

Techniques du son

www.techniquesduson.com

Didier Pietquin © 2006

Version décembre 2006

Line Array – Les critères de la WST

Avec l'utilisation de plus en plus fréquente des systèmes dits « Line Array », il nous a semblé intéressant de s'attarder aux caractéristiques de ceux-ci en décrivant dans un premier article les critères qui définissent ce qu'est un système d'enceintes positionnées en ligne verticale.

Cet article est largement inspiré des documents écrits par Christian Heil et Marcel Urban et également par ceux écrits par Alain Pouillon- Guibert parus dans le magazine Sonomag.

On pourrait définir cet article comme une vulgarisation dans le but de rendre accessible à tout le monde les principes de base de cette technologie.

En route vers le line array's

Depuis toujours, le rôle le plus important du sonorisateur a été de s'adapter aux différentes contraintes techniques, acoustiques,... du lieu à sonoriser, du type de manifestation, de la zone d'audience à couvrir,...

Et qu'il s'agisse d'une conférence, d'une convention, d'un concert rock ou de tout autre événement, le but est toujours identique :

La couverture sonore doit être la plus uniforme possible de façon à ce que tous les auditeurs entendent à peu de chose près le même message sonore, que son intelligibilité soit aussi grande que possible.

Il faut donc également que toute la bande passante audible soit reproduite avec le plus de fidélité possible.

Le choix du système de sonorisation n'est de ce fait pas une mince affaire...

Le choix du système de diffusion

Sans entrer pour l'instant dans les détails de la propagation sonore, on peut déclarer qu'un son qui se propage dans l'air est soit atténué (en fonction de la distance, des obstacles,...) soit renforcé (Réverbération, réflexion,...).

Nous allons plutôt nous occuper de l'atténuation dans un premier temps.

En champ libre et avec l'utilisation d'un système de diffusion classique (assemblage de sources sonores ponctuelles), l'atténuation dans l'air est de 6 dB par doublement de la distance.

Ce qui donne par exemple une atténuation de plus ou moins 32 dB à 40 mètres par rapport au niveau à 1 mètre d'une même source sonore (Formule : $20 \log 40$).

Et voilà déjà une information utile à prendre en compte lors du choix de la puissance nécessaire.

Imaginons une conférence lors de laquelle on souhaite obtenir un niveau de 75 dB à une distance de 40 mètres par rapport à la source. Tenant compte de l'atténuation en fonction de la distance (32 dB dans

notre cas), l'enceinte devra délivrer un niveau de 107 dB. Si cette enceinte a une sensibilité de 98 dB à 1W/1m (1 watt/ 1 mètre), la puissance nécessaire sera de :

$$107 - 98 = 10 \log P = 9 \text{ dB soit } P = \pm 8 \text{ watts}$$

Il sera donc facile de s'accorder une marge de manœuvre.

Par contre, dans le cas d'un concert où l'on souhaite obtenir un niveau de 100 dB à 40 mètres, la puissance sera de :

$$132 - 98 = 10 \log P = 34 \text{ dB soit } P = \pm 2600 \text{ watts}$$

On ne peut donc pas se permettre de jouer à l'apprenti sorcier (ou sonorisateur...) ou en tout cas, mieux vaut être sûr de son coup...

Cette petite parenthèse illustre le fait qu'une unique enceinte n'est pas capable de couvrir à elle seule une zone importante sans perte, autant du point de vue de la puissance que de sa directivité limitée. Comme dit précédemment, le but étant en effet d'obtenir une couverture sonore uniforme, tant en puissance qu'en bande passante, afin de réduire au minimum les différences entre un spectateur éloigné et un proche de la scène.

La solution la plus « logique » est donc de réaliser un couplage ou un assemblage de plusieurs enceintes afin d'arriver à la pression sonore désirée sur l'ensemble de la zone d'audience à couvrir. Mais coupler différentes enceintes n'est pas forcément une solution facile.

Cette multiplication de haut-parleurs ne crée pas assurément un couplage cohérent. Des interférences vont apparaître, dépendant de la fréquence et de la place de l'auditeur. Le résultat sera alors, dans certains cas, une couverture sonore irrégulière, une courbe de réponse accidentée et une portée limitée.

