi définir la couverture réelle de l'assemblage pour une fréquence donnée.

Pour obtenir un bon couplage entre les sources sonores et un maximum d'énergie dans la zone où le champ sonore est cohérent, la première étape logique consiste à minimiser la distance entre les sources, la situation idéale étant celle où les sources sonores sont tellement proches les unes des autres qu'elles deviennent assimilables à un ruban rayonnant droit équivalent à une source linéaire continue. Ceci permet, pour une fréquence donnée, d'augmenter le nombre de sources à l'intérieur du premier anneau constructif, la situation la plus favorable étant dans l'axe principal comme le montre la figure 6. Remarquez que dans la figure 6, la distance entre sources est plus petite que dans la figure 5, ce qui fait que davantage de sources se trouvent dans le premier anneau constructif.

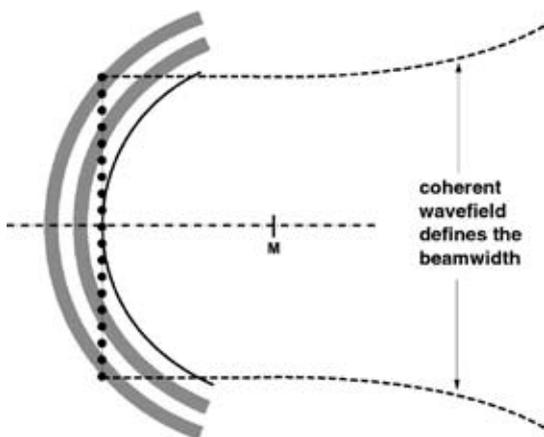


Fig. 6 : Anneaux de Fresnel dans l'axe où le champ sonore est cohérent pour un réseau dense de sources discrètes

Lorsque l'on s'écarte de l'axe principal (figure 7), le nombre de sources situées à l'intérieur du premier anneau constructif décroît progressivement, jusqu'à obtenir un nombre égal de sources dans les anneaux constructifs et destructifs. Les sources s'annulent alors les unes les autres et la zone devient totalement incohérente.

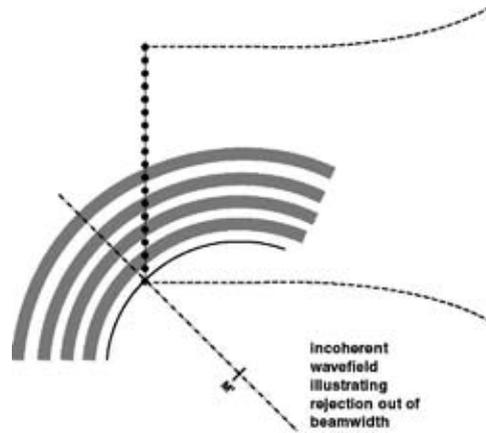


Fig. 7 : Anneaux de Fresnel hors de la zone de couverture où le champ sonore est incohérent pour un réseau dense de sources discrètes

L'influence de la fréquence pour une position d'écoute dans l'axe est représentée sur la figure 8.

Quand la fréquence diminue, la longueur d'onde et donc la dimension de l'anneau augmente, se traduisant par une zone dominante plus importante où davantage de sources se couplent de manière constructives. Inversement, si la fréquence augmente, moins de sources vont se situer dans cette zone.

Pour une fréquence constante, et donc une dimension d'anneau constante, on constate également que plus le point M. est proche du réseau, moins de sources vont se situer dans le premier anneau du fait de la courbure importante. Inversement, si le point M. est très éloigné, tout le réseau peut être situé dans l'anneau.

