



ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE LOUIS LUMIÈRE

Mémoire de fin d'études

Les dispositifs de reproduction des fréquences les plus basses en sonorisation

Directeur du mémoire : Didier DAL FITTO

Directeur associé : Étienne BULTINGAIRE

Intervenant extérieur : Cédric MANGIN

Organisme extérieur : DV2 et LAGOONA S.A.S.

SAILLANT Pierrick

Section SON - promotion 2010

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes directeurs pour avoir découvert avec moi le travail autour d'un mémoire. Didier DAL FITTO pour ses conseils, son temps et les moyens mis à disposition. Étienne BULTINGAIRE pour ses idées, son engagement et ses madeleines.

Merci à Cédric MANGIN, pour m'avoir accueilli avec ses cents boîtes, pour répondre à mes centaines de questions, et pour avoir contribué à l'élaboration de ce sujet.

Je remercie aussi Pascal GUILLAUME et Cédric MONTREZOR pour leur point de vue théorique et pratique.

Merci à l'ensemble du personnel de LAGOONA ainsi que toutes les personnes que j'ai eu l'occasion de rencontrer dans cette structure. Je tiens à remercier tout particulièrement Nicolas DANTAN pour sa disponibilité et les moyens mis en oeuvre pour la réalisation de la partie pratique de ce mémoire ainsi que Julien DESBROSSES.

Pour finir, je remercie Denis VAUTRIN pour sa pédagogie et sa contribution. Ainsi qu'Antoine VILLERET et les membres de ma famille pour leurs relectures, leurs conseils et leurs soutiens.

RÉSUMÉ

Dans le domaine de la sonorisation, les basses fréquences posent de nombreux problèmes, c'est grave. En effet, aujourd'hui, les événements de musiques amplifiées nécessitent des systèmes de diffusions puissants permettant une reproduction de qualité pour l'ensemble du public. Dans la conception d'un système de diffusion travaillant dans les basses fréquences, il est nécessaire de faire des choix en fonction des objectifs du système et des moyens mis à disposition.

Nous commencerons par définir le domaine d'étude : l'étendue spectrale et le type d'évènements. Ceci nous permettra ainsi de cibler le contexte. Cette analyse des mécanismes mis en jeu dans la perception des basses fréquences ainsi que l'observation du rôle des graves dans la production discographique nous permettra ensuite de définir les objectifs auxquels doit répondre un système travaillant dans les basses fréquences.

Nous observerons ensuite les nombreuses solutions permettant, en associant plusieurs enceintes identiques, de contrôler la directivité d'un système. Ces solutions sont basées sur des modèles théoriques et dans certains cas peuvent être appliquées directement par l'utilisateur. La validation des modèles théoriques se fera par la mesure.

Ainsi, nous pourrions proposer plusieurs solutions pour l'implantation des enceintes travaillant dans les basses fréquences. L'ensemble des solutions (implantation et contrôle de la directivité) se fait en adéquation avec la situation. Chaque situation est un cas particulier, c'est pourquoi il est important de connaître les configurations possibles et leurs caractéristiques.

Nous finirons par l'analyse d'un cas pratique : LE FESTIVAL DES ARTEFACTS édition 2010 au Zénith de Strasbourg. Cet exemple permettra d'observer sur un cas réel certaines théories énoncées précédemment. Nous étudierons ici la conception, la réalisation et les performances du système de diffusion travaillant dans les basses fréquences.

La conception d'un système de diffusion est un exercice compliqué. Il est nécessaire de connaître l'implication de chaque choix. Cette étude permet de faire un état des lieux des résultats des différentes techniques actuelles. L'ensemble des analyses présentées sont basé sur des réponses fréquentielles (en régime stationnaire). Néanmoins, on peut s'interroger sur l'influence des réponses temporelles pour la caractérisation d'un système de diffusion travaillant dans les basses fréquences. De même, ce travail ne permet pas d'observer l'influence du lieu qui est un paramètre important.

ABSTRACT

In the world of sonorisation, low frequencies can present several serious problems. In fact, nowadays, musical events require powerful PA systems to allow a high quality reproduction for the audience. In designing a PA system working on low frequencies, it is necessary to make choices depending on the system's goals and the means available.

We will begin by the definition of the area of study : the spectral scale and the type of events. We will subsequently be able to define the context. Thanks to this analysis of the mechanisms of low frequencies perception, as well as the observation of the role of low notes in music recording, we will be able to define the goals of a system working on low frequencies.

We will then observe the many possible solutions to control the system's directivity through the comparison of several identical speakers. These solutions are based on theoretical models, and in some cases they can be applied directly by the user. The validation of these theoretical models will be made by taking measures.

Therefore, we will be able to suggest several solutions for the installation of low frequencies speakers. All these solutions (installation and control of the directivity) are made according to the situation. Each situation is a specific case, for this reason, it is really important to know all the possible configurations and their characteristics.

We will finish with the analysis of a practical case : the "artefacts" festival 2010 at the Zenith of Strasbourg. This example will enable us to observe on a real case some of the theory viewed before. We will here study the conception, realisation and performances of the low frequencies pa system.

The design of a pa system is a difficult exercise. It's necessary to know the results of each choice. This study will reveal the present situation of the results of the several different techniques. The body of these analysis is based on frequency responses (on a stationary basis). However, this study will not allow us to observe the influence of the location, which is an important parameter. We can also question the influence of time responses for the devising of a low frequencies PA system.

Table des matières

Table des matières	5
Nomenclature	9
Introduction	10
I L'utilité des très basses fréquences	12
1 Cadre de l'étude	12
1.1 Domaine fréquentiel	12
1.2 Types d'évènements pour l'application de cette étude	14
1.3 Dispositif de mesure	17
2 La perception des fréquences les plus basses	18
2.1 L'audition et la sensation	18
2.2 La localisation des très basses fréquences	21
2.3 Effet de masque	22
2.4 Perception du niveau	23
2.5 Équilibre tonal	24
3 Évolution du rôle des basses fréquences dans la production discographique	26
3.1 Méthode d'analyse	26
3.2 Comparatif	26

II	Le contrôle de la directivité grâce à l'association et le traitement entre des enceintes identiques	29
4	Les enceintes travaillant dans les basses fréquences	29
4.1	Les haut-parleurs	29
4.2	Les enceintes	30
4.3	Caractéristiques des enceintes de grave	32
4.4	Modélisation	33
4.5	Mesure	35
5	Alignement ou empilement des enceintes	37
5.1	Le rôle de l'enceinte close et de sa taille : la diffraction	37
5.2	Le gain en pression	37
5.3	L'alignement et l'empilement : directivité et effet ligne source	38
6	Le décalage spatial et le retard temporel	41
6.1	Les interférences	41
6.2	Le retard électrique	47
6.3	Association d'un décalage spatial et temporel : directivité cardioïde	47
7	Différentes utilisations de la directivité cardioïde	51
7.1	End-fire : la directivité cardioïde par l'alignement de plusieurs enceintes	51
7.2	Front-back : la directivité cardioïde par l'empilement d'enceintes	53
8	D'autres possibilités pour le contrôle de la directivité	56
8.1	Les enceintes cardioïdes	56
8.2	L'association de deux monopôles : la directivité cardioïde sur l'ensemble du spectre	57
8.3	L'arc-sub	60

III	Le positionnement des enceintes et l'optimisation	66
9	Positionnement des enceintes	66
9.1	Enceintes accrochées	66
9.2	Enceinte(s) posée(s)	68
10	Interaction entre des systèmes d'enceintes	71
10.1	Couplage entre systèmes à la verticale	71
10.2	Couplage et interférence entre systèmes à l'horizontale	74
10.3	Mise en place de rappel	76
IV	Étude de cas : LE FESTIVAL DES ARTEFACTS au Zénith de Strasbourg	79
11	Cadre de l'étude de cas	79
11.1	La programmation	79
11.2	Le lieu	80
11.3	L'organisation du festival	81
11.4	Les difficultés	82
12	La salle	83
12.1	Description de la salle	83
12.2	Variation des paramètres avec la présence du public	84
13	Conception et réglage du système de diffusion basse fréquence	85
13.1	Descriptif du système de diffusion utilisé	85
13.2	Simulation	86
13.3	Les limites de la simulation	92
13.4	Réglage	94

14 Mesures et observations	96
14.1 Protocole de mesure	96
14.2 Couverture en profondeur	98
14.3 Couverture en largeur	100
14.4 Interaction entre les systèmes	102
Conclusion	105
V ANNEXES	107
A Glossaire	107
B Liste des morceaux analysés	109
C Résultats de l'analyse de chaque enregistrement	110
D Fiches techniques	112
Table des figures	118
Bibliographie	120

Nomenclature

c : vitesse du son en $m.s^{-1}$ ($c \approx 340 \text{ m.s}^{-1}$ dans l'air à 15 °C)

d : distance séparant deux enceintes en m

f : fréquence en Hz

k : nombre d'onde ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$)

r : distance du champ lointain en m

t : temps en s

λ : longueur d'onde en m ($\lambda = \frac{c}{f}$)

τ : temps en ms

φ : phase en degré

ϕ : phase en radian

INTRODUCTION

Les basses fréquences ont tendance à être problématiques, c'est grave ! Cette bande fréquentielle est située à la limite inférieure d'un phénomène physique et du seuil de perception de l'appareil auditif humain. Par cet aspect limite, l'homme est plus sensible à ces fréquences graves qu'aux fréquences plus aiguës. Les mécanismes de la perception des très basses fréquences sont plus proches de la perception tactile que de la perception auditive, elles provoquent une sensation physique.

Le spectacle vivant et le concert contrairement à la production discographique sont une expérience unique pour le spectateur. Dans ces domaines, les systèmes de diffusion sont conséquents et produisent d'importants niveaux en particulier dans les basses fréquences. Les critères et les objectifs auxquels doivent répondre les systèmes de diffusion présents dans ces deux domaines diffèrent. Et ces deux domaines n'ont pas les mêmes enjeux financiers et on n'observe pas la même évolution des technologies.

Dans le domaine de la sonorisation, pour des applications musicales, il est nécessaire d'obtenir une couverture la plus homogène possible pour le niveau sonore et la balance spectrale. C'est un compromis entre l'acoustique du lieu et le système de diffusion sonore conçu avec les moyens mis à disposition : l'espace, le temps, le matériel et le budget.

Les lieux et les configurations dans lesquels se déroulent ces événements sont très divers : en extérieur ou en intérieur, dans des salles aux caractéristiques acoustiques très variables, avec une surface à couvrir aux dimensions diverses. La réalisation d'un système de diffusion pour ces événements est un exercice périlleux. Il s'agit de réussir à concevoir un système en adéquation avec le lieu et le registre musical. Dans cette étude nous nous affranchirons de la salle et de son influence pour caractériser uniquement le système de diffusion.

Le développement de la théorie des systèmes de type ligne source a permis d'augmenter considérablement la portée d'un système de diffusion sonore large bande. Mais il est difficile de répondre à ces critères pour la diffusion des très basses fréquences. Aujourd'hui, les constructeurs se concentrent sur l'abaissement de la fréquence la plus grave reproductible pour un système large bande, mais il reste nécessaire d'ajouter un système dédié à la reproduction des très basses fréquences.

Aujourd'hui, des outils informatiques permettent de prédire le comportement du système de diffusion sonore. Ces prévisions s'appuient sur une modélisation des phénomènes sonores et permettent d'observer le comportement du système par rapport aux zones à couvrir, ainsi qu'à optimiser le système de diffusion.

Comment concevoir un système de diffusion pour les très basses fréquences, en adéquation avec un système large bande ? Quel est le but d'un système de diffusion basse fréquence et quelles sont les possibilités envisageables pour le concevoir ?

Dans un premier temps, nous étudierons l'utilité et la perception des basses fréquences. Cela nous permettra de définir les objectifs et les modalités pour la conception d'un système de diffusion basse fréquence. Nous nous intéresserons ensuite au contrôle de la directivité en couplant plusieurs enceintes de graves. Chaque cas sera modélisé et mesuré pour vérifier la validité. Puis, l'observation des interactions entre plusieurs systèmes, nous permettra d'évaluer les performances selon le positionnement des systèmes de diffusion. Enfin, nous ferons l'étude pratique du système mis en place pour LE FESTIVAL DES ARTEFACTS au Zénith de Strasbourg. La modélisation, la prédiction puis la mesure nous permettront de discuter des choix et de comparer la conception théorique de la validité pratique.

« Eastern philosophy and religions emphasize a sense of balance in the universe. In Buddhism, we have the Yin and Yang while Hindu deities both create and destroy. The light side balances the dark side. So it is with combinaison of speakers. »¹

1. « La philosophie orientale et les religions soulignent le sens de l'équilibre dans l'univers. Dans le Bouddhisme, nous avons le Yin et le Yang tandis que les dieux hindous créent et détruisent. Le côté lumineux équilibre le côté sombre. Il en est de même pour la combinaison d'enceintes. »

McCarthy, B., *Sound systems : Design and optimization*, Focal press, seconde édition, Oxford, 2010, p. 305.[1]

Première partie

L'utilité des très basses fréquences

1 Cadre de l'étude

1.1 Domaine fréquentiel

Ce travail de recherche est focalisé sur les très basses fréquences. Il s'agit de s'intéresser aux systèmes de diffusion (d'ondes sonores) de basses fréquences. Les systèmes larges bandes qui peuvent reproduire des fréquences basses ne feront pas partie de l'étude, car dans ce cas les caractéristiques et les performances sont indissociables dans les basses fréquences et dans les hautes fréquences.

1.1.1 La limite inférieure

La limite inférieure du domaine fréquentiel sur lequel se porte cette étude peut être définie de deux manières différentes. D'une part, la limite de la réponse en fréquence des enceintes. Et d'autre part, la limite de la perception humaine.

Les enceintes sont équipées de haut-parleurs d'environ 18 pouces (45,72 cm) de diamètre. La fréquence de résonance de ces haut-parleurs se situe entre 25 Hz et 30Hz. Dans les fiches techniques, les constructeurs donnent la limite basse de la réponse fréquentielle de leurs enceintes de renfort de grave autour de 25-30 Hz.

D'un aspect perceptif, la limite est plus vague. Si l'on observe les courbes d'isotonie (figure 2.1), la première version de **Fletcher** et **Munson** (1933) commence aux alentours de 30 Hz.

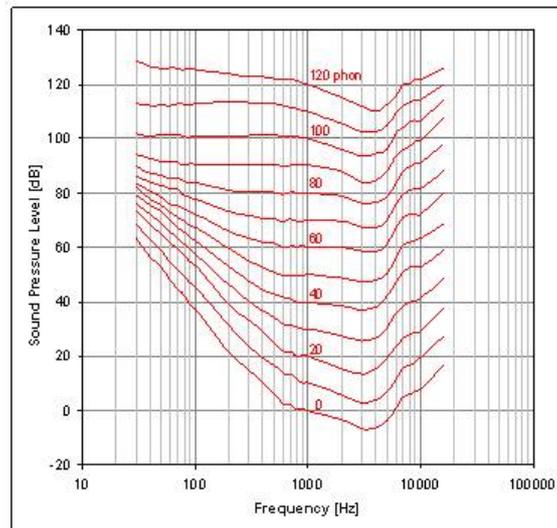


FIGURE 1.1 – Courbe d’isophonie (D’après, **H. Fletcher and W. A. Munson**, « Loudness of a Complex Tone, Its Definition, Measurement and Calculation », *The Journal of the Acoustical Society of America*, juillet 1933, Vol. 5, Issue 1, p. 65)

Depuis la révision (Robinson et Dadson, 1956), les courbes commencent à 20Hz. Des études [2] sur les résonnances du corps humain et les effets physiologiques portent sur des phénomènes avec des fréquences pouvant atteindre 2 Hz.

Avec ces différentes données, nous ferons le choix de commencer notre étude vers 25 Hz pour s’aligner sur les caractéristiques des enceintes existantes.

1.1.2 La limite supérieure

Compte tenu du choix de la limite inférieure, on procédera de même pour la limite supérieure. Certains systèmes de diffusion large bande ont une bande passante pouvant descendre jusqu’à 40 Hz. Dans ce cas, les enceintes de renfort de grave ne travaillent que jusqu’à cette fréquence ou ne sont pas forcément nécessaires. Mais nous prendrons plutôt en compte la bande passante des enceintes de renfort de grave. Ce paramètre dépend de la technologie utilisée par les constructeurs et des tolérances. La bande passante d’une enceinte varie en considérant ses limites dans un intervalle de 3 dB ou de 10 dB. Pour des haut-parleurs de renfort de grave, la bande passante à plus ou moins 3 dB s’étale généralement entre 25 Hz et 125 Hz. Ces données varient avec les enceintes et les mesures effectuées par les constructeurs, on gardera cette hypothèse qui sera vérifiée lors des différentes mesures.

1.1.3 Propriétés de la bande étudiée

La bande fréquentielle étudiée est située entre 25 Hz et 125 Hz ce qui fait un peu plus de 2 octaves. Le La 0 de la gamme tempérée étant à 55 Hz, notre bande fréquentielle correspond à l'intervalle La -1 (27,5 Hz) au Si 1 (123,4 Hz).

En comparaison, seuls quelques instruments produisent des sons aussi graves.

- L'orgue descend jusqu'à Do -1 (16,5 Hz).
- La guitare basse jusqu'à Mi 0 (41,2 Hz) ou Si 0 (30,9 Hz) pour la version à cinq cordes.
- Le piano jusqu'à La 0 (27,5 Hz).

Les longueurs d'onde correspondant à notre bande passante sont comprises entre 13,6 et 2,72 mètres. Le nombre d'onde est lui compris entre 0,46 et 2,3. On remarque que les longueurs d'onde correspondantes à la gamme étudiée sont importantes et que leurs variations sont élevées.

Fréquence (Hz)	Longueur d'onde (mètre)	Nombre d'onde	Note
25	13,6	0,46	La -1 (27,5 Hz)
50	6,8	0,92	Sol# 0 (57,31 Hz)
75	4,53	1,38	Ré 1 (73,42 Hz)
100	3,4	1,85	Sol 1 (97,99 Hz)
125	2,3	2,31	Si 1 (123,47 Hz)

1.2 Types d'évènements pour l'application de cette étude

On peut distinguer les événements à caractère musical et les autres (convention, performance...). Les enjeux ne sont pas les mêmes dans ces différents cas de figure. Cela va influencer le choix de la configuration.

Jacques Jouhaneau [3] rappelle que ce choix dépend du mode de restitution : direct ou différé. Dans la sonorisation en différé, il importe de couvrir toute la salle alors que dans la sonorisation en direct, il y a lieu de tenir compte de l'existence de plusieurs facteurs liés à la présence de plusieurs zones.

1.2.1 Le concert « rock »

Les concerts sont un cas de sonorisation en direct, et la configuration mise en place pour un tel événement dépend du registre musical. Les objectifs du système de sonorisation (puissance, respect du timbre, équilibre tonal...) varient selon le registre

musical. Le système de diffusion ne sera donc pas conçu et réglé de la même façon pour un concert de musique classique, de jazz ou de « variété ».

Notre étude se concentrera sur la musique dite « de variété ». Même si les jauges des salles varient (de 50 à plus de 100 000 personnes), les objectifs des systèmes de diffusion sont globalement invariants lors de concerts de musique de variété ou de concerts « rock ».

On peut distinguer quatre zones lors d'une sonorisation en direct pour un concert [3]. La zone des exécutants, la zone proche, la zone intermédiaire et la zone éloignée.

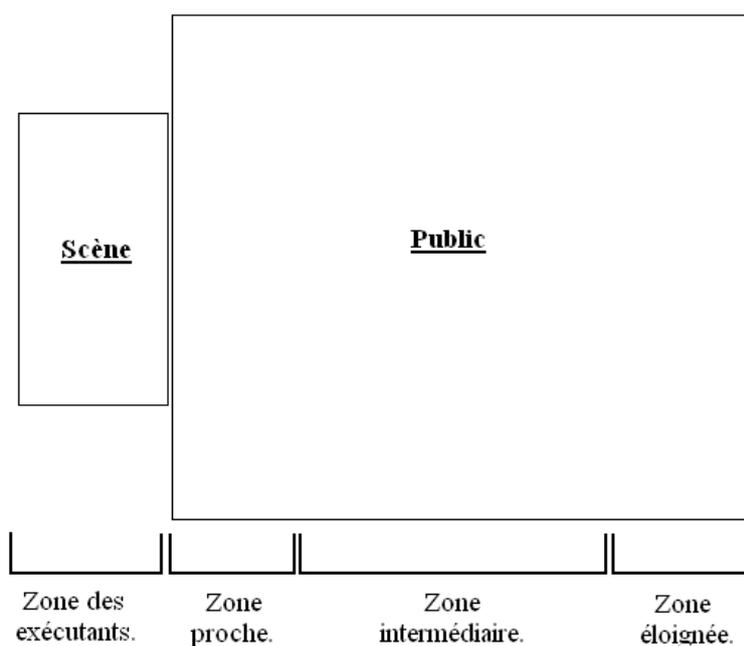


FIGURE 1.2 – Distinction des différentes zones pour un concert « rock »

Selon la situation, la caractérisation des différentes zones est variable. Mais on peut peu les définir dans le cas d'un concert « rock » pour une sonorisation en direct.

- La zone des exécutants est une zone qui a un système de sonorisation spécifique pour les musiciens : retour, ear-monitor, side. Il faut contrôler la pollution sonore de cette zone par le système destiné à la sonorisation du public.
- La zone proche dispose du système de sonorisation destiné aux auditeurs et de l'effet de reprise sonore du système dédié aux musiciens. Dans le cas d'une salle de taille importante, cette zone peut bénéficier d'un système de diffusion distinct. Il est important de noter que pour les concerts « rock », les auditeurs disposés dans cette zone recherchent de fortes sensations.
- La zone intermédiaire couvre la majeure partie du public. Elle dispose du système de diffusion principal. C'est dans cette zone qu'est positionnée la régie son. Le

mixeur qui l'occupe peut être considéré comme la personne la plus exigeante en termes de qualité sonore. Cette zone est à privilégier et à rendre la plus grande possible.

- La zone éloignée est située à la limite de la couverture du système de sonorisation. Dans cette zone, l'effet de salle est prépondérant et la réponse en fréquence est assez déformée. Il faut réduire au minimum cette zone ou la cibler dans certains cas (présence de billetterie, de bar ...).

1.2.2 Lieux à sonoriser

« La mise en place d'un bon système de sonorisation impose une connaissance préalable de la salle et de ses défauts »²

Les lieux à sonoriser sont nombreux et les configurations sont assez variables. On peut distinguer deux principales dispositions : l'intérieur et l'extérieur. La découverte de la salle se fait la plupart du temps avec des plans et des photographies. Il faut réussir à rassembler un maximum d'éléments pour pouvoir définir le plus précisément le lieu. On peut alors définir les différentes zones avant de concevoir son système. La conception du système va ensuite se faire en fonction des emplacements possible pour disposer les enceintes : place disponible au sol, position et capacité des points d'accroche. Pour finir, il est intéressant de connaître les paramètres acoustiques du lieu pour pouvoir distinguer des effets indésirables causés soit par : le système, son positionnement et l'acoustique de la salle.

Lorsqu'on se place en extérieur, on s'affranchit des réflexions sur les parois. Le sol est la seule surface à prendre en compte. Néanmoins, il peut se produire des réflexions non négligeables sur des surfaces naturelles éloignées (falaise, lac ...).

En intérieur, les salles ont toutes leurs propres caractéristiques. Dans les basses fréquences, les matériaux sont globalement plus réfléchissants. Il s'agit de trouver les meilleurs compromis possible pour que le système interagisse au mieux dans l'ensemble du lieu. La place est un facteur déterminant, on ne peut pas placer un système à tous les endroits : positionnement des points d'accroche, présence du public, masquage de la vue sur scène ...

1.2.3 Temps et budget

L'organisation d'une manifestation est gérée par la production. Et le son n'est qu'une petite partie de l'organisation... Les coûts de main-d'oeuvre sont les plus impor-

2. **Jouhaneau J.**, *Acoustique des salles et sonorisation*, éd. Tec&Doc, Paris, seconde édition, 2003, p. 448.[4]

tants, mais il y a aussi le budget alloué à la location du matériel. Et la quantité de matériel induit un certain nombre de paramètres : nombre de personnes nécessaire pour manipuler le matériel, moyen de transport. . . À partir d'évènements d'une certaine ampleur, une personne est responsable du système de diffusion. L'ingénieur système est chargé de concevoir, de mettre en place et de régler le système de diffusion. Il doit concevoir en connaissant les moyens qui peuvent être mis à disposition, et il ne dispose pas de matériel illimité et de temps illimité. Ces contraintes sont souvent assez lourdes et ont une influence importante sur le résultat qualitatif du système de diffusion. Il y a donc un important travail à effectuer en amont d'une installation pour quantifier puis justifier les moyens à mettre en oeuvre.

De nombreuses contraintes sont présentes lors de la conception d'un système de diffusion. Le cas idéal n'existe pas, mais on peut tenter de s'en rapprocher. Les moyens disponibles (matériel et temps) ainsi que le lieu dans lequel se produit un événement sont propres à celui-ci. Il faut donc s'adapter aux situations. Cette capacité d'adaptation s'acquiert en majeure partie avec l'expérience.

Dans ce travail de recherche, nous étudions dans un premier temps le cas théorique (en nous affranchissant de ces contraintes) pour ensuite nous placer dans une étude de cas pratique.

1.3 Dispositif de mesure

Pour cette recherche, les mesures permettront d'analyser la mise en pratique des analyses théoriques. Ces résultats nous serviront à comparer les démonstrations théoriques et les phénomènes réels. Il est donc important de disposer d'un système de mesures fiable. Même si des systèmes alternatifs aux mesures basés sur la FFT existent (l'analyse IDS par exemple), le choix s'est fait en adéquation avec les systèmes utilisés par les professionnels. Pour les basses fréquences, le microphone de mesure et l'interface audionumérique ne sont pas des éléments critiques. Par contre, le programme utilisé pour l'interprétation est déterminant.

Ce programme définit : les stimulus (sweep, MLS . . .), les options de fenêtrage pour la FFT, les visualisations possibles (réponse en fréquence, réponse en phase, réponse temporelle . . .). Pour la mesure concernant les basses fréquences, la FFT atteint ses limites. Il est nécessaire d'avoir une importante fenêtre pour disposer de suffisamment de points et de cohérence. En contrepartie, une longue fenêtre

temporelle nous amène à caractériser non plus le système, mais le système et un lieu. Nous tacherons donc d’optimiser à chaque mesure la fenêtre temporelle pour obtenir le maximum d’indications tout en limitant les effets de salle. Le logiciel utilisé dans cette étude est WinMLS³ qui propose différents stimuli ainsi qu’une modification du fenêtrage après les mesures et de multiples options de visualisation.

Pour être sûr de la cohérence des résultats, notre matériel de mesure a été comparé à un système MLSSA⁴. Pour les basses fréquences, les courbes obtenues sont identiques, ce qui conforte dans le choix du matériel. Nous avons fait le choix d’un stimulus de type sweep, en nous limitant à une fréquence d’échantillonnage de 4 kHz (bande passante de 2kHz).

Notre système de mesures ne pouvait pas être calibré. Ainsi, toutes les analyses présentées dans cette étude seront comparatives, et on ne pourra émettre d’hypothèse sur le niveau produit par chaque système mesuré. Avec cette limitation, nous n’avons pas pu caractériser le rendement et les performances en terme de niveau des systèmes étudiés.

Dans toutes les mesures, le microphone est placé au sol. Cette solution nous permet d’éviter les réflexions sur le sol qui créé, selon la hauteur, une atténuation autour d’une fréquence. Compte tenu de la disparité des conditions, lors de chaque présentation de résultat, nous préciseront le cadre et les limites de la mesure.

2 La perception des fréquences les plus basses

2.1 L’audition et la sensation

« La préférence de beaucoup d’auditeurs pour des bandes passantes relativement limitées répond peut-être à des remarques du même ordre ; les défauts qui se produisent éventuellement lors de la transmission des fréquences extrêmes pourraient avoir une influence sur les réseaux neuroniques bien supérieurs à celle que l’on attendrait d’un système électroacoustique. Tout cela pose évidemment le problème de l’interaction des composantes spectrales. »⁵

3. WinMLS est un logiciel développé par Morset Sound Development : www.winmls.com

4. MLSSA est une station de mesure (interface matériel et logiciel) développée par DRA Laboratories. www.mlssa.com

5. **Condaminés R.**, *Acoustique psycho-physique*, éd. Masson, Paris, 1986, p. 82.

2.1.1 Les limites de la cochlée

Les courbes isosoniques (norme ISO 389-7 :2005 d'après les travaux de **Fletcher** et **Munson** représentés figure 1.1) fixent le seuil de sensation dans les basses fréquences autour de 18 Hz. La perception de hauteur est liée à l'excitation cochléaire. Plus la fréquence est basse, plus les zones qui entrent en résonance (la déformation de la membrane basilaire) sont larges et proches.

Une étude de **Yeowart** [5] montre que l'appareil auditif est sensible jusqu'à 5 Hz. Les conditions d'obtention de ces résultats sont d'appliquer un son pur à un haut-parleur couplé à l'oreille par un tube en cuivre. Dans ce cadre, cette limite basse de la perception ne peut pas être validée, car les harmoniques de la fréquence créées dans le tube en cuivre sont aussi perçus. Il est donc difficile d'obtenir de bon résultat par cette méthode.

Par contre en immergant l'ensemble du sujet dans un caisson basse fréquence, on peut obtenir des résultats plus intéressants. Dans ce cas, ce n'est plus que l'appareil auditif qui est sollicité, mais l'ensemble des sens, et en particulier les sens tactiles.

2.1.2 Résonnance du corps humain

Le corps humain est complexe et son élasticité est difficile à modéliser.

Des études [6] ont permis de définir en fonction des stimuli les effets physiologiques ainsi que la résonnance de différentes parties du corps humain. Mais ces études sont dépendantes du contexte et du stimulus (son pur, son complexe . . .). On observe un lien entre la sensibilité et la tension musculaire ainsi que la position.

Les basses fréquences présentent des désagréments et des dangers dans l'environnement sonore quotidien. À niveau élevé, les dangers dans les basses fréquences touchent plus l'ensemble du corps humain que l'appareil auditif. Les organes mous et les yeux sont les plus exposés à ces risques. «L'absorption de résonnance diminue avec la fréquence, et plus la fréquence est basse, plus l'amplitude de résonnance est élevée.»⁶

6. **LUBIATO, Yoann**, *Mémoire de recherche sur l'étude des sons de très basses fréquences de leur perception et de leur utilisation dans la musique vivante*, Mémoire de l'E.N.S Louis Lumière, 2001, p.18.[2]

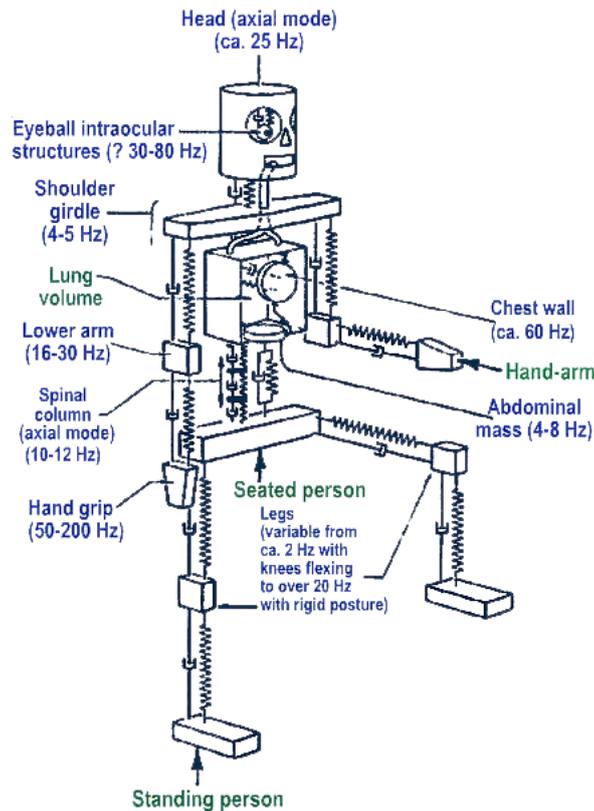


FIGURE 2.1 – Modelisation des résonnances du corps humain (**Rasmussen G.**, « Human body vibration exposure & its measurement », 1982.)

De nombreuses pathologies peuvent apparaître en fonction de l'exposition aux vibrations. On retiendra les principaux effets[7] :

- résonnances d'organes ;
- influence sur l'équilibre ;
- influence sur la respiration ;
- influence cardiovasculaire ;

Les phénomènes de résonance servent la sensation musicale. Une étude [8] sur le muscle sternocleïomastoïde (muscle qui s'étend du thorax à la base du coup et qui permet de tourner la tête du côté opposé) a mis en relation la réaction du muscle en fonction d'un stimulus de musique « rock and roll ». Lorsque les sujets sont exposés au « seuil du rock and roll » (un niveau d'au moins 90 dBA avec une concentration dans la bande de 50 à 100 Hz), on observe une réponse du muscle sternocleïomastoïde en lien avec le stimulus. Cette étude permet de lier les basses fréquences avec le plaisir musical : « à partir d'un certain niveau, le plaisir musical semble prendre source dans les basses fréquences ».⁷

7. **LUBIATO, Yoann**, *Mémoire de recherche sur l'étude des sons de très basses fréquences de leur perception et de leur utilisation dans la musique vivante*, Mémoire de l'E.N.S Louis Lumière, 2001, p.18.[2]

2.2 La localisation des très basses fréquences

2.2.1 Localisation sur le plan horizontal

Dans le plan horizontal, la localisation dans le domaine de la perception auditive s'effectue grâce à la tête et au pavillon de l'oreille externe. On observe deux phénomènes qui permettent la localisation lors du parcours de l'onde sonore jusqu'au conduit auditif.

- La diffraction induite par la tête et le pavillon considéré comme des obstacles. Ce phénomène crée une variation du niveau.
- Les temps de parcours qui varient selon la direction.

Pour les basses fréquences, la tête et le pavillon ne peuvent pas être considérés comme des obstacles en vue des longueurs d'onde mises en jeux. Et ce n'est qu'à partir de 2 kHz (longueur d'onde de 17 cm) que les différences de niveaux atteignent 10 à 15 dB. Quelle que soit la provenance d'un son émis, il n'y a donc pas de différence significative interaurale de pression pour les basses fréquences.

Par contre, des différences de phase interaurale interviennent aussi dans le processus de localisation. Ces différences atteignent 0,6 ms pour un son localisé à 90° [9]. Cette valeur correspond au temps mis par l'onde sonore pour parcourir la distance séparant les deux oreilles. Il est intéressant de comparer le retard à la phase du signal.

fréquence (Hz)	phase (°)
25	5,4
50	10,8
75	16,2
100	21,6
125	27

Dans la gamme de fréquences étudiée, la différence interaurale de phase est inférieure à moins d'un dixième de la période. Par cette observation, on peut s'interroger sur la capacité et le processus d'intégration du cerveau pour la localisation des basses fréquences.

2.2.2 Localisation sur le plan vertical

La localisation sur le plan vertical s'opère par les quelques asymétries du corps humain, notamment celle des pavillons. Dans ce cadre, la localisation des basses

fréquences sur le plan vertical est faible, car le pavillon, par ses dimensions, a une interaction minimale dans cette zone spectrale.

Néanmoins, on peut s'interroger sur la conduction osseuse et les résonances des différents organes qui vont être stimulées dans un ordre différent selon la provenance du son.

2.2.3 Perception de l'image stéréophonique dans les basses fréquences

La stéréophonie s'applique principalement dans le domaine de l'enregistrement où l'auditeur est normalement bien positionné devant ses deux enceintes. Dans le domaine de la sonorisation, la stéréophonie est difficile à gérer pour un auditoire important. Seul un petit groupe de personnes est bien positionné, et une différence de niveau importante entre les systèmes gauche et droit produit une zone de couverture plus réduite.

Dans les basses fréquences, d'un point de vue culturel, les enregistrements contiennent peu ou pas de basses fréquences latéralisées. Pendant la production des vinyles, les moyens mécaniques propres au support (profondeur et largeur du sillon) ne permettaient pas de latéraliser les basses fréquences du signal enregistré. Dans le domaine du disque, la latéralisation s'opère principalement avec des différences de niveau. Et nous avons vu que la différence de niveau n'intervient pas dans le processus de la localisation des basses fréquences.

Ainsi, on est peu habitué et réceptif à une image stéréophonique dans les basses fréquences. Même si les supports numériques permettent aujourd'hui de latéraliser les basses fréquences, on observe peu d'enregistrement utilisant ce procédé. Et l'apparition d'un seul haut-parleur de grave dans les systèmes d'écoute personnels (2.1 et 5.1) ne va pas dans la recherche d'une image stéréophonique pour les basses fréquences. On remarque aussi qu'un déséquilibre de niveau entre les enceintes dans les basses fréquences apporte plutôt une impression de défaut technique.

2.3 Effet de masque

Le masquage s'effectue quand un son est rendu inaudible par un autre. Il est lié à des paramètres physiologiques de la perception auditive (réflexe stapédien, fonctionnement de la cochlée, signal transmis par les nerfs auditifs). On peut distinguer deux effets de masque.

- Le masquage temporel : l'émission d'un signal masquant masque un son qui le suit. Il est lié à l'effet de précédece (appelé aussi *effet de Haas*).
- Le masquage simultané : il s'applique lorsqu'on a deux sources à différents niveaux, mais aussi avec différentes composantes spectrales.

De nombreuses études sur la psychoacoustique s'intéressent à « la capacité de sélectivité spectrale du système auditif »⁸.

Une étude de l'effet de masque de Wegel et Lane (1924) limitée à l'effet masquant des sons purs sur les sons purs permet de dégager un certain nombre de points.

- L'effet de masque est maximal pour les fréquences voisines de celles du son masquant.
- Les fréquences basses sont les plus gênantes.
- Les fréquences élevées sont les plus gênées.

Cette étude s'appuyant sur des sons purs recherche à montrer les capacités physiologiques de discrimination.

L'exposition prolongée à une stimulation auditive provoque aussi deux modifications de la sensation : l'adaptation et la fatigue. Dans le cadre de concert, on est exposé à un niveau important pendant plusieurs heures. Le comportement est donc largement modifié par rapport aux situations expérimentales dans les études de l'effet de masque.