Et dans ce cas, il sera nécessaire d'installer d'avantage de haut-parleurs qu'il n'en faudrait théoriquement si l'ensemble de ces sources sonores était réuni en une source sonore unique et cohérente.

Et quoi de plus simple pour illustrer ces propos que de retourner en enfance ?

Imaginons 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 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.

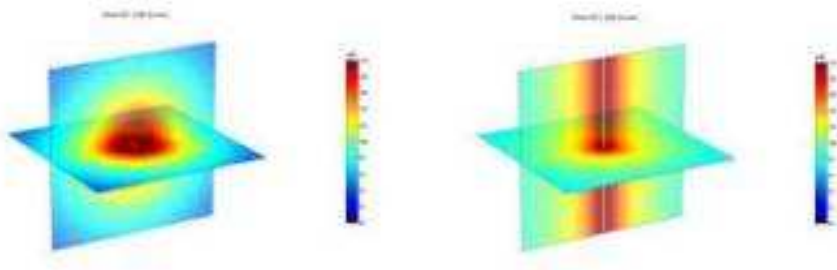
(Christian Heil)

En somme, l'idéal serait de créer une source sonore ponctuelle (source constituée par un seul point d'émission) dont on puisse en contrôler l'ouverture afin de concentrer l'énergie sur la zone d'audience qui nous intéresse.

C'est cette idée qui a conduit au développement des principes de la WST (« Wavefront Sculpture Technology » ou sculpture du front d'onde) dont le but était de trouver les conditions physiques pour qu'un système comprenant plusieurs haut-parleur soit assimilable à une source sonore unique de grande dimension capable de reproduire 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 de la WST. Cet exercice visait donc à réaliser une source sonore unique totalement cohérente et à directivité maîtrisée à partir d'un ensemble modulaire ajustable.

(Christian Heil – Marcel Urban)

De plus, la propagation sonore de ce genre de système en ondes cylindriques permet de réduire l'atténuation à 3 dB par doublement de la distance. (Nous verrons dans un autre article pourquoi).



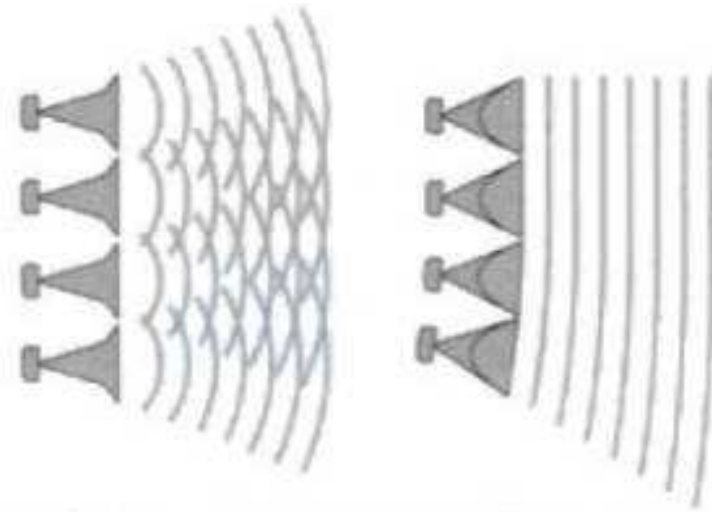
Source sphérique - Source cylindrique

Le Line array

Le line array est un réseau linéaire, un empilage vertical en ligne d'un certain nombre d'enceintes acoustiques.

Un line array n'est donc pas forcément un système capable de reproduire un front d'onde continu, assimilable à une source sonore unique de grande dimension.

Pour qu'un line array soit assimilable à une ligne source, il devra répondre aux critères de la WST, définis par les travaux de Christian Heil et de Marcel Urban.



Réseau d'interférences d'un assemblage classique de sources sonores par rapport au front d'onde homogène d'un système respectant les critères de la WST.

Premier critère

La surface couverte par l'ensemble des sources prises individuellement est supérieure à 80 % de la surface totale de cet ensemble de sources.

Pour simplifier, la surface des différentes sources acoustiques (haut- parleurs et guides d'ondes) doit représenter au moins 80% de la surface totale de la ligne.