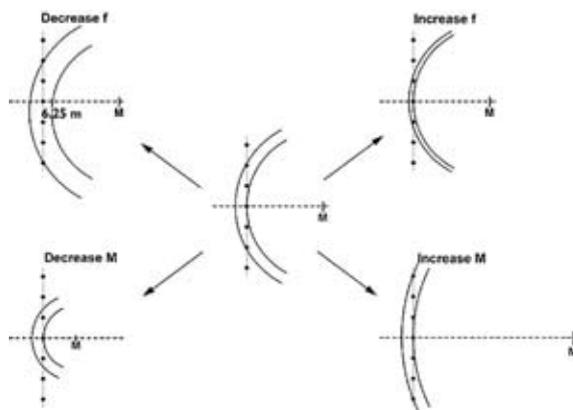


Fig. 8 : Influence de la fréquence et de la position de l'auditeur sur les anneaux de Fresnel

### Les cinq critères de la WST

Les critères de la WST, essentiellement établis à partir de l'analyse de Fresnel, ont pour but de fixer les conditions permettant de réaliser une source linéaire continue, droite ou à courbure variable, sur l'intégralité du spectre audio à partir d'un assemblage de sources sonores discrètes.

### Les deux premiers critères de la WST [1]

Considérant un ensemble de sources sonores émettant chacune un signal identique et formant un réseau régulier plan ou courbe de dimensions finies, le champ de pression rayonné par cet ensemble est équivalent au champ rayonné par une source unique étendue, de dimensions et forme identiques au réseau, si une des deux conditions suivantes est remplie :

**1<sup>er</sup> critère :** chaque source sonore de l'assemblage rayonne un front d'onde plan et isophasé et la surface couverte par l'ensemble des sources prises individuellement est supérieure à 80 % de la surface qui encadre cet ensemble de sources et qui représente la surface de la source sonore linéaire continue équivalente. Ce ratio est appelé ARF (Active Radiating Factor).

**2<sup>e</sup> critère :** la distance entre les centres acoustiques de chacune des sources, appelée STEP, est inférieure à la demi-longueur d'onde pour la fréquence d'utilisation la plus élevée.

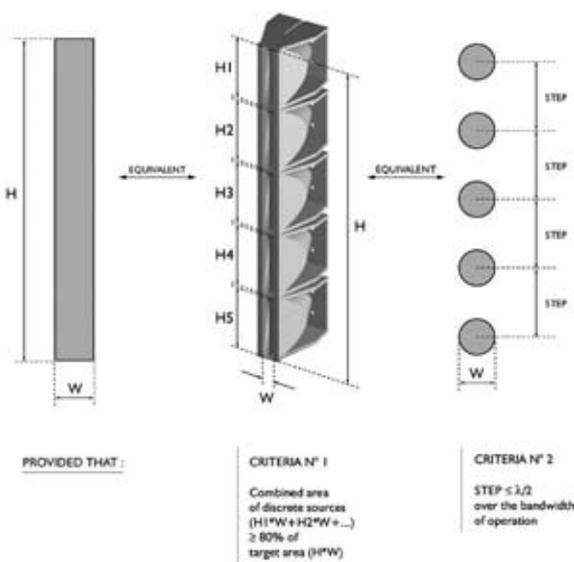


Fig. 9 : Les deux premiers critères de la WST

**3<sup>e</sup> critère :** En pratique une légère courbure du front d'onde rayonné par chaque source peut être acceptée. En effet, il a été démontré [2] que l'écart maximum entre la courbure du front d'onde rayonné par chaque source et un front d'onde plan ne doit pas être supérieur au quart de la longueur d'onde pour la fréquence d'utilisation la plus élevée (ce qui correspond à moins de 5 mm à 16 kHz).

