

Le couplage aux basses fréquences

Dans ce chapitre, nous allons parler du couplage acoustique dans le cadre d'une écoute stéréophonique. On en distingue deux sortes. Le couplage entre une ou plusieurs enceintes avec les surfaces adjacentes et le couplage mutuel entre deux enceintes ou davantage. Nous verrons que ces deux couplages peuvent coexister.

Rappel de définition : la stéréophonie

Le mot « Stéréophonie » vient du Grec « stereos » qui signifie solide et « phone » qui désigne la voix et par extension le son. La stéréophonie se réfère à un mode de reproduction sonore dans lequel on essaie de créer une illusion de direction et de perspective. Le principe de la stéréophonie est de pouvoir placer un son dans l'espace à un endroit où il n'y a pas de source physique, le plus souvent sous la forme d'une image fantôme ou virtuelle.

On crée la stéréo en utilisant plusieurs canaux audio indépendants reliés à plusieurs enceintes de manière à reconstituer l'espace sonore voulu par l'artiste. Par exemple, un signal distribué en quantité égale sur deux enceintes en phase et de même sensibilité, semblera provenir d'un point virtuel situé entre les enceintes.

La stéréophonie n'est pas limitée à deux canaux ni à deux enceintes. Elle s'applique au son multicanal ou *son Surround*. Le format sonore Dolby Stereo comprend 4 canaux distincts. Le format 5.1 est stéréophonique.

Pour plus d'informations: http://en.wikipedia.org/wiki/Stereophonic_sound

Couplage mutuel entre les enceintes et les surfaces adjacentes.

La reproduction d'un enregistrement stéréophonique à deux canaux fait généralement appel à une paire d'enceintes. Sous certaines conditions, cette configuration donne lieu à des effets de couplage qui modifient la relation acoustique entre la pièce et les enceintes. Nous allons examiner le comportement de l'image fantôme produite par une paire d'enceintes dans différents environnements acoustiques et de voir quelles conclusions on peut en tirer.

Introduction

La recherche de l'enceinte parfaite occupe l'esprit des amateurs et des professionnels de l'audio depuis de nombreuses années. On observe un consensus sur les spécifications: réponse en fréquence linéaire, faible distorsion, sensibilité élevée, etc. Par contre, les exigences relatives à la perfection de l'image stéréo sont beaucoup moins évidentes. La tâche est difficile et même si l'enceinte parfaite existait, les performances d'une paire stéréo en situation réelle ne seraient jamais à la hauteur des attentes, notamment à cause du couplage qui aggrave les problèmes habituellement rencontrés.

Aux fréquences basses, quasiment toutes les enceintes sont omnidirectionnelles. Cela signifie que l'enceinte rayonne non seulement à l'avant mais aussi vers les deux côtés, vers le haut, vers l'arrière et vers le bas. La meilleure image est celle de l'enceinte placée au centre d'une sphère représentant l'énergie rayonnée.

Quand on pose une enceinte omnidirectionnelle sur le sol, la moitié inférieure de la sphère de rayonnement est bloquée et l'énergie est réfléchi. Cette réflexion se combine avec la moitié supérieure de la sphère, ce qui a pour effet de doubler la pression acoustique et d'augmenter d'autant le niveau sonore. La présence d'un mur unique à proximité immédiate de l'enceinte accroît l'intensité sonore de 3dB et par conséquent la pression acoustique de 6dB.

Figure 1- Rayonnement d'une source omnidirectionnelle en champ libre (2p) et dans un champ hémisphérique (p). La pression globale A+B est la somme des pressions des deux hémisphères.

Cela signifie que la présence d'une surface réfléchissante donne naissance à un champ sonore équivalent à une seconde enceinte identique placée à la position de l'image miroir. Par analogie, il est donc logique de supposer que l'introduction d'une nouvelle enceinte identique à la première (la paire stéréo) augmentera la puissance d'autant.

Mais ce n'est pas aussi systématique. Alors que l'influence des parois sur l'intensité sonore est indépendante du signal et peut être prédite et corrigée par la conception de l'enceinte et/ou par une égalisation électronique, l'influence d'une enceinte sur une autre est très dépendante de la nature exacte du signal transmis. Par exemple, quand on envoie le signal à gauche ou à droite sur une seule enceinte, la reproduction théoriquement parfaite devient possible. Quand l'image sonore est centrée, les deux haut-parleurs envoient le même signal et des interférences apparaissent, donnant lieu à un champ d'intensité variable, dépendant de la position de l'auditeur et de la fréquence.

Dans la plupart des enregistrements stéréophoniques actuels, la partie la plus importante du contenu, tel le chant ou les dialogues se trouve au centre, entre les enceintes. On retrouve le principe de la stéréo. Hélas, dans ce contexte on observe et c'est regrettable, que ce contenu est presque toujours moins bien traduit que les sons monophoniques calés à droite ou à gauche.

Les problèmes liés à la reproduction de l'image fantôme au centre d'une paire stéréophonique peuvent être atténués ou surmontés. Tenter d'analyser sous toutes les facettes les relations qui existent entre une paire d'enceintes et le local d'écoute serait une tâche énorme. En outre, elle donnerait des résultats applicables uniquement au modèle considéré. Nous allons donc limiter notre investigation à une approche simple, plus générale avec un nombre de variables réduit au minimum. Considérons une paire d'enceintes supposées idéales, en mettant l'accent l'image fantôme au centre. Nous examinerons l'évolution de la vitesse et de la pression aussi bien en champ libre qu'en milieu réverbérant.

Analyse d'une enceinte idéale dans une pièce idéale.

Nous allons considérer successivement deux environnements acoustiques opposés: une chambre anéchoïde et une chambre réverbérante. Pour commencer, chacune contient une enceinte omnidirectionnelle, linéaire et supposée parfaite.

La réponse en fréquence observée à n'importe quel endroit la chambre anéchoïde est fonction de la pression fournie par l'enceinte (la pression acoustique en un point donné, par unité d'énergie électrique appliquée). L'enceinte étant omnidirectionnelle, la réponse est uniforme partout dans la pièce.

Dans la chambre réverbérante, la réponse en n'importe quel point correspond à la somme d'un nombre infini de réflexions, arrivant toutes avec un décalage temporel différent. C'est la définition du champ diffus. La réponse dans la chambre réverbérante dépend donc de la réponse en puissance du haut-parleur (la puissance sonore totale rayonnée par unité d'énergie électrique). Elle est aussi uniforme et la même partout.