On parlera du facteur ARF (Active Radiating Factor).

Deuxième critère

La distance qui sépare les centres acoustiques de chacune des sources (Step) est inférieure à la demi longueur d'onde pour la fréquence d'utilisation la plus élevée.

Pour rappel, la longueur d'onde se calcule comme suit :

$$\lambda = C/F$$

Avec λ en mètre

C (Célérité du son) en mètre/ seconde (+/- 340 m/s dans l'air à 20°C)

F (Fréquence en Hz)

Pour vous aider, voici un petit tableau reprenant quelques longueurs d'ondes :

Fréquence	Longueur d'onde
-----------	-----------------

100 Hz	3.4 m
--------	-------

500 Hz	0.68 m
--------	--------

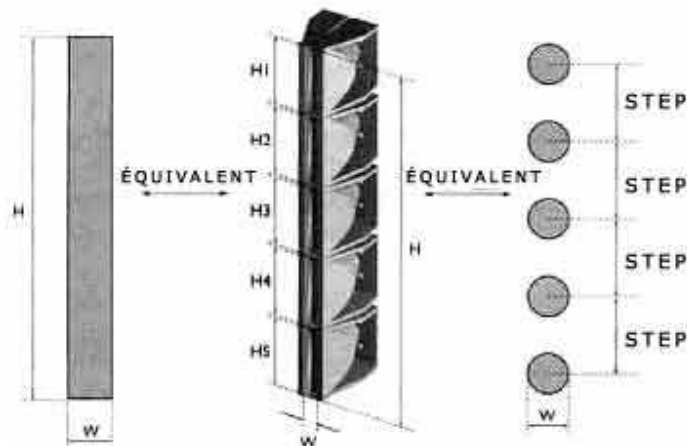
1000 Hz	0.34 m
---------	--------

2000 Hz	0.17 m
---------	--------

4000 Hz	0.08 m
---------	--------

8000 Hz	0.04 m
---------	--------

16 000 Hz	0.02 m
-----------	--------



Le problème qui se pose par rapport au premier critère est que le facteur ARF est inférieur à 80 % dans le cas d'éléments rayonnants adjacents (Haut- parleurs ou pavillons).

Ce critère demande en effet des épaisseurs de matière les plus faibles possibles entre chaque élément de la ligne.

Dans le cas du V-Dosc par exemple, les panneaux inférieurs et supérieurs sont en aluminium, permettant de cette manière un espacement aussi réduit que possible.

Par rapport au deuxième critère, lorsque les fréquences diminuent, la longueur d'onde augmente et les distances de couplage également.

Le deuxième critère ne posera donc pas de problème pour des fréquences inférieures à quelques KHz mais lorsqu'il s'agit de fréquences plus élevées, cela devient impossible.

A 16 KHz, l'espacement des sources devrait être de quelques millimètres.

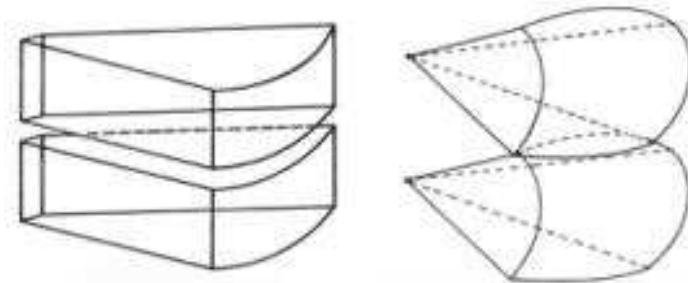
Il a donc fallu trouver une solution.

Et pourquoi ne pas utiliser des pavillons conventionnels ?

Malheureusement, ceux-ci ne répondent pas au troisième critère (voir plus bas) pour les hautes fréquences. Leur courbure du front d'onde étant en effet supérieure au quart de la longueur d'onde pour les fréquences situées au-delà de 6 à 8 KHz selon la forme du pavillon.

Ceci amenant des recouvrements provoquant des interférences destructrices.