2.4 Perception du niveau

La perception du niveau peut s'analyser par l'effet sur la sonie. La sonie ou loudness est une quantification de la perception du bruit chez l'être humain. « L'étude de la sonie des sons complexes a généralement été réalisée par une méthode de comparaison qui consiste à demander à des sujets de comparer la sonie d'un son étalon (son pur ou bande de bruit de largeur donnée) à celle d'un son complexe dont on fait varier la composition spectrale. »⁹

On peut observer les résultats des études sur la sonie pour la mesure de niveau sonore (figure 2.2).

8. Botte M.C., Canévet G., Demany L. et Sorin C., *Psychoacoustique et perception auditive*, éd. INSERM, Paris, 1989, p. 31.

9. Botte M.C., *ibid.*, p. 26.

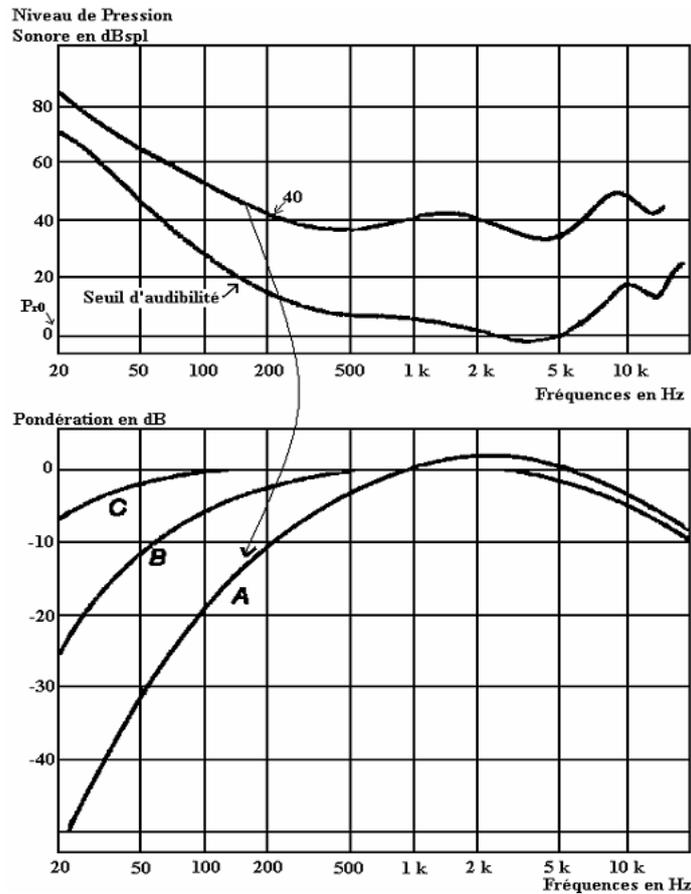


FIGURE 2.2 – Lien entre l'échelle des phones et les courbes de pondération

Il existe trois pondérations normalisées pour les niveaux sonores : les dB(A, B, ou C). La pondération A est basée sur la ligne 40 phones (40 dB SPL à 1 kHz), B sur 70 phones et C sur 100 phones. Ces pondérations en lien avec la perception montrent que la balance tonale évolue en fonction du niveau. À fort niveau (ce qui est le cas sur les événements sur lesquels se porte cette étude), la sensation est quasiment identique pour toutes les fréquences (dB C).

2.5 Équilibre tonal

Les systèmes de reproduction pour la musique enregistrée présentent une réponse assez plate, légèrement descendante. Pour un système d'écoute domestique ou d'écoute de studio, l'auditeur a besoin d'une reproduction fidèle. Dans ce cadre, les courbes de réponse de ces systèmes sont plates (on a ensuite l'interaction avec le lieu qui modifie cette réponse).

Pour un système de sonorisation, on sort de ce cadre. Le système de sonorisation est dédié à une situation, un contexte. Son objectif n'est pas d'être le plus fidèle, mais le plus adapté. Dans ce cadre, la réponse du système et l'équilibre tonal dépendront

des nécessités du système. Cette nécessité est liée au registre musical abordé et à la capacité du lieu. L'exploitation de ce système se fait ensuite par le mixeur.

On observe dans les concerts de variété, une grande ampleur des basses fréquences. Les mesures effectuées dans la dernière partie nous montrent un système avec un gain situé entre 10 et 15 dB en dessous de 150 Hz par rapport au reste du spectre (voir figure 12.2). Ce résultat se retrouve sur la majorité des évènements de ce type. On est assez loin des types de réponse fréquentielle obtenue sur des systèmes d'écoute personnels. Les niveaux sont aussi différents dans les deux situations. On observe un niveau moyen de 85 dB SPL pour une écoute domestique alors dans les concerts ont atteint souvent les 105 dB SPL. L'effet loudness (sonie) montre qu'il faudrait donc un système diffusant moins de grave à plus fort niveau. On observe pourtant l'inverse lors de l'analyse de la réponse fréquentielle des deux types de systèmes.

Nous n'avons pas pu approfondir cette observation. Mais on peut s'interroger sur le rôle de la réponse impulsionnel pour différencier un système de diffusion dédié à la sonorisation par rapport à un système d'écoute personnel.

L'ensemble des analyses observées dans cette partie nous permet d'avancer quelques points. Néanmoins, nous n'avons pas trouvé d'études et de résultat spécifiques à notre cas : la perception des basses fréquences dans le registre musical de type « rock » à niveau important. Il faut donc considérer les informations qui suivent comme empiriques.

- **L'être humain localise assez peu les basses fréquences. Cette donnée nous permet d'avoir une certaine liberté sur le positionnement des systèmes travaillant dans les basses fréquences.**
- **Les basses fréquences ont un lien avec la sensation. Dans la conception d'un système de diffusion, il est donc important de bien dimensionner la partie travaillant dans les basses fréquences pour produire des sensations physiques.**

3 Évolution du rôle des basses fréquences dans la production discographique

3.1 Méthode d'analyse

Nous avons sélectionné une trentaine d'enregistrements pour observer la balance spectrale et son évolution dans la production discographique. La liste de ces morceaux est disponible en annexe B. Pour choisir ces titres, nous avons privilégié le caractère populaire. La majeure partie des morceaux choisis sont des « tubes », classés dans différents hit-parades. En même temps, nous avons cherché des enregistrements riches en basse fréquence.

Pour l'analyse nous avons effectué une analyse FFT, environ toutes les secondes lors de la lecture de chaque morceau. On obtient ainsi une moyenne de la réponse fréquentielle du titre. Le fait que l'analyse ne s'effectue pas sur un temps défini permet de ne pas se trouver dans le rythme du morceau, ce qui pourrait perturber les résultats. La captation est effectuée sur une station MLSSA puis exportée vers le logiciel SYSTUNE¹⁰. La chaîne d'acquisition de la station MLSSA est filtrée pour la captation d'un bruit rose. Nous n'avons pas pu enlever ce filtrage, on ne peut donc pas tenir compte des valeurs obtenues. Néanmoins, ce filtrage étant identique sur toutes les acquisitions, on peut comparer les résultats entre eux.

Pour simplifier la lecture, les résultats obtenus pour chaque enregistrement sont visibles en annexe C.

3.2 Comparatif

3.2.1 Comparatif en fonction de l'année de production

Année	nombre de morceaux
avant 1980	4
1980-1990	9
1990-2000	9
2000-2010	10

Nous avons un nombre d'échantillons proche pour chaque décennie. Il reste néanmoins assez faible pour être suffisamment représentatif.

10. SYSTUNE est un logiciel de mesure développé par AFMG. www.systune.afmg.eu

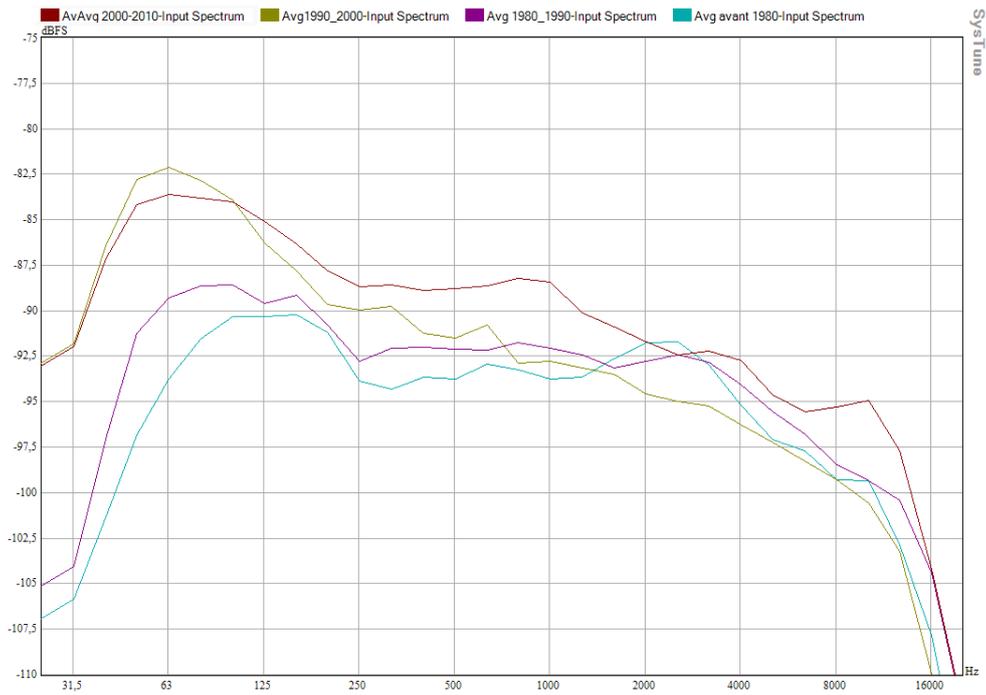


FIGURE 3.1 – Représentation spectrale de la moyenne des morceaux analysés classés par décennie

On remarque que les quatre courbes suivent deux tendances.

- Les deux moyennes des échantillons datés d'avant 1990 (avant 1980 et 1980-1990) sont situées dans une gamme de 5 dB entre 63 et 4000 Hz. Il y a une légère excursion dans le grave, mais qui ne dépasse pas les 3 dB.
- Les deux autres moyennes (1990-2000 et 2000-2010) ont une plus grande amplitude (10 dB entre 63 et 4000 Hz). Et l'excursion dans le grave (en dessous de 250 Hz) est de l'ordre de 5 dB.

Cette distinction des deux tendances peut s'expliquer par l'évolution des supports. On peut supposer que l'apparition du Compact Disc en 1979 et sa démocratisation à la fin des années 1980 a un lien avec l'évolution du spectre.

3.2.2 Comparatif en fonction des différents styles

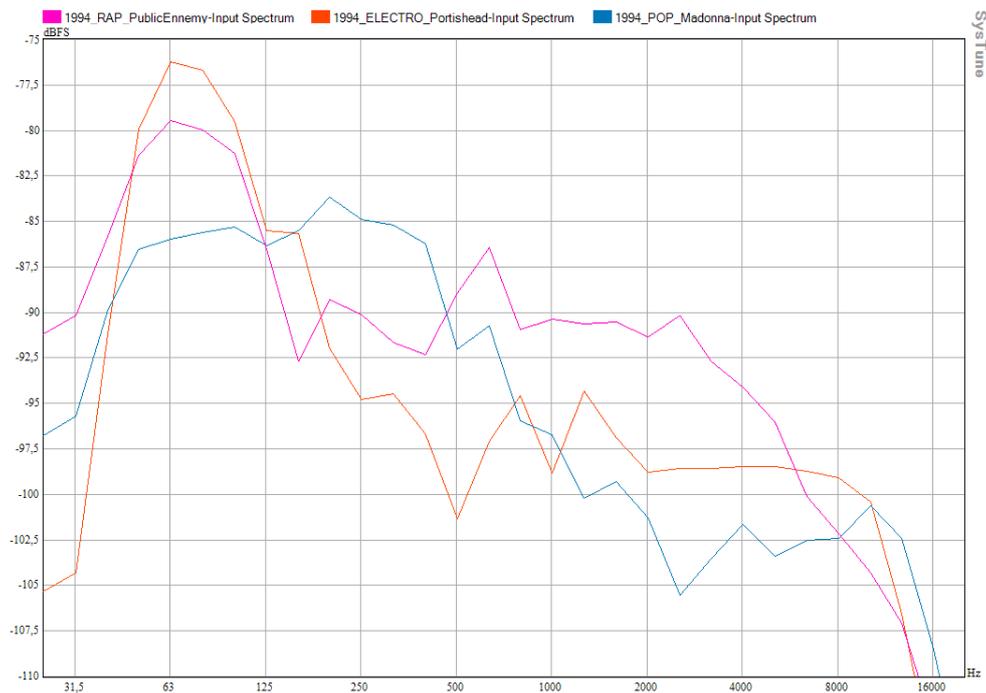


FIGURE 3.2 – Représentation spectrale de trois morceaux de styles différents (rap, électronique et pop) produits en 1994

La comparaison de trois styles se fait autour d'un seul morceau, on ne peut donc pas généraliser les résultats obtenus. Néanmoins, on peut mettre en lien avec les sensations lors de l'écoute des différents registres musicaux. Le morceau de rap et celui de musique électronique (trip-hop) présentent un important niveau centré autour de 70 Hz. On a plus de 10 dB de différence par rapport au reste du spectre.

Ces deux analyses nous permettent d'obtenir des informations sur l'évolution des habitudes d'écoute. On observe que les productions actuelles contiennent plus de graves que les productions effectuées il y a une vingtaine d'années.

Cette différence est reproduite dans le domaine de la sonorisation. Les systèmes de diffusion actuels doivent être capables de produire plus de basses fréquences. Et chaque dispositif de reproduction doit être adapté au style musical. Dans le cas d'un festival avec plusieurs styles et plusieurs groupes, il doit être capable de répondre au besoin le plus important.

Deuxième partie

Le contrôle de la directivité grâce à l'association et le traitement entre des enceintes identiques

4 Les enceintes travaillant dans les basses fréquences

4.1 Les haut-parleurs

« Le transducteur électroacoustique est établi pour recevoir de l'énergie d'un système électrique et fournir de l'énergie à un système acoustique. [...] Les haut-parleurs comportent généralement un moteur électrique qui commande le déplacement d'un organe mécanique »¹¹

Dans le domaine de la sonorisation, il faut concilier la puissance avec la qualité. Les enceintes utilisées dans ce domaine ont un rendement important et sont capables de produire un niveau de l'ordre de 140dB SPL (crête) à 1 mètre. Actuellement, seule la technologie des haut-parleurs dynamiques à bobine mobile est capable de produire une telle pression.

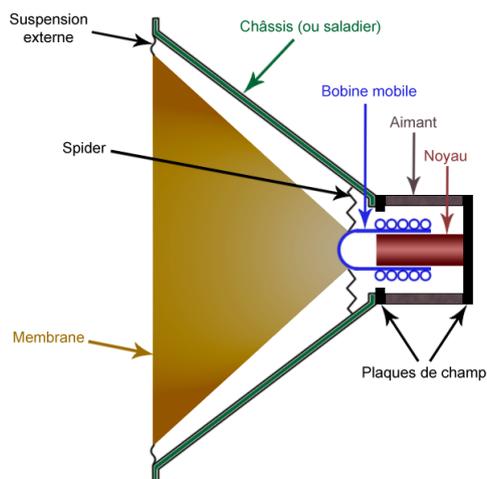


FIGURE 4.1 – Les principaux éléments constituant un haut-parleur à bobine mobile (www.enceinte.net)

11. « Physique appliquée à la reproduction des sons et des images » de Didier A., Masson et Cie Éditeur, Paris, 1964, p. 123.[10]

Les haut-parleurs à bobine mobile ont été inventés en 1874 et même si de nombreuses améliorations ont été apportées, la technique de base n'a pas évolué depuis. Ils ont trois systèmes distincts :

- le moteur (noyau, aimant, plaque de champ et bobine mobile) ;
- la membrane (et le cache noyau) ;
- la suspension (spider, et suspension externe) ;

Le saladier permet de fixer le haut-parleur à une paroi. Il doit être suffisamment solide pour supporter le poids de l'aimant et les vibrations.

Dans les basses fréquences, la longueur d'onde est grande. La membrane subit donc un important déplacement pour les reproduire à puissance élevée. En même temps elle doit présenter une surface suffisante pour produire un important déplacement d'air. La puissance mise en jeu pour mettre en place l'énergie nécessaire à cette partie mécanique nécessite une bobine avec une section de fil suffisamment importante.

4.2 Les enceintes

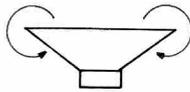
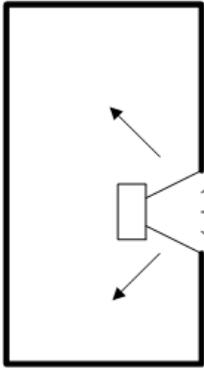


FIGURE 4.2 – Représentation d'un court circuit acoustique pour un haut-parleur nu.

Le haut-parleur nu présente un court circuit acoustique, principalement dans les basses fréquences. Sans encadrement, le déplacement de la membrane crée une surpression à l'avant et une dépression à l'arrière. Vu que les distances parcourues sont négligeables devant la grande longueur d'onde, sur un plan perpendiculaire au haut-parleur, il y a addition de deux ondes quasiment identiques avec une inversion de polarité. Pour contrer ce problème, il faut rallonger le parcours de l'onde sonore en plaçant par exemple un écran.

Il faut donc trouver une solution permettant de s'affranchir des courts circuits acoustiques. L'écran acoustique encadrant le haut-parleur est une possibilité. Mais pour les très basses fréquences, la longueur d'onde est si importante (6,8 m pour 50 Hz) qu'il faudrait un écran immense pour que l'onde arrière et l'onde avant soient en phase. L'autre solution est d'encadrer complètement le haut-parleur .

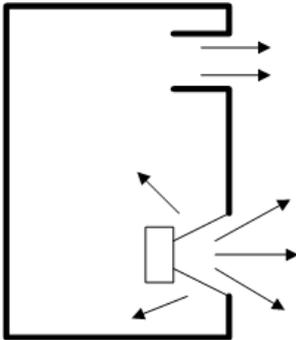


L'enceinte close permet d'isoler complètement l'onde arrière de l'onde avant.

Mais elle comporte deux inconvénients majeurs.

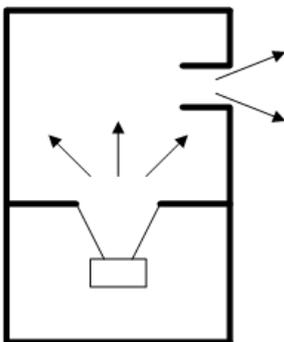
- L'onde arrière modifie l'élasticité de la membrane en créant des perturbations locales de pression dans le volume de l'enceinte. Ces perturbations entraînent une modification notable des caractéristiques mécaniques du haut-parleur.
- Seule la pression de la face avant crée le champ acoustique utile à l'auditeur.

La puissance acoustique est donc diminuée de moitié à puissance électrique équivalente. Cette baisse de rendement n'est pas négligeable dans un domaine où la puissance nécessaire est importante.



L'enceinte bass-reflex à radiation directe permet d'utiliser l'énergie de l'onde arrière en plus de l'onde avant.

Le principe du système bass-reflex est connu depuis le début des années 30¹². La cavité et l'évent sont accordés pour obtenir un maximum d'énergie autour d'une fréquence.



L'enceinte à charge symétrique est une variante de l'enceinte

12. Brevet de **Thuras** A.C. , 1932

bass-reflex.

Cette construction permet de contrôler la puissance de l'évent. « Elle présente l'avantage de régulariser la bande passante dans la partie basse du spectre et surtout, de réduire les distorsions apportées par la dissymétrie des charges de l'enceinte classique et les non-linéarités d'excursion. »¹³ Il existe de nombreuses variantes de l'enceinte à charge symétrique.

4.3 Caractéristiques des enceintes de grave

Chaque gamme d'enceintes est unique et a ses particularités. On peut néanmoins généraliser les caractéristiques pour les enceintes travaillant dans les basses fréquences. Pour la majorité des constructeurs, elles ont une conception équivalente. Les enceintes de grave utilisées sont composées de deux ou trois haut-parleurs d'un diamètre compris entre 15 et 21 pouces (entre 38 et 53 cm) et d'une enceinte bass-reflex ou à charge symétrique. La bande passante à -3 dB est située entre 30 et 120 Hz. Les fréquences de coupure sont situées entre 60 et 120 Hz, en fonction de la bande passante du système principal.

On peut distinguer deux types d'enceinte en fonction de leurs caractéristiques mécaniques.

- Les subwoofers « transportables » avec des dimensions de l'ordre de 60x60x60 cm et un poids de 75 Kg. Ces enceintes sont faites pour travailler en complément de grave avec des petits systèmes.
- Les subwoofers « encombrants » avec des dimensions de l'ordre de 50x150x100 cm et un poids de 150 Kg. Ces enceintes de graves délivrent d'importantes puissances dans des fréquences très graves en complément d'important système de diffusion ligne source.

Concernant le type d'enceinte acoustique, on trouve le plus souvent deux modèles : les constructions bass-reflex (à radiation directe) et les enceintes à charge symétrique. Même si la construction à charge symétrique nécessite un volume plus important, le choix de ces modèles reste indépendant de la taille des subwoofers.

13. « Notion élémentaire d'acoustique Électroacoustique » de **Jouhaneau J.**, éd. Tec&Doc, Paris, seconde édition, 2000, p. 548.

4.4 Modélisation

4.4.1 Piston plan circulaire encastré

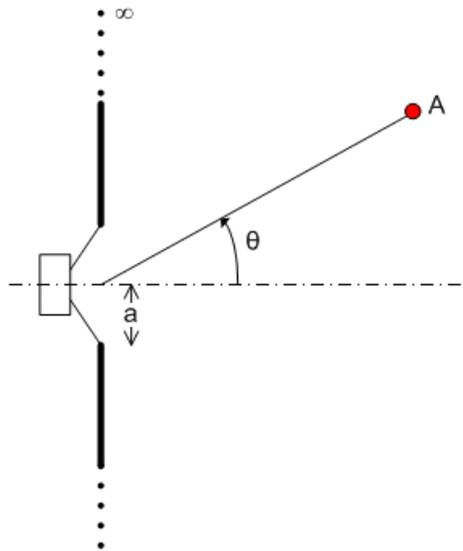
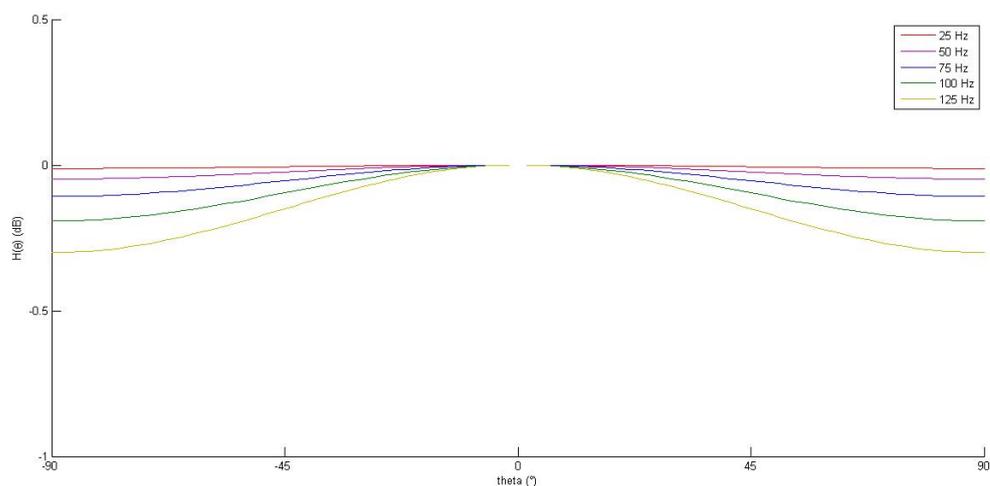


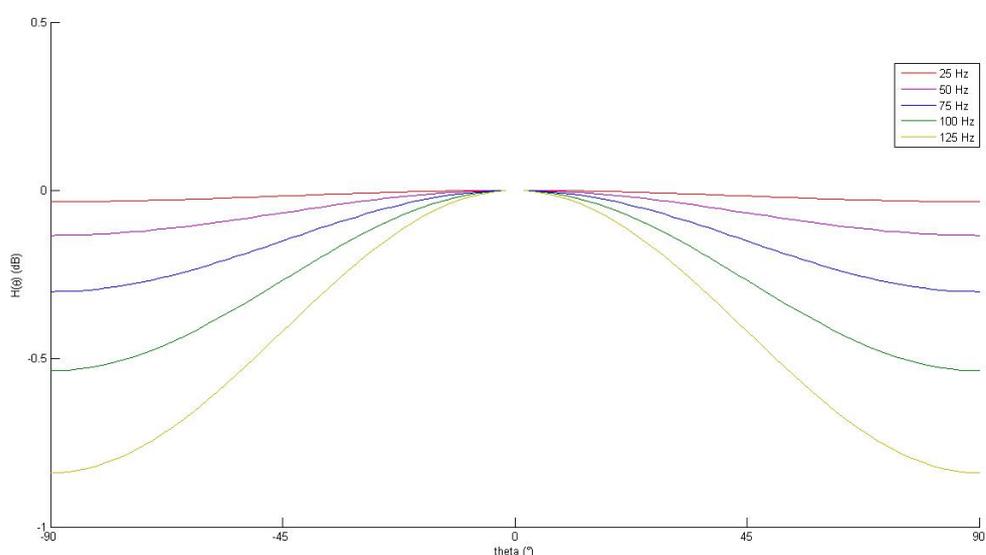
FIGURE 4.3 – Représentation du piston plan infini circulaire encastré (PPCE)

Le modèle du piston plan encastré est particulièrement adapté pour étudier le comportement de rayonnement directif d'un haut-parleur monté dans une enceinte. Ce modèle nous permet de définir la fonction de directivité en pression. [4]

$h(\theta) = \frac{2J_1(ka \times \sin(\theta))}{ka \times \sin(\theta)}$ avec a le rayon du piston circulaire, $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}$ et J_1 la fonction de Bessel du premier ordre.



(a) pour un haut parleur de 30 cm de diamètre



(b) pour un haut-parleur de 50 cm de diamètre

FIGURE 4.4 – Directivité du modèle du piston plan circulaire encastré en fonction de la fréquence et de l'angle

On observe que plus le piston a un diamètre important, plus l'enceinte est directive. Dans les fréquences basses, le modèle a un comportement très omnidirectionnel. Néanmoins, ce n'est qu'un modèle théorique qui n'est valable que jusqu'à 90° . Ces résultats devront être ajoutés au phénomène de diffraction et confrontés aux mesures.

4.4.2 Diffraction sur l'enceinte

« La diffraction est l'ensemble des phénomènes de réémission d'un élément soumis à une onde incidente »¹⁴. La diffraction s'applique dans deux cas pour les enceintes.

14. **Jouhaneau J.**, *Notion élémentaire d'acoustique Electroacoustique*, éd. Tec&Doc, Paris, seconde édition, 2000, p. 583.

- D'une part par la vibration de l'ensemble des parois constituant l'enceinte. Cet effet est quantifiable par le choix des matériaux en fonction de leurs propriétés mécaniques (épaisseur, raideur, amortissement) et par leur agencement. Dans les basses fréquences, cette part de réémission n'est pas négligeable.
- D'autre part par l'influence des ondes rasantes émises par les sources sur les arrêtes de la face avant. La réémission par les arêtes n'est pas la plus perturbatrice, mais c'est la plus difficile à modéliser.

Un modèle proposé dans une publication de **Christian Heil** [11] a été confronté aux mesures. Pour le plan infini, on encastre un haut-parleur dans le sol. Et pour le modèle baffle plan, on enferme un haut-parleur de 12 pouces (30 cm) dans une petite cavité imperméable. On encadre ce haut-parleur par un baffle circulaire de 1 m de rayon.

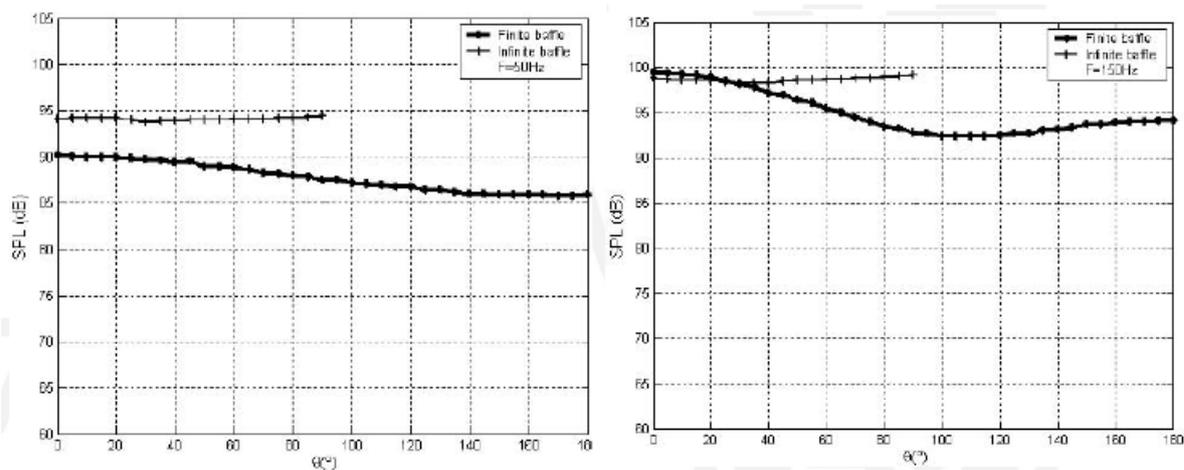


FIGURE 4.5 – Comparaison des mesures obtenus sur le modèle plan infini et baffle plan pour 50 Hz et 150 Hz[11]

Les mesures montrent une diminution d'environ 4 dB à 50 Hz et d'environ 7 dB à 150 Hz. On s'écarte déjà des résultats obtenus avec le modèle du piston plan encastré. . .

4.5 Mesure

Les enceintes utilisées pour ces mesures sont des enceintes METRIX SUB ainsi que les enceintes SPEKTRIX SUB fabriquées par la société ADAMSON¹⁵. Ces enceintes sont constituées de deux haut-parleurs de 15 pouces (38,1 cm) de diamètre pour les METRIX SUB et de 18 pouces (45,7 cm) pour les SPEKTRIX SUB. Dans les deux cas, l'enceinte est à charge symétrique. Les fiches techniques sont disponibles en annexe D.

15. www.adamsonsystems.com

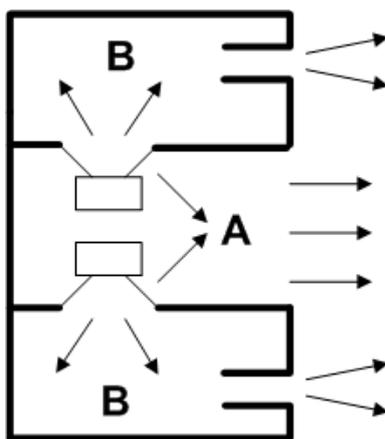


FIGURE 4.6 – Représentation de la construction d’une enceinte METRIX SUB et SPEKTRIX SUB

Vu la construction de l’enceinte, c’est l’onde générée par l’arrière du haut-parleur qui arrive le plus directement. L’enceinte est hors phase, plus précisément inversée en polarité par rapport à une enceinte à radiation directe.

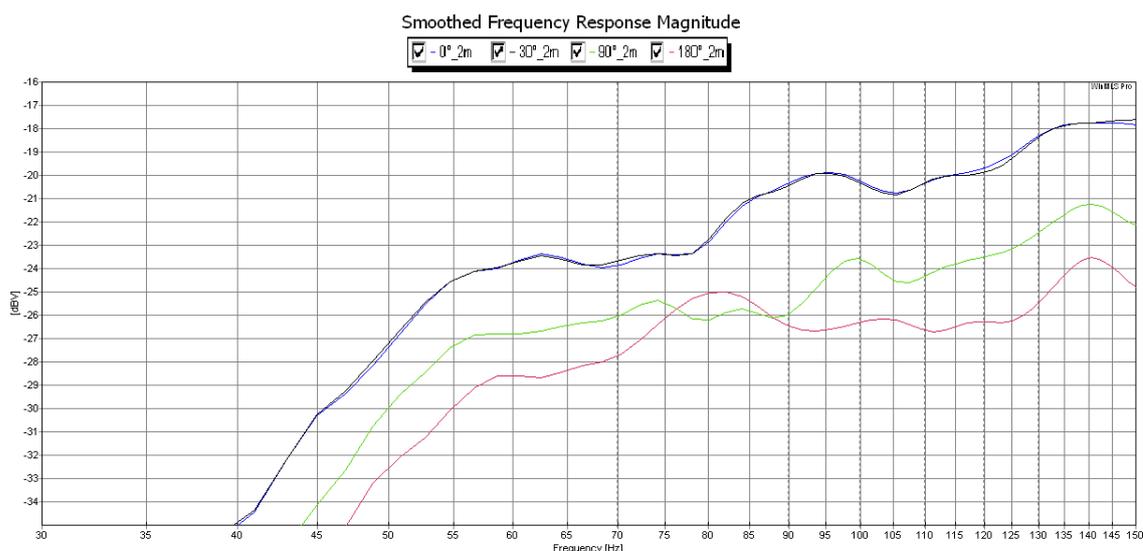


FIGURE 4.7 – Réponse fréquentielle d’une enceinte METRIX SUB en fonction de l’angle

Les mesures nous montrent que l’enceinte est directive : par rapport à la pression dans l’axe, on a -3 dB à 90° et -6 dB à 180°. Cette directivité est faible, mais il est important d’avoir à l’esprit que les enceintes travaillant dans les très basses fréquences ne sont pas complètement omnidirectionnelles. On est même assez loin du modèle du piston plan circulaire. Cette observation sera utilisée pour comparer la directivité d’un système par rapport à une enceinte. En effet, si on observe par exemple une perte de 6 dB à l’arrière lors de la mesure d’un système, la directivité

du système n'est que de 3 dB puisqu'il est conçu avec des enceintes légèrement directives.

Ces mesures ont été réalisées en plaçant les enceintes dans une pièce, ce qui modifie la courbe de réponse obtenue. En particulier, entre 80 et 100 Hz ou la mesure effectuée à 180° est accidentée. On ne peut donc pas conclure sur une modification de la courbe de réponse selon la position.

5 Alignement ou empilement des enceintes

Le fonctionnement d'un alignement ou d'un empilement dépend de l'enceinte, de sa construction et de ses dimensions. On peut assimiler l'alignement et l'empilement qui ne sont qu'une rotation de l'un par rapport à l'autre. Néanmoins, le sol a un effet qui distingue les deux et cet aspect sera traité dans la partie 9.2.2.

5.1 Le rôle de l'enceinte close et de sa taille : la diffraction

En reprenant le phénomène de diffraction, on voit que la taille, la distance entre le haut-parleur et les bords de l'enceinte à une importance. En augmentant la taille de l'enceinte, on peut accroître la directivité. Dans la pratique, les enceintes fonctionnant dans les basses fréquences sont à la limite du manipulable. Il est assez difficile d'augmenter encore la taille. Par contre si l'on positionne des enceintes côte à côte, on peut accroître la surface. Il faut néanmoins respecter certaines conditions comme l'éloignement entre les haut-parleurs qui peut produire des interférences (section 6.1).

5.2 Le gain en pression

La réalisation d'un groupe d'enceinte a pour objectif de gagner en pression acoustique. En associant plusieurs enceintes identiques, on peut avoir un gain en pression de 6 dB (3 dB en puissance) par ajout de source identique. Par contre, il faut veiller à ne pas dépasser une distance de $\frac{\lambda}{2}$ entre les haut-parleurs [12]. Dans ce cas, des interférences destructives se créent et le système n'est plus cohérent.

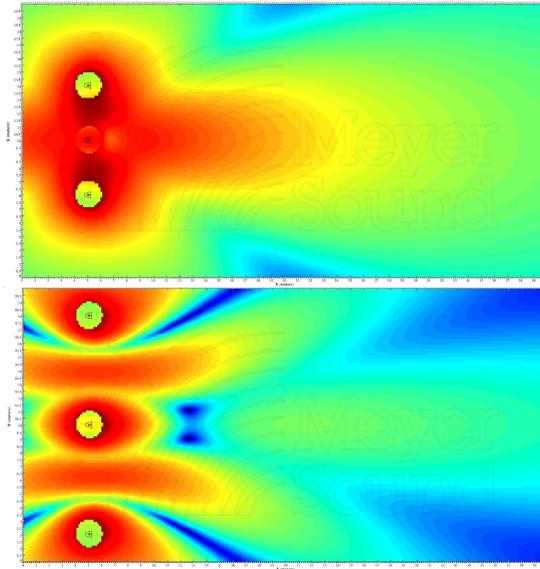


FIGURE 5.1 – Rayonnement à 50 Hz de trois enceintes écartées de 4 m et de 8 m

5.3 L'alignement et l'empilement : directivité et effet ligne source

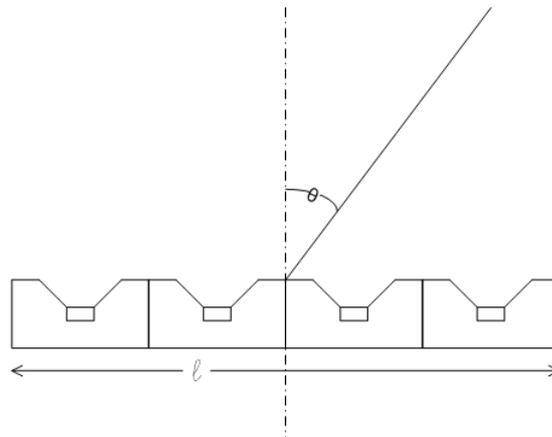


FIGURE 5.2 – Disposition de l'alignement de 4 enceintes

Si l'on aligne plusieurs enceintes identiques, la fonction de pression varie en fonction de l'angle [13] :

$$R_{\theta} = \frac{\sin(\frac{\pi l}{\lambda} \sin(\theta))}{\frac{\pi l}{\lambda} \times \sin(\theta)}$$

avec l la longueur de la ligne et λ la longueur d'onde.