Donc, la puissance rayonnée par une source peut être trouvée en intégrant la réponse anéchoïque sous tous les angles. On en déduit que la réponse en puissance d'une enceinte omnidirectionnelle est la même que sa réponse en pression. Elle est linéaire partout, aussi bien dans la chambre anéchoïde que dans la chambre réverbérante.

Cas de deux sources de vitesse dans une chambre anéchoïde

Il faut d'abord définir ce que sont une source de vitesse et une source de pression.
Quand la vitesse de déplacement de la membrane est indépendante de la charge de pression exercée sur elle, l'enceinte est une source de vitesse.
Quand la vitesse de déplacement de la membrane varie en fonction de la charge de manière à maintenir une pression constante, l'enceinte est une source de pression.

1) fonctionnement en vitesse ou pression ... / je ne suis pas sûr que sans analogie avec ce qui se passe avec la membrane ce soit suffisant de mon opinion il est nécessaire sans rentrer dans le détail de ce qui se passe avec le HP réel..

Si on s'intéresse à l'aspect physique, la différence entre une source de pression et une source de vitesse désigne la manière dont le haut-parleur transmet le mouvement de sa membrane à l'air qui l'entoure. Toutefois, en ce qui concerne le son, les ondes de vitesse n'existent pas. Le son est toujours la conséquence d'une variation de pression. Nos oreilles ne savent pas discerner autre chose.

Un haut parleur monté sur un caisson fermé est une source de pression. Quand la membrane du haut-parleur se déplace en avant, elle comprime l'air dans la pièce et inversement quand elle tire l'air vers l'arrière, un peu comme si le haut-parleur était une pompe comprimant et décomprimant l'air dans la pièce.

Une enceinte dipolaire est une source de vitesse. Quand la membrane pousse l'air, de quelque côté que ce soit, elle le comprime d'un côté de la pièce et le décomprime de l'autre, simultanément. A l'instant suivant, elle produit le même phénomène en sens inverse. Même si la comparaison est impropre on peut dire que le mouvement ressemble à celui d'un ventilateur qui soufflerait et aspirerait l'air dans un sens puis dans l'autre en alternance.

Le couplage d'une source de pression se fera sur les pics de pression alors que le couplage d'une source de vitesse aura lieu dans les nœuds de pression (zone de faible pression où la vitesse est maximale).

Je ne suis pas sûr qu'il faille aller au loin. Je ne souhaite pas entrer dans la description du fonctionnement des enceintes. Je veux m'arrêter aux phénomènes acoustiques des interférences et du couplage des enceintes.

Nous allons introduire une seconde enceinte, identique à la précédente, dans la chambre anéchoïde et l'alimenter avec le même signal pour produire une image stéréo. Le champ sonore correspond à la somme des pressions générées par les deux enceintes et la pression résultante peut être comparée à celle que produirait une seule source de même niveau, placée à mi-chemin entre les deux enceintes.

La première observation importante est qu'en tout point le long d'une ligne médiane à égale distance des deux enceintes, les deux champs sonores s'ajoutent et forment une interférence constructive à toutes les fréquences. Un auditeur placé le long de cette ligne entendra chaque enceinte en quantité égale, sans déformation autre qu'une élévation du niveau de pression de +6dB par rapport à celui d'une seule enceinte. La courbe de réponse est linéaire.

En dehors de cette ligne médiane, la réponse change car le son émis par chacune des enceintes interfère avec sa voisine. L'interférence sera constructive ou destructive selon l'écart de distance avec les enceintes et la longueur d'onde du signal.

Exemple : Supposons deux enceintes espacées de 2 mètres et un auditeur situé sur l'axe médian, à 3 mètres des enceintes.

Il perçoit un niveau sonore à toutes les fréquences, supérieur de 6dB à celui d'une seule enceinte. Puis notre auditeur s'écarte de l'axe de 0,5m vers la droite ou la gauche. Sa nouvelle position est distante de 3,35m (d2) d'une enceinte et de 3,04m (d1) de l'autre. L'angle formé par la ligne médiane et l'axe d'écoute est de 9,5° (voir fig. 2)

L'auditeur reçoit le son d'une enceinte avant celui de l'autre car les ondes sont décalées. Dans ces conditions, il existe plusieurs fréquences pour lesquelles l'écart de distance correspond au multiple entier d'une demi-longueur d'onde.

Or, on sait que deux ondes distantes d'une demi-longueur d'onde sont en opposition de phase et s'annulent. Ici, l'écart des distances ($\lambda/2$) mesure 0,313m. La fréquence pour laquelle la demi-longueur d'onde mesure 0,313m est : $340 / 2 \times 0,313 = 550\text{Hz}$.

Figure 2 – Représentation géométrique de la configuration d'écoute décrite ci-contre.

A cette fréquence les ondes s'annulent, le signal disparaît et l'auditeur ne l'entend plus. La réponse n'est plus linéaire à cause de l'interférence entre les champs acoustiques rayonnés par les deux enceintes et le champ de propagation n'est plus omnidirectionnel. On retrouve d'autres annulations à des intervalles multiples de la longueur d'onde, correspondant à 1650Hz, 2750Hz, 3850Hz, etc... Le signal disparaît à chacune de ces fréquences introduisant de fortes colorations et une réponse en fréquence qui ressemble à un peigne. Cela s'appelle un filtrage en peigne.

Figure 3 - Filtrage en peigne obtenu avec la configuration géométrique de la figure 2. L'échelle des fréquences est logarithmique sur le graphe du haut et linéaire sur celui du bas. La première annulation pour cet angle se produit à 550Hz, les suivantes étant espacées de 1100Kz.

Figure 4 – Ce graphe montre la directivité à l'état stable d'un système couplé en champ libre, pour deux positions de l'auditeur à 20 et 35 degrés de l'axe médian. La réponse combinée des deux haut-parleurs est proportionnelle à la somme des intensités pour chaque fréquence au point d'écoute choisi. Les annulations du signal apparaissent aux fréquences pour lesquelles la phase des signaux s'oppose à cause de l'écart de distance. Cependant, pour de grandes longueurs d'ondes, l'écart relatif devient négligeable et les courbes se superposent.