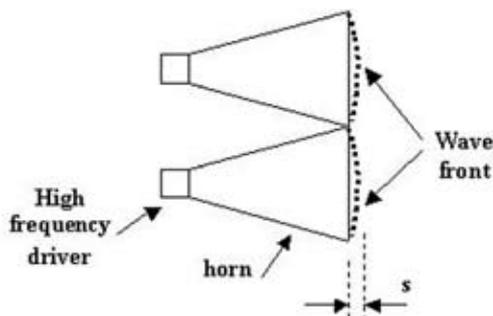


Fig. 10 : Pour obtenir un bon couplage entre les sources, l'écart s doit être inférieur au quart de la longueur d'onde pour la fréquence d'utilisation la plus élevée

Dans le cas d'éléments rayonnants circulaires adjacents (haut-parleurs ou pavillons), le facteur ARF n'est que de 75 %. Il est donc impossible dans ce cas de satisfaire au premier critère et, pour les pistons circulaires, le seul moyen d'éviter des lobes secondaires est donc un pas inférieur à la demi-longueur d'onde pour toutes les fréquences reproduites (deuxième critère). En d'autres mots, le diamètre des pistons doit être inférieur à la demi-longueur. Ceci est possible pour les fréquences inférieures à quelques kHz mais devient impossible aux fréquences élevées. Par exemple, à 16 kHz, le diamètre des pistons devrait être de quelques millimètres !

De cet exemple, nous comprenons que la seule solution pour satisfaire au premier critère à des fréquences élevées est d'assembler des éléments rayonnants rectangulaires. Une solution pourrait être d'utiliser des pavillons conventionnels dont la section à la sortie est rectangulaire. Mais aux hautes fréquences, les pavillons conventionnels ne peuvent respecter le troisième critère. En effet, la courbure du front d'onde rayonné est supérieure au quart de la longueur d'onde pour les fréquences situées au-delà de 6 à 8 kHz selon la forme du pavillon, entraînant ainsi des recouvrements des couvertures sonores de chaque source et des interférences destructives.

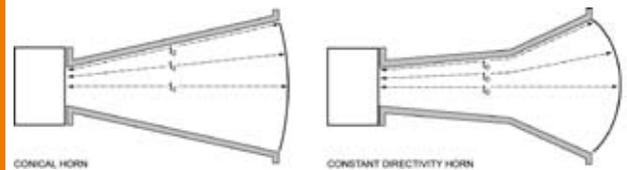


Fig. 11 : Front d'onde d'un pavillon conventionnel

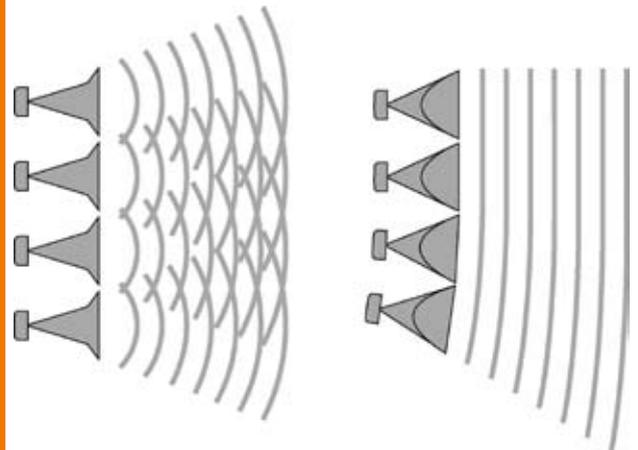


Fig. 12 : Réseau d'interférences d'un assemblage de pavillons conventionnels comparé au front d'onde homogène d'un système respectant les critères de la WST

Pour ces raisons, le guide d'onde DOSC (Diffusion d'Onde Sonore Cylindrique) a été développé. Il génère un front d'onde plan et isophasé en sortie d'une ouverture rectangulaire, pour permettre un couplage jusqu'à des fréquences supérieures à 16 kHz.

Ce guide d'onde, à l'intérieur duquel tous les trajets empruntés par l'onde sonore sont identiques, est utilisé à la sortie d'un moteur à compression conventionnel et convertit un disque plan isophasé en un ruban plan isophasé.