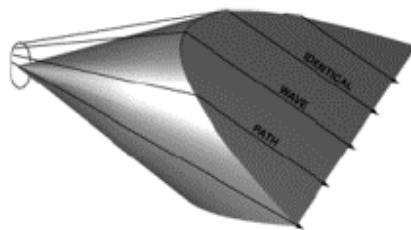
Le DOSC, Diffuseur d'Ondes Sonores Cylindriques



Diffuseur d'ondes cylindriques et diffuseur d'ondes sphériques

La solution a été trouvée avec la création du DOSC. Celui-ci génère en effet un front d'onde plan et isophasé en sortie d'une ouverture rectangulaire. Ceci permettant alors un couplage cohérent jusqu'à des fréquences supérieures à 16 KHz.

La particularité de ce guide d'onde vient du fait que chaque onde sonore emprunte exactement des trajets de longueur identique créant un front d'onde plan isophasé en forme de ruban à partir d'un moteur à chambre de compression tout à fait classique, celui-ci créant à la base un front d'onde plan et isophasé en forme de disque.

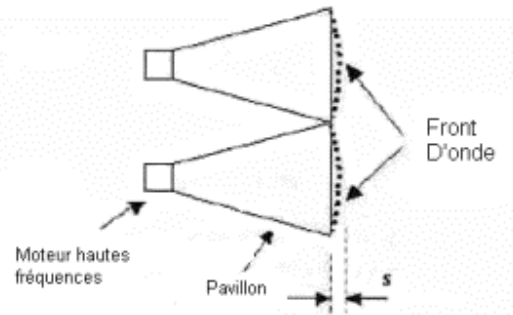


Le problème du deuxième critère est donc résolu. Il faudra toutefois veiller lors de l'assemblage vertical de plusieurs DOSC à ce que le premier critère soit respecté. Pour cela, et comme nous l'avons déjà vu, il faudra que l'espacement (ébenisterie, jours) entre chaque enceinte soit réduit au strict minimum.

Etant donné que le brevet du DOSC est détenu par la société de Christian Heil, d'autres marques comme Nexo, Adamson, ... ont breveté des principes similaires.

Troisième critère

Ce critère nous explique qu'une légère courbure du front d'onde rayonné par chaque source peut être acceptée. L'ondulation du front d'onde doit être inférieure 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).



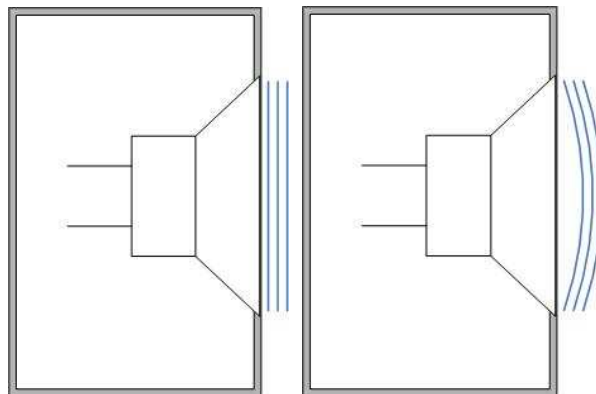
Pour obtenir un bon couplage entre les sources, l'écart S doit être inférieur au quart de la longueur d'onde pour la fréquence d'utilisation la plus élevée.

Mais quelle est l'importance de ce critère ?

Pour tenter de mieux comprendre, reprenons l'explication de M Alain Pouillon- Guibert parue dans le Sonomag n°298 de janvier 2005.

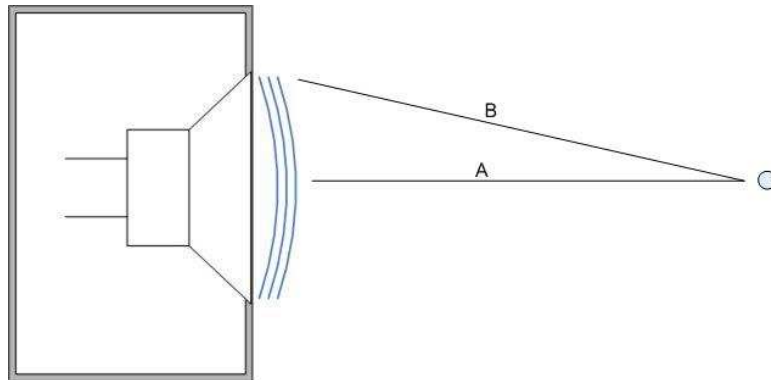
Chaque enceinte ayant une courbure de champ (ou front d'onde) vertical non nulle, leur empilage en ligne droite pour recréer une onde cylindrique de longue portée n'est pas parfait.