Cas de deux sources de vitesse dans une chambre réverbérante

Nous allons reproduire l'expérience précédente dans une chambre réverbérante. Après avoir introduit une seconde enceinte, on observe que la réponse est également uniforme partout dans la chambre. Mais cette fois-ci, elle est directement dépendante de la puissance combinée des deux enceintes. Le champ réverbéré étant diffus, la phase est aléatoire et la valeur résultante est nulle.

Toute la puissance produite par les enceintes est maintenue dans le champ réverbéré, indépendamment du fait que les interférences entre les haut-parleurs produisent des réponses en peigne toutes différentes selon la direction. L'auditeur reçoit la même quantité d'énergie

réfléchi provenant de toutes les directions. Par conséquent, la réponse est parfaitement linéaire en tout point de la pièce.

Ce bel avantage présente aussi un gros inconvénient. **Le son émis étant entièrement dans le champ réverbéré, l'auditeur n'entend plus que les réflexions.** Il n'y plus de localisation des sources, donc plus de droite ni de gauche, ni de stéréo. L'auditeur ne sait plus situer l'origine des sources dans l'espace.

2) le couplage en salle réverbérante avec la localisation pas possible ... oui moi je pense comprendre ce que tu veux décrire , mais je ne suis pas sur que tout le monde pourraje pense que c'est à affiner

J'ai répété la phrase qui se trouve 6 lignes au dessus. N'oublions pas que nous sommes dans un cas théorique idéal, c'est-à-dire que la réverbération est infinie à toutes les fréquences et que le champ réverbéré commence à 1cm des enceintes.

Conclusion de ces expériences

Les études sur le comportement d'une paire d'enceintes dans des conditions idéales montrent que les problèmes liés à la reproduction de l'image fantôme centrale partagent les mêmes causes, mais avec des effets différents.

Dans des conditions anéchoïques, on observe une élévation de la puissance acoustique d'une enceinte quand la seconde est alimentée par le même signal. Un signal diffusé sur les deux enceintes sera plus fort que sur une seule, ce qui peut être un inconvénient quand on veut effectuer une transition panoramique à niveau constant.

La directivité médiocre de la paire d'enceintes engendre une réponse en fréquences hachée qui colore le signal. Enfin, dans un espace réverbérant, la localisation des sources disparaît et l'intelligibilité est nulle.

Conséquences pratiques

L'analyse du comportement d'une paire d'enceintes idéale dans un environnement idéal est intéressante d'un point de vue académique, mais comment peut-on rapprocher cette démonstration à la situation habituelle de nos enceintes imparfaites dans des pièces d'écoute très imparfaites ?

Dès qu'un élément absorbant est introduit dans la pièce, il capte une partie de l'énergie, directe ou réfléchi, contenue dans le champ réverbéré qui se déplace dans sa direction. La quantité d'énergie absorbée n'est pas uniforme. Elle varie selon la fréquence, même en présence d'un dispositif absorbant parfait, en raison de la mauvaise directivité du couple d'enceintes.

De même, quand des surfaces réfléchissantes sont introduites dans une pièce sourde, elles renvoient une partie de l'énergie à l'auditeur, une fois encore, avec un équilibre tonal qui dépend de la directivité formée par le couple d'enceintes. **Cette variation tonale ne se produit pas quand une seule enceinte est utilisée.**

3) allant avec le point précédent et décrivant les surfaces d'absorptions et de réflexions ou ça ne se "produirait pas" avec une seule enceinte ... oui là encore je pense comprendre ta phrase, mais à la lire comme cela on peut comprendre qu'avec une seule enceinte un panneau réfléchitif ou absorbant n'a plus d'action ... à "affiner" sans doute ..

J'ai précisé qu'il ne s'agit que de la variation tonale

Donc, même avec des absorbeurs et des réflecteurs parfaits, il y aura toujours une différence significative entre la reproduction d'une image complètement à droite ou à gauche et une image fantôme au centre. On peut en conclure qu'il est impossible de produire une image

fantôme entre deux enceintes même parfaites dans une pièce qui n'est pas anéchoïque et que la stéréophonie sur deux canaux est une illusion très instable.

Figure 5 – Diagrammes de directivité d'une paire d'enceintes omnidirectionnelles supposées parfaites pour diverses fréquences. L'auditeur placé dans l'axe et les enceintes forment un triangle équilatéral de 3 mètres de côté. En dehors de l'axe médian à 0 degré, les annulations du signal produites par les interférences apparaissent dès 100Hz. La ligne bleue correspond à la dispersion d'une enceinte unique.

2eme partie : Le couplage mutuel

Le concept du couplage mutuel entre les haut-parleurs est familier à quiconque a monté deux haut-parleurs rapprochés.

Quand un haut-parleur rayonne à l'air libre, la pression locale sur la membrane est directement liée à son propre mouvement. Si on place un second haut-parleur à proximité immédiate du premier, alimenté avec le même signal et avec une phase identique, la pression locale devant chaque haut-parleur est sa propre pression plus celle rayonnée par la membrane adjacente. Cette pression ajoutée agit comme une augmentation de l'impédance de rayonnement, ce qui engendre une élévation du niveau sonore. L'intensité acoustique produite par l'ensemble en regard d'une seule, est quadruplée.

Mécanisme

Ce qui est peut-être moins évident, est de savoir comment l'introduction d'un second haut-parleur *distant* peut doubler la puissance du premier. On peut illustrer le couplage en imaginant que la membrane est faite de petites surfaces juxtaposées. Plus la membrane est grande, plus il est difficile pour une surface d'air en mouvement de se frayer un chemin en dehors du champ d'influence de la surface voisine. Les deux membranes travaillent ensemble, un peu comme le battement de nos paupières. Cette congestion communicative des particules d'air augmente la charge résistive de l'équipage mobile du haut-parleur.

En général, les grandes membranes rayonnent mieux les basses fréquences que les membranes de surface moyenne car le couplage est produit par chaque élément de surface des membranes. Quand on double la surface de la membrane d'un haut-parleur, à vitesse de déplacement constante, l'intensité augmente de 6 décibels. L'introduction d'un second haut-parleur à proximité d'un premier double la résistance au rayonnement de chacun des diaphragmes, doublant ainsi la puissance acoustique de chaque haut-parleur (1).

