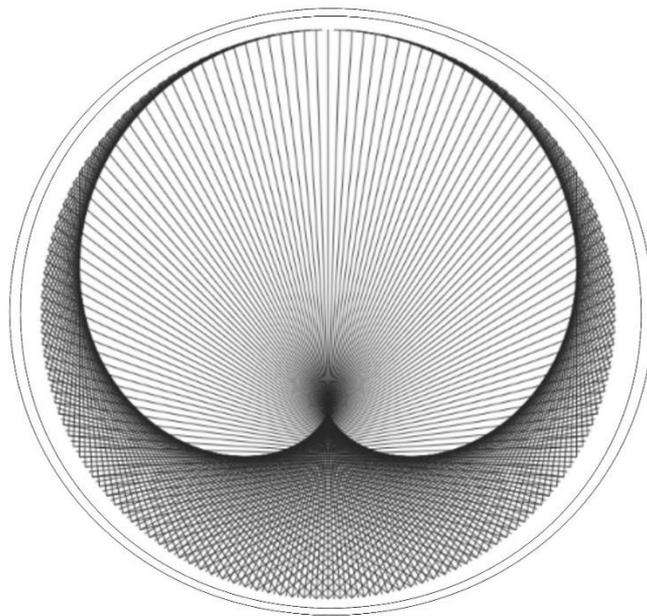


Mémoire de fin d'études

Au vu des contraintes rencontrées, quelles sont les solutions actuelles nous permettant de maîtriser au mieux la diffusion des basses fréquences dans le cadre de la sonorisation de concerts ?



Site internet : <https://guerinlucas14.wixsite.com/memoirelucasguerin>

Directeur du mémoire : HENOCQ Julien

GUÉRIN Lucas
Section ISTS

2019 – 2020





REMERCIEMENTS

Tout au long de ce travail de recherche et d'écriture, j'ai eu la chance de pouvoir compter sur certaines personnes qui m'ont permis de mener à bien cette réalisation, en me soutenant et en m'encourageant. Ma reconnaissance se tourne particulièrement envers elles.

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de mémoire, **Julien Henocq**, qui m'a suivi durant cette période, m'a conseillé et m'a aiguillé. Merci pour sa pédagogie durant ces trois années au sein de l'ESRA Bretagne, et pour la passion envers la technologie audio qu'il a su me transmettre. Je lui suis très reconnaissant.

Un grand merci à **Lola Delaunay** qui m'a particulièrement soutenu et m'a offert un point de vue différent, une aide importante et un recul nécessaire, lors des nombreuses relectures.

J'aimerais aussi remercier **Nelly Fita** pour son aide gentiment proposée et pour sa correction. Je remercie aussi **Mathis Deroyer**.

Merci à **Martial Marc**, qui m'a offert durant ces trois années l'opportunité de réaliser des stages plus qu'intéressants ainsi que la transmission d'une partie de son savoir en acoustique. Cela a été une chance pour moi.

Je remercie la société **Audiolite**, ainsi que ses employés et l'ensemble des intermittents du spectacle y travaillant. Les connaissances acquises qui m'ont été transmises lors de mon stage me sont précieuses. Merci pour avoir répondu positivement à ma demande dans l'optique d'effectuer des mesures.

Merci à **Sébastien Roblin**, **Patrick Passerel**, ainsi que **Maxime Menelec**, travaillant à **Intelligence Audio**, pour avoir pris le temps de répondre à mes questions.

Merci à ma famille, mes amis, et l'ensemble de mes professeurs.

Et pour finir merci à vous lecteur de prendre le temps de lire mon travail.





RÉSUMÉ

Généralement, lors des nombreux concerts sonorisés, les techniciens rencontrent des problèmes lors de la diffusion des basses fréquences : des contraintes qui nécessitent des solutions. Car même si nous constatons une importante évolution des systèmes de sonorisation ces dernières décennies, les problèmes physiques - et notamment ceux dus à l'acoustique des lieux - sont des facteurs à ne pas négliger, ce d'autant plus que les basses fréquences voient leur importance augmenter et se trouvent de plus en plus utilisées.

Si cette bande de fréquence est si particulière dans sa diffusion, cela vient du fait que les ondes sonores correspondantes faces aux obstacles rencontrés, se trouvent très vite gênantes lorsqu'elles sont mal gérées. Ainsi les contraintes résultantes se caractérisent par une qualité moindre du concert tant pour les techniciens et artistes que pour le public, mais aussi par des soucis envers le voisinage. L'arrivée de certaines réglementations a permis de limiter les problèmes d'émergence et de diminuer les risques auditifs des personnes assistant aux concerts.

Cependant, toujours pour un souci de qualité, les techniciens ont dû trouver des solutions permettant de contrôler la diffusion des basses fréquences. Ces solutions se sont avérées utiles avec l'utilisation de différentes configurations permettant d'associer plusieurs haut-parleurs entre eux. Nous parlons alors de configurations Line Source, arc sub ou encore de subwoofers accrochés, ces différents montages étant toujours dans l'optique d'améliorer la qualité d'écoute, ce d'autant plus que l'apparition des configurations cardioïdes dans les années 90 a permis de diminuer considérablement les problèmes présents au niveau du voisinage ainsi que sur scène. Ces soucis d'émergence sont devenus une priorité lors des événements sonorisés aujourd'hui.

Malgré les différents montages existants selon les cas, tel que le Front Back Front, ou le End Fire, la configuration dipôle se trouve être la plus intéressante lorsque nous voulons atténuer au maximum les niveaux sonores derrière le système.

Néanmoins, même si certains constructeurs ont pu trouver des solutions pour leurs produits, nous constatons une efficacité de la directivité cardioïde seulement pour une seule fréquence. L'idée ici est donc de pouvoir proposer une solution interopérable permettant de rendre une configuration dipôle cardioïde à toutes les fréquences, en travaillant sur le principe de traitement du signal en temps réel.





ABSTRACT

Usually, during the many concerts with sound, technicians encounter problems with the diffusion of low frequencies. Those constraints require solutions. Even though we have seen a significant evolution in sound systems over the last few decades, physical problems, and in particular those due to the acoustics of the venue, are factors that should not be neglected. Indeed, low frequencies are becoming more important nowadays, so that means that they are much more used than before.

If this frequency band is so particular in its diffusion, it is because the corresponding sound waves facing the obstacles encountered are very quickly disturbing when they are badly managed. Thus, the resulting constraints are characterized by a lower sound quality of the concert towards the technicians, artists, and for the public, and it also creates some issues with neighborhoods. New regulations have been able to limit problems of emergence, and to reduce the auditory risks of people attending concerts.

However, because of the poor sounding quality, technicians had to find solutions to control the diffusion of low frequencies. Those solutions proved to be useful with the use of different configurations allowing to associate several loudspeakers in-between. I am referring to Line Source configurations, arc sub or even mounted subwoofers, differently put together, always in the purpose to improve the listening quality. Furthermore, the appearance of cardioid configurations in the 90s has considerably reduced the problems that were endured by neighborhoods and on stage. These emerging concerns have become a priority in sound events nowadays.

In spite of the different existing configurations, that can change from one to another, such as Front Back Front, or End Fire, the dipole configuration happens to be the most interesting when sound levels can be attenuated behind the system as much as possible.

Nevertheless, even if some manufacturers have been able to find solutions for their products, an efficiency of the cardioid directivity can be noticed for only one frequency. The idea here is therefore to be able to propose an interoperable solution allowing a cardioid dipole configuration to be made cardioid at all frequencies, working on the principle of real-time signal processing.