L'analyse de cette formule nous permet d'avancer que le système gagne en directivité proportionnellement à :

- la longueur l de la ligne ;
- la fréquence ($f = \frac{c}{\lambda}$) ;

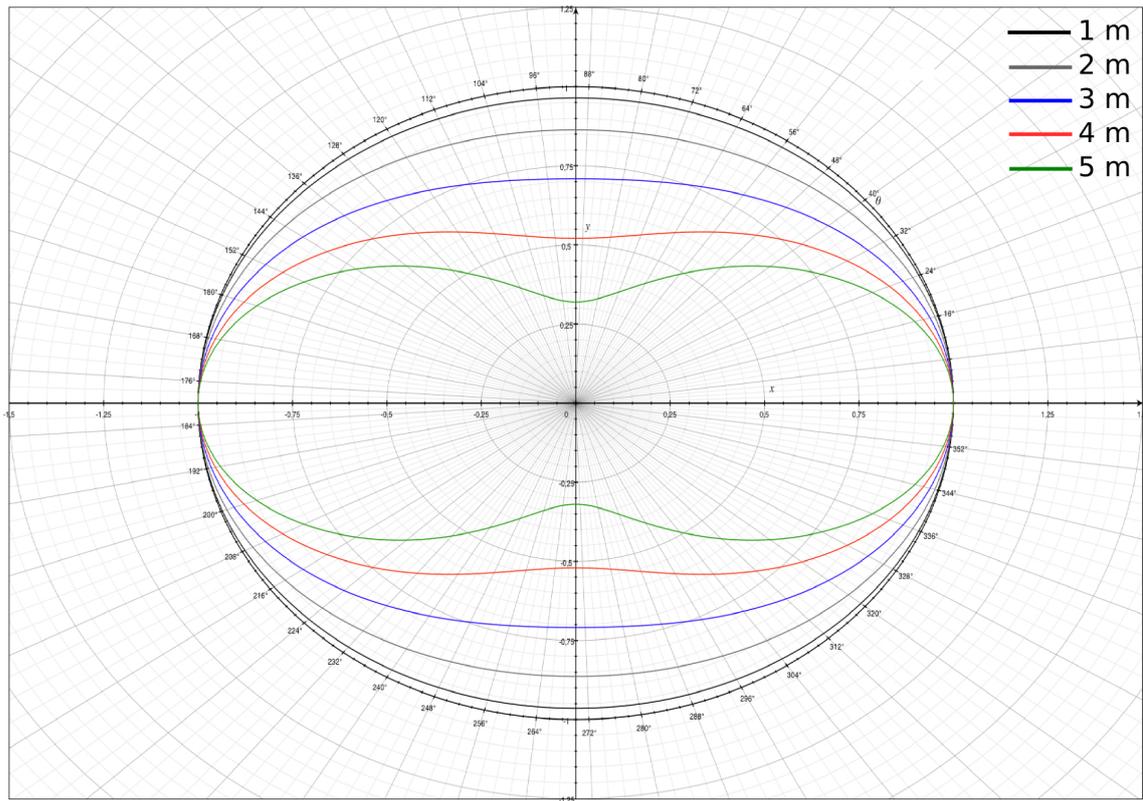


FIGURE 5.3 – Diagramme de directivité théorique à 50 Hz en fonction de la longueur d'une ligne

La figure 5.3 nous montre que pour une fréquence de 50 Hz, dès que l'alignement dépasse 3 m, on est déjà très directif.

Nous avons mesuré la directivité obtenue en alignant quatre enceintes SPEKTRIX SUB.

On observe sur la figure 5.4 que l'alignement de quatre enceintes créer un système très directif. La directivité varie en fonction de la fréquence. Avec ces enceintes, la ligne mesure 2,16 m. Pour un angle de 90° , le modèle donne une perte de 3 dB, et la mesure montre une variation de 6 dB entre la position à 0° et celle à 90° . Ces différences s'expliquent par la directivité de l'enceinte seule.



FIGURE 5.4 – Réponse en fréquence de quatre enceintes SPEKTRIX SUB alignées en fonction de l'angle

En considérant les réseaux ligne source et les zones de Fresnel et de Fraunhofer[12], on peut observer la limite des deux modes de propagation.

- Cylindrique en champ proche, 3 dB d'atténuation par doublement de distance.
- Sphérique en champ lointain, 6 dB d'atténuation par doublement de distance.

La position limite entre ces deux zones suit la règle de Vanderkooy : $R_{lim} = \frac{f \times l^2}{2c}$

Par exemple, en considérant une fréquence de 50 Hz, on peut obtenir une zone de Fraunhofer de 10 m en constituant une ligne de 11,6 m ! Une telle ligne est rarement réalisable pour une portée qui augmente très peu. De plus, vu le nombre d'enceintes nécessaires pour obtenir une telle ligne, le niveau serait extrêmement important dans les dix premiers mètres. Il est donc difficilement concevable d'obtenir un réseau de type ligne source conséquent pour les basses fréquences.

En respectant une distance inter-enceinte de $\frac{\lambda}{2}$, un groupement d'enceintes (empilées ou alignées) permet de gagner en pression sonore et en directivité. Par contre, on gagne très peu en portée ou il faudrait constituer des lignes très importantes.

6 Le décalage spatial et le retard temporel

6.1 Les interférences

6.1.1 Interférences temporelles liées à un décalage spatial : filtrage en peigne

Pour obtenir un important niveau sonore, homogène dans la réponse en fréquence dans toute la zone d'écoute, il est fréquent de multiplier les points de diffusion. La mise en place de plusieurs enceintes alimentées par le même signal entraîne souvent des effets indésirables : les interférences.

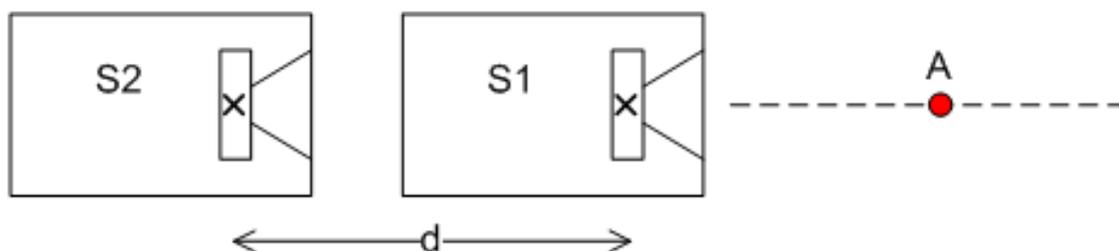


FIGURE 6.1 – Schéma de positionnement de deux enceintes pour l'obtention d'interférences

Dans le cas de signaux identiques appliqués à deux haut-parleurs, le décalage spatial introduit un déphasage dépendant de la fréquence. Cette situation est fréquemment rencontrée, principalement par la multiplication des enceintes et lors des réflexions d'une onde sonore produite par une source contre les parois d'une salle.

L'addition de signaux issus de deux sources non-coïncidentes diffusant strictement le même signal crée un déphasage φ . Il dépend de la distance séparant les centres acoustiques et de la fréquence (ou de la longueur d'onde associée).

$$\text{En degré : } \varphi(f, d) = \frac{d \times f \times 360}{c} = \frac{d \times 360}{\lambda}$$

L'addition en pression de deux sources diffusant le même signal avec un déphasage φ s'exprime :

$$A(\varphi) = 20 \log(\sin(2\pi ft) + \sin(2\pi ft + \varphi))$$

La figure 6.2 nous montre l'impact de l'addition de deux signaux purs avec un déphasage :

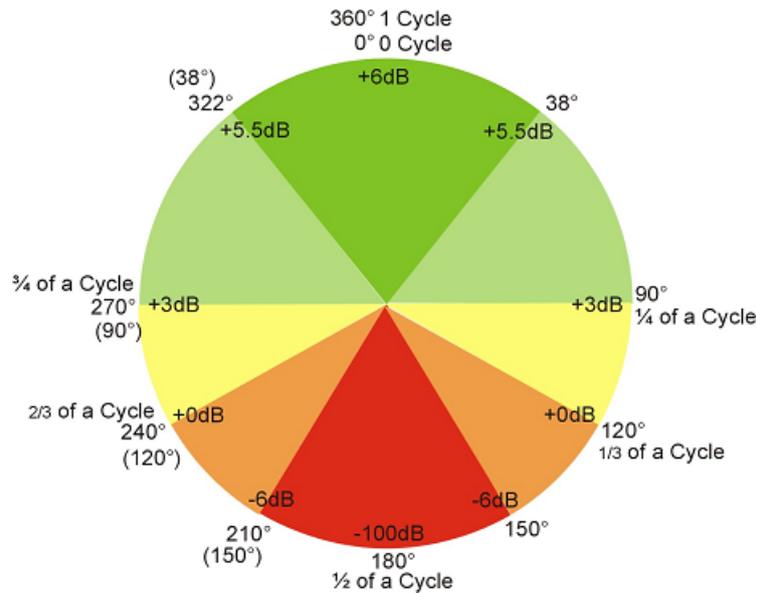


FIGURE 6.2 – Rôle de la phase pour l'addition de deux signaux identiques

On peut distinguer plusieurs zones :

- En vert, les signaux sont quasiment en phase (à $\pm 90^\circ$) la combinaison est constructive.
- En jaune, les signaux sont quasiment en quadrature de phase, la combinaison est très peu constructive, voire nulle.
- En orange/rouge, les signaux sont quasiment en opposition de phase, la combinaison est (très) destructive, voire une annulation complète.

Pour des signaux périodiques et pseudopériodiques, on peut considérer la phase 2π périodiques (360 degrés). Cela implique qu'à chaque doublement de fréquence, on retrouvera le même déphasage. On aura donc le même niveau d'addition de signaux déphasés.

On peut remarquer sur ce schéma que les combinaisons non destructives (> 0 dB) occupent 240° sur 360° soit 66% d'une période.

La fréquence centrale de la première annulation est à :

$$\varphi(f_1) = 180^\circ \text{ soit } f_1 = \frac{c}{2 \times d} \Leftrightarrow d = \frac{\lambda}{2}$$

La fréquence centrale de la deuxième annulation est à :

$$\varphi(f_2) = 540^\circ \text{ soit } f_2 = \frac{c}{2 \times d} \Leftrightarrow d = \frac{3}{2} \lambda \Rightarrow f_2 = 2f_1$$

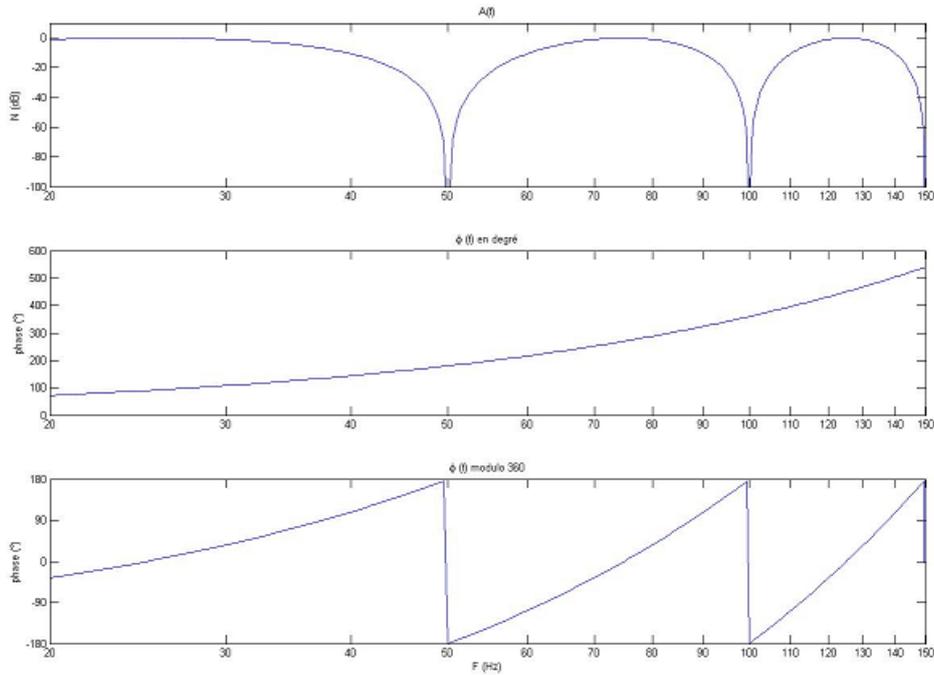


FIGURE 6.3 – Illustration des interférences pour un écartement d de 3,4 m. $N_{dB} = 20 \log(\sin(2\pi ft) + \sin(2\pi ft + 2\pi df))$

On observe sur la figure 6.3 le déphasage et son influence sur le niveau entre deux sources écartées de 3,4 m.

C'est le filtrage en peigne, il existe dès que deux ondes sonores identiques ont un temps de parcours différents.

Cet effet est limité par deux facteurs qui n'ont pas été pris en compte lors de la démonstration :

- Pour des fréquences élevées, les annulations sont si rapprochées que le filtrage en peigne est négligeable. Lorsqu'on prend en compte l'acoustique architecturale et les réflexions, on crée de multiples sources images qui vont interférer avec la source principale.
- Si la distance séparant les sources est importante, il apparaît une différence de niveau liée à la décroissance du niveau en fonction de la distance. Si la différence de niveau est supérieure à 20 dB, on peut négliger la source la plus atténuée donc les sources n'interfèrent pas.

Dans les basses fréquences, le filtrage en peigne prend une ampleur importante. Une différence de marche de l'ordre du mètre va impliquer un important filtrage sur une fréquence et ses harmoniques.

6.1.2 Interférence spatiale.

Si on dispose deux sources sonores, séparées d'une distance d , on peut observer une variation de la différence de distance des deux sources selon une position A .

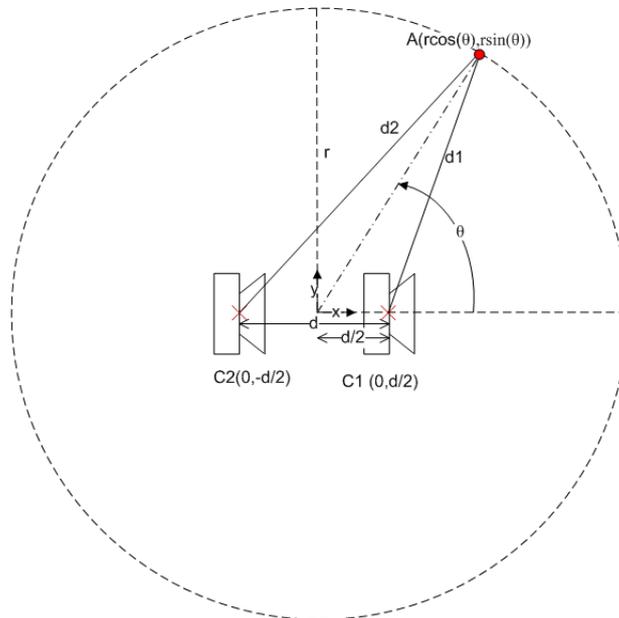


FIGURE 6.4 – Schéma d'implantation pour l'obtention d'interférence spatiale

$$D_1 = C_1A = \sqrt{r^2 \sin^2(\theta) + \left(r \cos(\theta) - \frac{d}{2}\right)^2}$$

$$D_2 = C_2A = \sqrt{r^2 \sin^2(\theta) + \left(r \cos(\theta) + \frac{d}{2}\right)^2}$$

$$\text{D'où } \Delta d = C_2A - C_1A = \sqrt{r^2 + \frac{d^2}{4} + rd \cos(\theta)} - \sqrt{r^2 + \frac{d^2}{4} - rd \cos(\theta)}$$

La différence de distance (Δd) varie en fonction de la distance séparant les deux enceintes, et de la position de réception (angle et distance). Cette relation dépend de beaucoup de paramètres et n'admet pas de simplification mathématique.

On peut utiliser la physique ondulatoire pour la simplifier et ainsi expliciter le phénomène d'interférence spatiale.

On se positionne dans le cas de source sonore travaillant dans les basses fréquences. À partir d'une certaine distance des sources, on peut utiliser l'approximation des ondes planes.

Pour cette hypothèse il faut que : $kr \gg 1 \Leftrightarrow r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$

Pour les basses fréquences : $\lambda_{max(25Hz)} = 13,6 \text{ m} \Leftrightarrow \frac{\lambda}{2\pi} \simeq 2 \text{ m}$

Si la position de réception est située à plus de 2 mètres des sources, on peut utiliser l'approximation des ondes planes. Dans ce cas, on peut considérer que les fronts d'onde des différentes sources sont plans et parallèles.

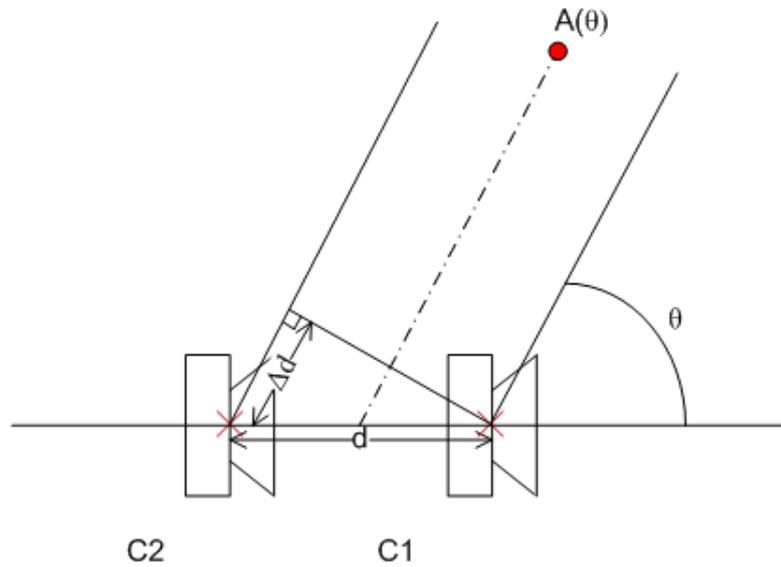


FIGURE 6.5 – Schéma d'implantation pour l'obtention d'interférence spatiale dans le cas d'ondes planes

Avec cette hypothèse, on peut considérer que la variation de la distance ne dépend plus que de l'angle défini par la position de réception. On peut appeler la différence de distance, la différence de marche puisqu'on se place maintenant dans le cas d'onde plane.

$$\text{Alors } \Delta d = | d \times \cos(\theta) |$$

Dans cette configuration, entre 0° et 90° , Δd varie entre d et 0 . En reprenant la variation de la phase en fonction de la fréquence et de la distance, on trouve :

$$\varphi(d) = \frac{d \times \cos(\theta) \times 2\pi}{\lambda}$$

L'addition en pression de deux sources diffusant le même signal à un point $A(\theta)$ s'exprime :

$$N_{dB}(\theta) = 20 \log(\sin(2\pi ft) + \sin(2\pi ft + \frac{d \cos(\theta) \times 360}{\lambda}))$$

Cette nouvelle équation nous montre que le déphasage ne dépend que de la distance séparant les deux sources et de la position de l'auditeur (uniquement en fonction de l'angle θ).

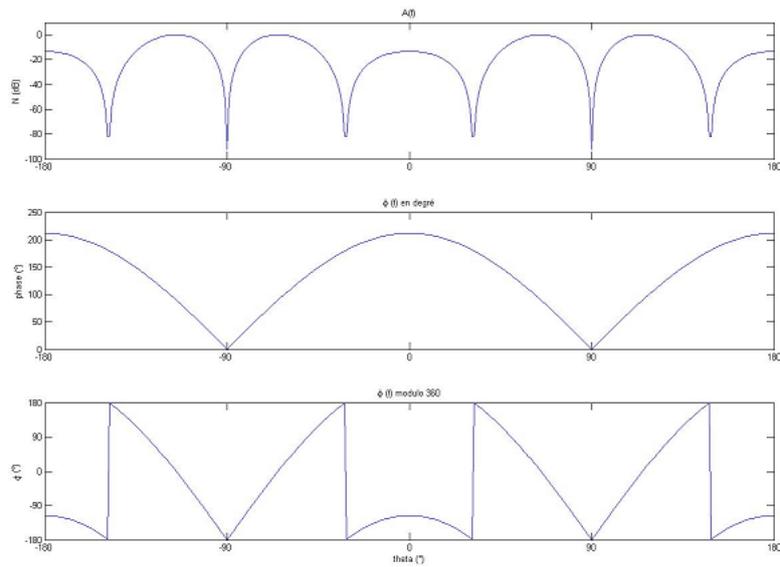


FIGURE 6.6 – Illustration des interférences spatiale pour un écartement d de 3,4 m. Variation de l’amplitude et évolution de la phase en fonction de l’angle θ pour une fréquence f de 100 Hz et une distance entre les enceintes d de 3m

Le logiciel de prédiction MAPP ONLINE PRO de MEYER SOUND¹⁶ incorpore l’ensemble de ces lois physiques pour l’appliquer à des modélisations d’enceinte. Ainsi, on peut facilement observer les interférences dans l’espace.

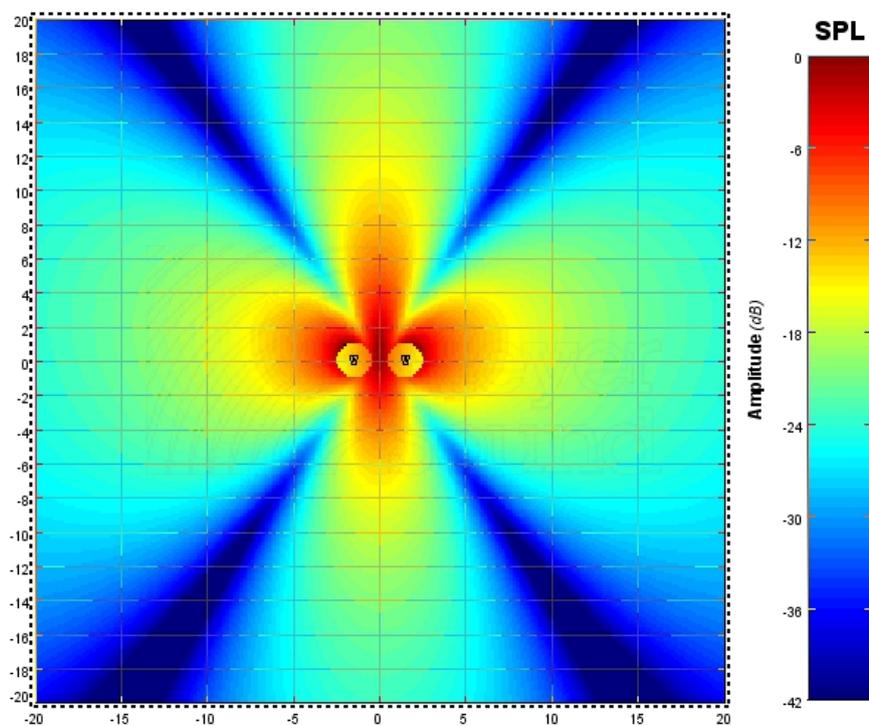


FIGURE 6.7 – Représentation de la couverture pour deux sources espacées de 3 m à 100 Hz

16. www.meyersound.com

6.2 Le retard électrique

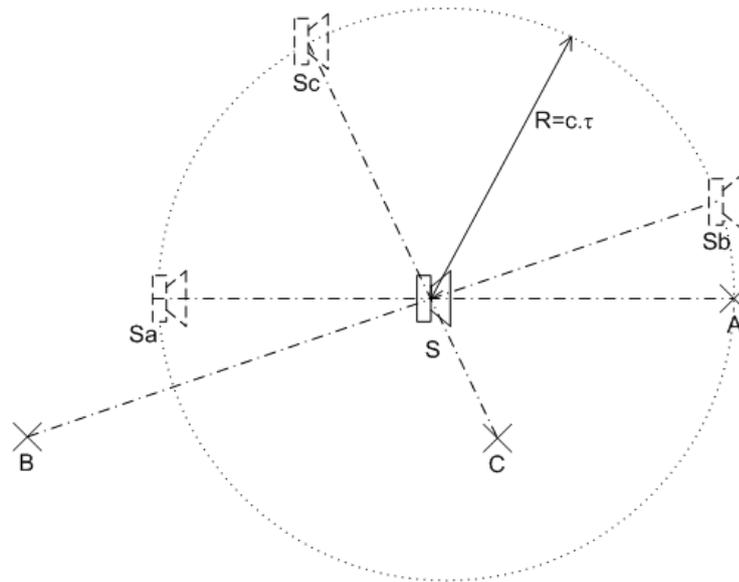


FIGURE 6.8 – Représentation des sources images conséquences d'un retard électrique

Lorsqu'on applique un retard dans le signal électrique, servant à alimenter à une enceinte, on peut considérer que la source physique est remplacée par une source virtuelle. Et la position de la source virtuelle dépend de la position de l'auditeur.

Il faut bien différencier le déplacement d'une source et l'application d'un retard : l'application du retard repositionne virtuellement une source selon la position de l'auditeur.

Par contre, l'expression de ce retard n'implique pas la position de l'auditeur :

$$\forall A(R, \theta) : S_A = \sin(2\pi f(t + \tau))$$

6.3 Association d'un décalage spatial et temporel : directivité cardioïde

Si on associe un décalage de position et un retard électrique, on peut contrôler la directivité d'un réseau constitué de plusieurs enceintes.

6.3.1 Configuration et modélisation

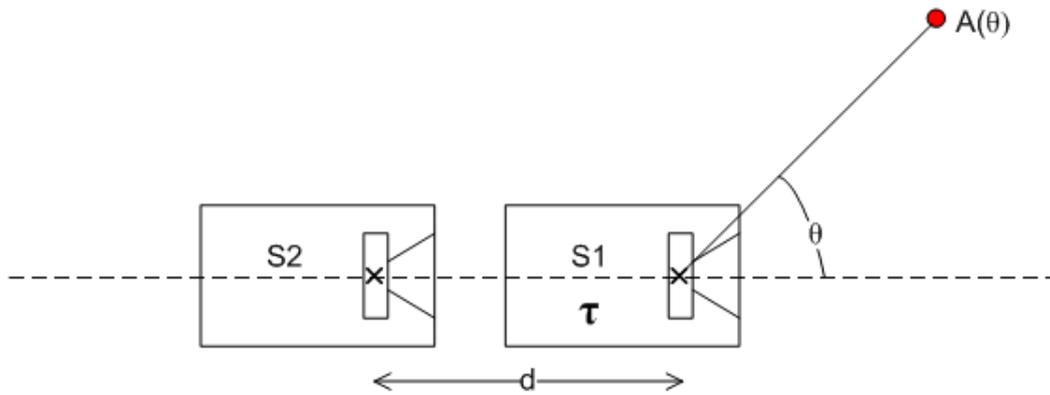


FIGURE 6.9 – Configuration cardioïde de type avec une enceinte devant une autre

Considérons d suffisamment petit pour que le niveau sonore, en tout point de l'espace, soit identique pour S1 et S2. Les deux sources sont alimentées par le même signal avec un décalage spatial d et un retard τ pour la source S1.

$$\text{Alors, } S_A = S_1(\tau) + S_2(d, \theta) = \sin(2\pi f(t + \tau)) + \sin(2\pi ft + \frac{d \cos(\theta) \times 2\pi}{\lambda})$$

En choisissant $d = c \times \tau$, en se plaçant dans l'axe (0°), le retard compense la distance qui sépare les deux enceintes. A cet endroit, la différence de phase sera nulle, et l'addition des signaux maximum.

$$\text{On a alors : } S_A = \sin(2\pi f(t + \tau)) + \sin(2\pi ft + \cos(\theta) \times \frac{c \times \tau \times 2\pi}{\lambda}) \text{ et } f = \frac{c}{\lambda}$$

$$\text{D'où } S_A = \sin(2\pi ft + 2\pi f\tau) + \sin(2\pi ft + \cos(\theta) \times 2\pi f\tau)$$

La différence de phase est donc :

$$\phi = 2\pi f\tau - \cos(\theta) \times 2\pi f\tau = (1 - \cos(\theta)) \times 2\pi f\tau$$

$$\text{En degré, on a : } \varphi = (1 - \cos(\theta)) \times 360 f\tau$$

La phase évolue selon deux variables : l'angle et la fréquence.

Pour l'angle, le facteur $1 - \cos(\theta)$ dessine une cardioïde quand θ varie entre -180 et 180 .

θ	$\cos(\theta)$	φ
0°	1	0
45° (-45°)	0,71	$0,29 \times 360 f\tau$
90° (-90°)	0	$1 \times 360 f\tau$
135° (-135°)	-0,71	$1,71 \times 360 f\tau$
180° (-180°)	-1	$2 \times 360 f\tau$

Cela confirme que pour $\theta = 0^\circ \Leftrightarrow 1 - \cos(0^\circ) = 0$, quelque soit la fréquence, il n'y a pas de différence de phase entre les deux sources : l'addition est totale.

Par contre, pour $\theta = 180^\circ \Leftrightarrow 1 - \cos(180^\circ) = -2$, l'atténuation est maximum. On a alors $\varphi(f, \theta = 180^\circ) = 2 \times 360f\tau$.

Dans ce cas, on retrouve des interférences de fréquence centrale f_1 tel que :

$$\varphi(f_1) = 180^\circ \Leftrightarrow 2 \times 360\tau f_1 = 180$$

$$\text{D'où } f_1 = \frac{1}{4\tau}$$

On peut mettre directement en lien la longueur d'onde avec la distance séparant les deux enceintes ($f_1 = \frac{c}{\lambda_1}$ et $\tau = \frac{d}{c}$).

$$\text{D'où } d = \frac{\lambda_1}{4}$$

En disposant deux enceintes l'une derrière l'autre, écartée d'une distance d (entre les faces avants), et en retardant l'enceinte avant de $\tau = \frac{d}{c}$, on obtient des interférences modulées par la fonction cardioïde : $1 - \cos(\theta)$. La première annulation à l'arrière a lieu à la fréquence f_1 dont la longueur d'onde λ_1 est égale au quart de la distance d .

6.3.2 Mise en place.

La mise en place et les mesures sont effectuées dans un dépôt avec deux enceintes METRIX SUB. L'écartement est de 1,06 m et l'enceinte de devant est retardée de 3,11 ms. Aucun traitement n'est appliqué aux enceintes excepté un filtre numérique passe-bas de -6 dB par octave (ordre 1) à 1 kHz.

Dans les basses fréquences, on considère que les obstacles dont les dimensions sont inférieures à la longueur d'onde sont négligeables. Néanmoins, on peut observer sur la figure 6.10 l'effet sur la réponse fréquentielle lorsqu'on place une enceinte juste devant une autre.

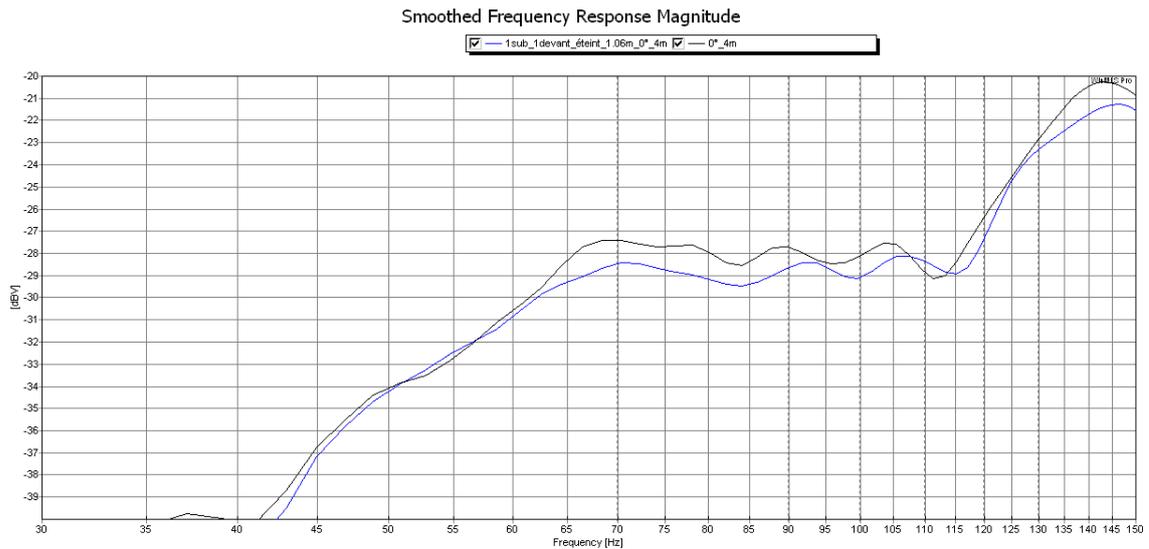


FIGURE 6.10 – Modification de la réponse fréquentielle d’un METRIX SUB avec un METRIX SUB devant

Même si on perd au maximum qu’un décibel, le fait d’aligner les enceintes diminue légèrement le niveau et modifie la courbe de réponse de l’enceinte seule.

En choisissant un écartement de 1,06 m et un retard de 3,11 ms on cherche à obtenir une annulation à 80 Hz.

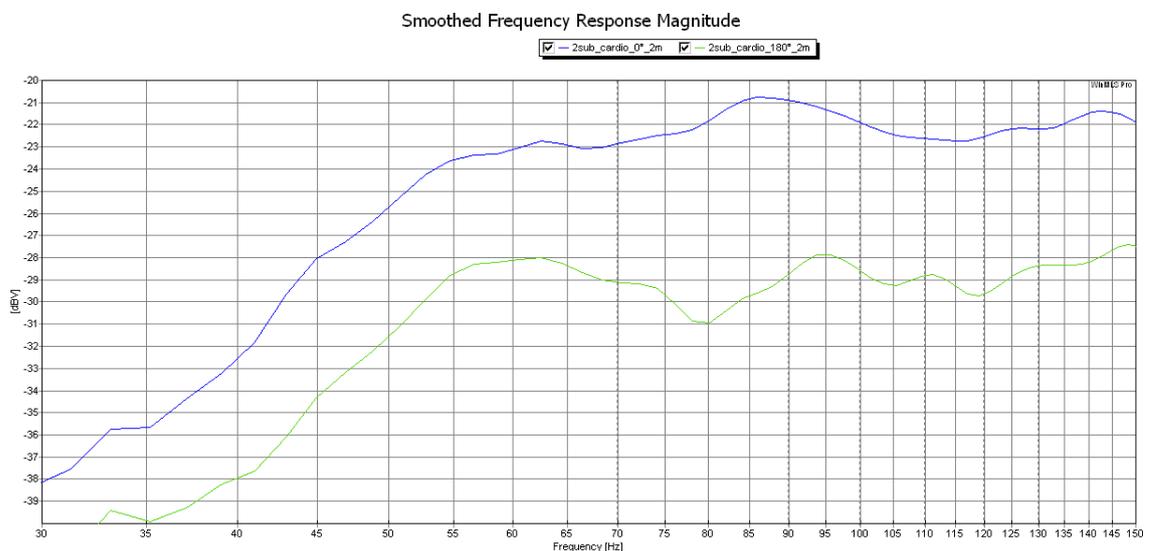


FIGURE 6.11 – Réponse fréquentielle obtenue avec un système composé de deux METRIX SUB écartés de 1,06 m avec un retard de 3,11 ms pour l’enceinte avant

Les résultats de la mesure sont cohérents avec la théorie. Il faut néanmoins souligner deux points importants.

- Les mesures concernant la directivité de l'enceinte nous ont montré qu'on perd jusqu'à 6 dB à 180° pour une enceinte seule.
- On observe effectivement une réjection arrière plus importante à 80 Hz, mais qui n'est que de 3 dB, ce qui est moins efficace que la modélisation des interférences qui nous montre une réjection à plus de 100 dB à l'arrière. Ce phénomène s'explique par le fait que les mesures sont effectuées dans une pièce, ce qui limite l'atténuation à l'arrière.

7 Différentes utilisations de la directivité cardioïde

7.1 End-fire : la directivité cardioïde par l'alignement de plusieurs enceintes

Le procédé d'end-fire est celui montré dans la section précédente. En utilisant deux enceintes et un retard, on obtient une fréquence centrale d'annulation. On peut améliorer le système en augmentant le nombre d'enceintes. Le principe revient à créer une antenne, comme pour les microphones à directivité canon utilisés en prise de son principalement dans le domaine du cinéma.

L'ajout d'enceintes nous permet d'obtenir plus de pression à l'avant ainsi que différentes distances et retards entre les enceintes, ce qui rajoute des fréquences d'annulation à l'arrière.

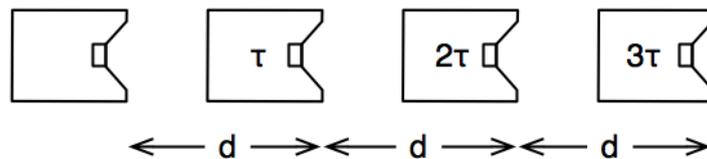


FIGURE 7.1 – Schéma d'implantation pour le end-fire avec quatre enceintes



FIGURE 7.2 – Placement pour la mesure du end fire.

La mesure de cette configuration est réalisée avec quatre enceintes SPEKTRIX SUB espacées de 1,2 m (entre les faces avant). Lors de cette mesure, on est sur un parking, on s'affranchit donc de beaucoup de phénomènes de réflexion qui ont lieu à l'intérieur. Pour évaluer le retard, nous avons effectué une mesure dans l'axe. Chaque enceinte était alimentée tour à tour, ainsi nous avons trouvé un retard de 4,2 ms. D'après les calculs, pour un écartement de 1,2m le retard aurait dû être de 3,5 ms. La différence de 0,7 ms s'explique par la modification de la réponse temporelle de la charge de l'enceinte. L'enceinte SPEKTRIX SUB fait 0,84 m de profondeur. Dans notre cas, l'arrière d'une enceinte et l'avant de l'autre ne sont donc écartés que de 0,36 m. Cette proximité crée une charge acoustique devant l'enceinte qui diffère de la charge acoustique sans obstacle à proximité ou en champ libre.