On peut illustrer ce qui précède avec un cas concret. Nous avons deux haut-parleurs A et B, de 30cm de diamètres, écartés de 3mètres. La magnitude de la pression sur la membrane du haut-parleur A due à l'influence du haut-parleur B est à peu près un vingtième de la pression liée son propre mouvement. Comment une augmentation de la pression de 5% peut-elle provoquer un doublement de la puissance acoustique? La réponse est donnée par la phase relative des deux pressions.

Aux basses fréquences, la pression sur la membrane A produite par sa propre vitesse est pratiquement *en quadrature* de phase avec la vitesse (l'impédance de rayonnement étant presque entièrement réactive), alors que la pression venant de B arrive quasiment *en phase* avec la vitesse à cause de la distance de propagation entre les sources. En fait, seule la partie en phase de la pression est responsable de puissance. Quand la distance *d* diminue, l'amplitude de la pression due à la deuxième source augmente et sa phase se rapproche de celle de la

pression due à la vitesse de la première source. L'augmentation de puissance reste à +6dB, mais elle s'étend vers des fréquences de plus en plus élevées.

On entend parfois dire : « le couplage mutuel, c'est quand plusieurs haut-parleurs sont assez proches pour produire un gain supplémentaire aux basses fréquences ». En fait, le couplage mutuel n'est pas limité aux basses fréquences mais la force résultante, n'est vraiment constructive qu'aux basses fréquences car l'onde rayonnée par une membrane doit être en phase avec le rayonnement de sa voisine. Au fur et à mesure que la distance entre les enceintes augmente, la distance de propagation approche la demi-longueur d'onde, la phase de la pression venant de la seconde source n'est plus en phase avec la vitesse. Le couplage s'affaiblit et devient même négatif à certaines fréquences.

Aux fréquences supérieures, les interférences engendrent la formation des lobes de directivité avec des annulations de signal. L'effet du couplage devient progressivement négligeable. Même quand les haut-parleurs se touchent, le couplage mutuel sur une large zone d'écoute dépasse rarement 300 à 500 Hz. Bien sûr, ce phénomène est dépendant de la position de l'auditeur.

Enfin, il existe un autre type de couplage entre les enceintes et les parois ou les surfaces adjacentes, c'est-à-dire les murs de la pièce le plus souvent. Quand les deux couplages coexistent, la linéarité de la réponse peut être grandement affectée et par conséquent conduire à une égalisation sévère. Donc, le couplage mutuel ne garantit pas une réponse linéaire ni même un gain de 6dB.

Quelle est l'écartement maximal à ne pas dépasser?

Contrairement aux idées reçues, il n'y a pas de distance définie qui permette le couplage mutuel. Le couplage est défini par le niveau minima en dessous duquel le phénomène n'est plus acceptable ou n'existe plus. C'est un niveau arbitraire qui ne peut en aucun cas être inférieur au niveau d'une seule source. La distance qui sépare les sources et la longueur d'onde (fréquence) du signal déterminent l'angle dans lequel les fronts d'ondes combinés répondent à la définition choisie du couplage effectif.

Il faut d'abord définir ce que l'on considère comme un couplage mutuel (c'est à dire, à quel niveau hors axe va-t-on considérer les sources comme n'étant plus couplées mutuellement) et ensuite quel est le critère pour une situation particulière. Autrement dit, à quelle fréquence exige-t-on le couplage et pour quel angle global ?

En audio, les écarts de 3dB et 6dB sont souvent utilisés comme critères représentatifs des augmentations ou des réductions acceptables du niveau.

On peut se demander si une atténuation du signal de -6dB, soit le niveau équivalent à une seule enceinte, pour un angle d'écoute à 45 degrés de l'axe par exemple, signifie que le faisceau du couplage mutuel est limité à 45 degrés ou bien faut-il chercher l'angle qui montre une atténuation de -6dB? Doit-on chercher un niveau proche de +6 dB, ou le retour au gain unitaire? Peut-être encore que la limite se trouve à l'angle qui correspond à une atténuation de -3dB ? C'est en fournissant la réponse à ces questions qu'on pourra déterminer la distance acceptable entre les haut-parleurs.

Le couplage observé sur la ligne médiane qui les sépare deux sources produisant un même signal se traduira par une augmentation de 6dB du niveau global comparé à une seule source. Sur cette ligne, le couplage mutuel aura lieu même si la distance entre les enceintes est énorme. L'espacement entre les sources n'a absolument aucun effet sur ce résultat tant que l'auditeur est sur la ligne médiane.

Figure 6 - Courbe de réponse d'une paire d'enceintes couplées (cas général).

- La ligne droite à 0 dB représente la réponse d'une enceinte seule.

- Dans la zone A, la distance qui sépare les enceintes est inférieure au quart de la longueur d'onde.

Les conditions du couplage sont remplies et l'intensité augmente de 6 décibels.

- Les longueurs d'ondes contenues dans la zone B sont trop courtes pour réaliser le couplage. Le gain est compris entre 3 et 6dB.

- La zone C est régie par la succession d'interférences qui donnent naissance à un couplage positif ou négatif selon qu'elles sont constructives et destructives.

- Aux fréquences supérieures l'effet du couplage est négligeable. La moyenne des intensités relevées sous tous les angles sauf dans l'axe, se stabilise à une valeur moyenne supérieure de 3 décibels à celle d'une enceinte unique (zone D).

Cependant, le gain lié au couplage n'est pas systématiquement perceptible par tous les auditeurs présents. Les deux sources étant physiquement séparées, le couplage diminue dès que l'auditeur s'écarte de l'axe et que l'écart de distance qui le sépare de chaque enceinte augmente. Ceci s'explique parce que l'angle de phase entre les deux ondes grandit de plus en plus. Pour un espacement des sources fixe, plus la fréquence est élevée, plus tôt l'apparition du couplage est précoce. De même, pour une longueur d'onde donnée, plus la distance qui sépare les sources est grande, plus le phénomène se produit tôt. Ainsi, l'amplitude du couplage mutuel en un point donné dépend à la fois de l'espacement des sources et de la longueur d'onde.

Une baisse du couplage de 6dB correspond à un écart de distance entre les sources et l'auditeur égal au tiers de la longueur d'onde. Cela équivaut à une différence de phase de 120 degrés entre les deux ondes (à ne pas confondre avec un angle de l'auditeur à l'axe médian). Cette valeur correspond également à l'intensité d'une seule enceinte et indique que le couplage est nul.