Table des matières

Remerciements	2
Résumé	4
Abstract	6
Table des matières	8
Nomenclature	12
Introduction	14
I/ L'évolution de la diffusion des basses fréquences et ses inconvénients.....	16
A. / Historique de la sonorisation.....	16
1. / De la source à nos oreilles	16
▪ 1) L'évolution d'un point de vue technologique.....	17
▪ 2) L'importance des lieux et de leur acoustique.....	26
2. / L'importance des basses fréquences.....	31
▪ 1) Historique rudimentaire des subwoofers.....	31
▪ 2) L'influence des styles musicaux.....	32
B. / D'un point de vue technique.....	34
1. / Rappels théoriques sur le son et principes acoustiques.....	34
▪ 1) L'onde sonore et ses caractéristiques.....	34
▪ 2) La perception des basses fréquences.....	40
▪ 3) Les obstacles rencontrés.....	47



2.	/ Les caractéristiques d'un Haut-Parleur électrodynamique.....	58
3.	/ Les différents types de subwoofers de nos jours en sonorisation de concerts.....	69
C. / Les conséquences de la diffusion des basses fréquences aujourd'hui.....		77
1.	/ Les problèmes engendrés.....	77
▪	1) L'acoustique des lieux et le cas du plein air.....	77
▪	2) Le point de vue qualitatif du concert	79
▪	3) La gêne occasionnée sur le voisinage.....	85
2.	/ L'arrivée des réglementations.....	86
▪	1) Les niveaux maxima autorisés.....	86
▪	2) L'émergence autorisée	87
II/ Les technologies et solutions actuelles cherchant à remédier aux contraintes.....		88
A. / Associations de Haut-Parleurs.....		88
1.	/ Associations entre différents subwoofers.....	88
▪	1) Point Source.....	89
▪	2) Line Source.....	90
2.	/ Arcs Sub.....	94
3.	/ Le cas des subwoofers stackés au sol.....	96
4.	/ Les subwoofers accrochés.....	98
5.	/ Associations des subwoofers avec les systèmes larges bandes.....	107
B. / Les montages des caissons de basses permettant une directivité cardioïde		113
1.	/ Front Back Front ou autres.....	114
2.	/ End Fire.....	117
3.	/ Dipôle.....	119



C. / Comparaison entre les différents dispositifs.....	121
1. / Les simulations.....	121
2. / Les mesures.....	125
▪ 1) Protocole de mesures.....	125
3. / Les résultats des simulations.....	126
▪ 1) Avantages.....	126
▪ 2) Inconvénients.....	127
▪ 3) Avis des professionnels.....	131
III/ La directivité cardioïde à toutes les fréquences.....	134
A. / Les dispositifs existants pour obtenir une directivité à toutes les fréquences.....	134
B. / Préconisations.....	135
1. / Le dipôle, meilleur compromis.....	135
2. / Le choix du délai.....	135
▪ 1) Délai fixe.....	136
▪ 2) Délai variable.....	138
3. / Son utilisation.....	143
▪ 1) Le principe.....	143
▪ 2) Les applications en fonction des cas.....	145
▪ 3) Les configurations compatibles.....	145
C. / Mon application.....	147
1. / L'amélioration proposée.....	147
2. / Le fonctionnement du programme.....	149
3. / Le futur de l'application.....	153



Conclusion	154
Annexes	156
Glossaire	168
Table des figures	172
Références	182



NOMENCLATURE

Symbole	Définition	Unités
A	Aire d'absorption équivalente en mètre carré	m²
a	Dimensions d'un objet	/
B	Champ magnétique en Tesla	T
c	Célérité du son	m.s⁻¹
D	Distance en mètre	m
d	Distance en mètre	m
F	Force en Newton	N
f	Fréquence en Hertz	Hz
f_c	Fréquence de coupure en Hertz	Hz
f_{CH}	Fréquence de coupure haute en Hertz	Hz
f_{CB}	Fréquence de coupure basse en Hertz	Hz
H	Hauteur en mètre	m
h	Hauteur en mètre	m
I	Intensité acoustique en Watts par mètre carré	W.m⁻²
I₀	Intensité acoustique de référence en Watts par mètre carré	W.m⁻²
ID	Indice de directivité	/
i	Intensité du courant électrique en ampère	A
k	Nombre d'onde angulaire	/
L_I	Niveau d'intensité acoustique en décibel	dB
L_p	Niveau de pression acoustique en décibel	dB (SPL)
L_w	Niveau de puissance acoustique en décibel	dB



l	Longueur de la bobine en mètre	m
P	Puissance en Watts	W
P₀	Puissance de référence en Watts	W
p	Pression en Pascal	Pa
P₀	Pression de référence en Pascal	Pa
Q	Facteur de directivité	/
r	Rayon en mètre	m
S	Surface en mètre carré	m²
T	Période en seconde	s
T	Température en degrés Celsius	°C
TF	Transformé de Fourier	/
t	Temps en seconde	s
V	Volume en mètre cube	m³
λ	Longueur d'onde en mètre	m
φ	Phase en degré	°
θ	Angle en degré	°
η	Rendement en pourcentage	%
Δd	Différence de marche en mètre	m



INTRODUCTION

“System optimization starts with good system design. From there it is a process that should be guided by structured thinking and critical listening.”¹

Depuis leurs débuts, les systèmes de sonorisation n’ont cessé d’évoluer, et ce à cause d’une nécessité grandissante, notamment dans le cadre de la sonorisation de concerts.

Baigné depuis mon plus jeune âge dans la musique, et notamment lors de ces événements, c’est en intégrant l’ESRA Bretagne, dans la section ISTS, que j’ai pu m’épanouir et m’investir pleinement dans mon travail, en alliant ma passion avec mes études, et en ayant pour objectif à moyen terme de devenir technicien son dans le domaine du spectacle vivant.

C’est au cours de ces trois années que j’ai pu développer ce sujet, jusqu’à en venir aux limites posées par la diffusion sonore, notamment dans les basses fréquences. Naturellement est née la problématique suivante : **Au vu des contraintes, quelles sont les solutions actuelles nous permettant de maîtriser au mieux la diffusion des basses fréquences dans le cadre de la sonorisation de concerts ?**

Le but de ce travail de recherche n’est pas d’établir une méthode pour caler un système de sonorisation, mais bien de trouver de nouvelles solutions ou d’améliorer les solutions actuelles, afin de pallier aux contraintes rencontrées.

Pour ce faire, il me semble logique afin de partir sur une base commune, de rappeler dans un premier temps, quelques notions historiques sur le sujet et d’établir des principes acoustiques essentiels à la compréhension de ce travail.

Cette première phase nous permettra d’expliquer l’évolution de la diffusion des basses fréquences au cours du temps et d’identifier ses différentes contraintes.

1. « L’optimisation du système commence par une bonne conception du système. De là, c’est un processus qui devrait être guidé par une pensée structurée et une écoute critique. »

McCarthy B. : *Sound systems : design and optimization*. Focal press, Oxford, seconde édition, 2010, p 14.



Dans un second temps nous ferons un état des lieux des solutions modernes, d'un point de vue théorique à l'aide de diverses simulations. Cette démarche aura lieu d'être dans le but de les comparer et de déceler chez eux, leurs avantages et inconvénients.

Pour finir, nous chercherons à améliorer les dispositifs présents permettant de maîtriser la diffusion des basses fréquences, en proposant un outil interopérable venant compléter et approfondir notre contrôle sur ce phénomène.