Même si la théorie veut que le front d'onde vertical d'ondes sonores produit par un diffuseur (Dosc par exemple) soit parfaitement droit, la réalité est telle que ce champ est légèrement courbé.



Front d'onde théorique et front d'onde réel

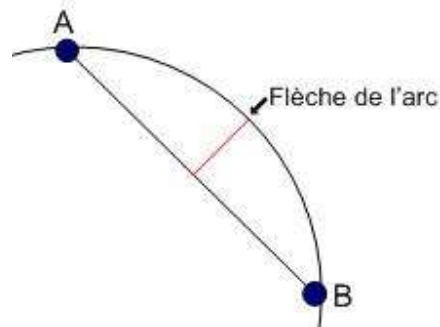
Un auditeur qui se trouve au lointain reçoit donc les signaux avec une erreur, une différence de chemin...



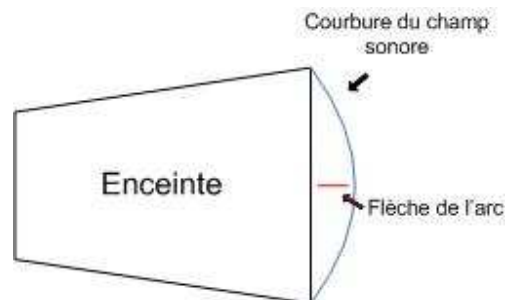
Le trajet A est différent du trajet B

...différence de chemin qui correspond à la flèche de l'arc de cercle vertical délimité par la courbure du front d'onde sur la face avant de l'enceinte.

Notion d'arc de cercle et de flèche :



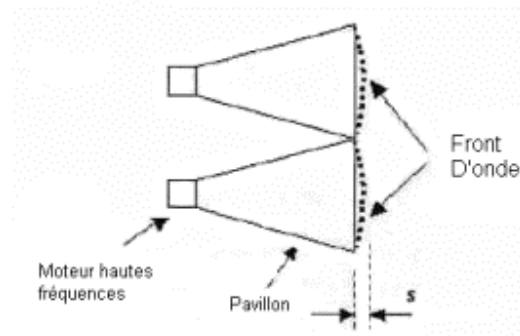
La partie du cercle qui va du point A au point B est un arc de cercle. La ligne rouge correspond à la flèche de l'arc.



Lorsque cette différence (la longueur de la flèche de l'arc) est égale ou inférieure à $\lambda/4$, il y a addition. Lorsque cette distance augmente, la sommation diminue jusqu'à devenir une annulation pure et simple à $\lambda/2$.

Sachant qu'un $\frac{1}{4}$ de longueur d'onde à 16 KHz équivaut à 5 mm, une flèche de 10 mm induit au lointain un trou dans la réponse à 16 KHz.

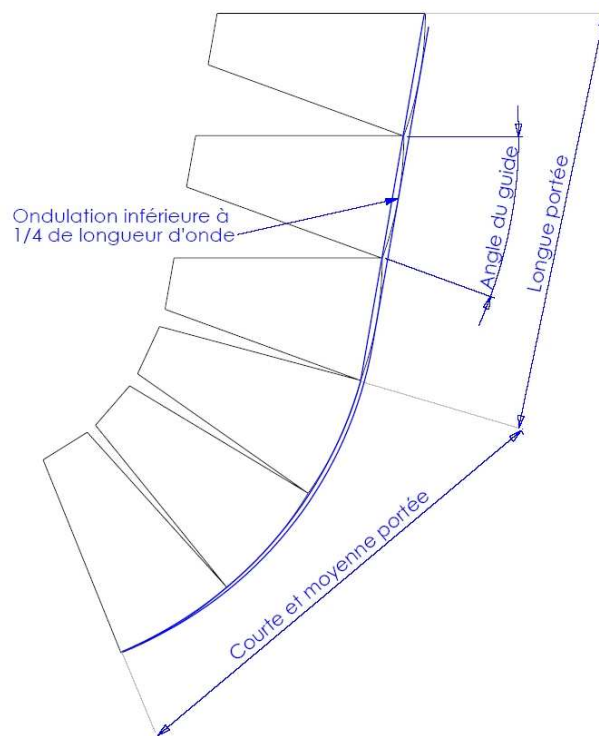
Dans notre cas, c'est bien sûr la courbure générale du front d'onde de l'ensemble des sources qui nous intéresse.