En résumé, la distance maximale à partir de laquelle le couplage mutuel apparaît dépend de ce que vous voulez définir comme limite de couplage. Il s'agit d'une transition graduelle, donc le choix entre une distance de séparation inférieure au quart ou la demi-longueur d'onde est une question de préférence personnelle.

Figure 7 – La ligne bleue représente la réponse d'une enceinte parfaite dans une chambre sourde indépendamment de la position de l'auditeur.

La ligne rouge montre la réponse d'une paire d'enceintes observée à la même distance sur la ligne médiane qui sépare les enceintes.

La courbe verte indique la moyenne des pressions observées pour une paire d'enceintes sous tous les autres angles. Hors couplage le gain est de 3dB. Les 3 décibels supplémentaires aux basses fréquences s'expliquent par le couplage mutuel des enceintes.

Pour ceux qui cherchent une formule à tout prix, on admet de source empirique que le couplage mutuel intervient à des fréquences dont la longueur d'onde est supérieure au quart de la distance qui sépare les centres des haut-parleurs. Pour deux haut-parleurs, la fréquence limite du couplage mutuel s'obtient avec l'équation suivante: $f_c = 7600/d$ où d en cm est la distance entre les haut-parleurs.

Cette fréquence diminue d'un facteur 0,7 à chaque fois qu'on double le nombre de haut-parleurs.

J. Eargle, C. Foreman "Audio Engineering for Sound Reinforcement" (JBL) page 261

Signaux transitoires

Le principe du couplage mutuel est acceptable pour expliquer l'élévation de la puissance en régime établi, à partir d'un signal périodique continu. Mais la bande son d'un film contient des signaux variés, parmi lesquels de nombreux passages brusques d'un état à un autre, appelés signaux transitoires.

En présence de signaux transitoires, le comportement d'un système couplé s'écarte sensiblement des observations précédentes. Pendant l'excitation transitoire, les deux haut-parleurs bougent simultanément et au moment où la pression du haut-parleur B atteint le haut-parleur A (et vice-versa), ce dernier a déjà cessé de bouger. Avec une source de vitesse, la pression transitoire tardive de B n'a plus aucun effet sur le son rayonné par A car la transitoire a déjà quitté le haut-parleur.

Toutefois, les états statiques et transitoires d'un système linéaire sont liés par la transformée de Fourier et tout changement de la réponse statique sera reflété dans la réponse transitoire. Quelles conséquences cette relation peut avoir sur le couplage mutuel face aux signaux transitoires ?

Quand l'auditeur se trouve dans l'axe qui sépare les enceintes, les signaux transitoires arrivent des deux haut-parleurs en même temps et se superposent pour produire un signal deux fois plus grand (+6dB) à toutes les fréquences. Pour les autres positions de l'auditeur, les signaux transitoires sont décalés et ne s'additionnent pas.

La transformée de Fourier pour le signal transitoire montre une courbe hachée comme celle de la figure 3. La réponse issue de l'intégration des intensités de deux signaux transitoires sous tous les angles est semblable à celle de l'état statique mais elle est limitée aux fréquences présentes dans les transitions du signal. Plus la transition est étroite, plus la réponse est étendue, plus l'angle de superposition dans l'espace est resserré et le gain aux basses fréquences est moins important.

Le dilemme du la balance panoramique

Sur une console de mixage, la balance panoramique est le nom qu'on donne au contrôle qui permet de diriger un signal monophonique vers le canal gauche, droit ou vers une position intermédiaire. La balance d'un ampli de salon désigne le bouton qui dose l'équilibre des deux canaux jusqu'à atténuer complètement l'un ou l'autre. L'effet est similaire. La différence majeure réside dans la nature du signal, monophonique dans un cas, stéréophonique dans l'autre.

Prenons l'exemple d'une paire d'enceintes produisant un bruit en bande large, un bruit rose par exemple, dans une chambre anéchoïde. On se souvient que la pression produite par un signal unique distribué à parts égales sur deux enceintes sera double (+6dB) pour un auditeur situé sur la ligne médiane qui sépare les enceintes.

On dispose d'un bouton de balance qui va diriger le son vers la gauche, le centre virtuel ou la droite. Pour qu'un auditeur situé sur la ligne de séparation des enceintes, n'observe pas de changement du niveau ou du timbre au cours du balayage panoramique il faut que le circuit de la balance dans sa position centrale atténue le signal de -6dB pour chaque enceinte.

Si l'auditeur s'éloigne de la ligne médiane, le son balayé progressivement de gauche à droite sera perçu comme étant neutre puis coloré puis neutre à nouveau à cause de la directivité limitée de la paire stéréophonique qui produit un filtrage en peigne, dès que l'on quitte la ligne médiane. La couleur du son varie en fonction de la position du point d'écoute. En dehors de l'axe, le niveau sonore diminue de 3 décibels et l'illusion de l'image virtuelle au centre disparaît.

Le seul véritable problème vécu par un auditeur au point d'écoute dans une chambre anéchoïde est qu'aucune des deux oreilles n'est véritablement sur la ligne médiane. La diffraction autour de la tête n'est pas la même pour une seule source frontale que pour une image fantôme. Dans les conditions normales d'écoute, le filtrage en peigne engendré par la distance qui sépare chaque oreille de la ligne médiane montre une première annulation vers 2kHz.

Dans une chambre réverbérante, le même signal dirigé uniquement à gauche ou à droite sera perçu comme étant neutre (comme dans la chambre anéchoïde). Notons que toute variation du contenu audio serait masquée par la réverbération. Mais lorsque le signal est dirigé vers la position centrale, la réponse en fréquence est similaire à celle de la figure 3, avec une hausse de 3dB dans les basses fréquences.

Si le même contrôle de la balance offre une compensation de -6dB au centre, le niveau acoustique des fréquences basses ne sera pas affecté durant le balayage gauche-droite. Par contre, les autres fréquences seront atténuées de -3dB dans la position centrale. On pourrait imaginer un contrôle de balance doté d'une compensation spéciale pour les pièces réverbérantes, atténuant les basses fréquences de -6dB et les autres fréquences de -3dB en position centrale, maintenant ainsi le spectre plat à toutes les positions de l'image panoramique. Mais l'écoute stéréo dans une chambre réverbérante présente un attrait limité.