Sujet passionnant mais cependant un peu complexe, qui je pense vous fera tendre l'oreille et ouvrir l'œil lors de votre prochain concert !

*La totalité des simulations présentes dans ce mémoire ont été réalisées
à l'aide du logiciel **Soundvision**, développé par **L-Acoustics**,
en employant des subwoofers de type **KS28** de la même marque.*

Cependant, malgré les nombreux calculs, simulations et hypothèses que nous allons faire dans ce travail de recherche, gardons à l'esprit que notre oreille sera toujours notre meilleur outil.



Première partie

L'évolution de la diffusion des basses fréquences et ses inconvénients

A Historique de la sonorisation

A.1 De la source à nos oreilles

Entendre et se faire entendre. Voilà une capacité très importante que nous retrouvons chez l'être humain, et même chez d'autres espèces d'ailleurs. Un facteur prédominant pour établir des relations sociales, et qui est à mon sens ce qui constitue la base du partage et de la communication. Ce phénomène est rendu possible grâce à nos oreilles, la partie de notre corps contenant l'ouïe, majeure dans notre vie, un élément que je considère comme essentiel du fait que ce soit l'un de nos cinq sens : on peut vivre sans, du moins à notre époque, mais il est très difficile de s'en passer.

Si nous prenons l'exemple de l'odorat ou du goût, il suffirait d'arrêter de respirer durant quelques secondes pour ne plus sentir ni goûter pendant ce court laps de temps. Il en est de même pour le toucher : si nous nous concentrons sur nos mains, il suffirait de les tendre devant nous à l'écart de tout objet pour ne rien ressentir. Fermer les yeux nous plonge dans le noir, et nous prive de la vue, mais qu'en n'est-il de l'ouïe ? À moins de nous rendre sourds - et encore je ne fais pas référence ici aux acouphènes post-surdités - il est impossible de nous priver du son, car le simple fait de nous boucher les oreilles nous permettrait seulement d'entendre en détails les bruits de notre corps. Vous comprenez donc l'importance et la place que le son occupe dans notre vie.

Au fil du temps, l'Homme a aussi compris cette importance et a cherché à dompter le son afin d'en tirer des avantages et à trouver des solutions aux problèmes rencontrés lors de son usage. Car il est facile de parler ou bien encore de jouer de la musique de façon intelligible devant



un petit groupe de personnes, mais c'est une toute autre histoire lorsque le message doit être entendu et compris par des milliers d'individus. C'est notamment le cas lors des concerts ayant des jauges de publics élevées - dans le cas des instruments électroniques - ou encore lorsque les sources émises sont d'un niveau sonore très faibles.

Ce travail de recherche étant axé sur la diffusion des basses fréquences dans le cadre de la sonorisation de concert, commençons par un petit rappel historique nous permettant de contextualiser et de comprendre les origines.

A.1.1 L'évolution d'un point de vue technologique

Dans l'histoire du son, et notamment dans sa diffusion, un des éléments clés donnant le top départ à la sonorisation, a été l'apparition des premiers transducteurs. Ici le terme transducteur définit un dispositif permettant de transformer un signal acoustique en un signal électrique, ou inversement. Plus simplement nous parlons alors des premiers microphones qui étaient présents dans les téléphones de l'époque.

En 1877, **Thomas Edison** et **Emile Berliner** déposent chacun un brevet revendiquant la paternité du microphone à charbon. Edison sortira vainqueur de cette bataille et en équipera ces appareils pendant près de cent ans.



FIGURE A.1.1 – Microphone à charbon. [10]

Leur importance ici ne vient pas du fait que ce soient les premiers transducteurs de ce genre, mais bien de leur fidélité à retranscrire les variations d'intensité de la voix humaine par rapport aux autres dispositifs de l'époque.



Une fois cette transduction faite, l'étape suivante -celle qui nous intéresse - est tout simplement l'inverse : transformer le signal électrique en signal acoustique. Ce phénomène est rendu possible par le biais de l'utilisation des haut-parleurs, notamment avec l'invention du transducteur à bobine mobile par **Oliver Lodge** en **1898**. Tout comme le microphone à charbon, des technologies plus anciennes permettaient déjà d'obtenir ce résultat, cependant moindre en qualité. Mais l'apparition de la bobine mobile occupe une grande importance dans notre histoire, car ce dispositif est toujours utilisé 120 ans plus tard.

En **1915**, la réalisation du tout premier haut-parleur doté d'un tel système revient aux ingénieurs Danois, **Peter L. Jensen** et **Edwin Pridham**, à Napa en Californie, mais leur brevet ne fut jamais retenu. Leur produit nommé Magnavox a donné naissance aux Public Address Systems (PA System), des systèmes de sonorisation destinés au départ à la diffusion à fort volume de la voix humaine à l'aide de cornets, dans des lieux nécessitant une audibilité accrue.



FIGURE A.1.2 – Démonstration en public du Magnavox par Fritzi Scheff, actrice et chanteuse Américaine. [11]

*Cependant le véritable brevet du haut-parleur dynamique revient à **Chester W. Rice** et **Edward W. Kellogg** en 1924.*



Parallèlement à ces avancées, d'autres inventeurs s'intéressent au signal électrique et plus particulièrement à son amplification. Effectivement, pour que le son émis soit d'un volume important, le signal entrant dans le transducteur doit être d'une amplitude conséquente.

Nous assistons alors à l'ouverture de l'ère de l'électronique, mot inventé par **John Ambrose Fleming**, physicien Anglais, signifiant traitement des signaux électriques. C'est en travaillant aux côtés de **Guglielmo Marconi**, physicien et inventeur italien, qu'il déposera le brevet de la diode en **1906**. Ce dispositif permet notamment de redresser un courant alternatif en un courant continu, un pas essentiel dans le traitement de l'électricité. Cette même année, **Lee de Forest** cherche à améliorer ce « kénotron », autre nom de ce système, en rajoutant seulement une pièce, créant ainsi l'audion, la première triode.

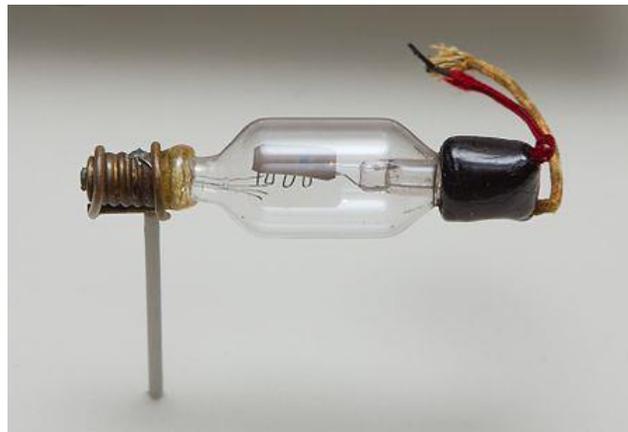


FIGURE A.1.3 – Photo de l'audion inventé par Lee de Forest. [12]

Ce tube à vide partiel fut le premier composant permettant de construire un amplificateur électronique. Sa faculté à amplifier un signal fut découverte par **Edwin Armstrong**, chercheur Américain, en **1912**. Cette technologie sera par la suite remplacée par le transistor, autre composant électronique découvert le **23 décembre 1947** par des chercheurs des laboratoires Bell.

Nous constaterons alors une évolution ainsi qu'une démocratisation des Public Address Systems, spécialement durant la seconde guerre mondiale.