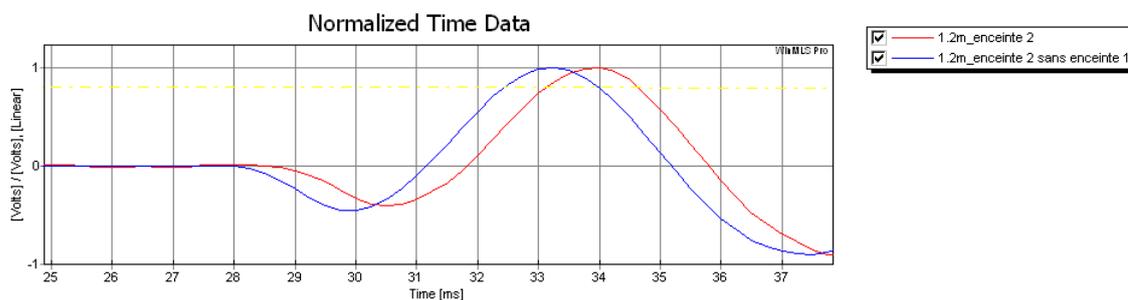


FIGURE 7.3 – Modification de la réponse temporelle en positionnant une enceinte (non alimentée) devant l'autre

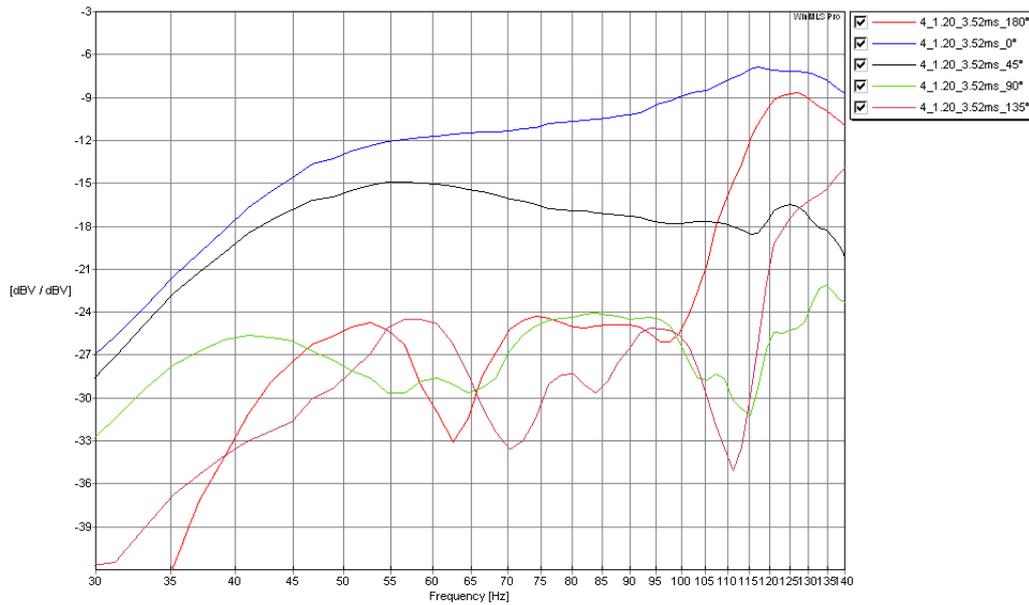


FIGURE 7.4 – Réponse fréquentielle et directivité de 4 enceintes (espacées de 1,2 m et retardées de 3,52 ms) en utilisant le principe du end-fire

L'écartement de 1,2 m (qui implique théoriquement un retard de 4,25 ms) correspond à une fréquence d'annulation théorique de 70,83 Hz pour 180°. On trouve ici, une fréquence de 60 Hz car le retard est de 3,52 ms. On a une perte importante à partir de 35 Hz, cela s'approche de la demi-fréquence d'annulation à 30 Hz créé par le end-fire à 4 enceintes. Par contre, au-delà de 105 Hz, on a moins de 6 dB de différence entre l'avant et l'arrière.

7.2 Front-back : la directivité cardioïde par l'empilement d'enceintes

Pour un gain de place, on peut faire le choix d'empiler les enceintes. Si l'empilement est fait avec une enceinte tournée vers l'avant et une autre tournée vers l'arrière, on crée une distance entre les centres acoustiques des deux enceintes. Dans ce genre de configuration, le fait de retourner une enceinte ne change pas la polarité.



FIGURE 7.5 – La configuration Back-Front-Front-Front pour les enceintes SB118 L-ACOUSTICS (www.l-acoustics.com)

La définition du centre acoustique est assez complexe. Pour les enceintes bass-reflex ou à charge symétrique, il est difficile de définir un point qui serait le centre du haut-parleur d'une enceinte close, surtout pour les basses fréquences. La meilleure façon de définir une distance entre les deux se fait par la mesure du retard de propagation. Mettre en phase la création d'une onde provenant des deux haut-parleurs (l'un face à nous et l'autre retourné) nous permet de définir la distance séparant les centres acoustiques.

C'est cette distance qui conditionne la fréquence d'annulation à l'arrière. Pour des enceintes de grave de dimension importante, on peut arriver à une différence de distance de l'ordre du mètre ce qui nous permet d'obtenir une annulation à l'arrière autour de 50 Hz.

Par contre, un haut-parleur de grave n'est pas totalement directif. Son niveau et sa réponse en fréquence varient selon l'angle. Contrairement au concept du end-fire, dans cette configuration, le rayonnement et la réponse en fréquence des sources ne sont pas identiques. Pour cette raison, afin de faire fonctionner tous les haut-parleurs au maximum, il est préférable d'utiliser deux ou trois enceintes dans le bon sens contre un haut-parleur retourné. Ainsi, le niveau obtenu à l'arrière des enceintes frontales est équivalent au niveau des enceintes retournées. On peut alors considérer les sources identiques et la réjection arrière est maximale.

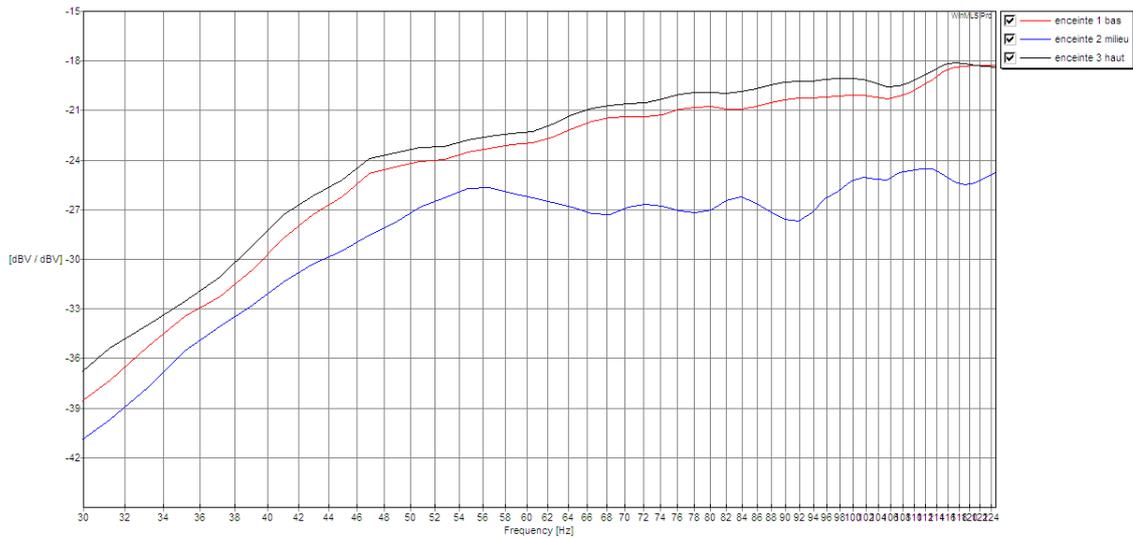


FIGURE 7.6 – Réponse fréquentielle dans l’axe (0°) de chaque enceinte (SPEKTRIX SUB) composant un empilement de type Front-Back-Front

Nous avons mesuré la réponse fréquentielle de chaque enceinte pour la mise en place d’un système Front-Back-Front. La figure 7.6 nous montre que l’enceinte retournée n’a pas le même niveau et la même réponse en fréquence que les autres enceintes.

Dans le cas de cet empilement (une enceinte retournée au milieu de deux enceintes droites), on trouve à l’arrière un niveau proche pour les deux enceintes droites par rapport à l’enceinte retournée.

Le délai inséré qui semblait optimal avec la mesure est de 3,9 ms. Il correspond à un écartement théorique du centre acoustique entre une enceinte droite et une enceinte retournée de 0,33 m. Cette distance reste proche des dimensions de l’enceinte (0,64 m).

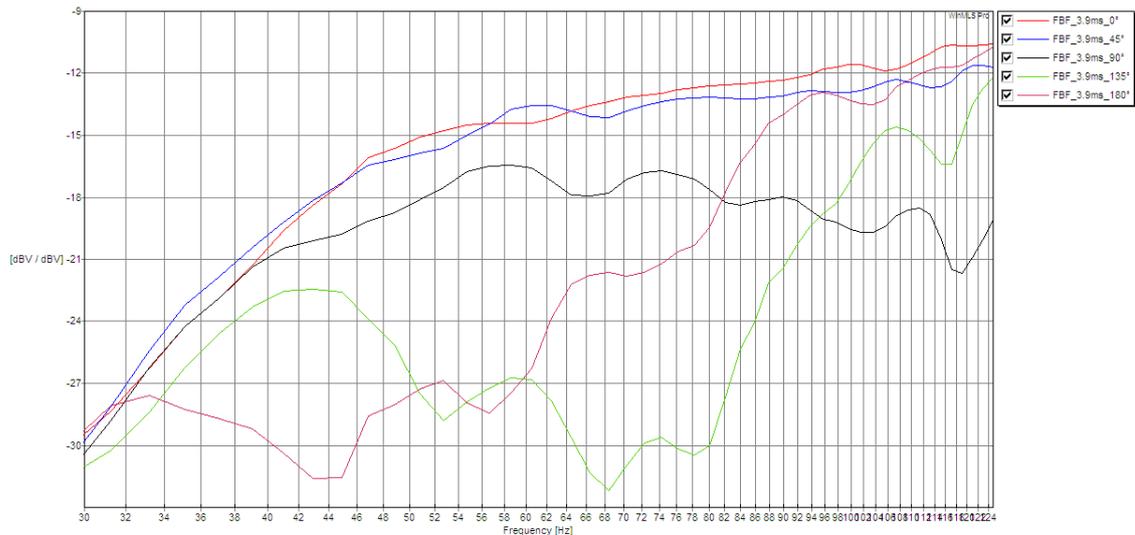


FIGURE 7.7 – Configuration Front-Back-Front avec trois SPEKTRIX SUB et un retard de 3,9 ms

Par rapport au rayonnement d'une enceinte seule, l'atténuation à l'arrière atteint 6 dB. L'atténuation est maximale vers 44 Hz qui correspond à la fréquence centrale des interférences obtenues. Les enceintes étant très proches pour cette configuration, la fréquence centrale des interférences est située plus haut. Les résultats obtenus sont assez différents de la configuration end-fire avec deux enceintes (figure 6.11). Cela s'explique par la différence entre les enceintes utilisées et le fait que ces mesures sont effectuées à l'extérieur.

8 D'autres possibilités pour le contrôle de la directivité

8.1 Les enceintes cardioïdes

Il existe des enceintes travaillant dans les basses fréquences qui ont un rayonnement cardioïde. Le modèle proposé par NEXO S.A.¹⁷ est une enceinte à gradient de pression qui utilise deux haut-parleurs traités indépendamment pour une enceinte. Une correction temporelle reprend le principe énoncé dans la conception d'un système à directivité cardioïde (figure 8.1).

17. www.nexo-sa.com

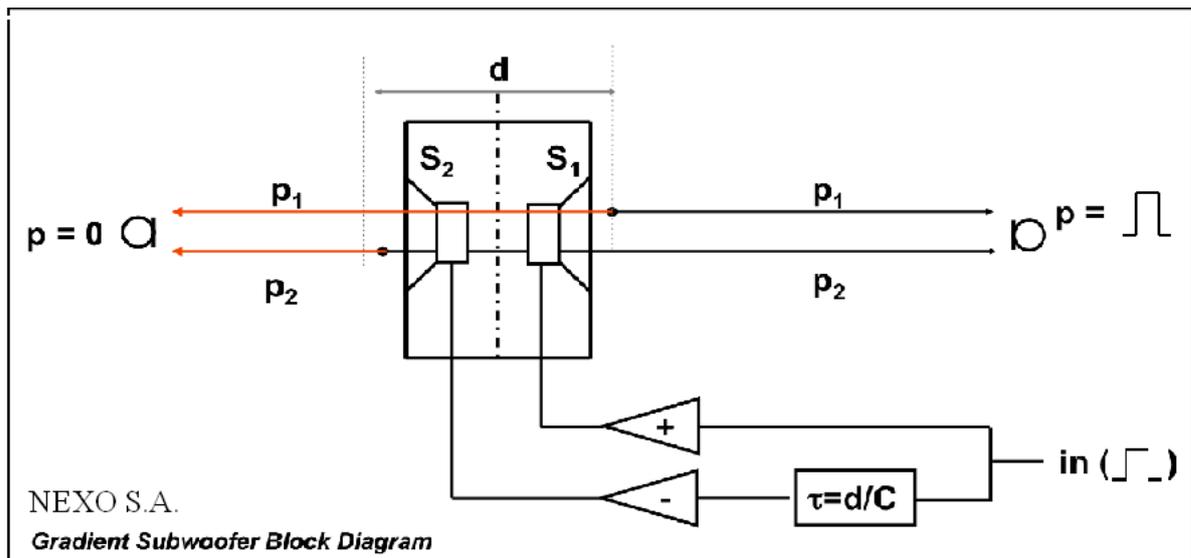


FIGURE 8.1 – L’enceinte à gradient de pression de NEXO S.A.

À l’avant, ces enceintes permettent un gain de + 5 dB (par rapport à une enceinte avec un seul haut-parleur) et la réjection à l’arrière est de - 15 dB. Les enceintes présentant ces caractéristiques peuvent être caractérisées comme enceintes « transportables ». Descendant moins bas, elles sont donc peu utilisées pour des sonorisations à très large audience. Pour des problèmes de moyens, ces enceintes n’ont pu être testées. Cependant, il faut distinguer une enceinte cardioïde d’un système cardioïde. L’enceinte est plus compliquée à réaliser, car on ne dispose pas de deux sources indépendantes (comme deux enceintes pour l’association end-fire) mais d’une construction à partir de deux haut-parleurs. Mais le temps et les moyens pris pour sa réalisation permettent de maîtriser complètement la directivité dans tous les cas de figure. Cela allège le travail pour concevoir un système cardioïde.

8.2 L’association de deux monopôles : la directivité cardioïde sur l’ensemble du spectre

8.2.1 Configuration et modélisation

En cherchant à obtenir une directivité cardioïde sur l’ensemble du spectre, on peut s’intéresser aux microphones. En effet, certains microphones à directivité sélective utilisent l’association de deux membranes pour modifier la directivité. Pour l’obtention d’une cardioïde, il faut associer à parts égales un monopôle et un dipôle.

Pour étendre ces résultats aux basses fréquences, il faudrait une enceinte qui ait un rayonnement dipolaire. Il est possible d’obtenir ce rayonnement avec un haut-parleur

nu (création d'un court circuit acoustique). Néanmoins, cette solution demanderait d'utiliser une enceinte avec un très faible rendement.

Une publication parue dans le journal de l'AES en septembre 1997 [14] propose une solution pour appliquer ce résultat à deux monopoles. L'article s'appuie sur la modélisation d'un dipôle et d'un monopôle pour ensuite le simplifier en champ lointain à l'association de deux monopoles. Ainsi, un traitement du signal permet d'obtenir une réjection arrière théorique de -20 dB sur l'ensemble du spectre.

Soit $S(\omega)$ le signal d'entrée, le champ sonore d'un monopôle est :

$$P_m(r, \theta, \omega) = S(\omega) \frac{\exp(-jkr)}{r}$$

En champ lointain, dans les conditions d'onde plane ($kr \ll 1$), le champ sonore d'un dipôle est :

$$P_m(r, \theta, \omega) = S(\omega) \frac{\exp(-jkr)}{r} \cos(\theta)$$

Pour obtenir une directivité cardioïde, il faut associer un monopôle et un dipôle à parts égales.

$$\text{Alors } P_m(r, \theta, \omega) = S(\omega) \frac{\exp(-jkr)}{r} (1 + \cos(\theta))$$

Entre -180° et 180° , le facteur $1 + \cos(\theta)$ dessine une cardioïde.

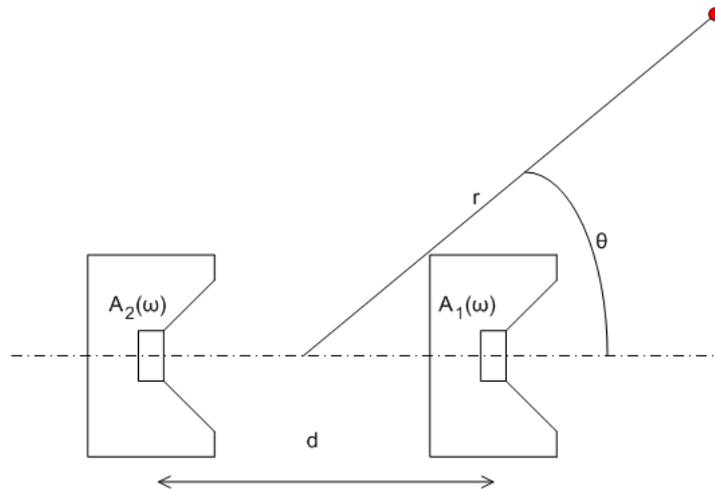


FIGURE 8.2 – Schéma de configuration pour l'association de deux monopoles

Si l'on dispose deux monopoles séparés de d et en appliquant à chaque enceinte un signal d'entrée A_1 et A_2 , on retrouve dans les conditions d'ondes planes en champ lointain ($d \ll r$ et $kr \ll 1$) :

$$P(r, \theta) = \frac{\exp(-jkr)}{r} (A_1 + A_2 + \frac{1}{2}jkd(A_1 - A_2) \cos(\theta))$$

En choisissant A_1 et A_2 pour que :

$$P(r, \theta, \omega) = P_m(r, \theta, \omega) \iff A_1 + A_2 + \frac{1}{2}jkd(A_1 - A_2) \cos(\theta) = 1 + \cos(\theta)$$

On trouve :

$$A_1(\omega) = \frac{1}{2}S(\omega) \left[1 + \frac{2c}{jd\omega} \right] \text{ et } A_2(\omega) = \frac{1}{2}S(\omega) \left[1 - \frac{2c}{jd\omega} \right]$$

Le traitement à imposer aux deux enceintes est alors :

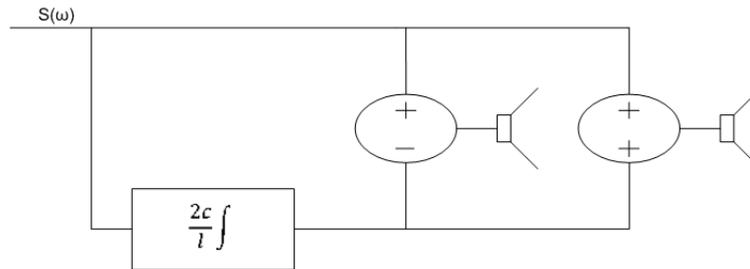


FIGURE 8.3 – Représentation du traitement à appliquer entre deux enceintes pour obtenir dans le cadre de l’association de deux monopôles une directivité cardioïde

Nous ne détaillerons pas plus le procédé qui est expliqué en détail sur la publication[14].

Dans la réalisation, l’intégrateur pose des problèmes dans le cadre de traitement numérique du signal. On peut néanmoins utiliser des filtres de phase, mais selon leurs constructions, ces filtres nécessitent une latence. Dans le cadre d’un concert, on ne peut pas s’autoriser à trop retarder notre signal. La méthode de traitement du signal utilisé pour la réalisation ne sera pas détaillée ici. La mise en place de ce traitement est faite par le constructeur et nous n’avons pas de détail la concernant.

8.2.2 Mesure

La société DV2¹⁸, en lien avec le constructeur ADAMSON propose dans les processeurs de diffusion des préréglages pour obtenir un rayonnement cardioïdes. Conçus à partir de la théorie énoncée ci-dessus, les résultats sont assez proches de ceux exposés dans la publication.

18. www.dv2.fr

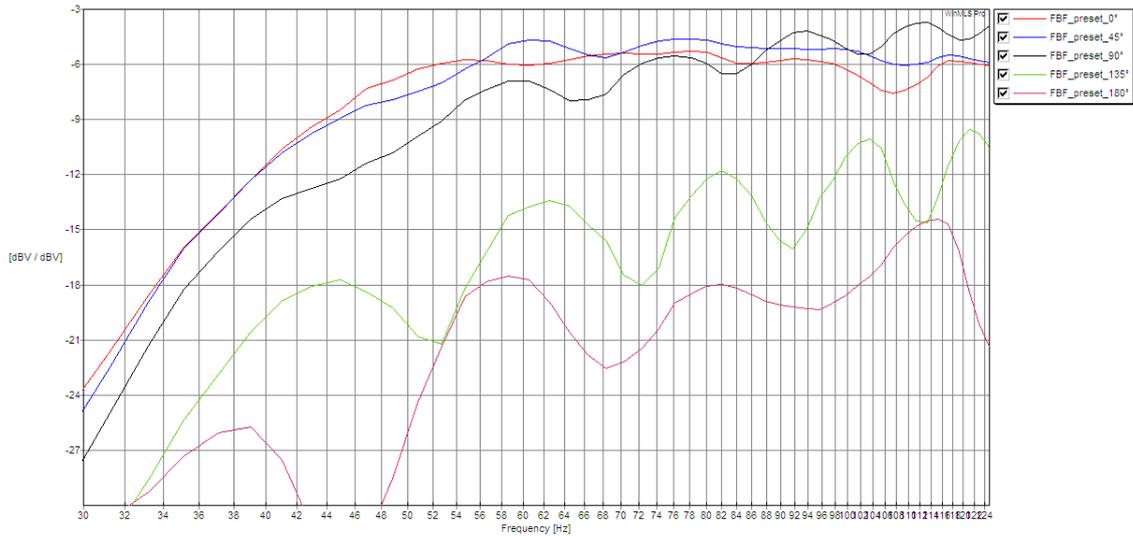


FIGURE 8.4 – Réponse de trois enceintes SPEKTRIX SUB traitées par le préreglage cardioïde ADAMSON/DV2

L'avantage de cette méthode par rapport aux méthodes précédentes est que la réjection arrière n'est pas centrée sur une fréquence, mais elle est présente sur l'ensemble du spectre. La figure 8.4 nous montre que cette disposition modifie peu la directivité dans l'axe (entre 0° et 90°). Et que la réjection arrière par rapport à la configuration Front-Back-Front (figure 7.7) est plus homogène et dépend moins de la fréquence. La réponse fréquentielle à l'arrière présente des ondulations qui correspondent moins à des interférences.

8.3 L'arc-sub

8.3.1 Définition

L'arc-sub est un concept assez vaste qui regroupe plusieurs techniques. Le but est de créer une diffusion homogène sur une large surface proche de la scène. Ici, on ne cherche pas à annuler l'onde arrière, mais à obtenir la meilleure couverture latérale en terme de puissance et d'homogénéité.

La base de l'arc-sub est d'aligner les enceintes. Ainsi, on garde un maximum d'énergie, notre système reste cohérent mais il est très directif.

Ensuite, l'écartement des enceintes nous permet d'obtenir une zone encore plus large en utilisant le même nombre d'enceintes. Par contre, il est nécessaire de rester dans certaines limites pour que notre système reste cohérent. L'endroit le plus critique étant la position à 90° du système, si on écarte les enceintes de plus de $\frac{\lambda_{min}}{2}$, on

obtiendra des interférences. Selon l'angle d'ouverture qu'on souhaite obtenir, on peut augmenter la distance entre les enceintes en suivant la formule :

$$d_{90^\circ} < \frac{\lambda_{min}}{2} \implies d_\theta < \frac{\lambda_{min}}{2} \cos(\theta)$$

Pour finir, on applique des retards électriques aux différentes enceintes. L'ajout de retard nous permet de recréer virtuellement un arc. Les retards peuvent être appliqués sur chaque enceinte ou sur des groupes d'enceintes (selon les moyens à disposition). Mais cet arc virtuel n'est valable que lorsqu'on se place en face du système. La figure 8.5 nous montre comment l'image d'une enceinte retardée évolue selon la position.

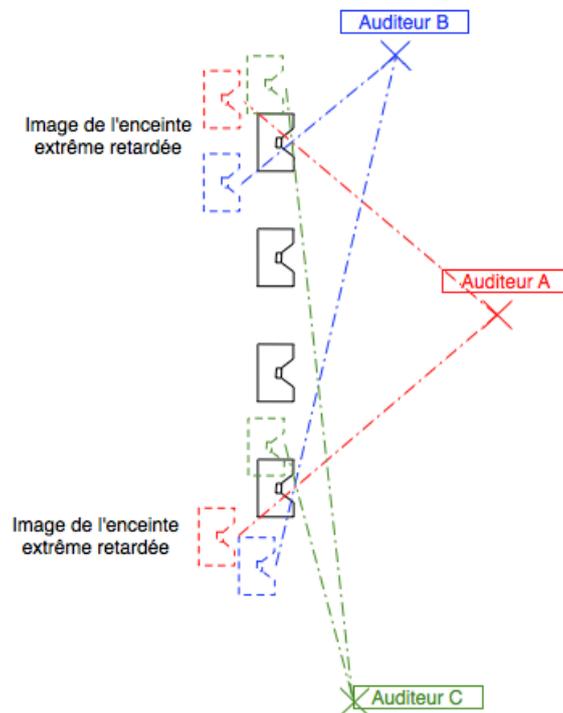


FIGURE 8.5 – Evolution de l'image virtuelle induite par un retard en fonction de la position

L'application d'un retard homogène tout le long de la ligne permet d'orienter le front d'onde. Pour obtenir une couverture latérale la plus homogène, retarder les enceintes extérieures permet :

- de réduire le lobe présent au centre du système ;
- d'augmenter la cohérence aux extrémités du système ;

8.3.2 Arc-sub réel et arc sub virtuel

La création d'un arc-sub se fait principalement de façon empirique. Ils sont aussi conçus pour répondre à une situation donnée. Il est en effet compliqué de se repré-

sender le retard selon la position. À partir du logiciel MAPP ONLINE PRO, nous allons étudier les configurations possibles.

Pour procéder, nous allons utiliser huit enceintes, espacées de 2 m et nous allons comparer un changement de position et un retard temporel autour de 50 Hz.

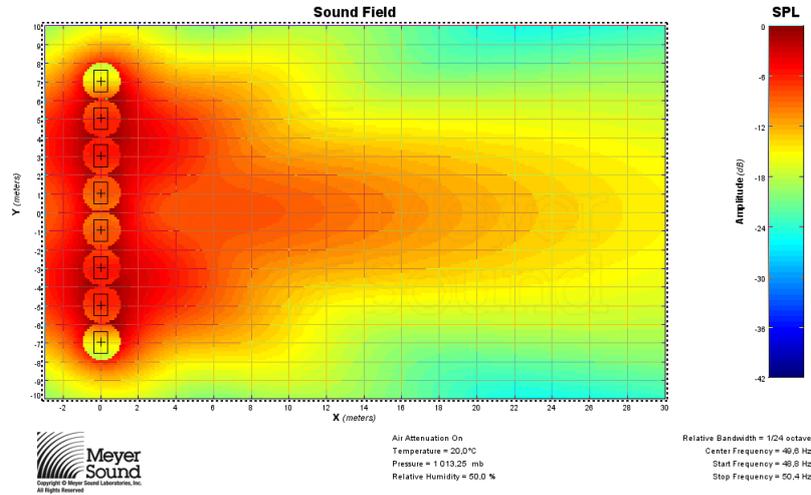


FIGURE 8.6 – Rayonnement de huit enceintes placées en ligne, espacées de 2 m et sans traitement

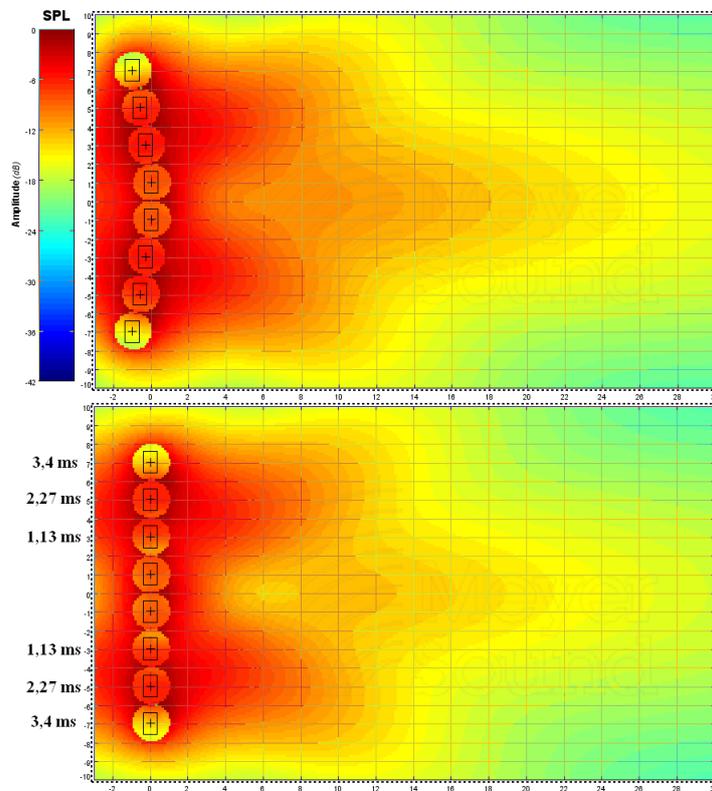


FIGURE 8.7 – Rayonnement de huit enceintes placé en arc réel (enceintes extrêmes reculées de 1 m) et en arc virtuel (enceintes alignées et les extrêmes sont retardées de 3,4 ms)

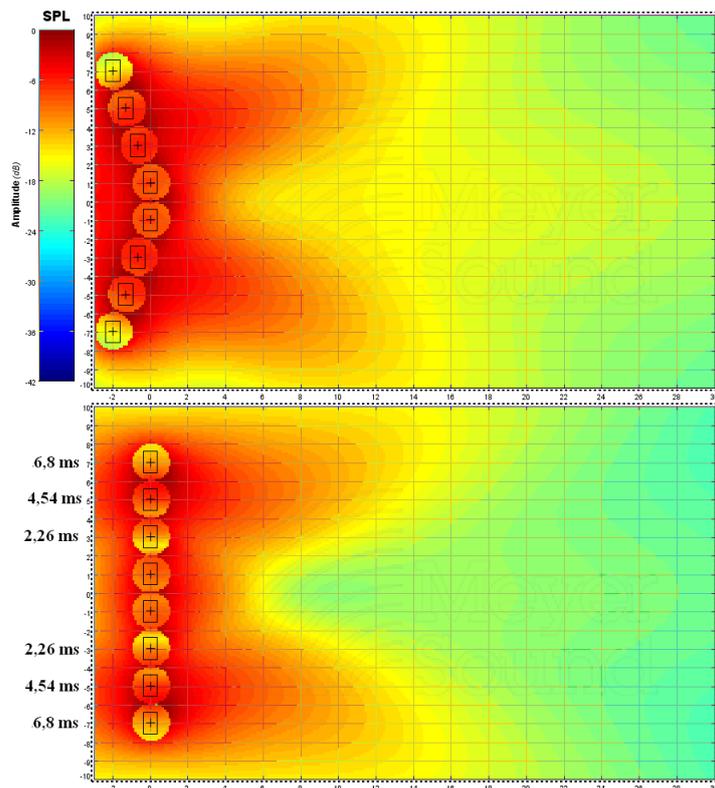


FIGURE 8.8 – Rayonnement de huit enceintes placé en arc réel (enceintes extrêmes reculées de 2 m) et en arc virtuel (enceintes alignées et les extrêmes sont retardées de 6,8 ms)

L'ensemble de ces figures (8.6,8.7,8.8) nous montre l'objectif de l'arc-sub : homogénéiser la couverture latérale au détriment de la portée.

8.3.3 Mesure

Lors des mesures nous avons cherché à observer l'effet des trois étapes lors de la création d'un arc-sub.

- L'écartement entre les enceintes.
- L'insertion du retard.
- La différence entre le retard et le décalage spatial.

Les mesures montrées dans ce paragraphe sont effectuées dans un cercle de 6 m de diamètre partageant son centre avec celui du système. Les enceintes utilisées sont les SPEKTRIX SUB d'ADAMSON.

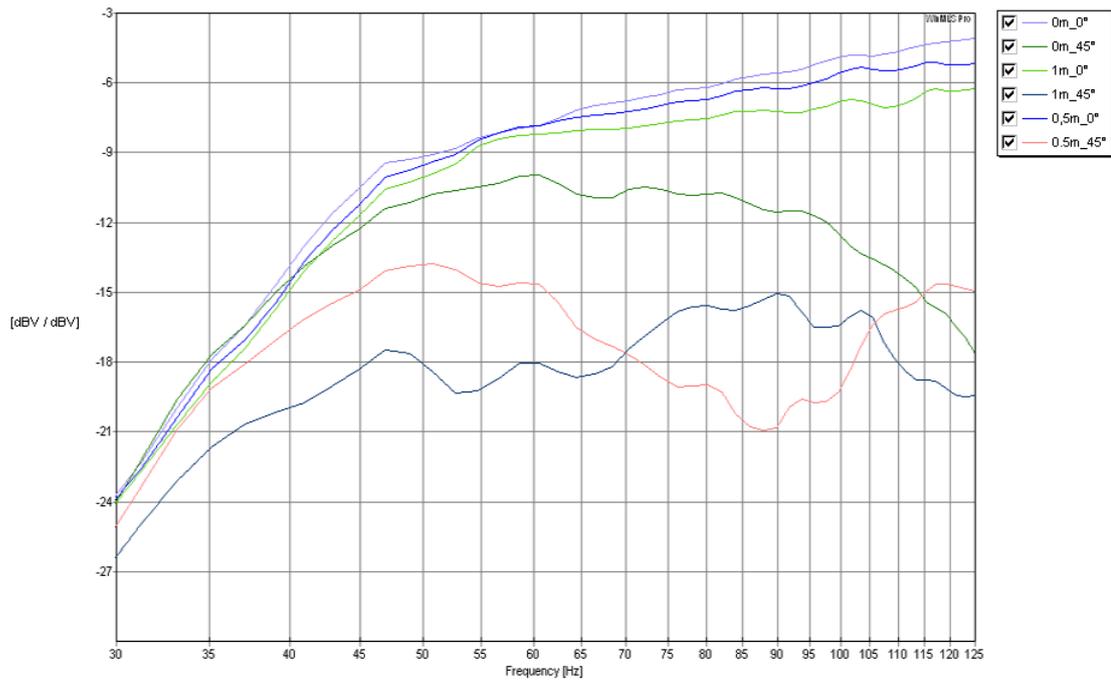


FIGURE 8.9 – Directivité de quatre enceintes en fonction de l'écartement

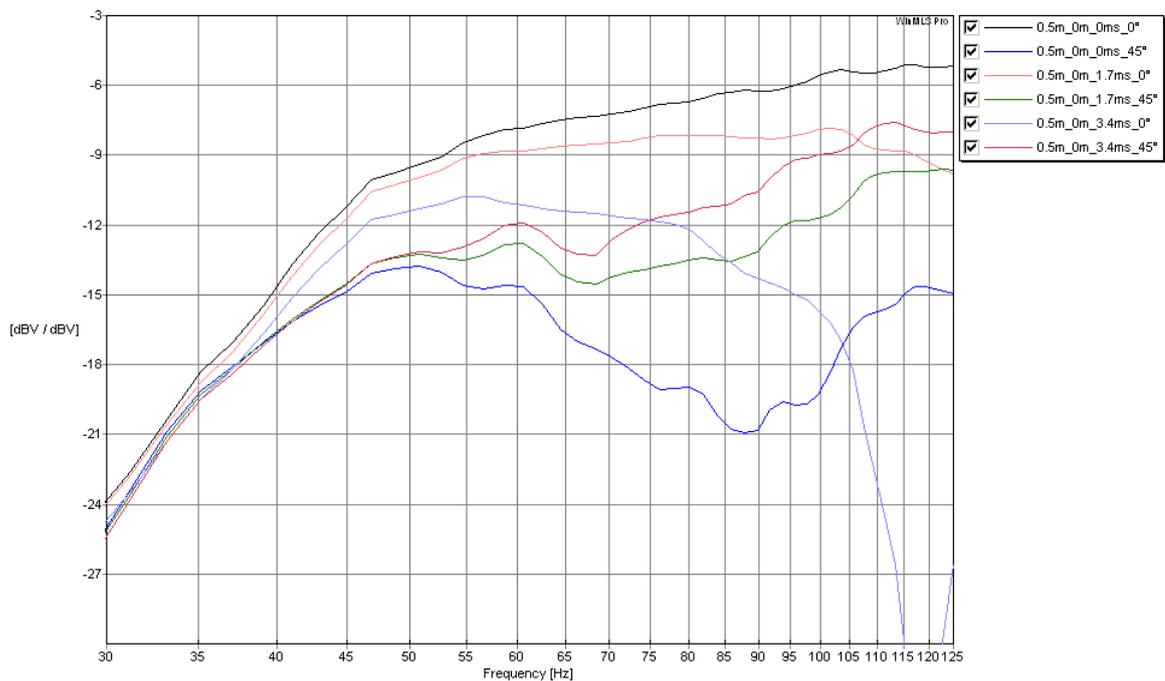


FIGURE 8.10 – Directivité de quatre enceintes en fonction du retard

Nous avons déjà parlé de l'avantage du retard temporel pour la mise en place d'un système cardioïde. Dans ce cas, on peut s'intéresser à la différence entre un décalage spatial et un retard temporel. Pour l'arc-sub, le retard peut poser un problème. La figure 8.11 nous montre la différence lors de mesures entre les deux systèmes.

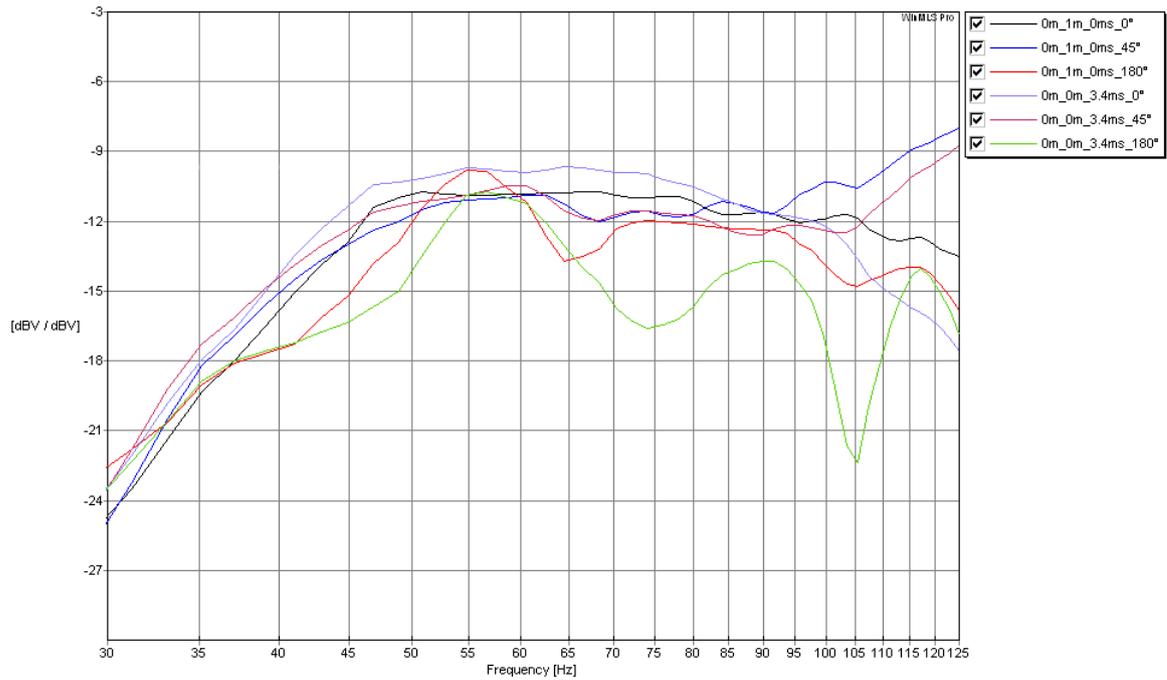


FIGURE 8.11 – Comparaison de la directivité entre le déplacement et l’insertion d’un retard

On observe que globalement, l’insertion d’un retard fait perdre quelques décibels, et rend notre système plus directif.