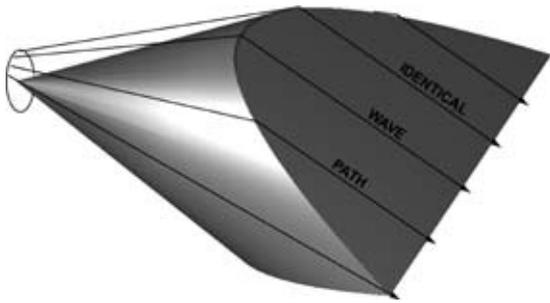


Fig. 13 : À l'intérieur du guide d'onde DOSC, tous les trajets empruntés par l'onde sonore ont une longueur identique, permettant ainsi la création d'un ruban sonore plan et isophasé

Quand plusieurs guides d'onde DOSC sont assemblés verticalement, ils respectent le premier critère (ARF = 80 %) à condition que l'espacement (épaisseur de l'ébénisterie de l'enceinte et jours entre enceintes) reste suffisamment faible.

Lorsque les conditions précédentes sont réunies, il est possible de réaliser une source linéaire continue droite à partir de sources sonores discrètes sur l'intégralité du spectre audio. Le système, une fois assemblé, rayonne une onde sonore cylindrique dont l'atténuation est de 3 dB par doublement de la distance.

En pratique, il est nécessaire de pouvoir adapter l'ouverture du système à la géométrie de l'audience en courbant le front d'onde. L'ouverture du système va ainsi dépendre du nombre d'éléments et des angles entre les différents éléments. Il est également indispensable de pouvoir focaliser davantage d'énergie vers les positions d'auditeurs les plus éloignées (angles nuls entre les éléments) mais aussi de mieux distribuer l'énergie aux positions les plus proches en ouvrant davantage le système. Une courbure variable de la source linéaire permet donc d'optimiser la répartition de l'énergie sonore sur toute l'audience.

Il est donc nécessaire de définir des critères (4e et 5e critères) pour préciser les conditions qui permettent de réaliser une source linéaire de courbure variable dont le front d'onde reste cohérent, sans interférences

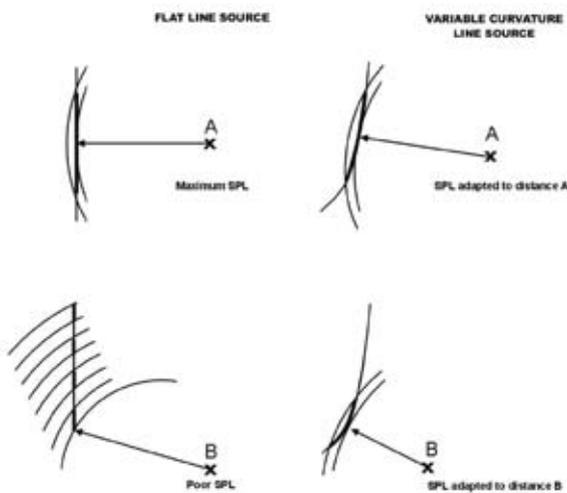


Fig. 14 : Comparaison entre des sources linéaires droites et à courbure variable. La distribution du SPL pour une source linéaire à courbure variable est adaptée à la géométrie de l'audience

destructives, et dont la répartition du SPL est optimisée pour maintenir une atténuation de 3 dB par doublement de la distance sur la zone d'audience.

**4<sup>e</sup> critère :** Pour déterminer la forme de la courbure la mieux adaptée à une géométrie d'audience donnée, il a été démontré [2] que, pour obtenir une atténuation de 3 dB par doublement de la distance le long de l'audience, les angles d'inclinaison de chaque élément doivent être inversement proportionnels à la distance à l'auditeur, ce qui équivaut à un espacement constant entre les différents points de visée de chaque élément sur l'audience.