Seulement, sans doute par manque d'intérêt pour le sujet à l'époque de l'avènement de la guitare électrique et du rock n'roll, les seuls moyens de sonorisation pour les groupes de musiques lors des concerts, étaient les amplificateurs dédiés à leurs instruments, ainsi que ces fameux Public Adress Systems. Et cette façon de procéder n'était toujours pas la plus adaptée.

Le **15 août 1965**, 56000 personnes assistent au plus gros concert de l'histoire à cette date : celui des Beatles au Shea Stadium de New York.



FIGURE A.1.4 – Concert des Beatles au Shea Stadium de New York le 15 août 1965.

[13]

Les seuls moyens de sonorisation déployés pour cet événement ont été pour ainsi dire ridicules. Un ensemble d'enceintes disposées autour du stade diffusaient au total un son d'une puissance de 700 Watts. À l'époque, de tels niveaux étaient pratiquement inconnus pour un concert live. Mais les quatre amplificateurs de puissance Altec 1570 ainsi que le système présent n'ont pas fait le poids face aux cris des fans.



FIGURE A.1.5 – Amplificateur de puissance ALTEC 1570. [14]



**FIGURE A.1.6 – Enceinte utilisée lors du concert
(extrait de la captation vidéo du Live). [15]**

Mais si nous devons retenir une date importante dans cette histoire, ce serait sans aucun doute celle du **29 août 1966**. Un an après leur concert au Shea Stadium de New York, les Beatles se produisent au Candlestick Park à San Francisco. Les spectateurs assistent alors sans le savoir au dernier concert du groupe. Le son est alors horrible et le show inaudible. Ne supportant plus cette mauvaise sonorisation et ne pouvant même pas s'entendre jouer sur scène, les quatre garçons font le choix de ne plus jamais donner de concert et se consacrent à un travail exclusivement en studio. Cet événement servira de catalyseur au changement et donnera naissance à un réel intérêt pour la sonorisation dédiée aux groupes de musique.

C'est au cours de cette même année que les frères **Gene Clair** et **Roy Clair** commencent à fournir du matériel de sonorisation adapté aux tournées des groupes avec leurs premiers concerts : **Frankie Valli And The Four Seasons**.

Une réputation naissante qui grandira sous le nom de **Clair Brothers**. Une société importante car elle apportera des nouveautés conséquentes dans le monde de la diffusion sonore. Autour des années **1970**, l'apparition des premiers retours bords de pieds (wedges) pour les musiciens, dispositif situé au sol devant eux, leur permet de s'entendre. En **1969**, lors de leur American Tour, les Rolling Stones jouaient avec un système de retours semblables.



FIGURE A.1.7 – Utilisation de « Wedges » lors de l’American Tour des Rolling Stones en 1969. [16]

En 1972, **Clair Brothers** innove en utilisant un système de diffusion suspendu, un concept qui, nous le verrons, est intéressant et avantageux. Le premier à en profiter lors de ses concerts fut Elvis Presley mais c’est une technique dont nous tirons profit encore aujourd’hui.

Deux années s’écoulèrent avant de voir apparaître leur modèle S4 : des enceintes quatre voies constituées de filtres crossovers électroniques, permettant ainsi de répartir le spectre du signal sur différents haut-parleurs dédiés à une bande de fréquence. Ce système était « **stacké** », c’est-à-dire posé au sol, les enceintes empilées les unes sur les autres, une technique répandue sous le nom de « **château** ».

Un des exemples les plus parlants sur cet empilement château est sans aucun doute le fameux « **Wall of Sound** » du **Grateful Dead** : littéralement un mur de six cent quatre enceintes au total, disposées derrière le groupe, servant ainsi de retour pour les musiciens et de diffusion pour le public. Une puissance correspondant alors à 26 400 Watts permettait de diffuser un son correct sur une distance de 400 mètres.

Ces enceintes étaient constituées de pavillons, un dispositif permettant d’augmenter leur sensibilité, car les haut-parleurs et amplificateurs de l’époque n’avaient pas la puissance de ceux d’aujourd’hui.

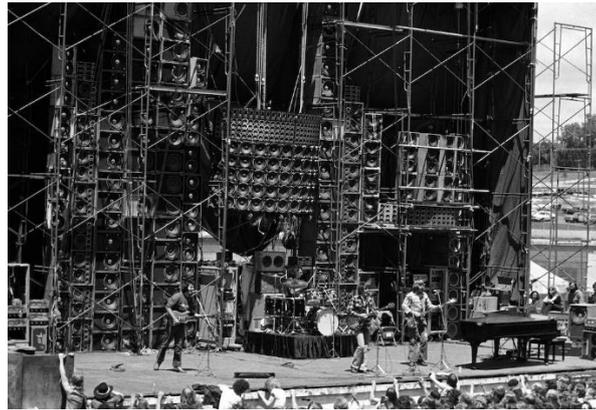


FIGURE A.1.8 – Wall of Sound du Grateful Dead. [17]

Historiquement utilisé pour amplifier le son sur le gramophone de **Emile Berliner**, le pavillon a été adopté des décennies plus tard, par de nombreuses sociétés produisant des systèmes de sonorisation. C'est le cas de **Martin Audio** avec leur modèle F2, la marque faisant passer la qualité acoustique de leur produit avant l'électronique. Par ailleurs, le système Alpha de chez **Nexo** est lui aussi une référence dans ce domaine, alors apparu en **1996**.

Les années **80** ont, quant à elles, été marquées par la démocratisation des tournées. La forte demande de matériel et de techniciens qui en résulta a donné naissance à de nombreuses sociétés proposant des prestations dans l'équipement scénique. C'est notamment le cas de la société **Audiolite**, prestataire breton, fondée en **1991**.

Dans les années **90**, la recherche s'est tournée vers une cohérence dans la méthode de diffusion, un désir d'améliorer la portée, la couverture, ainsi que l'homogénéité des systèmes. Une des solutions a vu le jour suite à l'apparition des enceintes HLA de chez JBL, dispositif utilisant encore une fois les pavillons, mais cette fois-ci en étant accroché, ce qui se démocratisera par la suite sous le nom de grappe ou de cluster d'enceintes.

Mais le changement le plus important et le plus marquant dans cette décennie se concrétise par l'apparition des premiers Line-Array (assemblage d'enceintes en lignes) de type Line Source. Nous devons cette avancée technologique à **Marcel Urban** et **Christian Heil**, fondateurs de la firme **L-Acoustics**, qui ont mis au point en **1992** la WST (Wavefront Sculpture Technology). Un système est considéré Line Source lorsqu'il répond aux critères de la WST, le premier étant le V-DOSC de chez L-Acoustics. Ces systèmes Line-Array ont réellement trouvé leur place dans la sonorisation au début des années 2000.



FIGURE A.1.9 – Système Line Array et Line Source, V-DOSC de chez L-Acoustics.

[18]

L'une des conséquences majeures de son utilisation se caractérise par l'extension du champ proche avec une conservation de la balance tonale du système, quelle que soit la distance à la source, et une augmentation sensible de la distance critique dans une salle donnée. Ceci confère au système une excellente fidélité et une parfaite intelligibilité dans des salles où la réverbération est importante. Du fait de l'angle donné aux boîtes et de leur directivité, cette méthode nous permet aujourd'hui une très bonne homogénéité des niveaux sonores en réception pour le public. Actuellement, une grande partie des constructeurs proposent des modèles de ce type, et pour ne citer que les plus connus, c'est le cas d'Adamson et de son E15, et de Meyer Sound et de son modèle LEO.