Il existe de nombreux moyens de maîtriser la directivité d’un système de diffusion travaillant dans les basses fréquences. La liste contenu dans cette partie n’est pas exhaustive. Même si ce travail n’a pas été réalisé ici, on peut éventuellement combiner plusieurs techniques.

Troisième partie

Le positionnement des enceintes et l'optimisation

9 Positionnement des enceintes

9.1 Enceintes accrochées

9.1.1 Lien avec le système large bande

Pour des lieux importants, le système large bande principal est souvent accroché. Cette méthode permet d'améliorer la couverture, et aussi d'utiliser de longues grappes d'enceintes qui ne pourraient pas être équilibrées au sol.

Positionner le système de diffusion basse fréquence à proximité du système large bande permet de s'affranchir de certains problèmes. Même si les deux systèmes travaillent dans des bandes de fréquence distinctes, ils ont la même contribution autour de la fréquence de coupure. Avoir ainsi les deux systèmes très proches permet d'obtenir les mêmes variations de phase autour de cette fréquence de coupure pour l'ensemble de la salle.

9.1.2 Les réflexions sur le sol

Le sol est le seul obstacle que l'on rencontre dans tous les cas de figure (qu'on soit dans un événement en extérieur ou en intérieur). Et par son omniprésence, on a tendance à oublier son effet.

Le sol peut être composé de différents matériaux plus ou moins réfléchissants. Le béton est l'un des plus réfléchissants alors que la moquette ou l'homme sont plutôt amortissants. Dans le domaine des basses fréquences, la plupart des matériaux sont assez réfléchissants dans les basses fréquences. Pour les basses fréquences, le coefficient d'absorption est faible et varie assez peu en fonction des matériaux (entre 0 et 0,3 pour 125 Hz).

Pour qu'une surface soit un obstacle, ses dimensions doivent être importantes devant la longueur d'onde. Le sol est l'une des plus grandes surfaces qu'on peut rencontrer,

c'est donc celle qui aura le plus d'impact pour les basses fréquences. Pour 25 Hz, la longueur d'onde est de 13,6 m, c'est une dimension minimale qui est fréquemment rencontrée pour le sol.

Dans le cadre de l'étude acoustique géométrique, en considérant le sol comme plat, infini et parfaitement réfléchissant, on peut l'assimiler à un miroir. Il y a alors création d'une source, image de la source réelle. Ces deux sources vont interagir entre elles et le niveau sera maximum lorsque les deux distances les séparant d'un point de l'espace seront identiques. C'est le cas au niveau du sol qui correspond à l'axe de symétrie entre la source réelle et la source image. Lorsqu'on se décale en hauteur, on observe une différence de distance entre cet endroit et la source réelle et son image. Cette différence est source d'interférence.

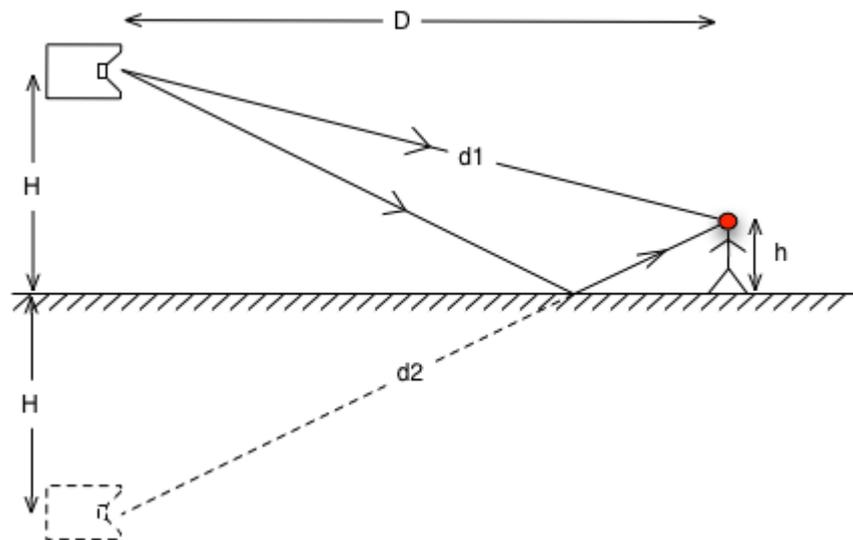


FIGURE 9.1 – Schéma de l'effet de sol pour les enceintes accrochées

On peut calculer cette différence de distance :

$$\Delta d = d_2 - d_1 = \sqrt{(H + h)^2 + D^2} - \sqrt{(H - h)^2 + D^2}$$

Si on prend la hauteur moyenne d'une personne (1,6 m), pour des enceintes accrochées à 5 m, à une distance D de 5 m, on trouve une différence de distance de 2,23 m. Ce qui correspond à un filtrage en peigne de fréquence 76 Hz. Pour 10 m, la fréquence centrale du filtrage est à 120 Hz.

L'effet de sol est problématique et on ne peut pas s'en affranchir lorsqu'on accroche les enceintes. En augmentant la hauteur, on augmente la fréquence centrale du filtrage. On peut donc chercher à limiter cet effet en obtenant une fréquence centrale du filtrage en peigne au-delà à la fréquence de coupure du système pour la zone à couvrir. La variation du coefficient d'absorption avec la présence du public va aussi permettre de limiter cet effet.

9.1.3 Effet sur la couverture

Accrocher les enceintes permet une couverture plus homogène. L'intervalle des distances séparant les personnes les plus proches des personnes les plus loin est plus faible. Par rapport à un système au sol, on est plus éloigné, on a donc moins de niveaux. En comparaison, le niveau est plus élevé pour les derniers rangs, car on a moins de différence de distance.

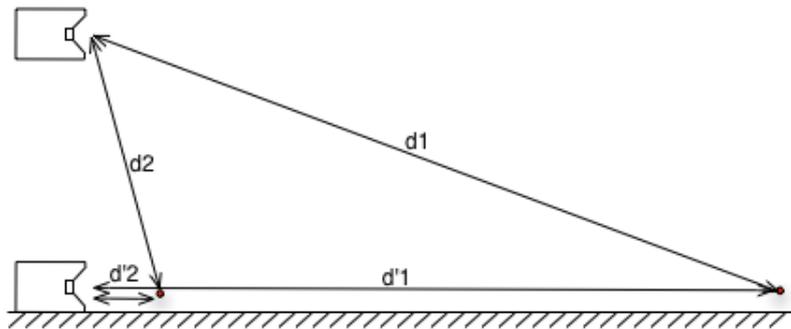


FIGURE 9.2 – Schéma de la variation des distances en fonction du positionnement des enceintes

On voit sur la figure 9.2 que $d_1 - d_2 < d'1 - d'2$. Cette inégalité s'applique aussi dans le cas où le sol n'est pas plat mais incliné, ce qui permet d'améliorer la visibilité pour les rangs les plus éloignés.

9.2 Enceinte(s) posée(s)

9.2.1 Différence de marche par rapport au système large bande

En positionnant les enceintes de grave au sol, on a deux positions distinctes entre le système au sol et le système large bande généralement accroché. Dans ce cas, des problèmes se posent autour de la fréquence de coupure. Dans cette zone fréquentielle, les deux systèmes ont la même contribution. Selon la position du spectateur, on observe alors une variation du rapport de phase entre les deux systèmes. Tant que la différence de phase ne dépasse pas $\pm 90^\circ$ (360° périodiques), on observe une addition, mais au-delà, les deux systèmes s'additionnent mal, ou s'annulent.

Les fréquences de coupure sont compliquées à mettre en place et choisies par les constructeurs. Nous n'aborderons pas cette problématique ici et nous supposons qu'autour de la fréquence de coupure, le système dédié aux graves a la même réponse en phase que le système large bande.

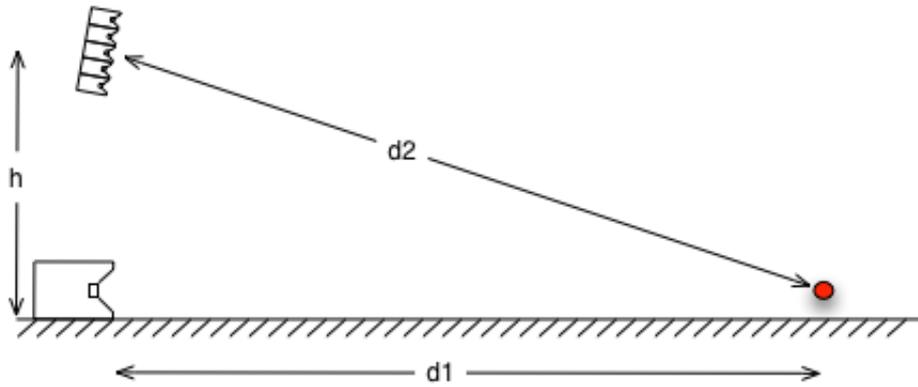


FIGURE 9.3 – Représentation schématique de l'association d'un système large bande accroché et d'un système de grave au sol

On considère que deux systèmes n'interfèrent pas s'il y a une différence de niveau de 20 dB entre les deux. Les filtres de coupure utilisés pour séparer le système large bande du système de grave sont à 24 dB par octave. Dans ce cas, l'idéal serait d'obtenir une phase identique sur une octave et demie autour de la fréquence de coupure pour l'ensemble du public. Pour une fréquence de coupure centrée sur \$f\$, la différence entre \$d_1\$ et \$d_2\$ doit être inférieure à $\pm \frac{\lambda}{2}$ pour rester dans un écart de phase correct.

$$\Delta d = d_2 - d_1 = \sqrt{d_1^2 + h^2} - d_1$$

Prenons une fréquence de coupure de 100 Hz, $\frac{\lambda}{2} = 1,7$ m. Dans le cas d'un système large bande à 6 m de haut, de premier rang situé à 2 m et de dernier rang situé à 20 m, Δd varie entre 4,3 m et 0,9 m. Alors, les deux systèmes sont quasiment en phase pour les derniers rangs uniquement.

L'insertion d'un retard dans l'enceinte placée au sol nous permet de rattraper la différence de distance.

$$\Delta d = d_2 - (d_1 + c\tau) = \sqrt{(d_1 + c\tau)^2 + h^2} - d_1 - c\tau$$

On peut insérer un retard de 9 ms qui correspond à un décalage virtuel de 3 m avec les valeurs obtenu précédemment. Alors Δd varie entre 0,5 m et 0,35 m. Ainsi, les systèmes sont quasiment en phase sur toute la longueur du public.

Dans le cas de deux systèmes de grave accrochés, la mise en phase doit être obtenue sur l'ensemble de la bande de fréquence de travail. C'est impossible à réaliser dans ce type de système et on observera l'effet dans l'étude de cas autour de la figure 13.6.

9.2.2 L'effet de sol

Positionner les enceintes au sol permet de gagner de la puissance. Le gain est maximal dans le cas d'un sol parfaitement réfléchissant, on gagne alors + 3 dB en pression.

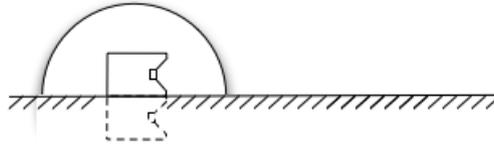


FIGURE 9.4 – Modélisation de l'effet de sol : source image ou rayonnement en demi-sphère

L'effet de sol peut être considéré de deux manières.

- L'enceinte ne rayonne plus dans l'ensemble de l'espace, mais dans un demi-espace. Pour la même force produite, la surface est diminuée de moitié (demi-sphère), on gagne en pression acoustique.
- En acoustique géométrique si on considère le sol comme une surface totalement réfléchissante, on peut alors construire une source image symétrique de notre source réelle par rapport au sol. Ainsi, on multiplie le nombre de source.

Dans ce cas, les deux sources (réelles et images) sont alignées et cohérentes. On forme ainsi une ligne double de la ligne réelle (voir section 5)

9.2.3 Influence du public

Dans le cas du positionnement au sol, un obstacle peut s'opposer à la propagation des ondes générées : le public. Le coefficient d'absorption du public est de l'ordre de 0,2 à 125 Hz. Par contre, il est difficile de mesurer les dimensions du public. Modéliser le public et son influence est assez complexe. Il est aussi difficile mettre en oeuvre des mesures avec le nombre de spectateurs qu'on peut avoir sur un évènement.

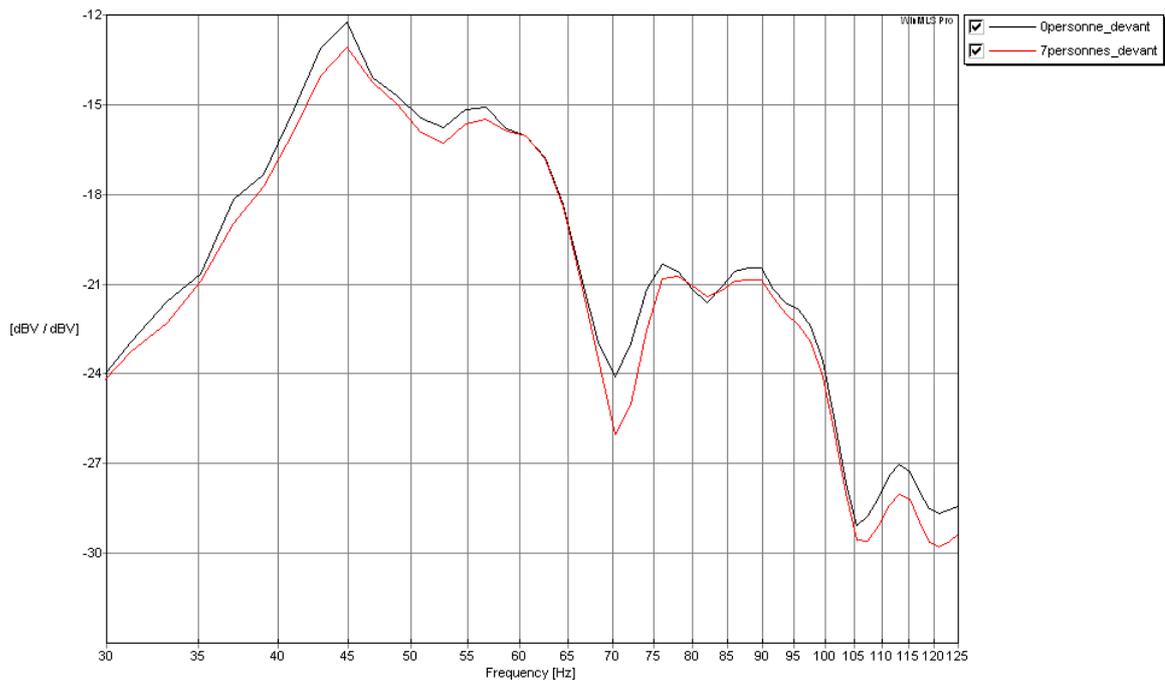


FIGURE 9.5 – Modification de la réponse fréquentielle d’une enceinte avec sept personnes devant

Nous avons effectué une mesure avec sept personnes devant une enceinte couchée (figure 9.5). On observe une légère baisse de niveau (moins de 1 dB) présente dans une importante partie du spectre. Cette mesure est prise dans un lieu comportant un mur situé à environ 9 m derrière l’enceinte, ce qui crée la déformation autour de 70 Hz. On remarque que le creux autour de cette fréquence est amplifié par la présence de personnes devant l’enceinte. Cela s’explique par la réflexion du son émis par l’enceinte sur les personnes et qui va amplifier les interférences induites par le mur situé derrière l’enceinte.

10 Interaction entre des systèmes d’enceintes

10.1 Couplage entre systèmes à la verticale

10.1.1 Deux systèmes travaillant dans la même bande de fréquence

Lorsque l’on place deux systèmes sur un plan vertical, on peut observer des interférences dans la profondeur. Si on considère le sol plat, le seul endroit au sol équidistant d’un système au sol et d’un système accroché est situé à l’infini.

En insérant un retard dans le traitement du système au sol, on peut ramener cet endroit dans le plan des spectateurs. Le retard est choisi pour une position, on ne peut pas avoir les deux systèmes en phase sur l'ensemble de la bande de fréquence utile et dans tout l'espace. Il y a deux choix pour la position où l'on effectue la mesure pour mettre en phase les deux systèmes.

Le premier choix est de faire la mesure à la régie. Ainsi, les deux systèmes sont en phase pour le mixeur, qui est la personne qui a besoin de la meilleure écoute. Ce n'est pas le plus judicieux pour plusieurs raisons.

- Le mixeur a besoin de travailler dans de bonnes conditions, mais le système de diffusion est destiné au public. Choisir la position du mixeur comme référence peut ne pas aller dans le même sens que créer la meilleure diffusion possible pour l'ensemble du public.
- Des problèmes acoustiques peuvent apparaître autour de cet endroit. Nous préciserons cet effet plus tard.

Le second est de pratiquer la mesure dans la zone où la densité de public est la plus importante. On cherche alors à rendre le système cohérent pour le maximum de personnes.

Dans la pratique, il faut prendre des précautions lors de la mise en place de la mesure pour connaître la valeur du retard. L'acoustique du lieu est à prendre en compte. Si on place notre microphone dans une zone perturbée (présence de réflexion importante par exemple), notre mesure sera faussée. On n'observera plus les systèmes, mais la salle excitée par les systèmes.

Il faut que le retard respecte la période des deux systèmes. En effet, on peut visualiser une phase identique pour les deux systèmes en ayant un décalage d'une ou plusieurs périodes. Calculer la différence de distance à l'endroit choisi nous permet d'obtenir l'ordre de grandeur du retard à insérer.

On peut alors effectuer l'alignement en deux temps. Pour commencer, on peut faire coïncider les réponses impulsionnelles issues des deux mesures. L'élargissement de la bande passante du système de grave permet de mieux visualiser la réponse impulsionnelle. En supprimant ou en augmentant le filtre passe-bas, on obtient ainsi une impulsion plus précise. On peut ensuite procéder à la mise en phase en alignant les courbes de réponse en phase des deux systèmes.

Pour observer comment deux systèmes peuvent interagir, nous avons élevé une enceinte SPEKTRIX SUB à 5,9 m du sol. Nous avons ensuite effectué la mise en phase pour le point de mesure à 6 m. Ainsi mis en phase, les deux systèmes s'additionnent parfaitement à 6 m.



FIGURE 10.1 – Implantation de la mesure d'un système au sol couplé avec un système en hauteur

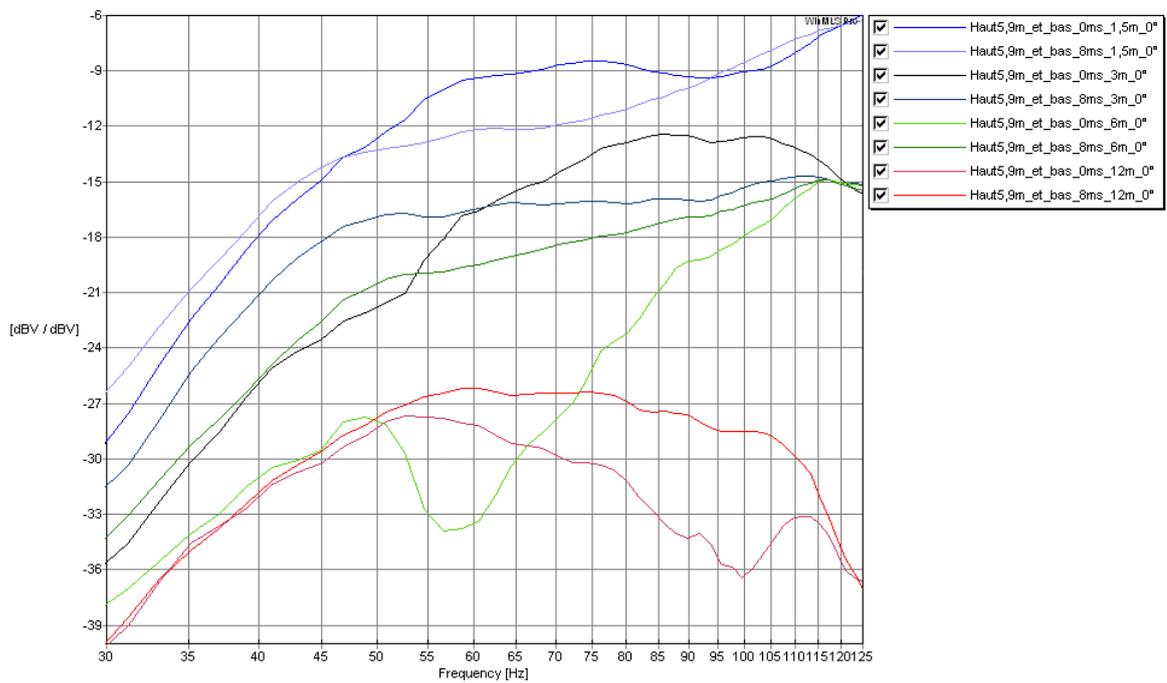


FIGURE 10.2 – Influence du retard sur l'association des deux systèmes

Mais on observe dans la figure 10.2 qu'il s'agit bien d'un compromis, et que l'addition est meilleure pour les positions proches lorsqu'on supprime le retard.

10.1.2 Deux systèmes complémentaires

Dans certains cas, on peut choisir d'utiliser deux systèmes (un au sol et l'autre accroché) en répartissant leur bande fréquentielle de travail. On peut limiter le système au sol à la partie extrême du spectre et le système accroché aux fréquences basses situées juste au-dessus de la bande de fréquences dans laquelle travaillent les enceintes au sol.

On cherche ainsi à :

- utiliser le système au sol pour obtenir une pression importante dans l'extrême grave pour le public proche de la scène ;
- utiliser le système accroché en empilant un maximum d'enceintes permet de gagner en directivité. On peut ainsi couvrir une partie du public plus lointain pour des fréquences suffisamment basses ;

Dans la pratique, on retrouve assez peu ce cas. Il n'existe pas d'enceinte adaptée à cette configuration. Les « petites » enceintes pourraient être accrochées, mais elles manquent de puissance. Et accrocher les « grosses » enceintes basse fréquence n'est pas intéressant, car on ne les ferait pas travailler dans la gamme de fréquences optimales.

Par contre, les enceintes large bande sont de plus en plus imposantes, car les constructeurs augmentent le diamètre des haut-parleurs. Ainsi, on se retrouve aujourd'hui avec des enceintes comportant des haut-parleurs de 15 voir 18 pouces (respectivement 38 et 46 cm). On peut donc faire fonctionner ces systèmes jusqu'à 40 Hz.

10.2 Couplage et interférence entre systèmes à l'horizontale

10.2.1 Gauche et droite

Un système gauche droite peut être utile dans le cadre d'une diffusion stéréophonique. C'est un cas que l'on retrouve assez fréquemment pour les systèmes de diffusion de conception simple et/ou de moyenne taille (pour moins de 5000 personnes).

Pour la partie basse fréquence du système de diffusion, le positionnement à gauche et à droite est cohérent avec le système large bande disposé en stéréo. Ce placement ne permet pas une reproduction stéréophonique, mais sert à couvrir l'ensemble de l'ouverture. Cette disposition permet aussi de dégager l'espace visuel dans le cadre de la scène.

Selon le positionnement et la directivité des systèmes, on peut observer deux zones différentes. Un espace ou un système est prépondérant par rapport à l'autre. Dans cette zone, il n'y a pas d'interaction entre les systèmes. Dans la deuxième zone, les deux systèmes fonctionnent en parallèle. La différence de niveau entre les deux ne permet pas d'en négliger un par rapport à l'autre. Ainsi, on observera des interférences spatiales dans cette zone. C'est cet espace qui est le plus critique. Lorsqu'on sort des conditions de champ libre, les multiples réflexions vont atténuer les interférences spatiales.

Utiliser des enceintes (ou des systèmes) directives permet de réduire la zone de recoupement des deux systèmes. En orientant deux systèmes directifs, la zone d'interférence est réduite. Dans un document de présentation (figure 10.3) , la société NEXO S.A. illustre l'utilisation de système directif dans la mise en place d'un système gauche et droite.

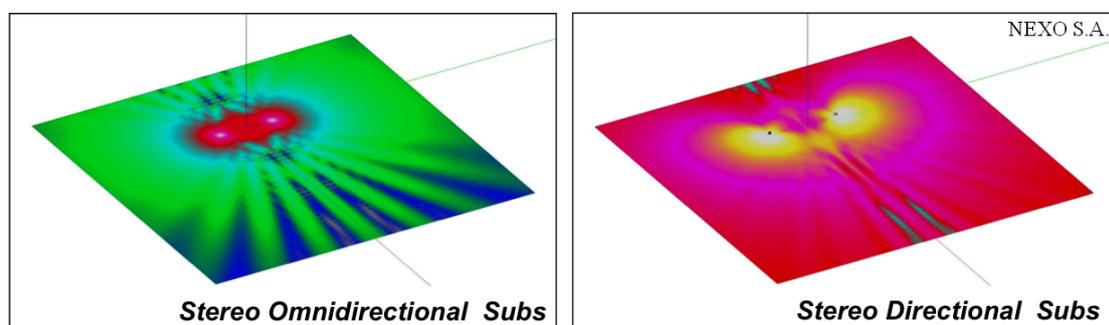


FIGURE 10.3 – Orientation des enceintes dans un système gauche droite (NEXO S.A.)

Le nombre de raies d'interférence est lié à la fréquence et à la distance séparant les deux côtés. Plus la fréquence et la distance augmentent, plus on observe de raie d'interférence. Dans le cas d'un système large bande, les interférences ne sont pas gênantes car le nombre de raies est très important. Dans le cas d'un système travaillant dans les basses fréquences, le faible nombre de raies d'interférence est problématique. On rencontre souvent le cas lorsqu'on se déplace dans un lieu. À certains endroits les graves disparaissent. Le couplage d'un système gauche droite n'est pas le seul responsable de ce phénomène, il y a aussi l'acoustique de la salle qui crée des noeuds et des ventres.

L'axe de symétrie entre les deux systèmes est une ligne qui parcourt le centre de la salle et de la scène. Autour de cette zone, l'addition est maximum, on appelle cette zone la POWER ALLEY (l'allée de puissance). Cette zone peut être problématique.

Le mixeur est normalement situé au centre de la salle, donc dans la POWER ALLEY. Contrairement à la majorité du public, il est situé à un endroit où il y a beaucoup

de graves. Lors de son travail de mixage, il va donc effectuer un dosage lié à sa perception qui ne sera pas optimum pour le reste du public. Il est donc important d'obtenir une diffusion de la meilleure qualité possible pour le mixeur, mais aussi en adéquation avec la diffusion destinée à la majeure partie du public.

10.2.2 Gauche et centre et droite

Pour atténuer les interférences créées par un système gauche droite, on peut ajouter un système au centre.

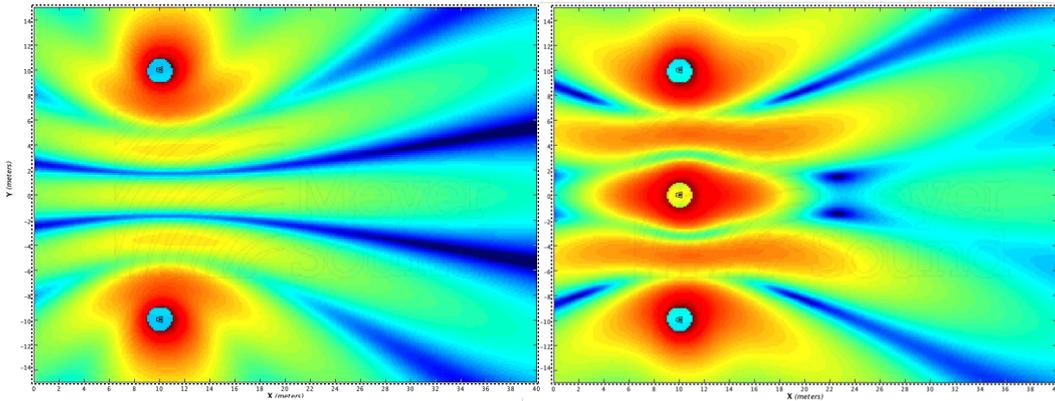


FIGURE 10.4 – Rayonnement à 50 Hz avec un espacement de 20 m entre les enceintes extrêmes d'un système gauche droite et d'un système gauche centre droite

Cette solution permet d'augmenter la puissance et d'atténuer les interférences situées au centre. Mais on reste dans un système très interférentiel. Les raies situées à l'extérieur restent très marquées malgré le système situé au centre. En ajoutant un système au centre, on obtient une couverture suffisamment homogène jusqu'à la limite des interférences extérieures. La POWER ALLEY est favorisée avec ce système, car l'axe médian reste l'axe de symétrie des trois systèmes.

En ajoutant un troisième système, il est plus difficile de modéliser l'association et la figure d'interférence. Il est aussi plus difficile de prédire l'interaction avec la salle.

10.3 Mise en place de rappel

En extérieur principalement, il peut être nécessaire de mettre des systèmes de diffusion en rappels. Un système de rappel consiste à ajouter un système de diffusion au bout d'une certaine longueur pour augmenter la portée de la diffusion.

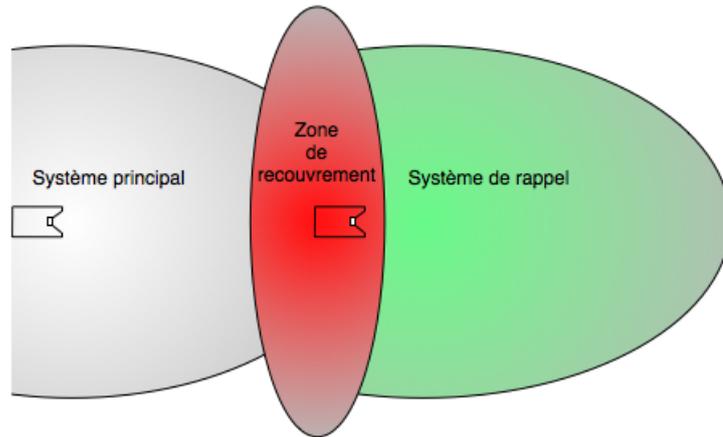


FIGURE 10.5 – Représentation des zones couvertes par un système associé à un système de rappel

Pour mettre en place un système de rappel, il est nécessaire :

- de définir les zones de couverture de chacun des systèmes ;
- de maîtriser la directivité de tous les systèmes mis en place ;

Il est très difficile de régler un système de rappel. Il y a nécessairement une zone que le système principal ne couvre plus et où le système de rappel commence à agir. Dans cette zone de recouvrement, il est difficile d'obtenir une bonne addition. C'est à cet endroit où la localisation va changer en même temps que la source. Le système de rappel a donc besoin d'être retardé pour être en phase avec le système principal. Ce retard est situé autour du temps mis par l'onde sonore pour aller du système principal au système de rappel. Mais les deux systèmes ne peuvent pas avoir une phase identique dans toute cette zone.

Dans le cas des basses fréquences, le contrôle de la directivité est un premier problème. Le système de reproduction des basses n'aura pas la même portée que le système large bande. Pour des moyens pratiques, si on choisit de mettre en place un système de rappel dédié aux basses fréquences, il sera difficile de ne pas avoir un trou dans le grave entre les deux systèmes.

Il est important que le système de rappel soit très directif. Si le niveau est important pour la zone située derrière l'enceinte, les personnes situées à cet endroit auront l'impression que les basses viennent de derrière. La contribution du système principal est plus faible derrière le système de rappel pour les basses fréquences. En effet, on a une décroissance de l'ordre de - 3 dB par doublement de distance pour un système ligne source dans la zone de Fraunhofer alors qu'on est généralement à - 6 dB pour un

système de grave. De plus, les systèmes à rayonnement cardioïde ont dans le meilleur des cas une atténuation limitée à -20 dB à l'arrière. Même si nous localisons mal les basses fréquences, avoir l'impression qu'elles proviennent de l'arrière peut être désagréable lorsqu'on assiste à un concert.

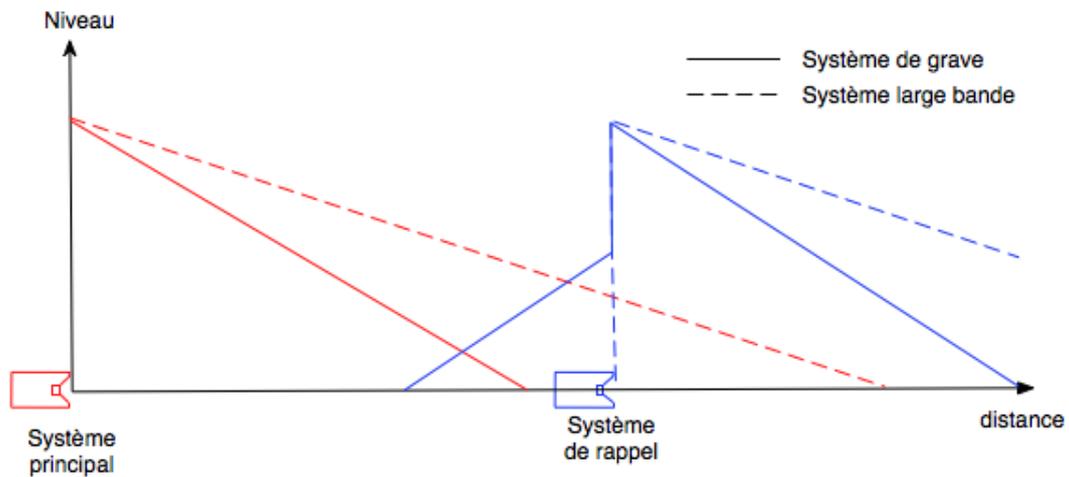


FIGURE 10.6 – Représentation schématisée des différents niveaux mis en jeu lors de l'implantation d'un système de rappel

La mise en place d'un système de rappel dans les basses fréquences est assez compliquée. Les moyens actuels permettent rarement d'utiliser cette technique dans la conception de système de diffusion. Mais les très basses fréquences ne sont pas nécessairement une composante importante pour les spectateurs situés à l'arrière. Nous reviendrons sur cette notion dans la section 11.4.

Quatrième partie

Étude de cas : LE FESTIVAL DES ARTEFACTS au Zénith de Strasbourg



11 Cadre de l'étude de cas

11.1 La programmation

LE FESTIVAL DES ARTEFACTS se produit pendant deux jours au Zénith de Strasbourg. La programmation est assez éclectique.

- On a le premier soir : THE BEWITCHED HANDS ON THE TOP OF YOUR HEAD, EIF-FEL, BRAIN JONESTOWN MASSACRE, IGGY AND THE STOOGES, YUKSEK LIVE, CROOKERS, BLOODEY BEETROOTS DEATH CREW 77 LIVE.
- Et le second soir : NADA SURF, RODRIGO Y GABRIELA, WAX TAILOR, ARCHIVE, CHINESE MAN.

Dans cette programmation, les différents groupes ont des registres musicaux assez variés : rock, pop, électronique, hip-hop ... De même, les formations varient, du simple DJ aux ensembles composés de batterie, guitare basse, clavier, quatre guitares, cinq chants. Les groupes sont d'origine internationale : France, Italie, Angleterre, États-Unis, Mexique.

Au même moment que le festival, on peut lire sur le site internet de **Le Monde** [15] un article concernant LE PRINTEMPS DE BOURGES, une manifestation similaire au FESTIVAL DES ARTEFACTS dans ses dimensions et sa programmation. « Ainsi, comment peut-on améliorer le son et la disposition du Phénix, le chapiteau de 6 800 places ? "Le son, répond Daniel Colling, est fait par les équipes des artistes, le matériel est le même pour tous." Parfait pour le concert de M ou d'Archive, il était approximatif pour Cœur de Pirate, par exemple. "Sans doute parce que le premier a l'habitude des grandes salles, des conditions de festival et que les groupes ou artistes plus jeunes que nous programmons en début de soirée n'ont pas encore acquis ce savoir-faire." »¹⁹

11.2 Le lieu

Le Zénith de Strasbourg est le plus grand Zénith de France, il peut accueillir jusqu'à 12 000 personnes. Le cahier des charges auquel doit satisfaire une salle d'appellation ZÉNITH nous renseigne sur les critères auxquels doit répondre le lieu. Outre les critères de gestion et d'exploitation, le cahier des charges met en place les critères techniques. « Ces critères techniques forment l'ensemble des éléments indispensables à la bonne fonctionnalité du Zénith. Chacun de ces éléments devra obligatoirement être complété et détaillé. En outre, pour tenir compte de particularités locales, des adaptations peuvent être nécessaires. »[16]

Pour la conception d'un système de diffusion, on peut retenir les éléments suivants.

- Architecture : ouverture en plan entre 60° et 75°, la distance du dernier rang ne devra pas être excessive et la présence de balcons et de piliers est totalement exclue.
- Capacité : variable, mais la plus petite configuration ne peut être inférieure à 20% de la capacité maximale.
- Acoustique : la volumétrie doit être étudiée avec un acousticien, temps de réverbération entre 1,6 et 2,1 secondes et isolation sonore.
- Espace scénique : éléments démontables, scène d'une surface de 600 m² entre un et deux mètres de haut. Configuration minimale : 14 m de profondeur et jusqu'à 30 m d'ouverture.

19. Mortaigne V., *Printemps de Bourges, premier bilan*, lemonde.fr, avril 2010[15]

- Plafond technique : de nombreux points d'accroche pouvant supporter jusqu'à deux tonnes, avec au maximum 35 tonnes suspendues.
- Régie : située dans l'axe de la scène à une distance entre la moitié et les 2/3 de la profondeur de la salle.
- Électricité : cellules indépendantes (son, lumière, vidéo et salles) avec une puissance indicative de 150 kVA pour le son.