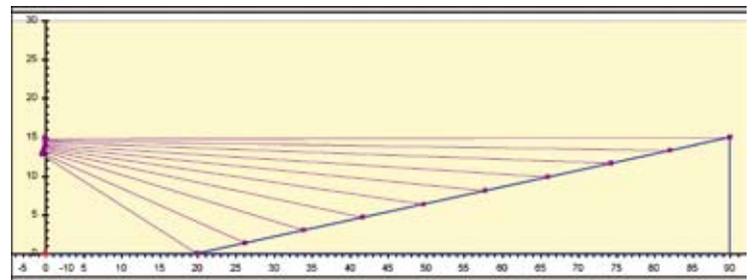


Fig. 15 : Représentation de la sculpture du front d'onde avec une source linéaire constituée de 10 éléments et dont la courbure est optimisée pour obtenir un comportement cylindrique de l'onde le long de l'audience

**5e critère :** Il a également été démontré [2] que l'angle maximum entre chaque élément du réseau doit respecter la limite suivante :

$$\alpha_{\max} = \left\{ \frac{1}{24ARF \text{ STEP}} - \frac{\text{STEP}}{d_{\min}} \right\} \frac{180}{\pi}$$

où  $\alpha_{\max}$  est l'angle maximum admissible entre chaque élément, ARF est le ratio présenté précédemment, STEP est la dimension verticale de chaque élément et  $d_{\min}$  est la distance minimale de l'auditeur.

Le respect de ce critère permet ainsi d'éviter l'apparition de lobes dans le champ proche. Par exemple, il n'est pas pertinent d'utiliser un angle de 10° entre des enceintes qui contiennent des haut-parleurs 15 pouces (ce qui correspond à une hauteur nominale STEP d'environ 50 cm). En effet, dans ce cas l'apparition de lobes audibles (> 16 dB) apparaissent dans le champ proche à des fréquences médiums/aiguës. Pour ce type d'enceintes, l'angle maximum pour que la source linéaire puisse être efficace à partir de 10 m est de 5°.

### Propriétés de la WST

Un système composé d'un assemblage linéaire de sources sonores qui satisfait à tous les critères de la WST se comporte comme une source linéaire continue de courbure variable qui rayonne un front d'onde cohérent.

Ce parfait couplage entre les sources permet d'obtenir des niveaux sonores plus puissants à puissance électrique équivalente et une portée plus importante qu'un système classique.

En effet, avec une source linéaire, le champ proche, où est observée une propagation cylindrique jusqu'aux fréquences les plus élevées, est étendu.

Il est intéressant de préciser qu'une source linéaire possède deux modes de propagation :

- cylindrique en champ proche où la propagation s'effectue avec 3 dB d'atténuation par doublement de la distance
- sphérique en champ lointain où la propagation s'effectue avec 6 dB d'atténuation par doublement de la distance

La position de la limite entre ces deux zones, appelées zone de Fresnel pour le champ proche et zone de Fraunhofer pour le champ lointain, est proportionnelle à la fréquence et au carré de la hauteur de la source :

$$d_{\text{border}} = \frac{3}{2} H^2 F \sqrt{1 - \left(\frac{1}{3HF}\right)^2}$$

avec :

H = hauteur du réseau (en m)

F = fréquence exprimée en kHz

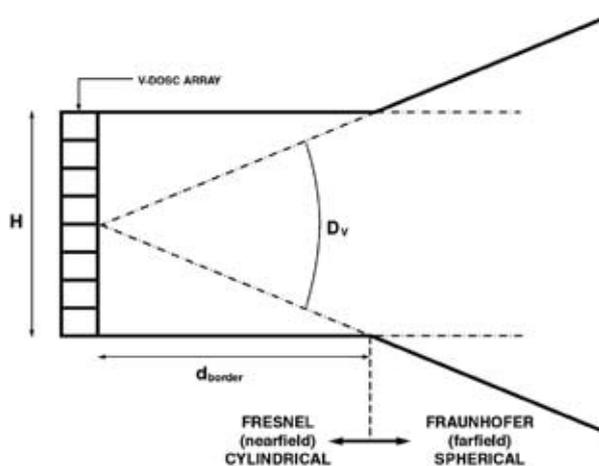


Fig. 6 : Dans la zone de Fresnel, le SPL décroît de 3 dB par doublement de la distance (propagation d'une onde cylindrique) tandis que dans la zone de Fraunhofer, le SPL décroît de 6 dB par doublement de la distance (propagation d'une onde sphérique)