Plus récemment, les constructeurs se sont dirigés vers la technique du WFS, par exemple L-Acoustics et son système L-ISA. La **Wave Field Synthesis (WFS)** vise à recréer totalement les fronts d'ondes générés par les sources, ainsi le champ sonore se trouve reconstruit permettant aux auditeurs de se déplacer tout en gardant une perception cohérente de la localisation des sources.



L'évolution et l'apparition des nouveaux systèmes ont nécessité un contrôle de plus en plus important sur le son, notamment à cause des enceintes devenues de plus en plus nombreuses. Des réglages demandant une grande précision ont introduit l'utilisation d'appareils de mesures, la toute première datant de **1984**, effectuée par **John Meyer**, lors d'un concert à Phoenix. Aujourd'hui, ces mesures sont réalisées à l'aide de différents outils informatiques. Nous pouvons citer par exemple le logiciel **SMAART Live**. Ce dernier permet d'établir les fonctions de transfert des systèmes de sonorisation, de mesurer leur réponse en fréquence, leur réponse impulsionnelle, ainsi que la phase et la magnitude.

L'arrivée des processeurs et leur évolution grandissante, comme en témoigne la loi de Moore, nous permettent désormais d'avoir une chaîne et un traitement totalement numérique du son, ce qui facilite grandement les installations lors des concerts. Le son, passant par un réseau numérique et étant adressé par IP, nécessite le plus souvent uniquement des câbles de type RJ45, ce qui facilite les branchements et le transport en vue du gain de place et de poids. Ce réseau transmet le signal via divers protocoles, le Dante par exemple développé par Audinate, le plus répandu à ce jour. Mais d'autres protocoles existent, notamment l'AVB (Audio Video Broadcasting) qui commence à faire sa place dans le milieu par le biais de son utilisation par la marque L-Acoustics. Le fait qu'il soit Open Source est un réel atout.

Les enceintes du constructeur Meyer sont désormais « actives » ce qui signifie qu'elles sont équipées d'un amplificateur intégré. Si nous nous projetons dans le futur, lorsque les micros numériques seront devenus une généralité dans le domaine de la sonorisation, nous pouvons alors imaginer une chaîne audio câblée uniquement avec un seul câble entre les appareils, du micro jusqu'aux enceintes en passant par tout outil de traitement disponible. Nous nous dirigeons de plus en plus vers la simplicité.

Cependant, même si les moyens de diffusion sonore ont considérablement évolué au cours des dernières décennies, des paramètres comme les lieux et l'acoustique restent essentiels à une bonne qualité d'écoute.



A.1.2 L'importance des lieux et de leur acoustique

J'aime à penser que lorsque nous étudions ou travaillons dans le domaine du son, une des données les plus importantes à connaître en détail est l'acoustique. Car l'acoustique est tout simplement la science du son, elle étudie ce phénomène physique depuis son émission, sa transmission jusqu'à sa réception. Et dans ce parcours sonore allant d'une source à nos oreilles la notion de diffusion est à travailler. Et si j'estime primordial de posséder ces connaissances aujourd'hui à notre portée, c'est que les premiers moyens trouvés par l'Homme afin de diffuser le son dans des espaces ouverts ainsi que fermés, de façon optimale, ont été inconsciemment l'utilisation des phénomènes acoustiques. Et ce sont encore et toujours ces phénomènes qui sont à la base des technologies présentes.

Une étude réalisée en **2018** par **Shigeru Miyagawa**, linguiste au Massachusetts Institute of Technology (MIT), démontre que les peintures rupestres, découvertes dans les grottes, sont typiquement situées à des endroits stratégiques, acoustiquement parlant. Effectivement, la plupart de celles-ci sont retrouvées à des points dit « chauds », lieux très réverbérants, qui ont sûrement poussé nos ancêtres à produire des sons afin d'exciter la pièce. S'en découlent donc un raisonnement et peut-être même des réponses naissantes au sujet de l'origine du langage.

Mais ces découvertes nous montrent aussi l'importance du son et de l'acoustique pour ces premiers Hommes, qui recherchaient des endroits spécifiques pour y dessiner : un attrait déjà naissant pour cette science mêlée à l'art, datant de plusieurs milliers d'années.

Par la suite, les populations ont utilisé les propriétés physiques naturelles de leur environnement à leur profit, un moyen pour notre espèce de communiquer clairement et de se faire entendre distinctement lors de grandes assemblées. Un des exemples les plus parlants, de mon point de vue, est le parlement unicaméral de l'Islande, l'**Althing**, fondé en **930** à Thingvellir. Les regroupements d'élus avaient lieu à cet endroit précis, dans une plaine qui, dominée par des falaises, offrait une acoustique naturelle avec diverses réflexions du son et sa réverbération avantageuses.



FIGURE A.1.10 – Lieu de rassemblement du parlement Althing à Thingvellir (930).

[19]

Mais si nous approfondissons encore plus nos recherches et que nous remontons un peu plus dans le temps, nous pouvons découvrir des prouesses humaines fabuleuses en termes d'architecture et d'acoustique. A partir du VI^e siècle av. J.-C. environ, les Grecs puis les Romains ont commencé à rechercher des lieux acoustiquement intéressants, notamment des collines afin d'y creuser et d'y construire des théâtres. L'un des plus anciens selon certains auteurs serait le **théâtre de Thorikos** avec sa forme semi-elliptique, datant du VI^e au IV^e av. J.-C., situé dans une ancienne cité grecque, à la fois mycénienne et classique, et pouvant accueillir 2700 personnes.

Nous remarquons alors, à partir de ce moment, une avancée importante dans la maîtrise de la diffusion des ondes sonores. Prenons comme exemple le **Grand Théâtre de Pompéi**, théâtre antique datant du II^e av. J.-C. Par sa forme et la présence de son mur dos aux artistes, cet édifice permettait une bonne visibilité ainsi qu'une bonne écoute en tout point. Un renforcement du niveau sonore du côté des spectateurs était rendu possible en utilisant l'énergie des réflexions au niveau du sol, et celle venant du panneau réflecteur citée précédemment comme « mur ».

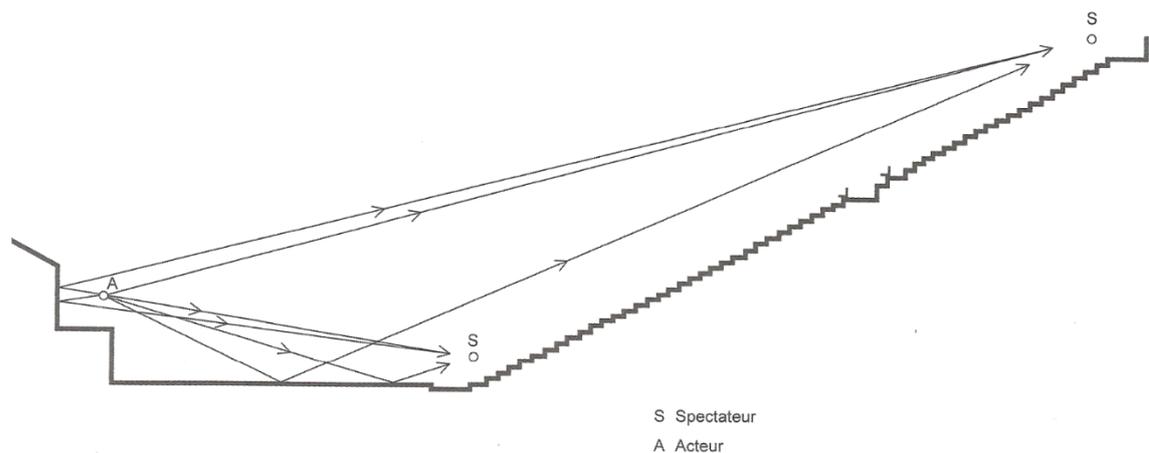


FIGURE A.1.11 – Schéma représentant la diffusion des ondes sonores dans le Grand Théâtre de Pompéi. [20]

Dans cette même optique de contrôle des ondes sonores et en ayant acquis les connaissances nécessaires sur le sujet à travers les siècles, les Hommes ont pu concevoir des lieux ayant une acoustique particulière désirée, parfois pour des raisons pratiques. Pour prendre comme exemple un cas concret, nous pouvons parler des divers lieux de cultes, églises, cathédrales, chapelles, etc... Ces endroits possèdent une réverbération très longue et importante, au service des chants religieux. Celle du **baptistère Saint-Jean de Pise**, en Toscane, avoisine les douze secondes !