De toute évidence, le contrôle de balance idéal dépend de l'acoustique de la pièce dans laquelle le son sera reproduit. L'environnement des pièces d'habitation se situant quelque part entre anéchoïque et réverbérant, un compromis est nécessaire.

Traditionnellement la balance des consoles de mixage a un recouplement gauche-droite à -3dB. Mais depuis l'arrivée des consoles numériques à commandes virtuelles, certains fabricants proposent plusieurs lois pour répondre à différentes applications ou configurations (voir fig. 8 ci-contre).

D'autres optent pour un compromis à -4,5dB. Ainsi l'erreur est limitée à 1,5dB dans le pire des cas.

Indépendamment de la compensation choisie, l'image d'une source fantôme au centre d'une paire stéréo sera toujours perçue avec un timbre différent de celui d'une véritable enceinte centrale. Ce fait a des répercussions importantes dans la compatibilité mono/stéréo. Un dicton circule chez les ingénieurs du son expérimentés: "pan d'abord, puis égalise". J'observe une certaine sagesse dans cette déclaration qui s'applique partout, y compris dans les environnements acoustiques supposés parfaits.

Enceintes réelles

Jusqu'ici nous n'avons considéré que des enceintes théoriquement parfaites. La plupart des enceintes sont omnidirectionnelles aux basses fréquences mais elles ne le sont plus pour le reste du spectre. Aux basses fréquences, le couplage mutuel peut être appliqué à des enceintes réelles avec une certaine confiance car le comportement des enceintes à source de pression montre que l'impédance mécanique des haut-parleurs réels influe peu sur les résultats. Cependant, la directivité des enceintes aux fréquences moyennes et hautes modifie sensiblement la directivité de l'ensemble. Cette directivité change l'interaction avec l'acoustique de la salle, notamment en présence de surfaces absorbantes et réfléchissantes.

En règle générale, qu'il s'agisse d'une reproduction monophonique simple ou stéréophonique à partir d'une paire d'enceintes, les haut-parleurs à directivité étroite interagissent moins avec

l'acoustique des salles que les haut-parleurs à directivité large. Dans des conditions d'écoute anéchoïdes, il n'y a pas de réflexion. Le seul son perçu par un auditeur est celui qui vient directement du haut-parleur. Le rendement mis à part, il n'y a aucune raison d'entendre une différence entre un haut-parleur omnidirectionnel parfait qui irradie une réponse en fréquence uniforme et une enceinte unidirectionnelle dirigée vers l'auditeur.

Les enceintes dipôles, telles les modèles électrostatiques, se comportent d'une manière différente. Le son n'étant pas ou très peu dirigé vers l'enceinte voisine les rend insensibles aux effets de couplage mutuel (à condition qu'elles ne soient pas orientées l'une vers l'autre). Le couplage avec la salle existe encore, bien qu'il soit moins marqué qu'avec les enceintes unipolaires.

Compatibilité Stéréo/Mono et son Surround

Théoriquement, le niveau de recouplement des tensions qui offre la meilleure compatibilité mono est à -6dB. En réalité, le taux réel d'atténuation est lié à la durée de la réverbération aux basses fréquences dans la pièce. D'une manière générale, tout mixage stéréophonique équilibré pour le couplage mutuel dans des conditions d'écoute stéréo sera déséquilibré après la réduction des signaux en mono. Cette situation est aggravée lorsqu'il s'agit d'un système multicanal en son surround.

La figure 7 montre la puissance combinée de quatre haut-parleurs dans un rectangle de 3m x 4m. On voit immédiatement que le couplage mutuel associé à une paire d'enceintes se complique avec quatre enceintes. Comparativement à un seul haut-parleur, le gain aux basses fréquences atteint 12 dB, la puissance est multipliée par 16. Sachant que ce gain dépend de l'acoustique et du type de haut-parleur utilisé, quelle forme doit prendre le mixage surround, et comment se comporteront les niveaux après une réduction en mono?

D'autre part, dans presque toutes les conditions d'écoute stéréo, le couplage mutuel donne lieu à un changement de timbre au centre quand le son est balayé de gauche à droite. Sachant que pour la plupart, les pièces d'habitation sont semi-réverbérantes, on peut imaginer un contrôle de balance compensé aux basses fréquences pour corriger ce problème, mais qui hélas ne corrigera pas les colorations induites par la directivité.

Si un tel dispositif existait, il ne serait pas utilisable pour d'autres applications telles les chaînes stéréo portables, les casques, l'automobile. Enfin, ce qui est probablement le plus important : quel serait le résultat dans le cadre d'une écoute mono ?

Une réponse au problème de la compatibilité multicanal et du couplage mutuel en général, réside dans l'emploi d'un caisson de graves unique. Le subwoofer peut reproduire les basses fréquences inférieures à la demi-longueur d'onde, éliminant ainsi le problème du gain inhérent au couplage quand le son est au centre. Malgré tout, cela ne va pas sans poser d'autres problèmes. Par exemple, la distance de propagation des haut-parleurs medium et celle du subwoofer sont différentes pour chaque spectateur, ce qui complique le raccordement en phase et le calcul des filtres. Mais le principal inconvénient du caisson mono, est qu'il ne peut pas reproduire le décalage de phase d'un signal stéréo à basse fréquence. Ce type de signal, même s'il est très rarement reproduit de manière fidèle, pourrait contribuer au réalisme de la scène sonore dans le cas d'enregistrements de concerts en public ou d'effets spéciaux dans les films.

7) le caisson "sub" .. mono ... le point sur la sensibilité à un effet de "stéréo " sur une section sub me paraît trop discutable.

Là je n'ai rien retouché. Mon texte reprend directement la phrase de Keith Holland (voir références : 5).

Pour info, il existe une recommandation (je ne sais plus laquelle, DTS ou SDDS peut-être) qui dit que le canal LFE n'est pas limité et qu'il peut monter jusqu'à 1000Hz et même au-delà (même si ça n'est jamais utilisé).

The main disadvantage with the mono subwoofer though, is that it cannot reproduce any out-of-phase low frequency stereo information. Such information, even if not reproduced faithfully (a very rare situation), can contribute to the feeling of ambience in live recordings or enhance special effects in film soundtracks.