Dans la zone de Fresnel, le front d'onde est cylindrique et se propage seulement dans la dimension horizontale. La hauteur du front d'onde est égale à la hauteur du réseau. Dans la zone de Fraunhofer, le front d'onde est sphérique et se propage à la fois dans les dimensions horizontales et verticales et l'angle de couverture verticale est :

$$D_v = 2 \sin^{-1} \left( \frac{0,6}{3HF} \right)$$

Par exemple, le champ proche d'une source linéaire droite d'une hauteur de 5,4 m s'étend jusqu'à 88 m à 2 kHz et l'angle de couverture en champ lointain est de 1°.

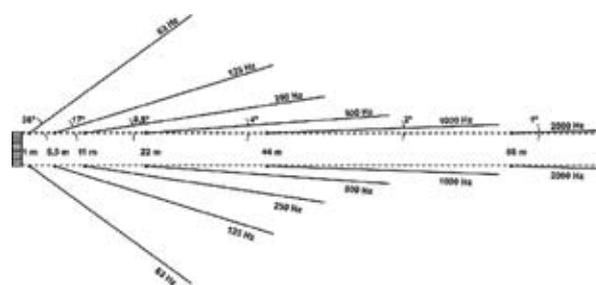


Fig. 17 : Représentation des différentes distances limites entre champ proche et champ lointain et de la déviation angulaire en fonction de la fréquence pour une source linéaire droite d'une hauteur de 5,4 m

De manière perceptive, cette extension du champ proche, dont bénéficie généralement la majorité de l'audience, peut se caractériser par une meilleure homogénéité du SPL et de la balance spectrale avec la distance, une meilleure image stéréo (dans une configuration Gauche/Droite) même à grande échelle, une intelligibilité et une clarté exceptionnelle, ainsi qu'une sensation de proximité (le système de diffusion apparaît plus proche que ce qu'il est réellement).

Lorsqu'une source linéaire à courbure variable est utilisée, il y a une combinaison entre comportement cylindrique et sphérique. Bien qu'une propagation purement cylindrique n'ait pas été réalisée, le respect du quatrième et du cinquième critère permet tout de même d'obtenir une atténuation de 3 dB par doublement de la distance le long de l'audience ainsi qu'une extension du champ proche.

La forme du front d'onde du système est directement définie par le nombre d'éléments assemblés et par les angles entre chaque élément. Ainsi la couverture verticale est totalement prévisible, reproductible et peut être facilement optimisée à toute configuration d'audience. D'autre part, la focalisation de l'énergie sur l'audience, qui contribue à la fois à augmenter l'énergie du champ direct et à diminuer l'énergie du champ réverbéré, permet d'étendre la distance critique (distance à laquelle l'énergie du son direct est égale à l'énergie du champ réverbéré), ce qui est particulièrement intéressant pour améliorer l'intelligibilité dans les lieux réverbérants.

L'importante réjection du SPL hors de la zone de couverture permet une onde arrière atténuée qui permet un meilleur monitoring de scène et une diminution des nuisances sonores de voisinage dans les installations sensibles.

## Références bibliographiques

[1] C. Heil, M. Urban, "Sound Fields Radiated by Multiple Sound Source Arrays", preprint 3269, présenté à la 92e Convention AES, Vienne, mars 1992

[2] M. Urban, C. Heil, P. Bauman, "Wavefront Sculpture Technology", preprint 5488, présenté à la 111e Convention AES, New York, novembre 2001