Un autre procédé, différent mais tout aussi intéressant, permettait grâce à un système de voûtes elliptiques, d'entendre les chuchotements d'un individu placé dans l'angle d'une pièce, distinctement lorsque nous nous situons dans l'angle opposé, et cela sans que les autres personnes présentes dans la pièce puissent déceler le message. Ce phénomène physique a nourri la légende du confessionnal à lépreux, qui permettait aux malades de se confesser à un homme de religion en respectant une certaine distance physique. Nous retrouvons encore aujourd'hui ces voûtes dans certaines stations de métro.

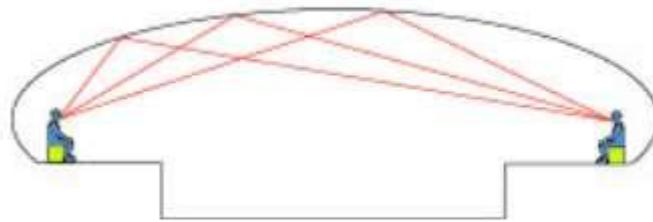


FIGURE A.1.12 - Schéma représentant la diffusion des ondes sonores dans le cadre d'une voûte elliptique. [21]

Plus récemment, l'avancée de ces connaissances nous a permis de mettre au point des salles de concert très performantes avec une acoustique complètement contrôlée : des endroits conçus pour recevoir des musiciens et un système de diffusion. Il existe même des salles ayant une acoustique totalement modulable, pouvant ainsi s'adapter à divers cas rencontrés. C'est le cas de l'espace de projection de l'**IRCAM** (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique), situé au Centre Pompidou à Paris et fondé par **Pierre Boulez** en **1977**.



FIGURE A.1.13 – Salle de projection de l'IRCAM. [22]



Dans cet historique de la diffusion sonore que nous sommes en train de construire, l'idée n'est pas de citer l'ensemble des découvertes et des moyens rencontrés et utilisés au cours du temps, mais bien de comprendre cette réalité : petit à petit, l'Homme a su modéliser l'acoustique d'un lieu, et donc le trajet du son à l'aide de l'architecture, selon le résultat souhaité. Des techniques et des connaissances de plus en plus élaborées ont permis d'avoir un contrôle total sur la diffusion. D'ailleurs les architectes font aujourd'hui appel aux acousticiens lors de la confection de divers édifices, notamment ceux destinés à une exploitation musicale.

Mais si j'insiste sur l'acoustique et les lieux dans ce travail de recherche au niveau de la diffusion des basses fréquences, c'est du fait que le couplage système de diffusion / pièce, est selon moi extrêmement important. Car, même si aujourd'hui il existe des moyens techniques et informatiques pour remédier aux problèmes liés au lieu, devant l'impossibilité d'avoir un résultat idéal en tout point, il est selon moi indispensable d'avoir une acoustique traitée le cas échéant.

Avec la meilleure enceinte au monde, si la pièce dans laquelle cette source émet le son est sujette à de nombreux défauts acoustiques, le son résultant ne sera pas à la hauteur de nos attentes, et nous ne pourrons pas profiter pleinement des qualités de cette enceinte. Cela est valable particulièrement dans le domaine des basses fréquences, une partie du spectre sonore devenue très importante aujourd'hui.



A.2 L'importance des basses fréquences

Durant la démocratisation et l'évolution des systèmes de diffusion, il est intéressant de remarquer un soin particulier apporté à l'émission des basses fréquences : des systèmes dédiés toujours plus conséquents et performants, délivrant des puissances importantes. Pour ne prendre qu'un exemple, nous retrouvons aujourd'hui dans la réponse en fréquence d'un système de diffusion, une différence de 7 à 10 dB en termes de pression sonore selon les styles musicaux, entre les basses fréquences et le reste du spectre sonore. Une réponse voulue non plate afin d'améliorer l'expérience du spectateur, en l'enveloppant et le faisant vibrer, afin de lui faire vivre le concert de manière physique ; un plus par rapport aux équipements grand public, et une façon ici d'améliorer l'impact sensitif.

Afin de prendre conscience de l'importance de cette plage de fréquence, nous allons d'abord établir un historique des enceintes dédiées à la reproduction des sons graves pour en constater l'évolution. Dans un second temps, nous nous pencherons sur l'influence des styles musicaux, un élément majeur dans la direction suivie par cette évolution.

A.2.1 Historique rudimentaire des subwoofers



FIGURE A.2.1 – Historique des subwoofers représentant les moments clés dans l'évolution de la sonorisation.



A.2.2 Influence des styles musicaux

Un des facteurs qui a pu en partie catalyser l'avènement de l'importance des basses fréquences dans le milieu de la sonorisation, a été l'influence des styles musicaux.

En effet, l'apparition de certains instruments électriques, notamment la basse, nécessitant une amplification dédiée, a permis l'émergence de certains courants. C'est notamment le cas en Jamaïque pour le passage du ska au reggae, musique dont les basses fréquences sont devenues indispensables, particulièrement dans les Sound Systems.

Cependant lors des concerts, les Public Address de l'époque n'étaient pas adaptés pour sonoriser ce genre d'instruments, et les amplificateurs sur scène étaient trop peu puissants. S'en est donc suivie l'apparition de systèmes dédiés, les **subwoofers**.

Au fil des années, et encore plus aujourd'hui, les styles de musique utilisent de plus en plus les basses fréquences dans la construction de leurs morceaux. De plus, l'arrivée de la synthèse sonore grâce à l'électronique a rendu possible l'utilisation des fréquences très basses à forts niveaux, non émises par des instruments acoustiques. Voilà des sons actuellement très utilisés dans les shows de musique électro et lors des concerts de Rap.

Nous assistons donc à une utilisation croissante des basses fréquences dans la réalisation musicale, appréciée du public lors des concerts du fait que celles-ci agrémentent l'impact sensitif.

Il est possible d'observer à titre d'exemple cette évolution en comparant la réponse en fréquence moyenne de deux productions musicales de même style (rap), de différentes époques. Cette observation est à prendre avec beaucoup de recul, car nous comparons ici seulement deux morceaux, sans oublier que les choix artistiques sont à prendre en compte.

Ici, en comparant le titre « Without me » de Eminem sorti en 2002 et le titre « Chaud » de Roméo Elvis sorti cette année, nous pouvons remarquer une différence de presque 10 dB dans le bas du spectre, notamment autour de la fréquence de 50Hz.

L'utilisation des basses dans la production musicale a augmenté, donc le monde de la sonorisation a dû s'adapter et suivre cette évolution, tout en faisant attention à leur émission. Car comme nous le verrons lors des rappels d'acoustique, les fréquences basses sont délicates à gérer.