Une ligne étant constituée de plusieurs enceintes, c'est la courbure globale du champ sonore qui est à prendre en compte. La distance S de l'ensemble doit donc être inférieure au $\frac{1}{4}$ de la longueur d'onde pour la fréquence la plus élevée.

Il convient de remarquer que vers le bas de la ligne, lorsque la courbure augmente, la flèche résultante diminue, jusqu'à s'annuler lorsque les angles inter-enceintes sont égaux à l'angle de courbure du champ sonore.

D'où l'idée de fabriquer des enceintes spéciales destinées non plus à couvrir la longue portée mais au contraire le champ proche.



Le premier à avoir eu cette idée est Nexo avec l'enceinte GeoS 830, dont l'angle de champ vertical est de 30° , enceinte prévue pour relayer la GeoS805 au-delà de 5° d'angle interenceintes.

Quatrième critère

Le respect des critères précédents va permettre de réaliser une source sonore linéaire sur l'ensemble du spectre audio. Le résultat sera la propagation d'une onde sonore cylindrique dont l'atténuation est de 3 dB par doublement de la distance.

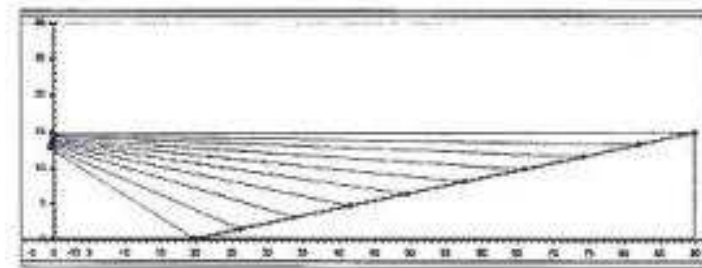
Pratiquement, il faudra encore adapter l'ouverture du système par rapport à la géométrie de l'audience à couvrir en courbant le front d'onde. Il sera également nécessaire de focaliser suffisamment d'énergie vers les auditeurs les plus éloignés (angles nuls entre les éléments) et d'ouvrir davantage le système en bas de la ligne pour mieux distribuer l'énergie sur la zone la plus proche.

Une courbure variable de notre source linéaire permettra donc d'optimiser la répartition de l'énergie sonore sur toute l'audience.

Les quatrième et cinquième critères ont donc été définis afin de déterminer les conditions permettant de conserver une source sonore linéaire de courbure variable dont le front d'onde reste cohérent.

Pour garder notre atténuation de 3 dB par doublement de la distance, il a été démontré que les angles d'inclinaisons entre chaque enceinte doivent être inversement proportionnels à la distance de l'auditeur.

Ce qui veut dire que plus les auditeurs sont éloignés, plus les angles de couplage entre chaque enceinte doivent être serrés.



Cinquième critère

L'angle maximum entre chaque élément du réseau doit respecter la limite suivante :

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

Ou α_{\max} est l'angle maximum admissible entre chaque élément. ARF est le ratio correspondant au premier critère, 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 sonore 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 mètres est de 5°.

Christian Heil

La ligne source

Notre assemblage linéaire d'enceintes acoustiques se comportera alors comme une ligne source pour autant qu'il respecte les cinq critères définis ci-dessus. Le front d'onde résultant de cet empilage sera cohérent.

Sources :

Documents sur la WST disponibles sur le site <http://www.l-acoustics.com>

Articles de Alain Pouillon-Guibert parus dans les Sonomag 284, 285 et 298.

Article sur le DOSC de Patrice Congard parus dans les Sonomag 159 et 160.

Le livre des techniques du son, Tome 1 , Collectif d'auteurs, Editions Dunod, 2002

Didier Pietquin Novembre 2005 ©

www.techniquesduson.com