11.3 L'organisation du festival

Le nombre de personnes intervenants sur le festival est assez important. Il y a de nombreux domaines d'action (administration, buvette, sécurité, cuisine, technique. . .). L'équipe son est composée de trois personnes pour le plateau, deux pour les retours, une pour l'accueil façade et une pour le système (une dernière personne vient en renfort pour le montage et le démontage du système de diffusion). Je me suis rajouté à cette équipe en tant qu'assistant grave. L'équipe technique dispose d'une journée pour installer l'ensemble des équipements. Concernant le son, cette journée est destinée à effectuer de nombreuses tâches.

- L'installation des équipements nécessaires sur scène.
- L'installation de la régie façade et de la régie retour, ainsi que du câblage pour lier la scène à la régie façade.
- L'installation du système de diffusion : enceintes, amplificateurs, câblage.
- La vérification du fonctionnement de l'ensemble des équipements.
- La configuration du dispositif de diffusion sonore : mise en place de la chaîne de traitement, des interfaces de contrôle (synchronisation avec un ordinateur, configuration d'un ordinateur tactile pour contrôler le système en wifi . . .)
- Le réglage et l'optimisation du système de diffusion.

Ces processus sont, quand il est possible, effectués en parallèle. Un gain de temps sur l'installation permet de réduire la journée de travail, et aussi de disposer de plus de temps pour les réglages et l'optimisation. De nombreux problèmes peuvent apparaître à différentes étapes de l'installation, et il s'agit d'être efficace pour les résoudre.

Le festival se déroule sur deux jours au Zénith. La première journée du festival débute en fin de matinée pour les équipes techniques. Il faut accueillir un des groupes pour prérégler le concert du soir. L'ouverture des portes est à seize heures, puis les concerts s'enchaînent jusqu'à quatre heures du matin. Une partie de l'équipe part avant la fin des concerts pour venir en premier le lendemain.

La seconde journée débute dans la matinée. Une seule partie de l'équipe est présente pour l'accueil d'un des groupes (la partie qui est rentrée plus tôt la veille. . .). L'autre partie arrive ensuite. Puis s'enchaîne à nouveau l'ensemble des concerts de quinze heures à une heure du matin. Dès le dernier groupe, les équipes démontent tout le matériel pour laisser un Zénith vide pour le lendemain.

On remarque que malgré un personnel assez important, les journées sont longues et assez chargées. Il s'agit donc de préparer le maximum en amont pour que l'ensemble de l'évènement ait lieu dans les meilleures conditions.

11.4 Les difficultés

Les dimensions de la salle (figure 12.1) font que sans système de rappel additionnel, il est impossible d'obtenir une couverture homogène dans les très basses fréquences sur toute la profondeur. Néanmoins, on peut utiliser le système principal (large bande) pour couvrir le fond de la salle jusqu'à des fréquences suffisamment basses.

Dans notre cas, l'objectif est d'obtenir une pression homogène dans les graves pour l'ensemble du public proche de la scène au détriment d'une couverture la plus lointaine possible. Ce choix est aussi fait par rapport au placement du public. Dans ce cas de concert à placement libre, les personnes proches de la scène cherchent d'un maximum de sensations tandis que les personnes les plus éloignées préfèrent avoir une écoute équilibrée. Focaliser le dispositif de diffusion basse fréquence vers l'avant de scène permet d'obtenir ce type de diffusion.

Le système de reproduction de basse fréquence qui présente les meilleurs paramètres pour notre configuration est une association d'un arc-sub et de groupe d'enceintes situées sur les extrémités. Pour l'arc-sub, les enceintes d'extrêmes graves sont disposées en ligne en avant-scène ce qui offre un résultat très homogène sur le devant de la scène avec une portée limitée. De chaque côté, un nombre important d'enceintes placées au sol et en l'air permet d'avoir un niveau élevé pour le reste de la salle.

Concernant le système de diffusion large bande, le nombre important de sources sonores permet d'avoir une diffusion homogène et cohérente. Même si le système à pleine puissance peut délivrer un niveau très important (de l'ordre de 110 à 115 dB SPL), disposer de beaucoup de sources dans un système ligne source nous permet d'avoir une couverture homogène. Ainsi, baisser le niveau de l'ensemble permet :

- de ne pas arriver aux limites de puissance de fonctionnement des enceintes, ce qui crée des distorsions ;

- de disposer d'une importante plage dynamique, entre le bruit de fond de la salle (principalement le public) et la puissance maximale du système ;

Ce sont ensuite les mixeurs qui accompagnent chaque groupe qui sont les maîtres du son. Ainsi, le volume sonore dépendait des groupes. Sur certains, il ne dépassait pas les 100 dB A, sur d'autre il a pu approcher les 110 dB A...

12 La salle

12.1 Description de la salle

« La salle de spectacle doit, par sa forme et ses aménagements, répondre aux impératifs suivants : une bonne visibilité, une bonne acoustique, un confort suffisant, un respect des normes de sécurité. »²⁰

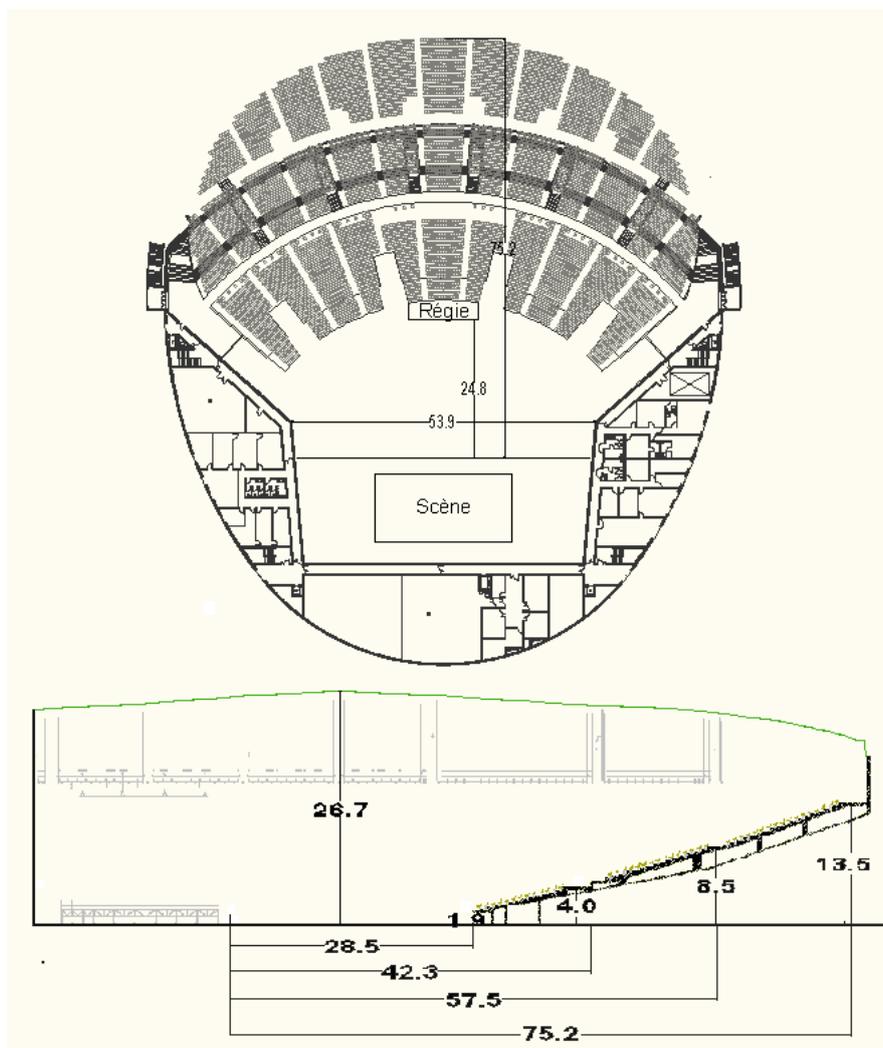


FIGURE 12.1 – Vue de dessus et en coupe du Zénith de Strasbourg

20. [16]

Ces impératifs privilégient l'utilisation des gradins dans l'architecture. Une construction avec des gradins est intéressante pour la diffusion sonore. D'une part, l'irrégularité du sol permet de s'affranchir de problème acoustique comme les modes et le flotteur écho. D'autre part, cela permet de réduire la distance entre les rangées les plus lointaines et le système de diffusion accroché.

La figure 12.1 nous montre les principales dimensions de la salle. Le parterre occupe un tiers de l'espace pour accueillir presque la moitié des spectateurs. L'ouverture est assez importante. Située au dernier rang, la scène paraît très loin.

12.2 Variation des paramètres avec la présence du public

L'optimisation du système de diffusion et les préréglages ont lieu sans la présence du public. Or la présence du public modifie la réponse de la salle. Donc pour tous les réglages, il faut savoir anticiper ce paramètre qui intervient au dernier moment. La présence du public modifie principalement le coefficient d'absorption du sol. On observe aussi des variations de température et d'hygrométrie pendant la soirée. Ces deux dernières changent les propriétés du milieu de propagation et plus directement la célérité du son. Nous n'avons pas pu dissocier ces trois variables, mais nous avons pu mesurer l'impact sur le système de diffusion.

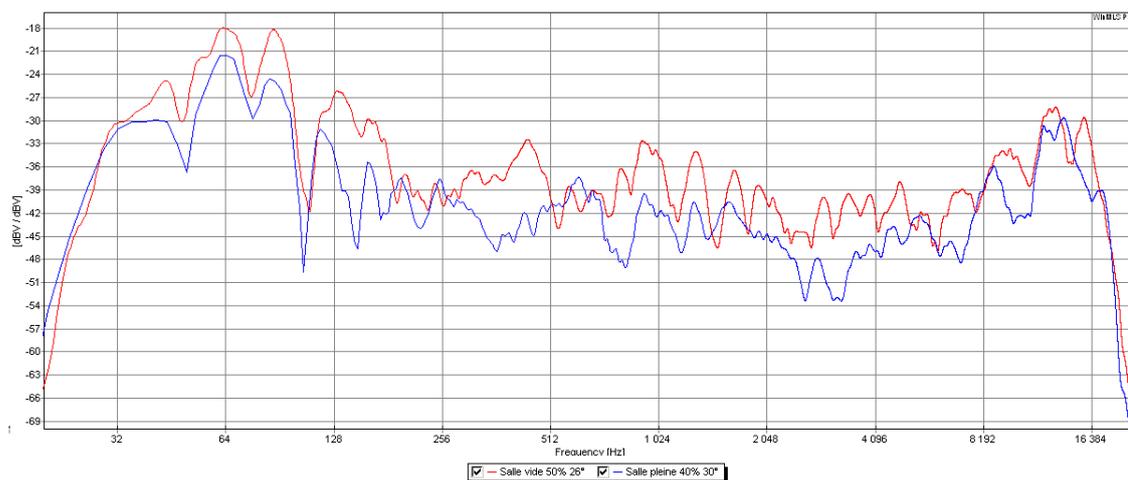


FIGURE 12.2 – Modification de la réponse fréquentielle du système selon la présence du public, l'hygrométrie et la température

Nous avons eu l'occasion d'effectuer une mesure immédiatement après le passage du groupe IGGY AND THE STOOGES. À cet instant, la salle était remplie, la température a augmenté de 4° et l'hygrométrie de 10 %. Les deux mesures de la figure

12.2 ont été effectuées à la régie, à 25 m, avec le microphone à 1,5 m du sol. La présence d'une petite paroi immédiatement derrière la régie ainsi que la hauteur du microphone explique le creux à 100 Hz. On peut remarquer qu'on a globalement perdu quelques décibels. La plupart des bosses indésirables (autour de 140 Hz et 440 Hz principalement) ont été largement atténuées avec la présence du public. La réponse fréquentielle a aussi gagné en linéarité, il y a moins de filtrage en peigne. Ce résultat s'explique par le coefficient d'absorption du public qui est plus important que celui du sol, ce qui diminue les réflexions sur celui-ci.

Concernant les basses fréquences, on remarque que la présence du public implique une perte d'environ 3 dB. Par contre, l'évolution des deux courbes dans le grave est à peu près identique.

13 Conception et réglage du système de diffusion basse fréquence

13.1 Descriptif du système de diffusion utilisé

Le système de diffusion utilisé est composé de plusieurs sous-ensembles. Outre le dispositif dédié aux basses fréquences, il y a cinq systèmes distincts pour reproduire l'ensemble du spectre.

- Le système principal (main) composé de deux grappes d'enceintes accrochées de chaque côté de la scène. Chaque grappe étant constituée de dix ADAMSON Y-AXIS 18 et six AMDASON Y-AXIS 10. Ce système principal permet d'obtenir un niveau homogène de quinze à soixante mètres de profondeur. Il couvre ainsi la majeure partie de la salle.
- Le système destiné au public proche de la scène (downfill) accroché de chaque côté de la scène. Ce système, plus petit est composé de cinq adamson spektrix et un adamson spektrix wave par côté. Il permet de couvrir entre cinq et quinze mètres. Par contre, l'ouverture horizontale n'est que de 120° par enceinte ce qui ne permet pas de couvrir toute la largeur de la salle.
- Le système permettant de couvrir les côtés (outfill) posé de chaque côté de la scène. Ce système, composé de six ADAMSON Y-AXIS 10, est orienté de 30° pour couvrir uniquement les extrémités situées près des murs. Il est en complément du système downfill.
- Le système destiné aux personnes très proches de la scène (frontfill) est posé de chaque côté de la scène. Composé de quatre ADAMSON SPEKTRIX par côté, il est

largement orienté vers l'intérieur pour couvrir la zone entre la scène et jusqu'à cinq mètres de celle-ci. Ce système d'appoint positionné au sol permet aussi aux personnes très proches de la scène de percevoir le son comme provenant de la scène et non en hauteur.

- En appoint à ce dernier système, quatre enceintes alignées en front de scène (lips-fill) permettent de couvrir les premiers rangs du public. Il sert à compenser le manque de couverture au centre du système frontfills.

Pour les basses fréquences, on a trois systèmes distincts.

- Un arc-sub placé devant la scène. Ce système composé de douze enceintes permet de produire un niveau homogène sur l'auditoire placé à proximité de la scène. L'arc-sub permet une couverture homogène sur toute la largeur de la salle.
- Deux groupes de trois enceintes empilées placés au sol de chaque côté. Ces deux systèmes permettent d'obtenir un niveau de pression élevé sur les extrémités de la salle. Ce système a été choisi en complément de l'arc-sub. Ainsi, on reste cohérent sur l'ensemble des systèmes au sol.
- Deux groupes de quatre enceintes suspendues de chaque côté. Ces enceintes accrochées nous permettent d'élargir la couverture à des positions plus reculées. Néanmoins, ces deux systèmes ne sont pas en cohérence avec les systèmes placés au sol. Par contre après l'alignement temporel, on est plus cohérent avec le système large bande principal.

13.2 Simulation

« Les études prédictives sur les systèmes de diffusion permettent de déterminer le matériel nécessaire dans un lieu donné pour couvrir la zone d'audience de façon optimale »²¹. Pour la conception du système de diffusion, on s'appuie sur des logiciels distribués par les constructeurs. Ces programmes permettent d'observer les performances de notre système dans la zone d'audience. Mais ils ne prennent pas en compte l'acoustique de la salle et les réflexions.

Notre choix sur le logiciel utilisé pour simuler notre système de diffusion basse fréquence ne s'est pas fait en lien avec le logiciel proposé par le constructeur des enceintes utilisées, mais en lien avec les capacités et l'interface. Dans notre cas de système de diffusion travaillant uniquement dans les basses fréquences, nous avons cherché à placer rapidement nos enceintes, effectuer des traitements temporels et observer la couverture sonore. Le logiciel MAPP ONLINE PRO proposé par MEYER est celui qui répondait le plus à nos critères.

²¹. **Montezor C.**, *Pertinence des logiciels de prédictions pour les systèmes de sonorisation en ligne sources*, Mémoire de l'E.N.S. Louis Lumière, 2003, p. 17.[12]

Les enceintes utilisées n'étant pas les mêmes que celles proposées par le logiciel, nous avons d'abord vérifié la cohérence entre nos enceintes et les modèles. Pour obtenir un modèle le plus exact possible, nous leur avons appliqué un filtrage virtuel pour qu'ils s'approchent au maximum de la mesure.

Dans l'organisation de la simulation, nous avons d'abord positionné l'arc-sub. Dans un premier temps en alignant les enceintes (12 SX SUB) côte à côte nous occupions que 10 m de largeur. Pour occuper l'ensemble du devant de scène, nous avons écarté les enceintes de 0,5 m. Nous avons ensuite positionné le groupe d'enceinte de chaque côté à 0,5 m également.

Le réglage des retards et des niveaux entre les enceintes a ensuite été choisi pour obtenir le résultat qui nous paraissait le plus homogène.

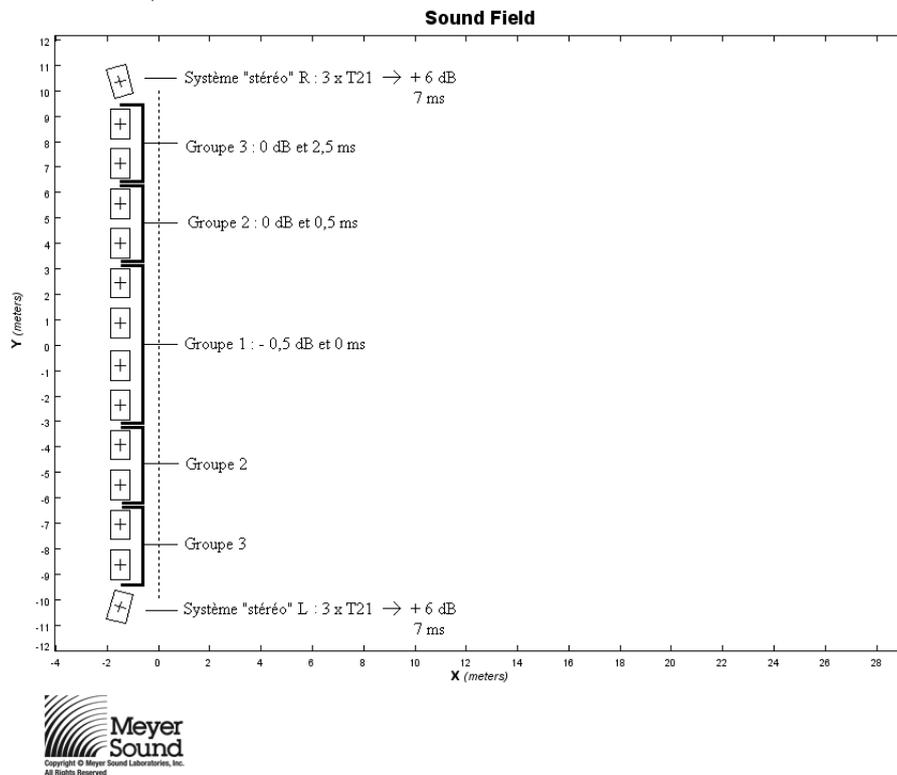
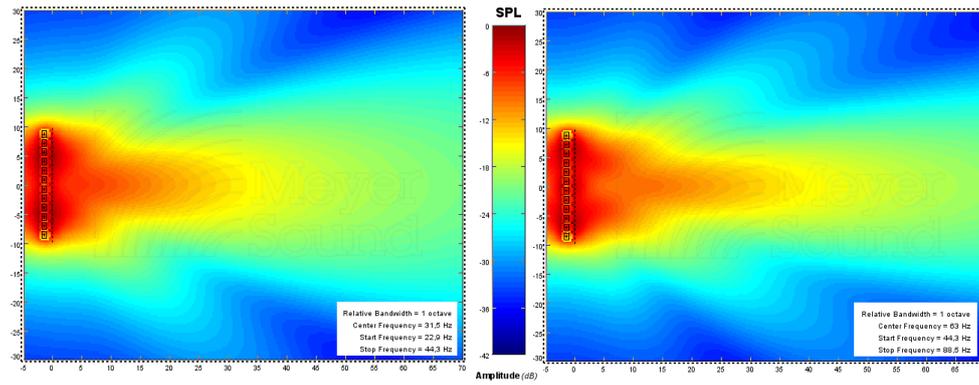
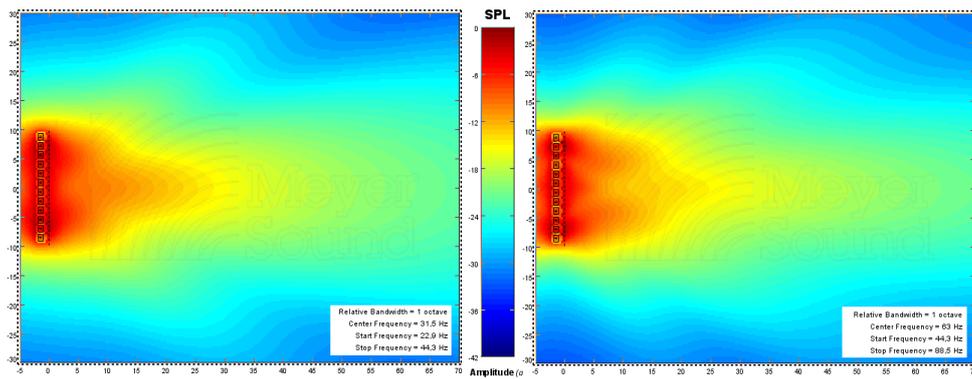


FIGURE 13.1 – Choix d'implantation et de traitement des enceintes au sol



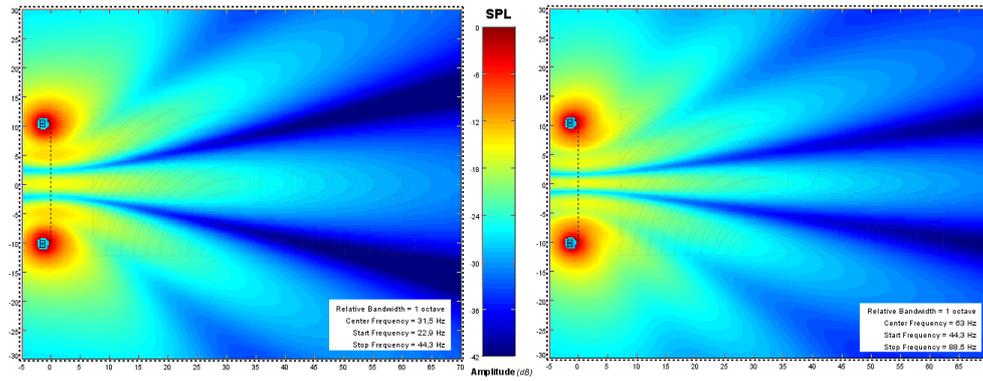
(a) Sans traitement



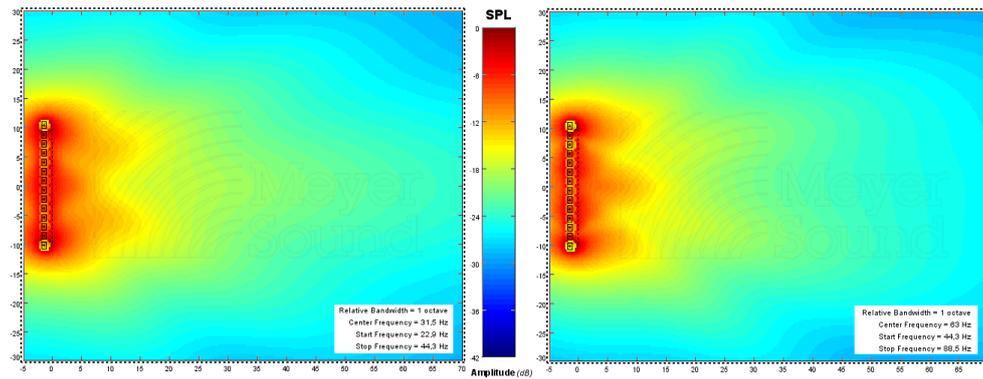
(b) Avec retard et correction de niveau

FIGURE 13.2 – Simulation de l'arc-sub seuil

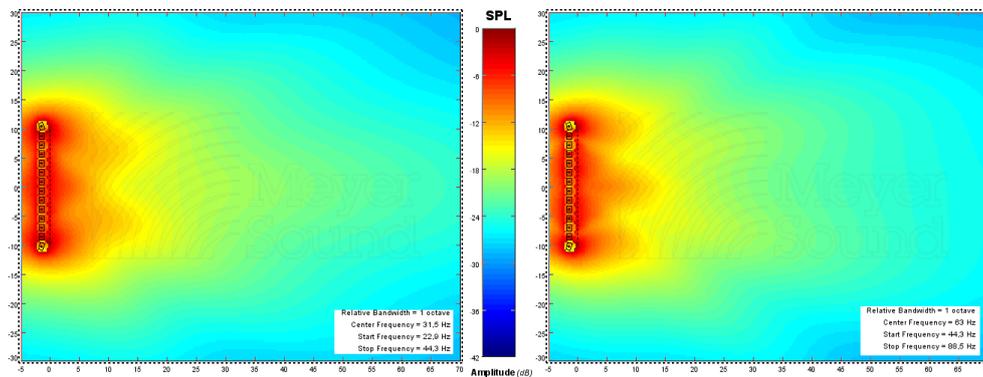
La mise en place de traitement temporel (figure 13.2) entre les différentes enceintes au sol améliore nettement la couverture latérale. On perd alors l'effet d'alignement qui permet d'obtenir une importante portée dans l'axe. Par contre, l'ouverture du système est beaucoup plus importante, et le résultat est assez homogène.



(a) Système “stéréo” seul



(b) Tous les système droit au sol



(c) Tous les systèmes au sol avec angulation

FIGURE 13.3 – Simulations des systèmes au sol

On remarque que le système stéréo seul est peu cohérent. Avec ce système, on obtient quatre raies d’interférence, ce qui crée des ventres et des noeuds importants (en condition de champ libre). Par contre, dès que l’on ajoute l’arc-sub, on gagne nettement en homogénéité. Le système ainsi mis en place est beaucoup plus cohérent. Le résultat n’est pas parfait, mais il est très acceptable pour une situation avec autant de points de diffusion. On obtient une couverture assez homogène jusqu’à 25 m avec une pression très importante.

Orienter les enceintes situées aux extrémités semble inutile, surtout lorsqu’on parle

d'enceinte de grave très peu directive. Néanmoins, cette orientation permet d'augmenter légèrement la couverture latérale.

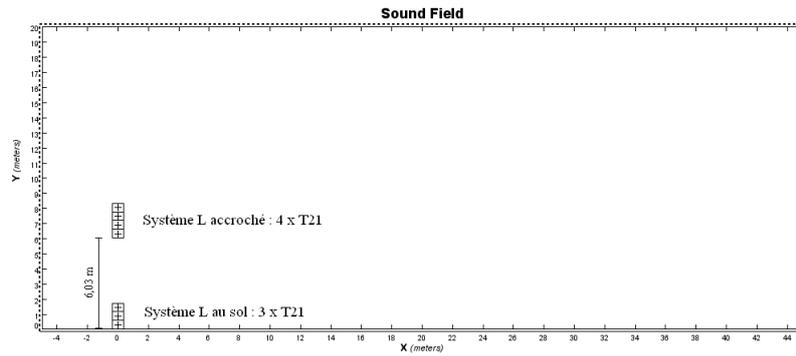
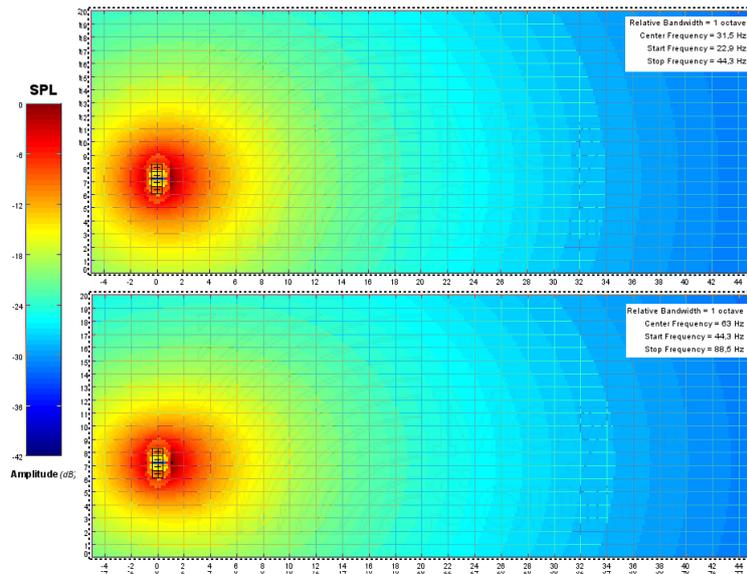


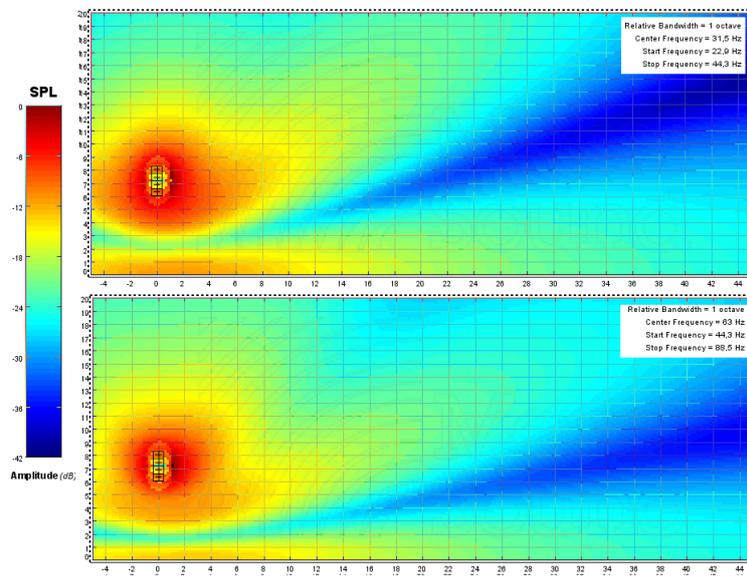
FIGURE 13.4 – Choix d'implantation des enceintes accrochées, vue latérale

De chaque côté, en complément du système de trois enceintes mis au sol à l'extérieur, un système de quatre enceintes est accroché à 6,3 m. Le système accroché permet d'augmenter la couverture en profondeur.

Pour effectuer la simulation du système en vue latérale, on peut s'intéresser à l'effet de sol. Dans le cas d'un sol totalement réfléchissant, l'image des enceintes accrochées interagit avec celles-ci. Ainsi, on obtient des interférences. Néanmoins, au niveau du sol, on est à la même distance de la source et de la source image, on a donc un maximum de pression. Par contre, le creux qu'on observe sur la figure 13.5 peut apparaître au niveau des gradins, mais les gradins sont une nouvelle surface de réflexion.



(a) Enceintes accrochées en condition de champ libre

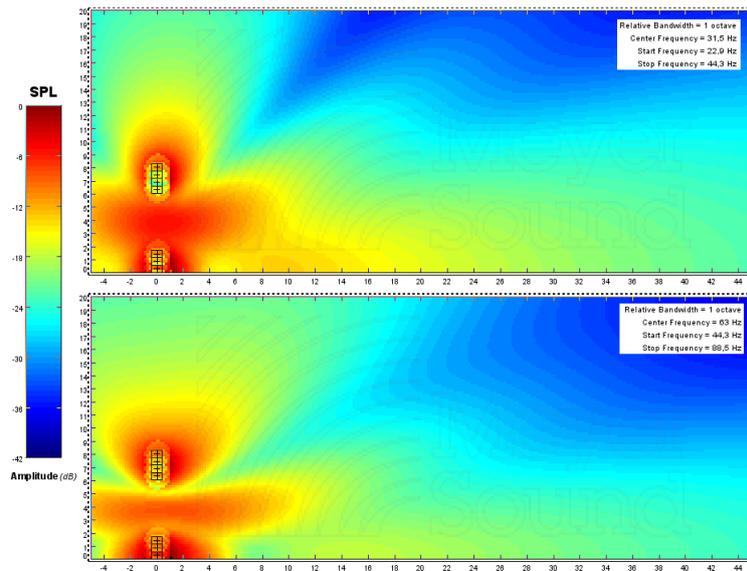


(b) Enceintes accrochées avec la simulation d'un sol plat parfaitement réfléchissant

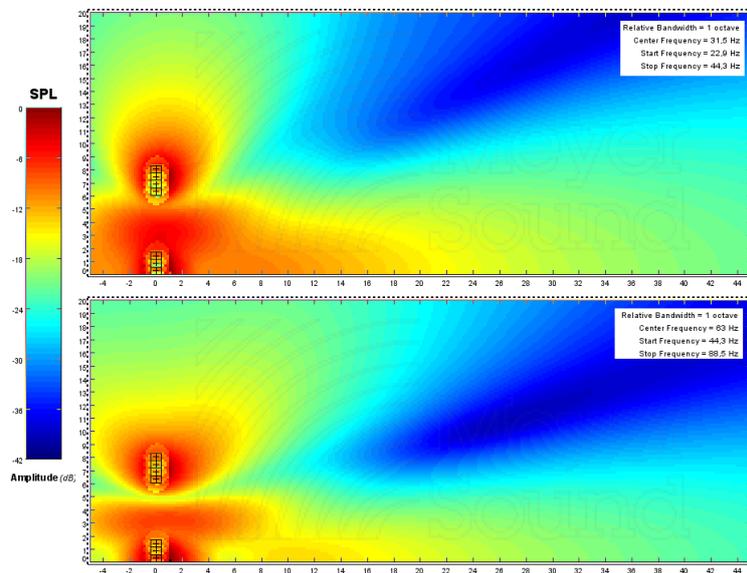
FIGURE 13.5 – Simulation de l'effet de sol

Lorsqu'on dispose deux systèmes (un au sol et un accroché), même s'ils sont parfaitement alignés, des problèmes de cohérence peuvent apparaître. Le niveau sonore produit par chaque système est relativement équivalent pour toute l'aire d'audience. Il faut donc insérer un retard dans le système accroché pour corriger la différence de distance. Et ce retard dépend du choix de la position.

Ici le retard est de 2,55 ms ce qui correspond à une correction de distance (mise en phase) pour une personne placée au sol, à 23 m des enceintes.



(a) Rayonnement des deux systèmes sans retard



(b) Rayonnement des deux systèmes avec un retard de 2,55 ms pour les enceintes au sol

FIGURE 13.6 – Simulation de la couverture en vue latérale

L'insertion du retard crée des interférences beaucoup plus marquées. Mais le résultat obtenu au sol à proximité des enceintes est beaucoup plus homogène. Et la portée du système est aussi plus importante.

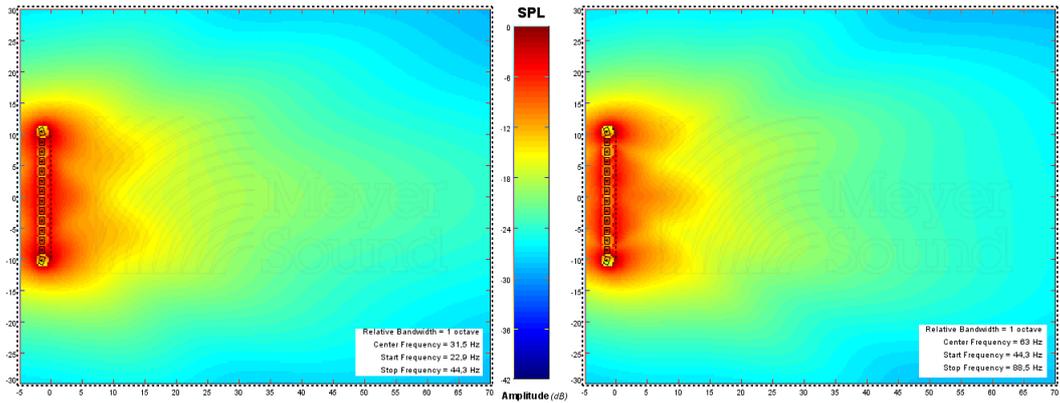
13.3 Les limites de la simulation

Effectuer une simulation permet de déterminer le matériel utile, son positionnement ainsi que de préparer l'optimisation du système de diffusion. Certains choix faits

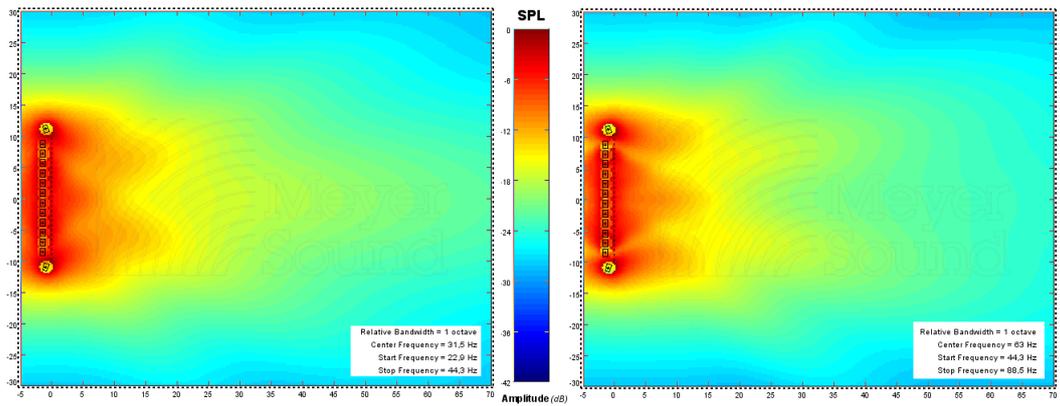
lors de la prédiction sont définitifs (nombre d'enceintes, position des enceintes accrochées. . .). Il n'est plus possible une fois sur place de changer la configuration, surtout après l'installation. Ces changements impliqueraient un coût de main-d'oeuvre important alors qu'on ne dispose que de peu de temps. Mais les simulations ne correspondent pas exactement à la réalité. Lors de la préparation, il faut arriver à prévoir la validité de la simulation par rapport au cas réel et cette faculté s'acquiert principalement par l'expérience.

Un des premiers facteurs qui influe sur les résultats est la salle et son acoustique. Il est assez compliqué de simuler un lieu et l'ensemble des paramètres qui modifient l'acoustique. En particulier l'ensemble des surfaces, leurs agencements, leurs dimensions et leurs coefficients de réflexion et d'absorption. Les logiciels de simulations fournis par les constructeurs ne permettent pas d'intégrer ces paramètres. Par contre, des logiciels spécialisés en acoustique permettent d'obtenir des simulations qui approchent de la réalité[12].