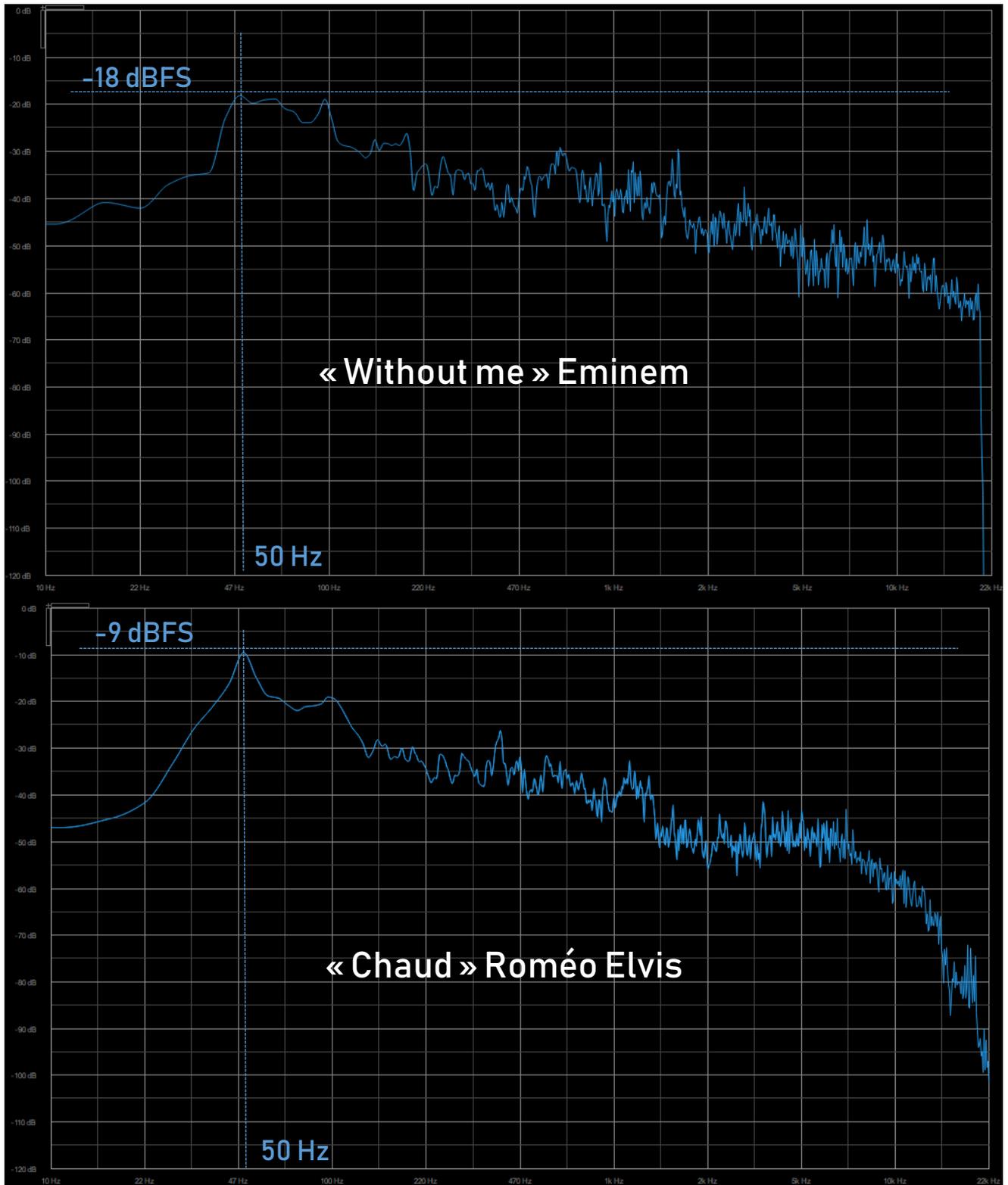


FIGURE A.2.2 – Analyse spectrale moyenne de deux morceaux de rap :
« Without me » de Eminem (haut) ; « Chaud » de Roméo Elvis (bas).



B D'un point de vue technique

B.1 Rappels théoriques et principes acoustiques

B.1.1 L'onde sonore et ses caractéristiques

Le signal sonore, le son ou encore l'onde sonore, est en réalité ce que nous appelons une onde acoustique. C'est le résultat de la vibration d'un objet, d'un corps solide, transmise dans un milieu élastique, progressivement, et possiblement de façon périodique. Les molécules de ce milieu vibrent les unes à la suite des autres, et donc se mettent en mouvement autour de leur point d'origine, c'est le mouvement vibratoire. Il y a donc un transfert d'énergie sans déplacement de matière, une onde de compression et de dépression.

Le milieu élastique permet donc la transmission du son par sa variation de pression, c'est pour cette raison que le son ne se propage pas dans le vide.

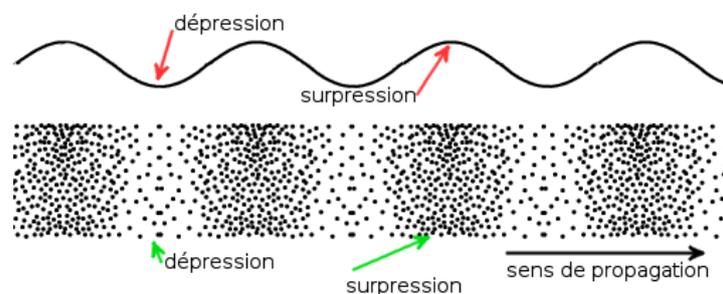


FIGURE B.1.1 – Représentation du phénomène physique lors de la transmission d'une onde sonore. [23]

La vitesse :

De plus, la densité du milieu a un impact sur la vitesse du son, ce que nous appelons la célérité. Plus la densité augmente, plus la célérité augmente. Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons à la propagation de l'onde sonore dans l'air :

$$c_{\text{air}} (20^{\circ}\text{C}) = 343 \text{ m.s}^{-1} \text{ soit } 1234,8 \text{ km.h}^{-1}$$



Dans l'air, les particules oscillent dans la même direction que la propagation du front d'onde, ce que nous appelons **onde longitudinale**.

Mais la densité n'est pas la seule variable pouvant modifier la vitesse du son : la température est un paramètre à prendre en compte. Effectivement, la célérité augmente lorsque la température augmente :

$$c = 331,4 + 0,607 \cdot T$$

Dans le cadre de la sonorisation de concert dans une salle de spectacle, ce changement de célérité en fonction de la température peut poser problème, car l'air étant plus chaud au niveau du public qu'au-dessus de celui-ci, nous observons alors un phénomène de réfraction. L'onde sonore est déviée vers le plafond. Lors des exploitations extérieures, cet effet dépend du moment de la journée et donc de la température du sol. Le vent quant à lui modifie la direction de l'onde mais pas sa vitesse. L'humidité peut elle aussi modifier la vitesse du son, mais de façon infime et donc négligeable.

Aucune autre variable n'entre en jeu dans la célérité de l'onde sonore.

Température	Vitesse du son	Milieu	Vitesse du son
-10°C	325 m/s	Air	340 m/s
0°C	330 m/s	Eau	1450 m/s
10°C	337m/s	Glace	3200m/s
20°C	343 m/s	Verre	5300 m/s
30°C	349m/s	Acier	5750m/s

FIGURE B.1.2 – Rappel de la vitesse du son en fonction de la température de l'air et du milieu. [24]

Il est d'ailleurs important de distinguer la célérité de **la vitesse acoustique**, qui est la vitesse de vibration des molécules.