Remarque : Il nous arrive de poser le caisson ou l'enceinte sur un tabouret pour mieux l'entendre ou pour atténuer la vibration du plancher qui résonne. Allons nous perdre le couplage et les 6 décibels que nous venons de gagner ? Non, pas à cette hauteur. Par contre la fréquence de couplage régresse, c'est-à-dire qu'au lieu d'avoir le gain dès 250Hz par exemple, il n'apparaîtra qu'en dessous de 100Hz.

La régie du studio

Le couplage mutuel et les problèmes de directivité associés à l'écoute stéréo sur deux enceintes dépendent dans une large mesure du traitement acoustique de la pièce d'écoute. L'acoustique des pièces d'habitation est rarement traitée pour l'écoute musicale ou cinéma. D'autre part, beaucoup de gens écoutent via un casque ou dans leur auto, où les problèmes liés à la reproduction stéréo sont très différents.

C'est dans le studio d'enregistrement que le contrôle de la qualité de l'enregistrement est effectué et c'est dans la régie du studio, où les problèmes associés à l'écoute stéréo sont importants, que la correction acoustique est possible. L'environnement anéchoïque semble offrir la meilleure situation, à condition que l'écoute s'opère dans un périmètre optimal.

Cinéma

La plupart des problèmes abordés dans ce chapitre sont considérablement réduits par l'adoption d'un troisième canal central. L'information la plus importante, celle qui supporte l'action au centre de l'image est alors reproduite avec la même qualité que les canaux de gauche ou de droite.

Le couplage des enceintes n'est pas souhaitable dans une salle de cinéma, qu'elle soit grande ou petite. Les trois canaux de la façade doivent rester distincts et le niveau sonore de chaque paire d'enceintes (gauche-centre et centre-droite) doit rester constant quelle que soit la position de l'image sonore, réelle ou virtuelle.

D'autre part, les enceintes proposées pour les systèmes grand public ont une bande passante limitée vers le grave. Les signaux dont la fréquence est inférieure à 80Hz sont redirigés vers un caisson spécial. Pour éviter le couplage accidentel des enceintes de façade, il est prudent de veiller à ce que la distance séparant chaque paire d'enceinte soit supérieure à un mètre.

Un atout supplémentaire du canal central est un élargissement effectif de la zone d'écoute, au moins pour les images sonores situées au centre.

Idéalement, la stéréophonie à trois canaux devrait être proposée au marché de la hifi, même si les systèmes multicanaux pour le cinéma peuvent supporter certaines formes de réduction.

Conclusion

Après la lecture de ce chapitre, on peut admettre que, dans presque toutes les conditions d'écoute, le timbre d'un signal au centre d'une paire d'enceintes sera différent de celui d'une enceinte centrale (ou d'une des deux enceintes latérales). Les conclusions qu'on peut en tirer ont une influence directe sur la conception de la pièce d'écoute et sur la compatibilité entre le son multicanal, surround, stéréo et mono.

Annexe : L'enceinte centrale et la configuration MTM

Depuis l'avènement du son multicanal, également appelé Surround Sound, une troisième enceinte est venue compléter la paire stéréo traditionnelle. La position de cette nouvelle enceinte au milieu de la scène sonore lui confère le nom d'enceinte centrale. En constitue une source physique réelle avec un positionnement spatial stable, qui remplace avantageusement l'image fantôme sans le problème d'instabilité.

Le rôle de cette enceinte est crucial car 75% du programme sonore des films est acheminé vers le canal du centre. Ses performances en termes de puissance, de résistance au vieillissement et de directivité revêtent une importance plus grande que pour les autres enceintes. Toutefois, la cohérence de l'image sonore entre les canaux de façade impose des caractéristiques identiques pour les trois enceintes. L'intensité et le timbre d'un son dirigé successivement sur chacune des trois enceintes ne supportent aucune modification audible. Le test mené avec un bruit en bande large (un bruit rose, par exemple), est révélateur.

D'autre part, les critères de conception pour l'enceinte centrale exigent de pouvoir la loger aussi discrètement que possible au plus près de l'image. Idéalement, le son doit venir de derrière l'image, à travers l'écran comme dans toutes les salles de cinéma. Avec un écran transonore, perforé, micro-perforé ou tissé, cela ne pose pas de problème. Les autres configurations ne le permettant pas, des solutions de compromis ont fleuri avec plus ou moins de bonheur.

Les toiles pleines et les téléviseurs n'offrent pas la transparence acoustique nécessaire pour loger une enceinte derrière l'écran. Il demeure que l'enceinte centrale a besoin de reproduire l'essentiel des dialogues, tout en préservant la dynamique et la pureté, jusqu'à ce que le caisson de graves prenne le relais. On a alors recours à une configuration horizontale qui permet de placer l'enceinte sous l'écran. Mais la hauteur de l'enceinte étant limitée, il est difficile d'y loger des haut-parleurs de grand diamètre. Or, reproduire un son à 80Hz sans distorsion ni perte notable de puissance avec un petit haut-parleur est un problème difficile pour ne pas dire quasi insoluble.

L'approche commune est de doubler les haut-parleurs du registre médium/grave pour répartir la charge de travail et profiter du gain apporté par le couplage mutuel qui se manifeste dès que la distance qui les sépare est inférieure à la demi-longueur d'onde. Le placement au plus près de l'écran dicte naturellement la disposition des haut-parleurs dans le sens horizontal.

L'acousticien Joseph d'Appolito a conçu un modèle d'enceinte original avec un tweeter entre deux haut-parleurs couplés. Sans entrer dans les détails du fonctionnement, on peut estimer que cette enceinte présente des caractéristiques de directivité intéressantes pour un petit home cinéma.

La configuration d'Appolito (ou MTM pour médium-tweeter-médium) est très répandue et sa diffusion commerciale est telle qu'un grand nombre de home-cinéphiles est persuadé que l'enceinte centrale doit être horizontale. Malheureusement, l'enceinte MTM posée dans le sens horizontal ne va pas sans poser quelques problèmes comme nous allons le voir.

Plus une enceinte possède de haut-parleurs couplés dans le même alignement, plus elle se comporte comme une ligne source plutôt qu'un point source (source ponctuelle). Sans vouloir nous éloigner du sujet qui nous concerne, une parenthèse s'impose préciser ce qu'est une ligne source. Physiquement, une ligne source est constituée par un ruban longiligne ou par une série de haut-parleurs alignés sur un axe et couplés entre eux. Pour que le couplage

existe, les haut-parleurs doivent être suffisamment rapprochés. D'autre part, la longueur totale de la ligne doit atteindre au moins deux fois la plus grande longueur d'onde.