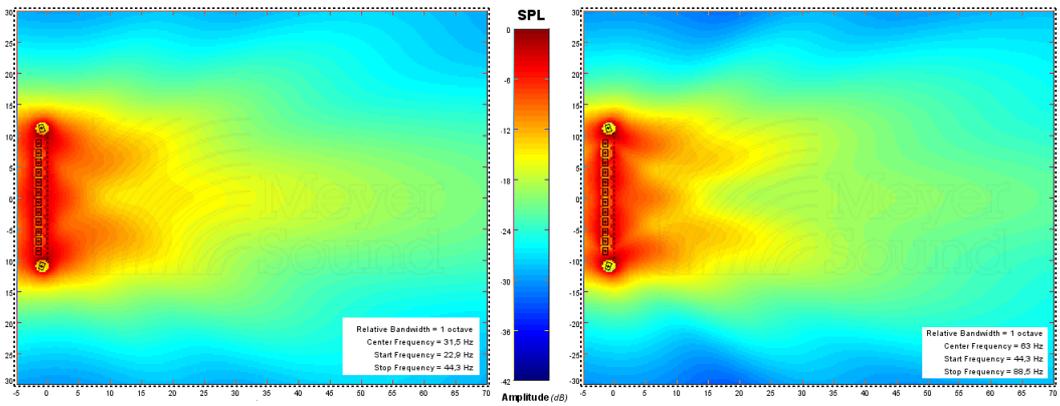
Des erreurs de calcul sur les dimensions de la salle peuvent aussi perturber la simulation. C'est ce qui est arrivé dans notre cas d'étude. Les enceintes de grave placées au sol aux extrémités n'étaient pas assez éloignées des extrémités de la scène. La position initiale posait un problème au niveau visuel (qui prime sur le son . . .). Nous avons donc dû écarter légèrement ces enceintes. En effectuant une nouvelle simulation sur place (figure 13.7), nous nous sommes rendu compte que ce changement avait une influence sur la prédiction avec nos paramètres initiaux. Nous avons donc changé le retard appliqué à ces enceintes pour retrouver une couverture semblable à ce qu'on voulait obtenir.



(a) Rayonnement obtenu après l'implantation prévu pour la simulation



(b) Rayonnement obtenu après l'implantation sur le festival



(c) Rayonnement obtenu après l'insertion d'un retard supplémentaire de 2 ms pour l'arc-sub

FIGURE 13.7 – Changement de la position et du traitement des enceintes placées aux extrémités

13.4 Réglage

Une fois le système de diffusion mis en place, il faut régler chaque partie pour créer un système de diffusion cohérent dans la salle. Ce réglage est effectué par plusieurs processeurs de diffusion situés en amont de l'amplification.

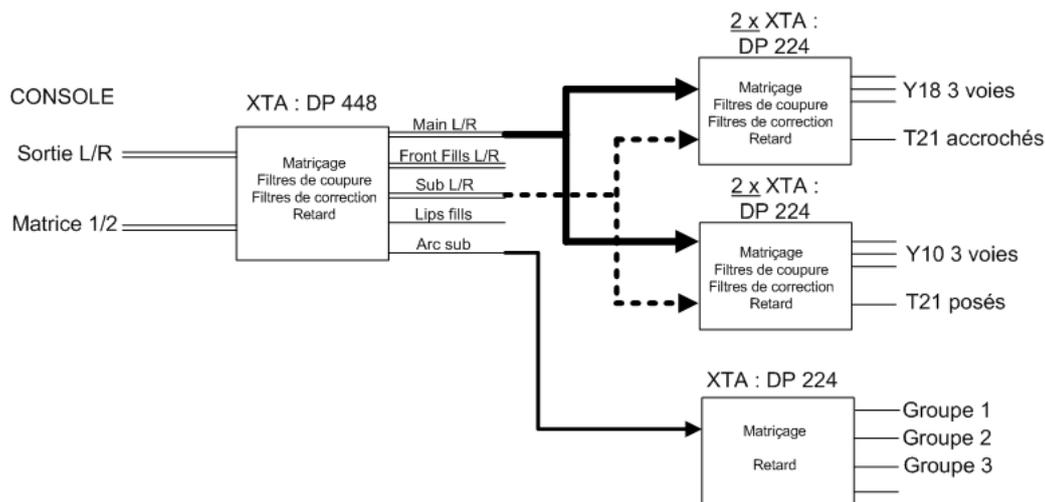


FIGURE 13.8 – Représentation schématique des processeurs de diffusion pour le traitement des système fonctionnant dans les basses fréquences

Le réglage intervient sur plusieurs niveaux.

- Les filtres de coupure pour répartir les domaines fréquentiels de travail de chaque enceinte, et de chaque haut-parleur pour les enceintes actives. Les filtres utilisés pour le traitement des enceintes actives sont fabriqués par le constructeur et ne sont pas souvent accessibles pour deux raisons. D'une part, car ce réglage est extrêmement fin et que l'on dispose rarement des outils nécessaires pour les optimiser au maximum. D'autre part pour éviter d'endommager des haut-parleurs en les utilisant dans une plage de fréquence inadaptée.
- Les retards temporels permettent d'aligner les systèmes à certains endroits et peuvent aussi être utilisés pour l'effet Haas (effet de précedence).
- Les niveaux des différents systèmes pour obtenir une réponse homogène. Il arrive aussi de régler les niveaux entre les enceintes d'une même grappe pour orienter le faisceau de projection sonore.
- Les filtres de correction ainsi que les niveaux pour optimiser le fonctionnement du système par rapport à son positionnement et au lieu.

Dans un premier temps, nous avons mis en place les filtres de coupure pour délimiter les zones fréquentielles de travail de chaque système. Les enceintes de grave sont filtrées avec un filtre passe-bas de type Linkwitz Riley de 24 dB/octave de fréquence de coupure 60 Hz et d'un filtre passe-haut de type Butterworth de 24dB/octave de fréquence de coupure 25 Hz. Le filtre passe-haut permet de ne pas arriver aux limites de l'amplificateur et des enceintes en les excitant avec un signal continu ou beaucoup trop grave pour être perçu. En complément, un filtre paramétrique est mis en place autour de 130 Hz pour tous les systèmes basses fréquences. Ce filtre situé au-delà de la fréquence de coupure atténue une résonance de l'enceinte qui perturbe l'addition avec le système large bande.

Ensuite, les retards temporels entre le système accroché et le système au sol sont mis en place. Pour ce réglage, seules les enceintes au sol situées à l'extérieur sont alimentées. Pour définir ce retard, il faut aligner la réponse en phase des deux enceintes quand on se place en face d'un côté à une dizaine de mètres. Le choix de cette position se fait en lien avec la couverture des deux systèmes. Il s'agit d'obtenir un compromis pour que les deux systèmes soient en phase lorsque leurs niveaux sont équivalents et pour le plus de personnes (ce qui peut être différent de la plus grande surface). Après les mesures, les enceintes au sol sont retardées de 2,55 ms par rapport au système accroché.

Puis on effectue le réglage des niveaux de chaque système et à l'intérieur d'un système. Les zones où plusieurs systèmes se recoupent peuvent avoir un niveau plus important, il faut alors doser le niveau sonore apporté par chaque système pour avoir un niveau homogène dans toute la salle. La recherche d'un niveau homogène ne signifie pas nécessairement un niveau identique. Dans le cadre de ce festival, le placement est libre et les spectateurs sont debout à l'avant et assis à l'arrière. Dans ce cas, on cherche globalement à avoir légèrement plus de niveau à proximité de la scène qu'à l'arrière de la salle.

Pour finir, les filtres de correction permettent de corriger les défauts des systèmes, de leurs couplages et de la salle. Ces filtres permettent aussi de donner une couleur au système de diffusion. Il ne s'agit pas de créer une réponse fréquentielle la plus plate possible. Un système avec une réponse plate ne serait pas agréable à l'écoute, ne conviendrait pas à l'acoustique et à sa modification avec le public. Il y a donc plusieurs manières d'appliquer les filtres de correction et cette partie est la plus difficile, car elle fait intervenir la mesure et son analyse ainsi que l'écoute. La mesure permet de cibler précisément les défauts. Mais il faut choisir les endroits où on l'effectue et arriver à l'interpréter : problème de réponse des enceintes, problèmes d'interaction entre les systèmes, intégration par rapport à l'acoustique. . . Le réglage par l'écoute est déterminant et permet de rendre le système musical. L'écoute se fait sur des morceaux connus par la personne qui règle le système. Différents morceaux dans des styles de musique variés permettent de régler différents problèmes : présence de basse fréquence, agressivité. . .

14 Mesures et observations

14.1 Protocole de mesure

De nombreuses mesures ont été effectuées pour quantifier le système de diffusion basse fréquence. L'objectif de ces mesures porte sur l'apport des différents systèmes,

leurs combinaisons ainsi que la couverture.

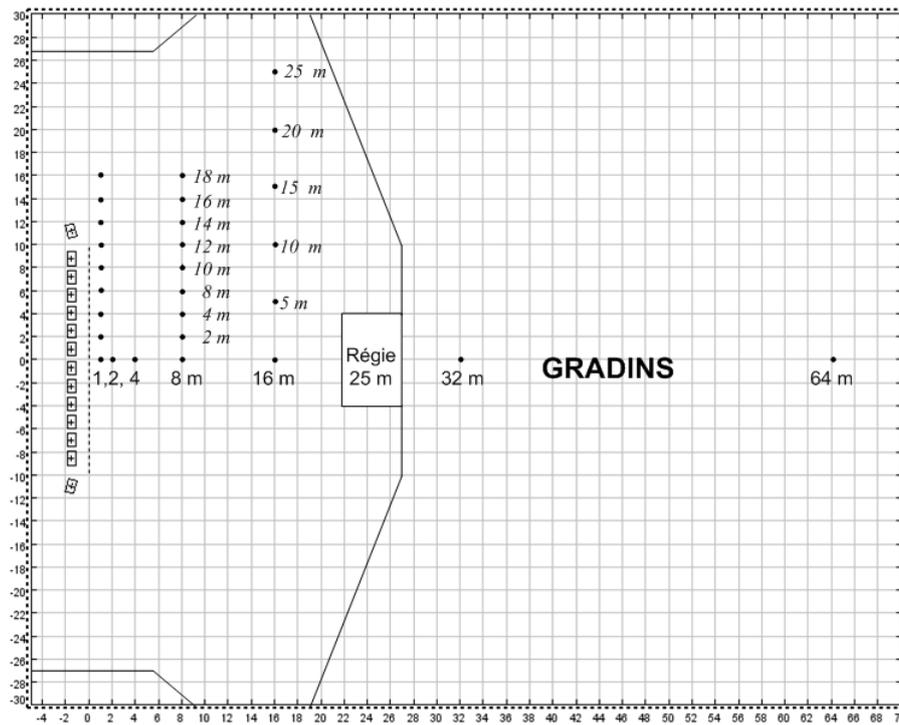


FIGURE 14.1 – Schéma d'implantation des points de mesure

Au total, vingt-huit points de mesure sont disposés dans la salle (figure 14.1). Les points sont disposés d'une part dans la profondeur et d'autre part dans la largeur. Ces deux dispositions permettent de caractériser la couverture et la réponse des systèmes dans les deux dimensions. Pour l'ensemble des mesures, le microphone est positionné au sol ou au niveau du siège dans les gradins le cas échéant. Le placement au sol permet de s'affranchir des réflexions qui peuvent être assez perturbatrices pour les basses fréquences.

Pour chaque point nous avons effectué une mesure :

- de l'arc-sub ;
- du système au sol côté droit ;
- du système accroché côté droit ;
- du système accroché et du système au sol droit ;
- du système accroché et du système au sol gauche ;
- du système accroché et du système au sol gauche et droit ;
- de l'ensemble du système basse fréquence ;

En effectuant ces différentes mesures, nous cherchons à décrire :

- la couverture de l'arc-sub ;

- la couverture des systèmes accrochés et au sol ;
- l'association des systèmes gauche et droit ;
- l'association et la couverture de l'ensemble des systèmes ;

14.2 Couverture en profondeur

Pour la couverture en profondeur, on rappelle qu'en théorie (source ponctuelle à rayonnement omnidirectionnel en condition de champ libre), on perd 6 dB par doublement de distance.

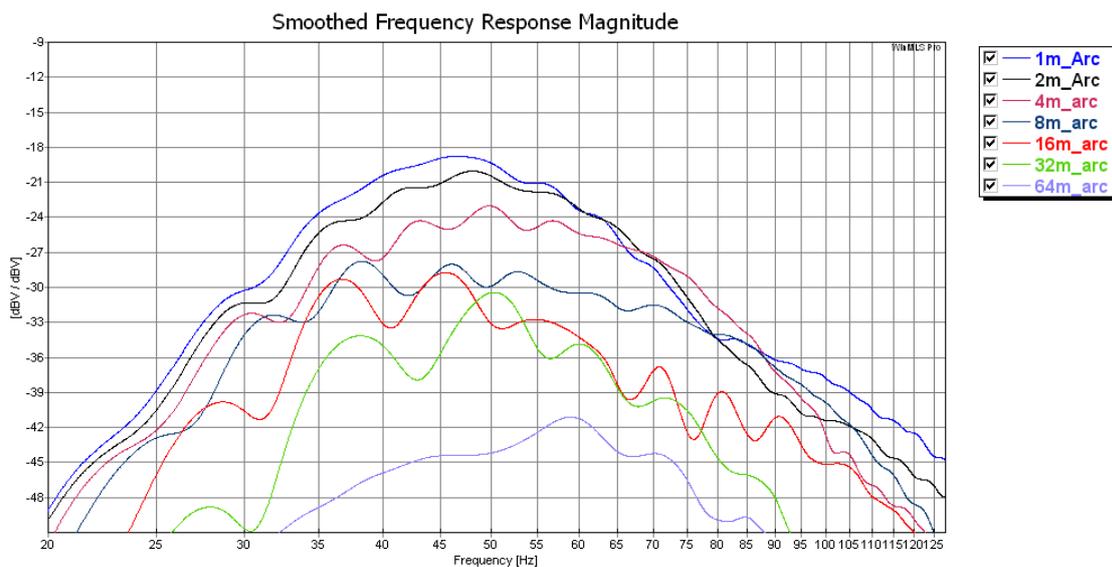


FIGURE 14.2 – Réponse en fréquence de l'arc-sub, mesurée au centre de la salle en fonction de l'éloignement

L'arc-sub a une fonction assez limitée. Les courbes obtenues (figure 14.2) nous montrent un niveau important et réponse en fréquence relativement plate jusqu'à 8 m. Au-delà, la réponse est assez accidentée et on observe une perte de niveau importante. Même avec le filtre coupe-bas (Butterworth de -24 dB/octave centré à 25,3 Hz), on remarque que le système descend très bas jusqu'à 4 m.

Le rôle de l'arc-sub est de couvrir les premiers rangs et les mesures nous montrent qu'il remplit cette fonction. Mais pour le comportement de ce système, la réponse fréquentielle dans la largeur sera plus intéressante à analyser.

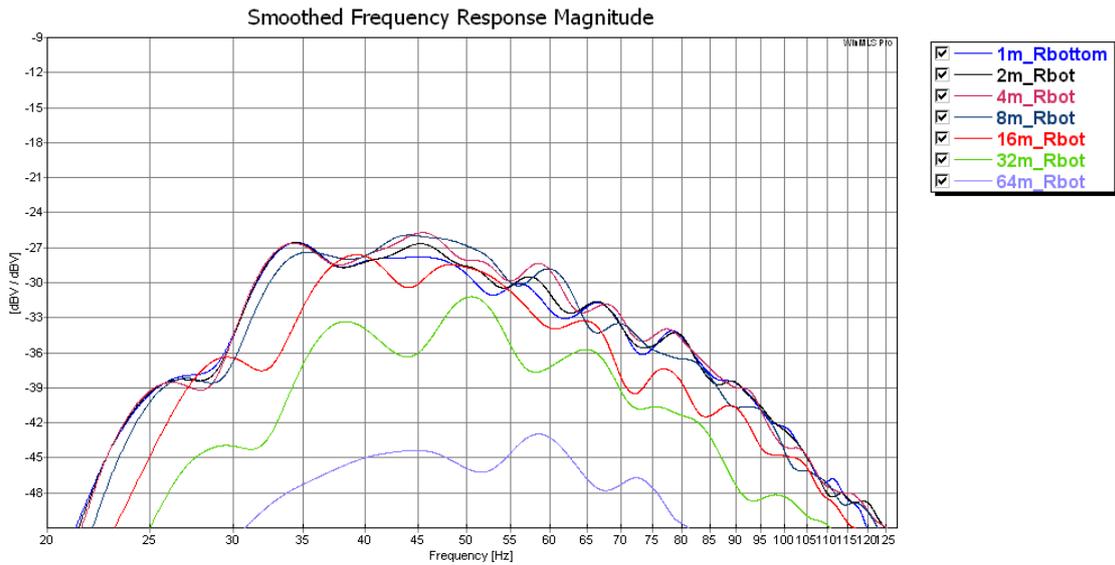


FIGURE 14.3 – Réponse en fréquence du système de droite au sol, mesurée au centre de la salle en fonction de l'éloignement

Le système au sol est beaucoup plus cohérent jusqu'à 16 m. On a même une perte de niveau proportionnelle à la distance jusqu'à 32 m. Par contre, la réponse est plus accidentée. Ces irrégularités s'expliquent par un rayonnement moins contrôlé de ce système par rapport à l'arc-sub. Ainsi les parois environnantes sont plus excitées ce qui augmente le nombre de sources images donc crée des interférences.

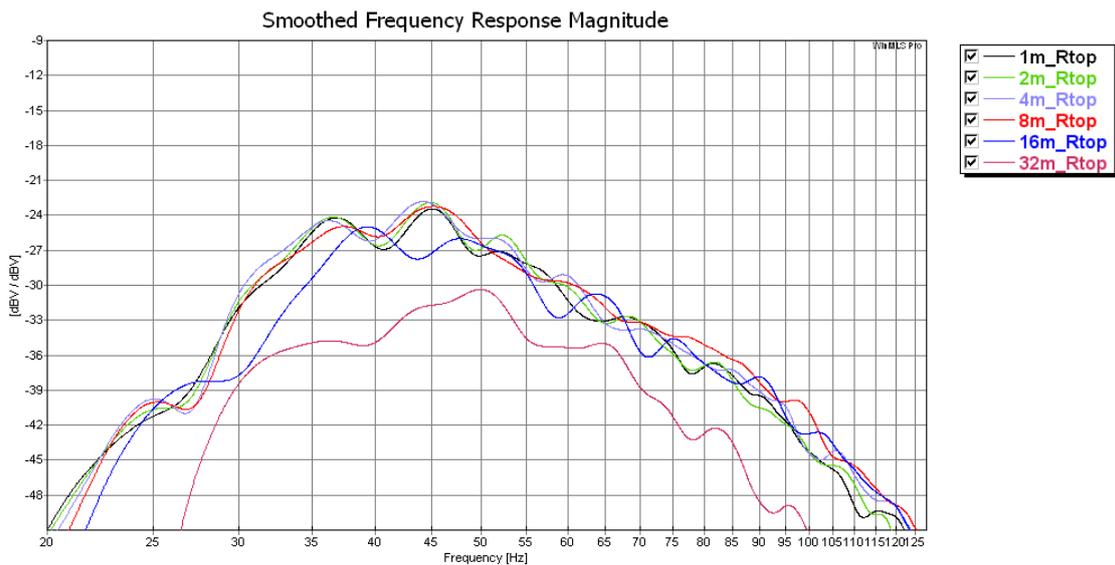


FIGURE 14.4 – Réponse en fréquence du système de droite accroché, mesurée au centre de la salle en fonction de l'éloignement

Le système accroché est celui qui fournit le plus de puissance. Il a aussi la portée la plus importante. Autour de 42,5 Hz le système est encore présent pour la mesure à 64 m et on n'a perdu que 6 dB par rapport à la mesure effectuée à 32 m.

14.3 Couverture en largeur

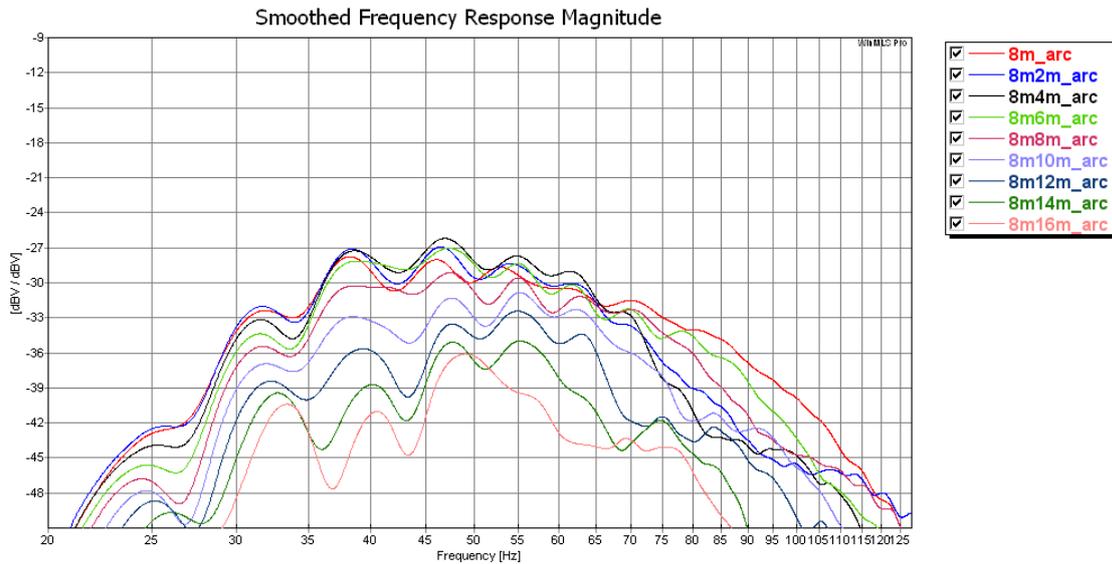


FIGURE 14.5 – Réponse en fréquence de l’arc-sub, mesuré à 8 m du premier rang entre le centre et un écartement latéral de 16 m

Cette mesure n’est effectuée que sur la demi-ouverture et on peut considérer que le résultat est identique sur l’ouverture totale. La couverture latérale de l’arc-sub est très homogène sur quasiment toute la longueur du système (20 m). Jusqu’à 8 m de demi-ouverture, on a moins de 3 dB d’écart entre les mesures. Conformément à nos prédictions, l’arc-sub a une couverture très homogène dans les huit premiers mètres sur huit mètres d’ouverture. Au-delà de ces distances, les autres systèmes prennent le relai. Mais l’arc-sub fonctionne avec les autres systèmes dans des zones et des niveaux similaires, il faudra donc observer l’interaction entre les différents systèmes.

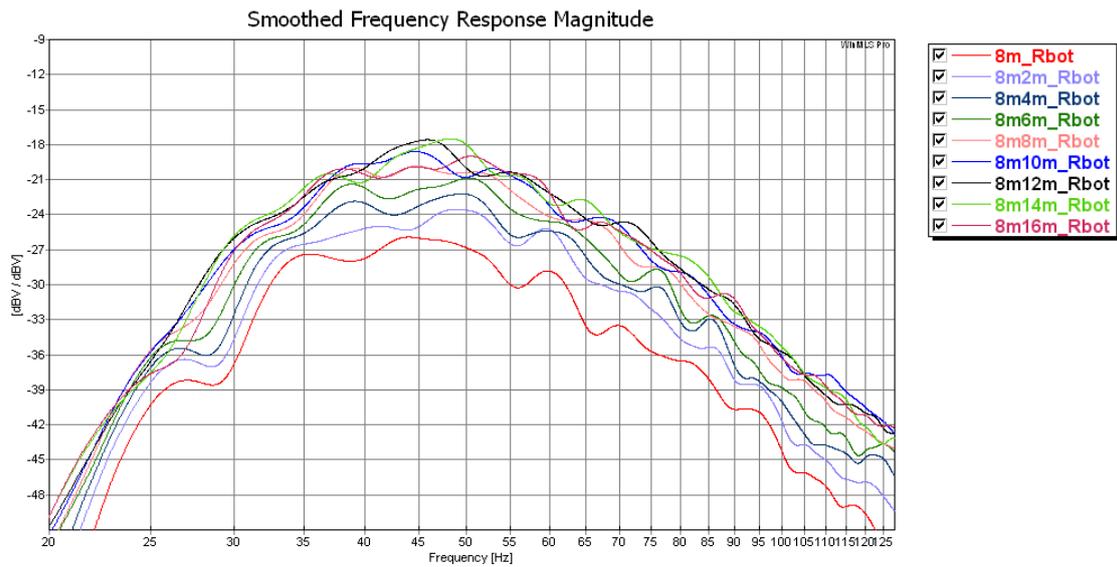


FIGURE 14.6 – Réponse en fréquence du système de droite au sol, mesuré à 8 m du premier rang entre le centre et un écartement latéral de 16 m

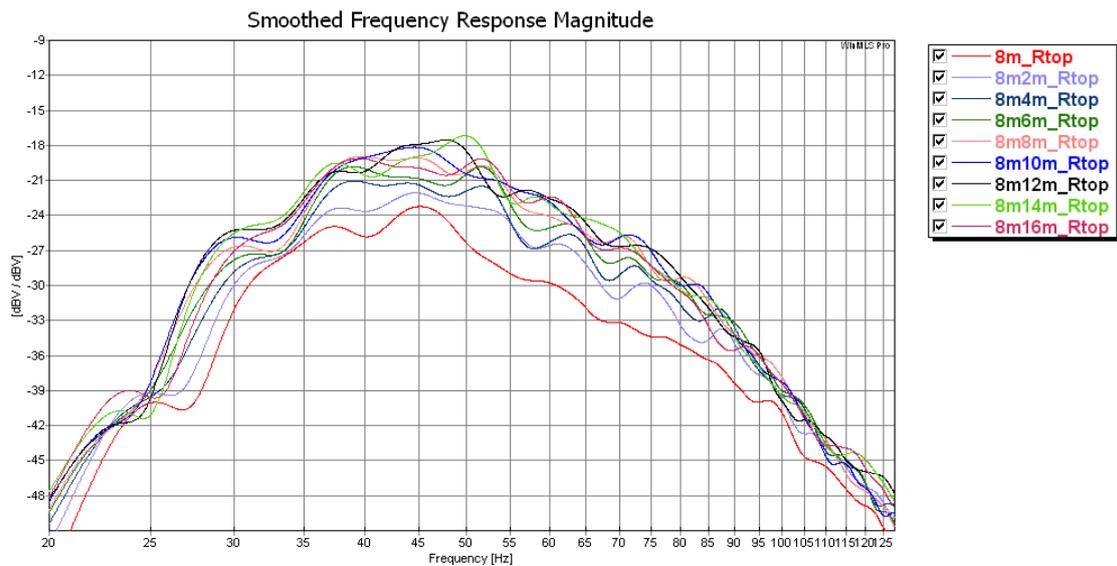


FIGURE 14.7 – Réponse en fréquence du système de droite accroché, mesuré à 8 m du premier rang entre le centre et un écartement latéral de 16 m

Les deux systèmes (accroché et au sol) ont un niveau et une réponse similaire. Sur les deux figures (14.6 et 14.7), on n'observe que le système du côté droit. Ce qui explique la perte de niveau en se rapprochant du centre.

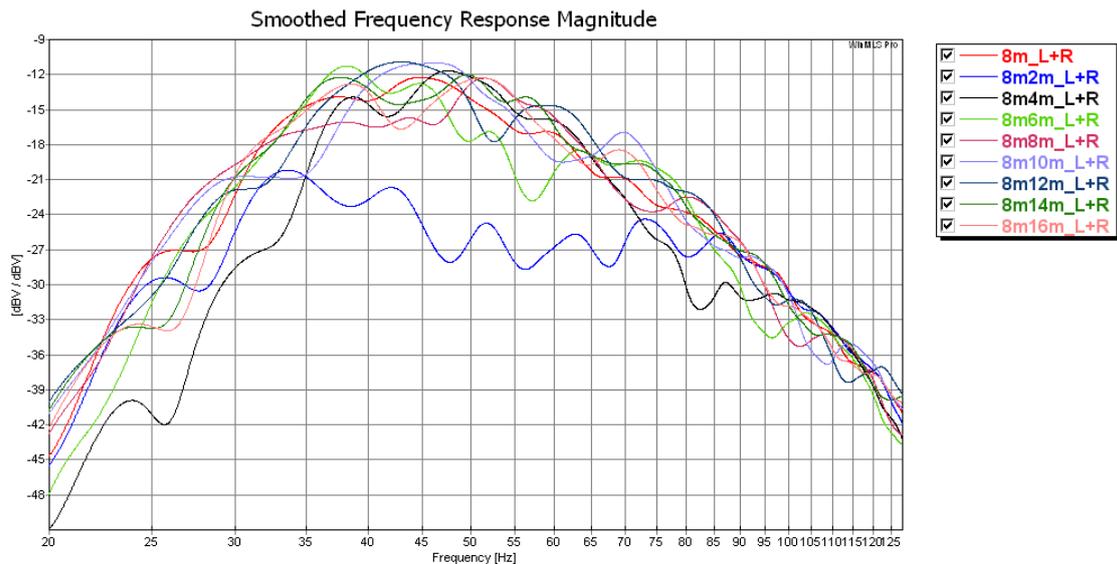


FIGURE 14.8 – Réponse en fréquence des deux systèmes gauche droite, mesuré à 8 m du premier rang entre le centre et un écartement latéral de 16 m

Quand on prend l'ensemble des systèmes gauche et droit, il y a beaucoup moins de variation de niveaux latéralement. Excepté à 2 m en latéral, où l'on observe une baisse de niveau de l'ordre de -10 dB. Ce creux est lié à la différence de phase entre les deux systèmes à cette position. C'est une raie d'interférence spatiale qui apparaît nettement dans la prédiction du système gauche droite seul (voir figure 13.3).

14.4 Interaction entre les systèmes

Les différences de phase entre les systèmes dépendent de la position de la mesure. Selon les situations, on pourra observer des additions ou des annulations.

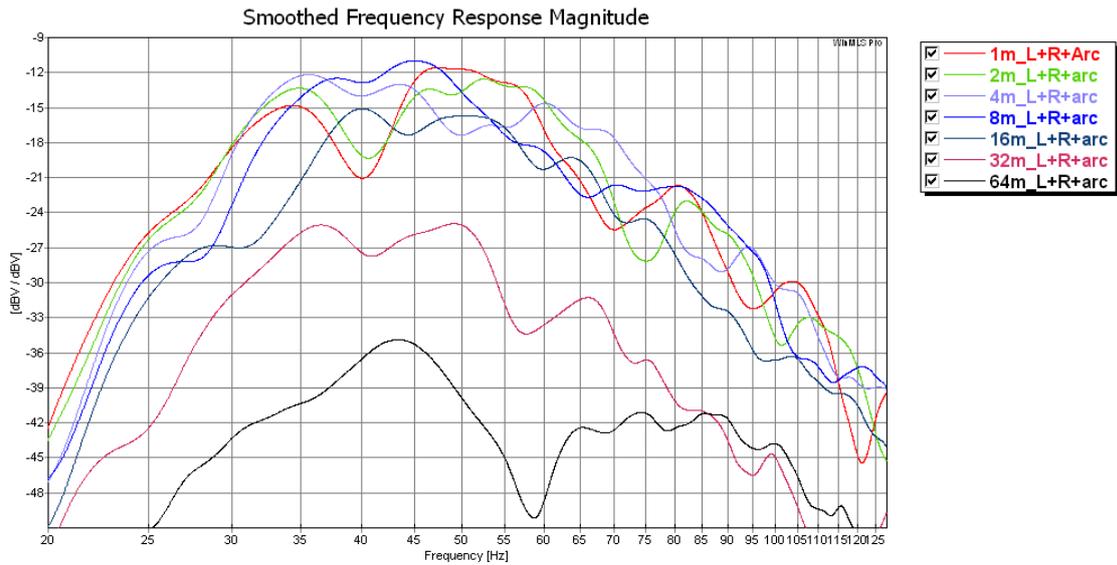


FIGURE 14.9 – Réponse en fréquence des trois systèmes de grave, mesuré à 8 m du premier rang entre le centre et un écartement latéral de 16 m

On remarque la présence d'un creux autour de 40 Hz pour les mesures à 1 m et à 2 m. La figure suivante montre la différence de la réponse en phase entre l'arc-sub et les autres systèmes. L'écart avoisinant la demi-période autour de 40 Hz est responsable de ce creux. En dehors de ce problème pour les premiers rangs, les systèmes sont globalement en phase et s'additionnent.

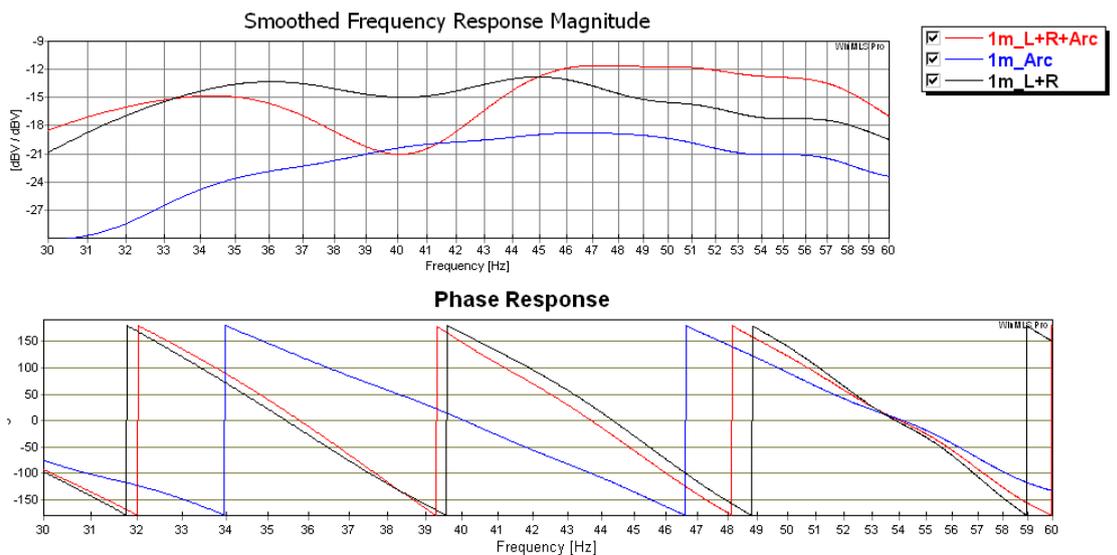


FIGURE 14.10 – Incidence de la phase sur l'association des systèmes

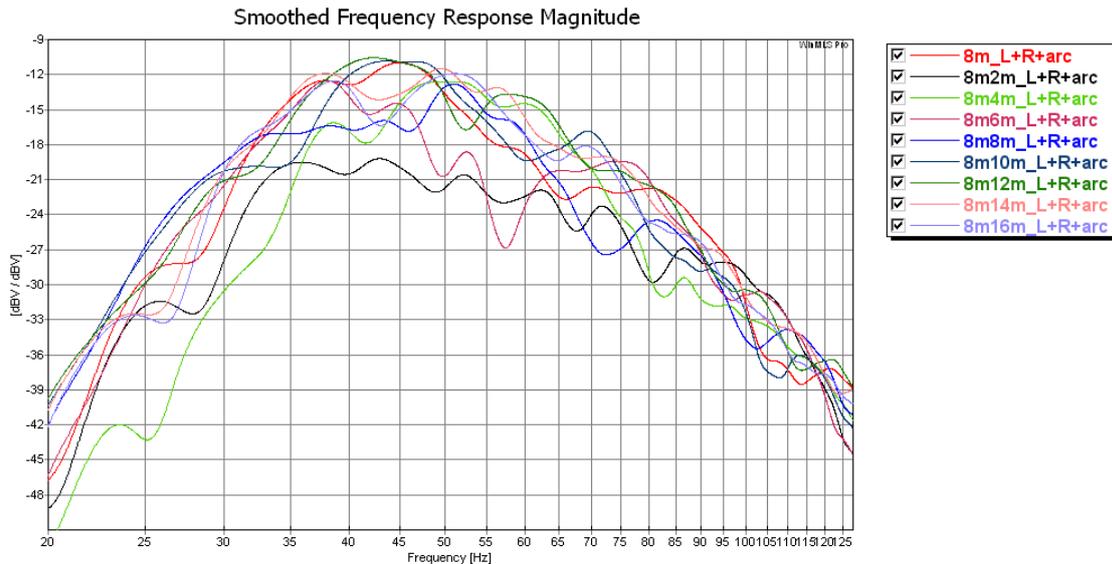


FIGURE 14.11 – Réponse en fréquence des trois systèmes de grave mesuré à 8 m du premier rang entre le centre et un écartement latéral de 16 m

Cette dernière figure (14.11) nous montre la couverture latérale de l'association des trois systèmes. On conserve la perte globale autour de 2 m en latéral liée à l'association des deux systèmes gauche et droit. Néanmoins, cette perte est légèrement atténuée par la présence de l'arc-sub. Un autre problème apparaît à 6 m autour de 57 Hz est lié aux relations de phase entre l'arc-sub et les autres systèmes.

Après l'analyse de ces différentes courbes, on peut avoir les conclusions suivantes.

- L'utilisation d'un unique point de diffusion ne permet pas d'avoir une couverture homogène. Les pertes engendrées par les distances parcourues par l'onde sonore sont inévitables.
- Multiplier les points de diffusion permet d'homogénéiser la couverture. Par contre dès que plusieurs systèmes non coïncidents fonctionnent dans les mêmes zones, on observe des différences de phase entre les systèmes qui varient selon la position. Ces différences de phase donnent lieu à des pertes de niveaux ou à une modification de la courbe de réponse fréquentielle. Aucun outil de traitement du signal ne permet de les corriger.
- Dans cette étude de cas, la prédiction s'accorde assez bien avec les résultats des mesures.

CONCLUSION

Nous avons cherché dans ce mémoire à évaluer les performances des différents dispositifs de diffusion travaillant dans les basses fréquences. Il existe de nombreuses façons de créer un système de diffusion en rassemblant plusieurs enceintes. Les choix de réalisation se font en fonction du contexte. Et il est nécessaire de s'adapter aux situations qu'on rencontre.

La connaissance du fonctionnement de la perception ainsi que les paramètres du signal à diffuser permettent de fixer les objectifs d'un système de diffusion travaillant dans les basses fréquences. Dans le domaine de la sonorisation et dans notre contexte, la sensation s'effectue à l'aide des basses fréquences.

Combiner plusieurs enceintes permet de contrôler la directivité. L'alignement, le décalage spatial et les traitements temporels permettent d'obtenir des combinaisons constructives et destructrices. De nombreux moyens existent et ils ont chacun leurs propres performances que l'on peut modéliser et mesurer. Le choix se fait donc pour chaque situation en fonction des objectifs et des contraintes.

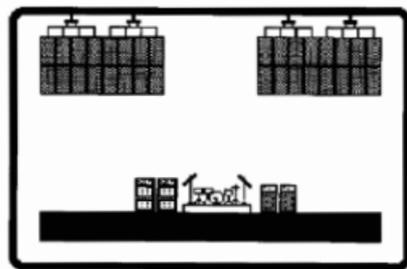
Le positionnement des enceintes est important. Ce choix s'effectue principalement en suivant des contraintes techniques et pratiques. Mais positionner correctement un système de diffusion en connaissant les phénomènes d'interaction entre les enceintes permet d'optimiser les performances du système de diffusion dans une situation donnée.

Il est important d'observer les écarts entre la modélisation d'un système de diffusion et le fonctionnement dans une situation donnée. L'étude de cas nous a permis d'observer ce qui se passe sur le terrain. Dans notre situation, le temps et le matériel ne nous ont pas fait défaut. La simulation nous a permis de concevoir le système de diffusion en fonction de la salle, des possibilités et des différentes zones à couvrir. L'ensemble des mesures nous a permis de quantifier les performances du système de diffusion et de comparer avec la simulation.

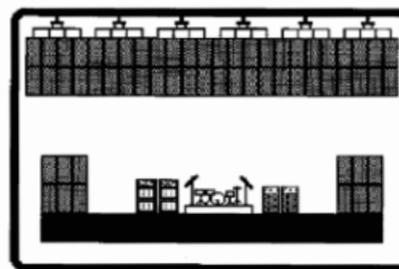
Ce travail n'aborde qu'une petite partie de l'étude d'un système de diffusion (les basses fréquences) en s'affranchissant de l'acoustique du lieu. Pourtant, le lieu a une forte interaction avec le système de diffusion. Il est donc important, pour l'application pratique, de recadrer les résultats de cette étude avec les paramètres d'acoustique des salles. Cette étude touche à de nombreux domaines qui sont assez méconnus. La perception des basses fréquences dans le cadre d'un stimulus musical est compliquée à qualifier et à quantifier. Et il semble que le lien entre la réponse impulsionnelle et la perception des graves est assez important. Néanmoins, il est difficile

de lier directement la sensation à la réponse impulsionnelle et les connaissances dans ce domaine sont faibles.

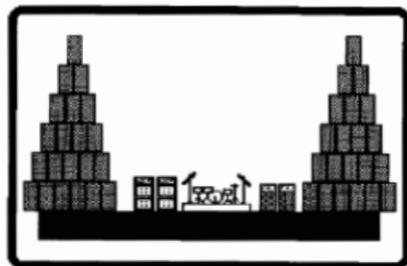
Cette étude a été très formatrice. Comme je l'ai dit, la conception des systèmes de diffusion est un domaine vaste. L'aborder dans le cadre d'une recherche m'a permis d'essayer de répondre à des centaines de questions que je me posais. Dans le cadre de mon travail, j'ai eu l'opportunité de suivre tout le travail autour du système de diffusion mis en place pour LE FESTIVAL DES ARTEFACTS, de disposer d'une nuit pour réaliser plus de 250 mesures et même de lancer un sweep avec 10 000 personnes dans un Zénith ! J'ai aussi pu rencontrer de nombreux professionnels, certains théoriciens, d'autres praticiens et leurs commentaires m'ont permis d'élaborer toutes ces pistes de recherche. Même si je n'ai pas pu répondre à toutes les questions que je me posais, ce travail m'a permis de poser des connaissances solides que j'aurai l'occasion de réutiliser tout au long de mon parcours professionnel. Et les méthodes utilisées dans cette étude me donnent des outils pour répondre à d'autres interrogations que j'ai autour des systèmes de diffusion.



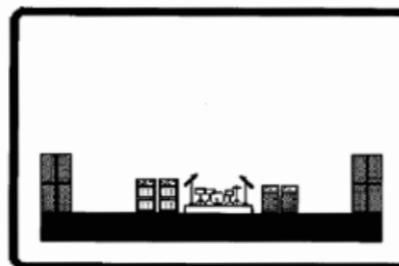
What the tech rider specified.



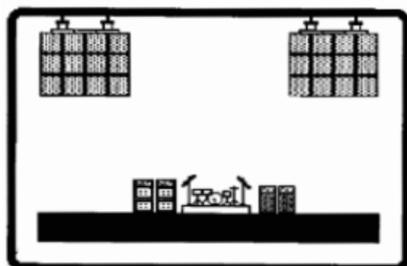
What the mixer really wanted.



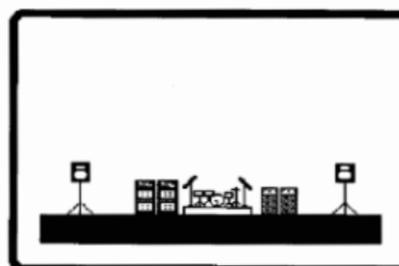
What the band thought was cool.



What the accountant pleaded for.



What the local sound company provided.



What the venue really needed.

Herman M., *Live sound! and touring technology*, janvier 1993.

Cinquième partie

ANNEXES

A Glossaire

AES : acronyme de Audio Engineering Society. Société dédiée aux technologies audio dans le domaine professionnel et de la recherche.

Arc-sub : technique permettant de contrôler la directivité pour une ligne d'enceintes fonctionnant dans les basses fréquences.

Back-Front-Front-Front (Arrière-Avant-Avant-Avant) : caractérise l'empilement à directivité cardioïde en fonction du positionnement des enceintes.

Bruit rose : signal aléatoire dont la densité spectrale de puissance décroît de 3 dB par octave. En conséquence, l'énergie par bande d'octave est constante.

Downfill : système de diffusion large bande accroché et orienté vers le bas pour le public proche de la scène.

Effet Haas (effet de précédence) : Effet psychoacoustique décrit par la loi du premier front d'onde. La localisation d'une source est donnée dans la direction d'où provient le son qui arrive en premier à l'oreille.

End-fire : principe de positionnement des enceintes l'une derrière l'autre espacée d'une certaine distance pour obtenir une directivité cardioïde.

Frontfill : système de diffusion large bande positionné sur les côtés de la scène destiné au public proche de la scène.

FFT : acronyme de Fast Fourier Transform. Algorithme permettant de transformer des données discrètes du domaine temporel dans le domaine fréquentiel.

Hit-parade : classement des chansons à la mode en rapport avec les meilleures ventes de disque.

IDS : acronyme d'Intégrateur de Densité Spectrale. Modèle spectral de l'audition.

Ligne source : technologie de système de diffusion répondant aux critères de la WST.

Lipsfill : système de diffusion posé sur le devant de scène destiné aux personnes les plus proches de la scène.

Loudness : correcteur physiologique permettant de faire correspondre l'intensité et la sonie.

Mixeur : ingénieur du son qui est chargé de réaliser le mélange et le traitement des différents microphones placés sur scène pour réaliser le son à diffuser.

MLS : acronyme de Maximum Length Sequence. C'est une séquence binaire pseudo-aléatoire qui est utilisée en mesure et qui permet d'extraire la réponse impulsionnelle

Outfill : système de diffusion large bande destiné au public situé sur les extrémités latérales.

Power Alley : allée de puissance située dans la ligne centrale d'une salle. Dans cette allée le niveau est maximum, car elle correspond à l'axe de symétrie des systèmes. C'est l'endroit où les fronts d'onde arrivent en phase.

Subwoofer (sub) : haut-parleur destiné à la reproduction des basses fréquences.

Sweep : consiste à balayer l'ensemble du spectre avec un son pur. Ce signal est utilisé lors de la mesure.

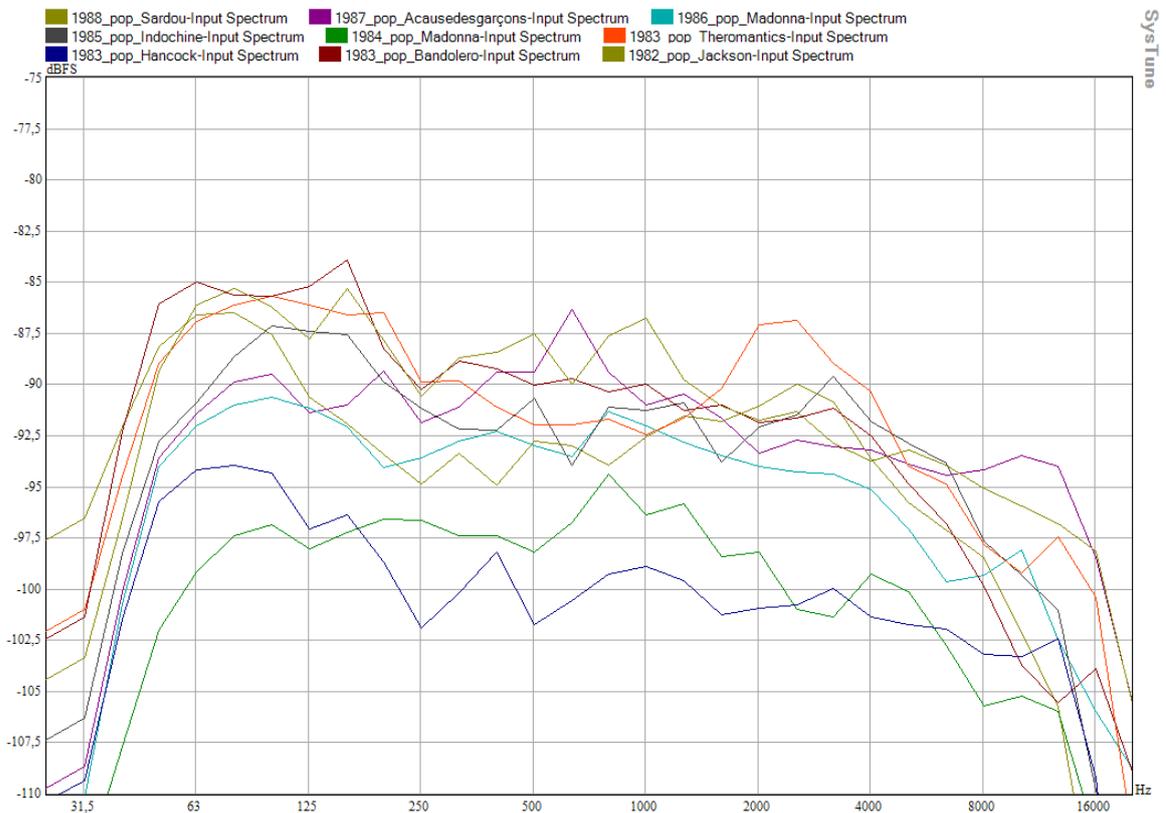
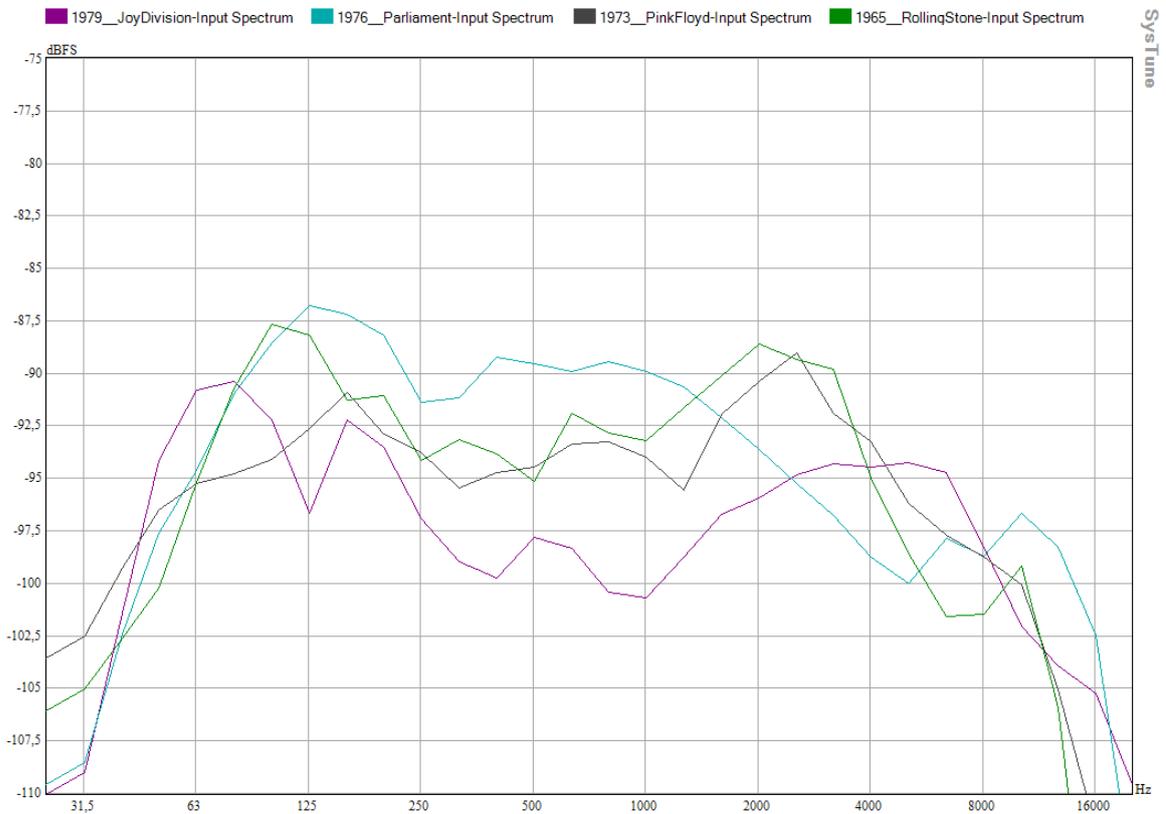
WST : Acronyme de Wave Sculpture Technology. Technologie développée initialement par Heil C. et Urban M. pour reproduire un front d'onde continu en utilisant plusieurs haut-parleurs.²²

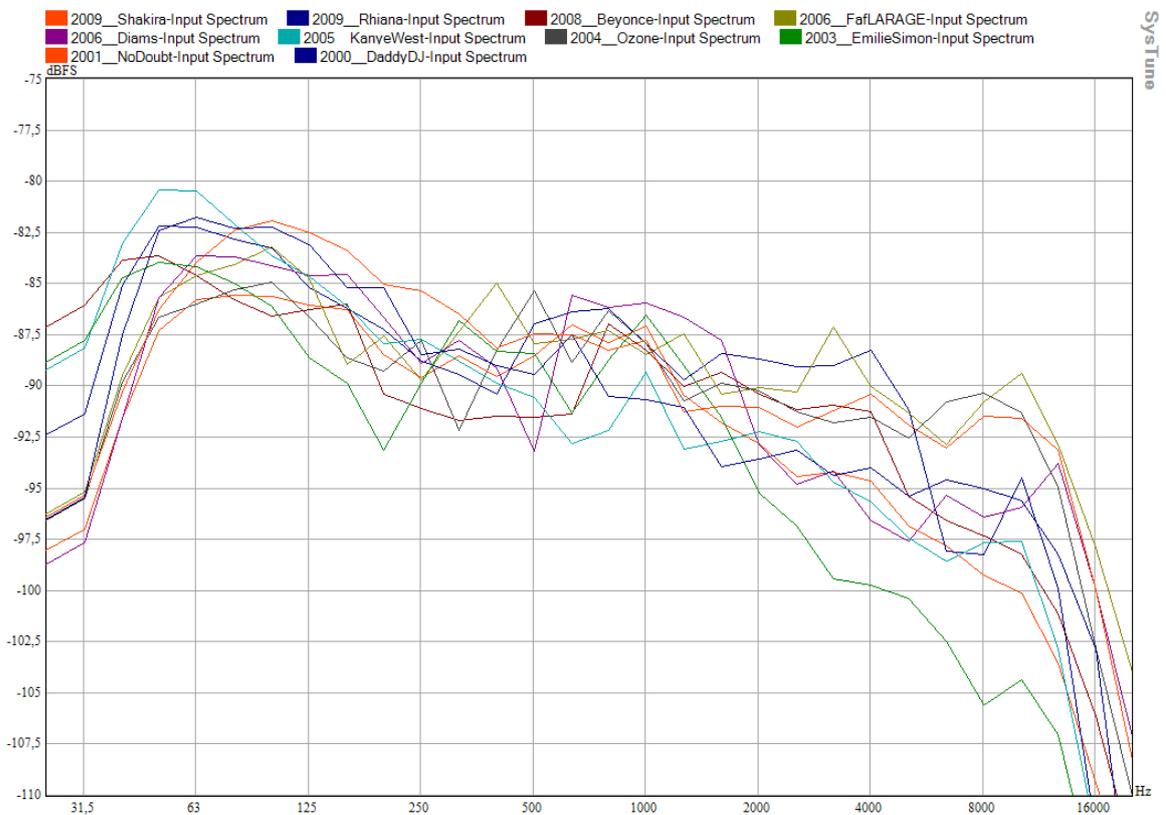
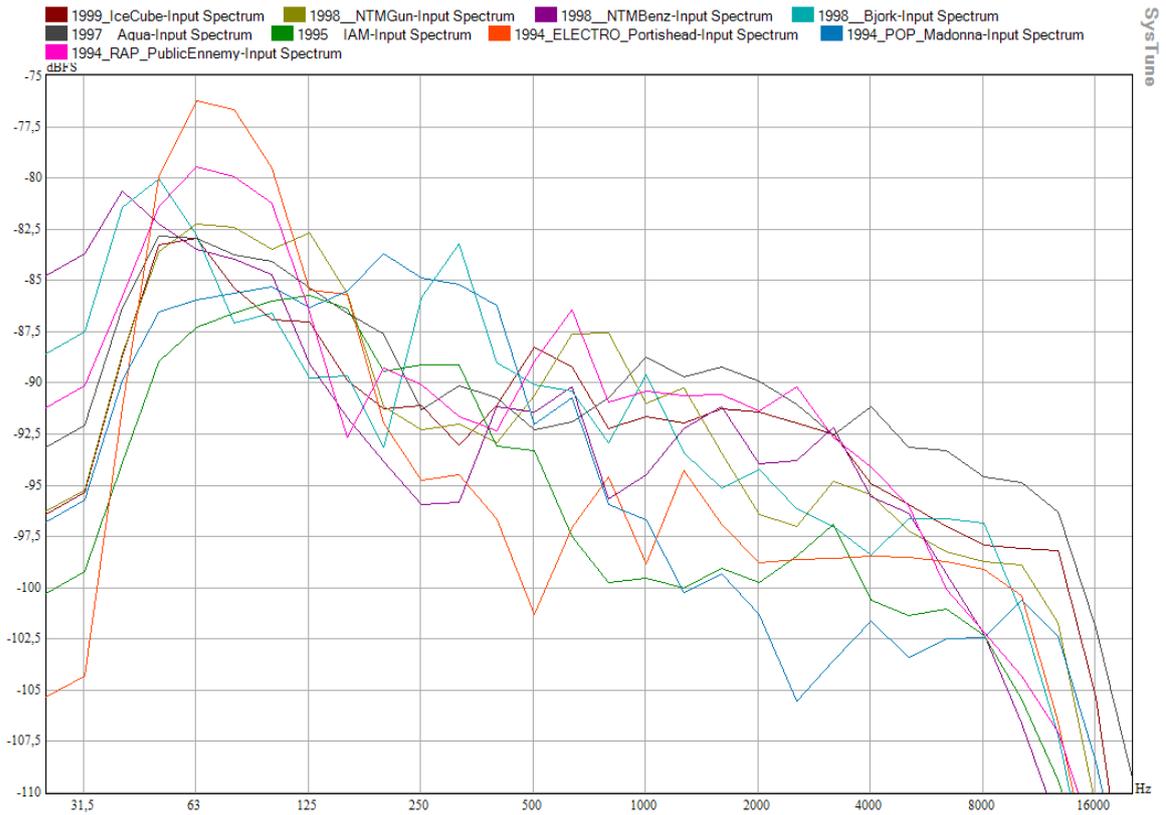
22. « Wavefront Sculpture Technology » de **Heil C.**, **Urban M** et **Bauman P.**, J. Audio Eng. Soc., Vol 51, No. 10, octobre 2003.

B Liste des morceaux analysés

Année	Artiste	Morceau	Durée	Style
1965	The Rolling Stones	Get Off of My Cloud	2'56	Rock
1973	Pink Floyd	Money	6'22	Rock
1976	Parliament	Dr. Funkenstein	5'48	Funk
1979	Joy Division	She's lost control	4'55	Rock
1982	Michael Jackson	Beat It	4'19	Pop
1983	The Romantics	Talking In Your Sleep	3'54	Pop/Rock
1983	Bandolero	Paris Latino	5'07	Funk/Disco/Rap
1983	Herbie Hancock	Rock It	5'28	Funk
1984	Madonna	Like a virgin	3'39	Pop
1985	Indochine	3ème sex	4'37	Rock
1986	Madonna	Open your Hearth	4'19	Pop
1987	À Cause des Garçons	À Caus' des Garçons	4'05	Pop/Rock
1988	Michel Sardou	La même eau qui coule	6'04	Chanson
1994	Public Enemy	Stop In The Name ...	1'21	Rap
1994	Madonna	Bedtime Story	4'53	Pop
1994	Portishead	Pedestal	3'41	Trip-hop
1995	IAM	Je danse le mia	3'56	Rap
1997	Aqua	Barbie girl	3'15	Dance/Pop
1998	NTM	Dans ma benz	4'07	Rap
1998	NTM	Pose ton gun	3'40	Rap
1998	Bjork	Hunter	4'45	Électronique
1999	Ice cube	Hello	3'51	Rap
2000	Daddy DJ	Daddy DJ	3'35	Électronique
2001	No Doubt	Making out	4'15	Rock
2003	Emilie Simon	Il pleut	3'31	Pop/Électronique
2004	O-zone	Dragostea Din Tei	3'35	Pop/Dance
2005	Kanye West	My Way Home	4'33	Rap
2006	Diam's	La boulette	3'41	Rap
2006	Faf Larage	Pas le temps	3'37	Rap
2008	Beyoncé	Single Ladies	3'13	Pop/R&B
2009	Rihanna	Wait Your Turn	3'47	Pop/R&B
2009	Shakira	She Wolf	4'15	Pop/Dance

C Résultats de l'analyse de chaque enregistrement





D Fiches techniques

technical specifications

METRIX SUB



DESCRIPTION

Provides high SPL extended bass to Adamson Metrix enclosures. The Metrix Sub is equipped with two powerful ND15-S Kevlar Neo low frequency drivers in a tuned, vented enclosure.

The cabinet is fully braced to minimize LF resonance and maximize efficiency. In the Sub -t, four sets of captured precision-machined aluminum rigging hardware retract into the cabinet body when not in use; and four NL8 connectors (two front, two back) enable easy cable loop-through regardless of the sub's orientation.

Metrix Sub Frame includes stacking plates for minus 3 degrees of negative angle.



PHYSICAL DATA

Dimensions & Weight	
Height Front (cm)	24.41" (62)
Width (cm)	21.37" (54)
Depth (cm)	28.87" (73.3)
Weight (Kg)	i - 117.5 lbs (53.2)
	t - 129.5lbs (58.7)
Box Shape	Rectangular
Box Finish	Textured Water Borne Acrylic
Hardware Finish	Polyester Sandtex™ Powder
Protective grille	14 Gauge cold steel
Horn Configuration	Fiberglass Waveguide
Cabinet Construction	Rugged 11 ply 5/8" Baltic Birch
Rigging	AIR™ (-t) / no rigging hardware (i)
Accessories	Black powder coated aluminum rigging frame (f) Steel rigging frame (i), Install adapter plate, Frame Link Plate, Wooden dolly, Waterproof Soft covers

TECHNICAL DATA

Frequency Response (+/-3dB)	
Full Range Preset	40Hz - 160Hz
Frequency Range	
with Xover Preset	35Hz - 110Hz
Maximum SPL (Continuous)	
with Xover Preset	130.4dB
Maximum SPL (Peak)	
Xover Preset	136.4dB
Sensitivity (2.83V @ 1m)	
LF	104.5dB
LF Section (Impedance Ω)	ND-15 S 15" Kevlar Neodymium Driver x 2 (6Ω)
Power Handling	
	(AES / Program / Peak)
2 x	500 / 1000 / 2000
Connection	
	Neutrik Speakon™ NL8 connectors
Processor Presets	
	XTA, PLM, LAKE



Adamson Systems Engineering
1401 Scugog Line 6, Port Perry,
ON L9L 1B2, Canada
t: [905] 982 0520 f: [905] 982 0609
www.adamsonsystems.com
info@adamsonsystems.com

**METRIX
SERIES**

Specifications are subject to change without notice.

technical specifications

SPEKTRIX **SUB**

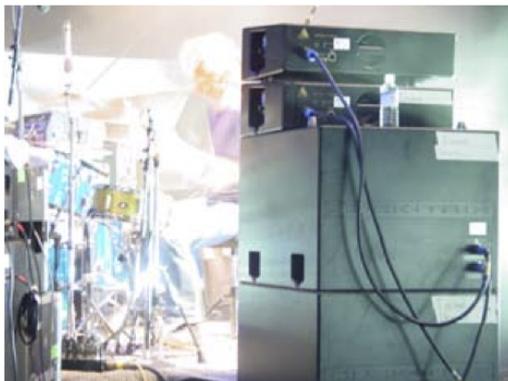


FEATURES

A compact, sub-bass loudspeaker designed to provide high SPL extended bass to Adamson SpekTrix enclosures, the SpekTrix Sub is equipped with two powerful AW18 18" Kevlar low frequency drivers in a tuned, vented enclosure.

The cabinet is fully braced to minimize LF resonance and maximize efficiency. Four sets of captured, precision-machined aluminum rigging hardware are spring-loaded and retract into the cabinet body when not in use; and four NL8 connectors (two front, two back) enable easy cable loop-thru regardless of the sub's orientation.

- Dual AW18 18" Kevlar Bass drivers
- Frequency Response of 40 - 160 Hz
- Efficient Cabinet Design
- Durable, Waterborne Acrylic Finish
- Captured, Spring-Loaded Precision Rigging Hardware
- Easy Truck Pack with 2 cabinets per dolly paired with optional waterproof softcovers for protection



Specifications are subject to change without notice.

PHYSICAL DATA

Dimensions & Weight	
Height (cm)	23" (58.5)
Width (cm)	28" (64)
Depth (cm)	32" (84)
Weight (Kg)	170lb (77)
Shape	Rectangular
Box Finish	Waterborne Acrylic
Hardware Finish	Back Bake Enamel
Flying Points	Captured spring-loaded precision machined aluminum
Protective grille	14 Gauge cold steel
Cabinet Construction	Rugged 15-ply Baltic Birch, internally braced
Accessories	Aluminum Dolly Board
Optional Accessories	Aluminum or Steel Rigging Frame, Waterproof Soft cover

TECHNICAL DATA

Frequency Response (+/-3dB)	
Full Range Preset	40Hz - 160Hz
Frequency Range	
Xover Preset	35 Hz – 110 Hz
Maximum SPL (Continuous)	132dB
Directivity	Convertible to Cardioid
LF Section	Two Adamson AW18 18" Kevlar Low Frequency Drivers
Power Handling (AES / Program / Peak)	
LF	600 / 1200 / 2400
Nominal Impedance	4 ohms
Sensitivity (2.83V @ 1m)	105.8dB
Connection	Neutrik Speakon™ NL8 (2 front, 2 rear)

SPEKTRIX
SERIES

Table des figures

1.1	Courbe d'isotonie (D'après, H. Fletcher and W. A. Munson , « Loudness of a Complex Tone, Its Definition, Measurement and Calculation », <i>The Journal of the Acoustical Society of America</i> , juillet 1933, Vol. 5, Issue 1, p. 65)	13
1.2	Distinction des différentes zones pour un concert « rock »	15
2.1	Modelisation des résonnances du corps humain (Rasmussen G. , « Human body vibration exposure & its measurement », 1982.)	20
2.2	Lien entre l'échelle des phones et les courbes de pondération	24
3.1	Représentation spectrale de la moyenne des morceaux analysés classés par décennie	27
3.2	Représentation spectrale de trois morceaux de styles différents (rap, électronique et pop) produits en 1994	28
4.1	Les principaux éléments constituant un haut-parleur à bobine mobile (www.enceinte.net)	29
4.2	Représentation d'un court circuit acoustique pour un haut-parleur nu.	30
4.3	Représentation du piston plan infini circulaire encastré (PPCE)	33
4.4	Directivité du modèle du piston plan circulaire encastré en fonction de la fréquence et de l'angle	34
4.5	Comparaison des mesures obtenus sur le modèle plan infini et baffle plan pour 50 Hz et 150 Hz[11]	35
4.6	Représentation de la construction d'une enceinte METRIX SUB et SPEKTRIX SUB	36
4.7	Réponse fréquentielle d'une enceinte METRIX SUB en fonction de l'angle	36
5.1	Rayonnement à 50 Hz de trois enceintes écartées de 4 m et de 8 m	38
5.2	Disposition de l'alignement de 4 enceintes	38
5.3	Diagramme de directivité théorique à 50 Hz en fonction de la longueur d'une ligne	39

5.4	Réponse en fréquence de quatre enceintes SPEKTRIX SUB alignées en fonction de l'angle	40
6.1	Schéma de positionnement de deux enceintes pour l'obtention d'interférences	41
6.2	Rôle de la phase pour l'addition de deux signaux identiques	42
6.3	Illustration des interférences pour un écartement d de 3,4 m. $N_{dB} = 20 \log(\sin(2\pi ft) + \sin(2\pi ft + 2\pi df))$	43
6.4	Schéma d'implantation pour l'obtention d'interférence spatiale	44
6.5	Schéma d'implantation pour l'obtention d'interférence spatiale dans le cas d'ondes planes	45
6.6	Illustration des interférences spatiale pour un écartement d de 3,4 m. Variation de l'amplitude et évolution de la phase en fonction de l'angle θ pour une fréquence f de 100 Hz et une distance entre les enceintes d de 3m	46
6.7	Représentation de la couverture pour deux sources espacées de 3 m à 100 Hz	46
6.8	Représentation des sources images conséquences d'un retard électrique	47
6.9	Configuration cardioïde de type avec une enceinte devant une autre .	48
6.10	Modification de la réponse fréquentielle d'un METRIX SUB avec un METRIX SUB devant	50
6.11	Réponse fréquentielle obtenue avec un système composé de deux METRIX SUB écartés de 1,06 m avec un retard de 3,11 ms pour l'enceinte avant	50
7.1	Schéma d'implantation pour le end-fire avec quatre enceintes	51
7.2	Placement pour la mesure du end fire.	52
7.3	Modification de la réponse temporelle en positionnant une enceinte (non alimentée) devant l'autre	52
7.4	Réponse fréquentielle et directivité de 4 enceintes (espacées de 1,2 m et retardées de 3,52 ms) en utilisant le principe du end-fire	53

7.5	La configuration Back-Front-Front-Front pour les enceintes SB118 L-ACOUSTICS (www.l-acoustics.com)	54
7.6	Réponse fréquentielle dans l'axe (0°) de chaque enceinte (SPEKTRIX SUB) composant un empilement de type Front-Back-Front	55
7.7	Configuration Front-Back-Front avec trois SPEKTRIX SUB et un retard de 3,9 ms	56
8.1	L'enceinte à gradient de pression de NEXO S.A.	57
8.2	Schéma de configuration pour l'association de deux monopoles	58
8.3	Représentation du traitement à appliquer entre deux enceintes pour obtenir dans le cadre de l'association de deux monopôles une directivité cardioïde	59
8.4	Réponse de trois enceintes SPEKTRIX SUB traitées par le préreglage cardioïde ADAMSON/DV2	60
8.5	Evolution de l'image virtuelle induite par un retard en fonction de la position	61
8.6	Rayonnement de huit enceintes placées en ligne, espacées de 2 m et sans traitement	62
8.7	Rayonnement de huit enceintes placé en arc réel (enceintes extrêmes reculées de 1 m) et en arc virtuel (enceintes alignées et les extrêmes sont retardées de 3,4 ms)	62
8.8	Rayonnement de huit enceintes placé en arc réel (enceintes extrêmes reculées de 2 m) et en arc virtuel (enceintes alignées et les extrêmes sont retardées de 6,8 ms)	63
8.9	Directivité de quatre enceintes en fonction de l'écartement	64
8.10	Directivité de quatre enceintes en fonction du retard	64
8.11	Comparaison de la directivité entre le déplacement et l'insertion d'un retard	65
9.1	Schéma de l'effet de sol pour les enceintes accrochées	67
9.2	Schéma de la variation des distances en fonction du positionnement des enceintes	68

9.3	Représentation schématique de l'association d'un système large bande accroché et d'un système de grave au sol	69
9.4	Modélisation de l'effet de sol : source image ou rayonnement en demi-sphère	70
9.5	Modification de la réponse fréquentielle d'une enceinte avec sept personnes devant	71
10.1	Implantation de la mesure d'un système au sol couplé avec un système en hauteur	73
10.2	Influence du retard sur l'association des deux systèmes	73
10.3	Orientation des enceintes dans un système gauche droite (NEXO S.A.)	75
10.4	Rayonnement à 50 Hz avec un espacement de 20 m entre les enceintes extrêmes d'un système gauche droite et d'un système gauche centre droite	76
10.5	Représentation des zones couvertes par un système associé à un système de rappel	77
10.6	Représentation schématique des différents niveaux mis en jeux lors de l'implantation d'un système de rappel	78
12.1	Vue de dessus et en coupe du Zénith de Strasbourg	83
12.2	Modification de la réponse fréquentielle du système selon la présence du public, l'hygrométrie et la température	84
13.1	Choix d'implantation et de traitement des enceintes au sol	87
13.2	Simulation de l'arc-sub seul	88
13.3	Simulations des systèmes au sol	89
13.4	Choix d'implantation des enceintes accrochées, vue latérale	90
13.5	Simulation de l'effet de sol	91
13.6	Simulation de la couverture en vue latérale	92
13.7	Changement de la position et du traitement des enceintes placées aux extrémités	94

13.8	Représentation schématique des processeurs de diffusion pour le traitement des système fonctionnant dans les basses fréquences	95
14.1	Schéma d'implantation des points de mesure	97
14.2	Réponse en fréquence de l'arc-sub, mesurée au centre de la salle en fonction de l'éloignement	98
14.3	Réponse en fréquence du système de droite au sol, mesurée au centre de la salle en fonction de l'éloignement	99
14.4	Réponse en fréquence du système de droite accroché, mesurée au centre de la salle en fonction de l'éloignement	99
14.5	Réponse en fréquence de l'arc-sub, mesuré à 8 m du premier rang entre le centre et un écartement latéral de 16 m	100
14.6	Réponse en fréquence du système de droite au sol, mesuré à 8 m du premier rang entre le centre et un écartement latéral de 16 m	101
14.7	Réponse en fréquence du système de droite accroché, mesuré à 8 m du premier rang entre le centre et un écartement latéral de 16 m	101
14.8	Réponse en fréquence des deux systèmes gauche droite, mesuré à 8 m du premier rang entre le centre et un écartement latéral de 16 m	102
14.9	Réponse en fréquence des trois systèmes de grave, mesuré à 8 m du premier rang entre le centre et un écartement latéral de 16 m	103
14.10	Incidence de la phase sur l'association des systèmes	103
14.11	Réponse en fréquence des trois systèmes de grave.mesuré à 8 m du premier rang entre le centre et un écartement latéral de 16 m	104

Références

- [1] McCarthy B. : *Sound systems : design and optimization*. Focal press, Oxford, seconde édition, 2010. 1
- [2] LUBIATO YOANN : Mémoire de recherche sur l'étude des sons de très basses fréquences de leur perception et de leur utilisation dans la musique vivante. Mémoire de D.E.A., E.N.S Louis Lumière, 2001. 1.1.1, 6, 7
- [3] JOUHANEAU J. : *Acoustique des salles et sonorisation*. Tech et Doc, Paris, seconde édition, 2003. 1.2, 1.2.1
- [4] JOUHANEAU J. : *Notion élémentaire d'acoustique. Électroacoustique*. Tech et Doc, Paris, seconde édition, 2000. 2, 4.4.1
- [5] YEOWART N. S. : Effects of infrasound on man. *In Rapport sur le colloque international sur les infrasons*. C.N.R.S., 1973. 2.1.1
- [6] COERMAN R. : The passive dynamic mechanical properties of the human thorax-abdomen system and of the whole body system. *l'Aerospace Med.*, janvier 1960. 2.1.2
- [7] GUASTAVINO CATHERINE : *Étude sémantique et acoustique de la perception des basses fréquences dans l'environnement sonore urbain*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 2003. 2.1.2
- [8] McANGUS T. et NEIL P. : Vestibular responses to loud dance music : A physiological basis of the "rock and roll treshold" ? *The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 107, Issue 1*, janvier 2000. 2.1.2
- [9] HANDEL S. : *Listening. An introduction to the perception of auditory events*. The MIT Press, Cambridge, 1993. 2.2.1
- [10] DIDIER A. : *Physique appliquée à la reproduction des sons et des images*. MASSON et Cie Éditeur, Paris, 1964. 11
- [11] HEIL C., URBAN M., PIGNON C. et BAUMAN P. : The distributed edge dipole (d.e.d.) model for cabinet diffraction effects. *J. Audio Eng. Soc., Vol. 52, No. 10*, octobre 2004. 4.4.2, 4.5, D
- [12] MONTREZOR CÉDRIC : Pertinence des logiciels de prédictions pour les systèmes de sonorisation en ligne sources. Mémoire de D.E.A., E.N.S. Louis Lumière, 2003. 5.2, 5.3, 21, 13.3
- [13] OLSON H.F. : *Acoustical Engineering*. D. Van Nostrand Company Inc., Princeton, New Jersey, 1957. 5.3

- [14] BOONE M. M. et OUWELTJES O. : Design of a loudspeaker system with a low-frequency cardioid radiation pattern. *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 45, No. 9, septembre 1997. 8.2.1, 8.2.1
- [15] MORTAIGNE V. : Printemps de bourges, premier bilan. *lemonde.fr*, avril 2010. 11.1, 19
- [16] Centre Nationale des chansons des Variétés et du JAZZ : Cahier des charges des salles zénith, octobre 2002. 11.2, 20