Quand ces deux conditions sont réunies, les haut-parleurs ne se comportent plus comme une source ponctuelle. L'atténuation de 6dB à chaque doublement de la distance (loi du carré inverse) ne s'applique plus. Le niveau de pression acoustique perdure plus loin.

La directivité de la source quitte sa forme sphérique pour prendre celle d'un cylindre, orientable vers les spectateurs. Avec une ligne verticale, la directivité horizontale est plus large tandis que la directivité verticale est limitée.

En contrepartie, les dimensions de la ligne source sont fixées par la fréquence de couplage et la fréquence la plus basse à contrôler. Dans les pièces étroites la réflexion sur les murs latéraux demeure et devra être corrigée. D'Appolito ne prétend pas que son modèle s'apparente à une ligne source (loin s'en faut), mais l'idée est là. Fin de la parenthèse.

Contraintes imposées par l'orientation horizontale

En reprenant le principe de la stéréophonie, un spectateur assis dans l'axe médian qui coupe une enceinte MTM horizontale en deux entend un niveau sonore double de celui que produirait un seul des deux haut-parleurs. Naturellement, s'il s'écarte de cette ligne il retrouve des problèmes analogues à ceux d'une paire stéréo.

Figure10 - Représentation des interférences au croisement des ondes émises par les haut-parleurs.

Bien sûr, les constructeurs connaissent ce problème et ils en tiennent compte dans la conception de leurs enceintes. La solution consiste à maintenir la fréquence de transition entre les haut-parleurs médium et le tweeter, plus basse que celle de la première interférence. Ainsi, aucune interférence n'apparaîtra dans le registre médium/grave de l'enceinte.

C'est plus facile à dire qu'à faire. Les tweeters de ces enceintes sont trop petits pour supporter une fréquence de coupure suffisamment basse. **La fréquence de coupure se situe souvent entre 1200Hz et 2500Hz. Les pentes du filtre et le déphasage qu'il engendre, seront particulièrement surveillés dans ce type de montage.**

6) mais aussi au type de filtrage utilisé qui génère un déphasage qui associé bien souvent à celui que génère par le composant lui même à sa coupure vient mettre "par terre" tout le beau calculle filtrage devra de plus être très spécifiquement étudié pour ce type montage.. J'ai ajouté une ligne sur le filtre, mais je ne souhaite pas aller plus loin car le but n'est pas de dire comment on construit cette enceinte.

Voici un exemple simple qui illustre notre propos. Supposons une enceinte MTM horizontale avec une coupure à 1500Hz. Les deux haut-parleurs médium, espacés de 34cm, diffusent un signal à 1000Hz. Un auditeur assis face à l'enceinte perçoit le niveau de pression que nous venons de décrire.

Par contre, à 30 degrés de l'axe, le décalage sera 17cm soit une demi-longueur d'onde correspondant à un retard de 0,5ms. Les signaux des haut-parleurs arrivent avec une phase opposée qui annule le signal au point d'écoute (voir fig. 11 ci-contre).

Le phénomène se répète pour d'autres fréquences à des angles différents. A 2kHz par exemple, l'annulation se produira à 15° et à 49°.

L'interférence s'accompagne souvent d'une perte de repère spatial. Cet inconvénient devient un avantage pour les enceintes surround dont le rôle est de produire un champ diffus. En multipliant le nombre d'enceintes on perd la trace de l'origine du son.

Les annulations se produisent aux harmoniques vocales et nuisent à l'intelligibilité de la parole. La chute d'intensité à certaines fréquences donne la sensation d'un son creux avec une perte apparente du niveau global. Certains installateurs n'hésitent pas à compenser cette perte en relevant le niveau de 1 à 3dB.

Enfin, on peut penser que l'enceinte MTM posée dans le sens vertical souffrira du même problème. C'est vrai mais les conséquences sont moins dommageables. Les spectateurs sont généralement assis sur un même plan horizontal et l'écart angulaire entre les rangées de spectateurs est insignifiant. La présence de quelques gradins compense le parallaxe et atténue encore le décalage vertical. La dispersion horizontale est élargie.

Conclusion

Faut-il rejeter l'enceinte centrale horizontale ? Si la disposition MTM ne remplace pas les véritables enceintes cinéma à haut rendement, elle représente une alternative acceptable pour les petits systèmes à condition qu'elles soient toutes posées dans le sens vertical.

Réservez cette enceinte aux écrans sans transparence acoustique et assurez-vous que la fréquence de coupure du tweeter est inférieure à la première interférence pour l'angle d'écoute maximal dans votre pièce.

References

[1] C. P. et R. E. Boner, "The Gain of a Sound System," *J. Audio Engineering Society*, volume 17, number 2 (1969).

[2] "Loudspeaker Arrays — Design and Performance," *J. Audio Engineering Society*, volume 38, number 4 (1990).

[3] R F Allison, "The Influence of Room Boundaries on Loudspeaker Power Output", 48e Convention de l'AES, Mai 1974 dans "Loudspeakers, an Anthology, Vol. I-Vo1.25", éditeur R E Cooke, The Audio Engineering Society, 1980, p353-59.

[4] T Ward and J A S Angus, "The Effect of a 6 Walled Room on Loudspeaker Output", *Proceedings of the Institute of Acoustics*, Vol. 18, part 8, *Reproduced Sound* 12, 1996, p253-61.

[5] P R Newell et K R Holland, "A Proposal for a More Perceptually Uniform Control Room for Stereophonic Music Recording Studios", 103e Convention de l'AES, Septembre 1997.

[6] O Kirkleby, P A Nelson et H Hamada, "The "Stereo Dipole" - Binaural Sound Reproduction using Two Closely Spaced Loudspeakers", 102e Convention de l'AES, Mars 1997, AES Preprint No. 4463

[7] Lee Henney's *Radio Engineering Handbook*, 5e édition., Ch. 11 'Loudspeakers and Room Acoustics.

[8] Klapman S. J., "Interaction Impedance of a System of Circular Pistons," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 11, p. 289, 1940.

[9] John Borwick "Loudspeaker and Headphones Handbook"

[10] P R Newell et K R Holland, "Loudspeakers for music recording and reproduction" Focal Press, 2007