Fréquence :

La plupart des ondes sonores peuvent être caractérisées par leur hauteur, dépendante de leur fréquence dominante. En physique, la fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène périodique se reproduit par unité de temps. C'est donc le nombre d'oscillations en une seconde. Une oscillation peut être définie physiquement comme le trajet d'une molécule subissant une compression puis une dépression avant de revenir à sa position d'origine. L'unité de la fréquence est le **Hertz (Hz)**.

Nous appelons ce phénomène périodique tout simplement une **période**. C'est la durée émise par le son pour effectuer une oscillation.

Une période (secondes) = Une oscillation

Une autre caractéristique d'une onde sonore est sa **longueur d'onde**. Elle correspond à la distance entre deux fronts d'ondes, c'est-à-dire la distance parcourue par le son pendant une période. Elle se mesure en mètres et s'écrit : λ (**Lambda**).

$$f = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda} \quad \text{donc} \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

Fréquence (Hertz)	31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
λ (mètres)	10.79	5.4	2.72	1.36	0.68	0.34	0.17	0.09	0.04	0.02
T (millisecondes)	31.7	15.9	8	4	2	1	0.5	0.25	0.12	0.06

FIGURE B.1.3 – Tableau représentant la longueur d'onde et la période selon la fréquence.

Remarque : Pour les basses fréquences, les longueurs d'ondes sont très importantes.



Représentation temporelle et fréquentielle :

Il existe différentes façons de représenter les ondes sonores. Lors de diverses mesures, nous pouvons facilement obtenir un schéma représentant la pression acoustique en fonction du temps : $p(t)$. Les microphones de classe 1 et 2, ayant une grande précision, nous donnent une valeur de la pression acoustique précise, à 1 ou 2 dB près, en fonction de leur position (x) et du temps (t) : $p(t,x)$.

L'onde sonore la plus simple à représenter est l'**onde sinusoïdale**, elle est périodique et définie comme un **son pur** car elle est la représentation d'une seule fréquence.

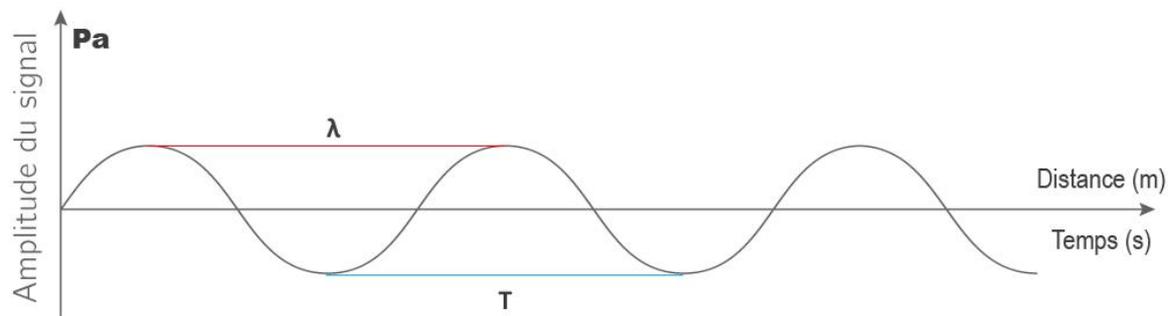


FIGURE B.1.4 – Représentation temporelle d'un son pur. [7]

Il existe des ondes périodiques non sinusoïdales, appelées **sons complexes**. Nous pouvons alors parler de signal harmonique. C'est un motif qui se répète, composé d'une fréquence fondamentale : $f_0 = \frac{1}{T_0}$ et d'harmoniques multiples f_n de la fréquence fondamentale tel que $f_n = n \cdot f_0$ avec n entier.

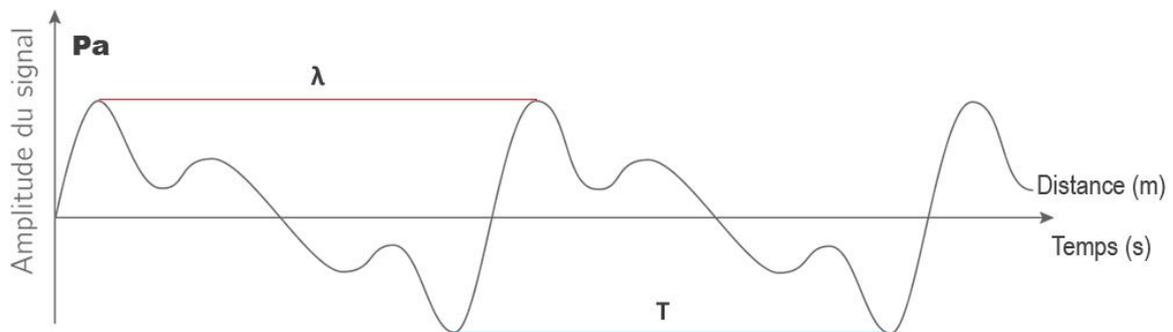


FIGURE B.1.5 – Représentation temporelle d'un son complexe. [7]



Un autre type d'onde appelée **bruit**, résultant en une vibration aléatoire, ne contient aucune périodicité et donc ne nous fait profiter d'aucune hauteur tonale percevable. C'est le cas des **bruits roses et blancs**. Il est important de noter que la notion de différence entre bruit et son est subjective.

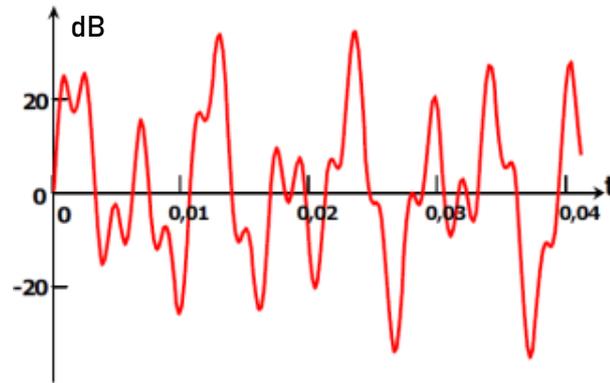


FIGURE B.1.6 – Représentation temporelle d'un bruit. [25]

Afin d'obtenir une représentation fréquentielle du signal sonore à partir de sa représentation temporelle, nous pouvons utiliser le théorème de **Fourier** :

« Tout signal périodique peut se décomposer en une sinusoïde de fréquence fondamentale, ainsi que d'harmoniques dont les fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale. »

Dans le cadre de la mesure en temps réel, nous utilisons des oscilloscopes ou des analyseurs **FFT (Fast Fourier Transform)**.

$$\text{TF}\{p(t)\} = p(f)$$

TF = Fonction transformée de Fourier



Cette représentation fréquentielle nous donne ce que nous appelons un **spectre**. Celui-ci nous expose les zones de fréquences ou fréquences pures du signal qui contiennent plus ou moins d'énergie. Le spectre est instantané et évolue dans le temps, ou bien il est donné comme moyenne sur une période donnée.

Nous parlons de spectre de raies quand celui-ci dépeint la fréquence fondamentale, les harmoniques et partiels (multiples non entiers de la fondamentale). Comme nous pouvons le voir dans la figure suivante, un signal est composé d'une seule raie (fréquence), un signal carré possède une fondamentale et des harmoniques de rangs impairs, et un bruit blanc est considéré comme un signal large bande (même énergie à toutes les fréquences).

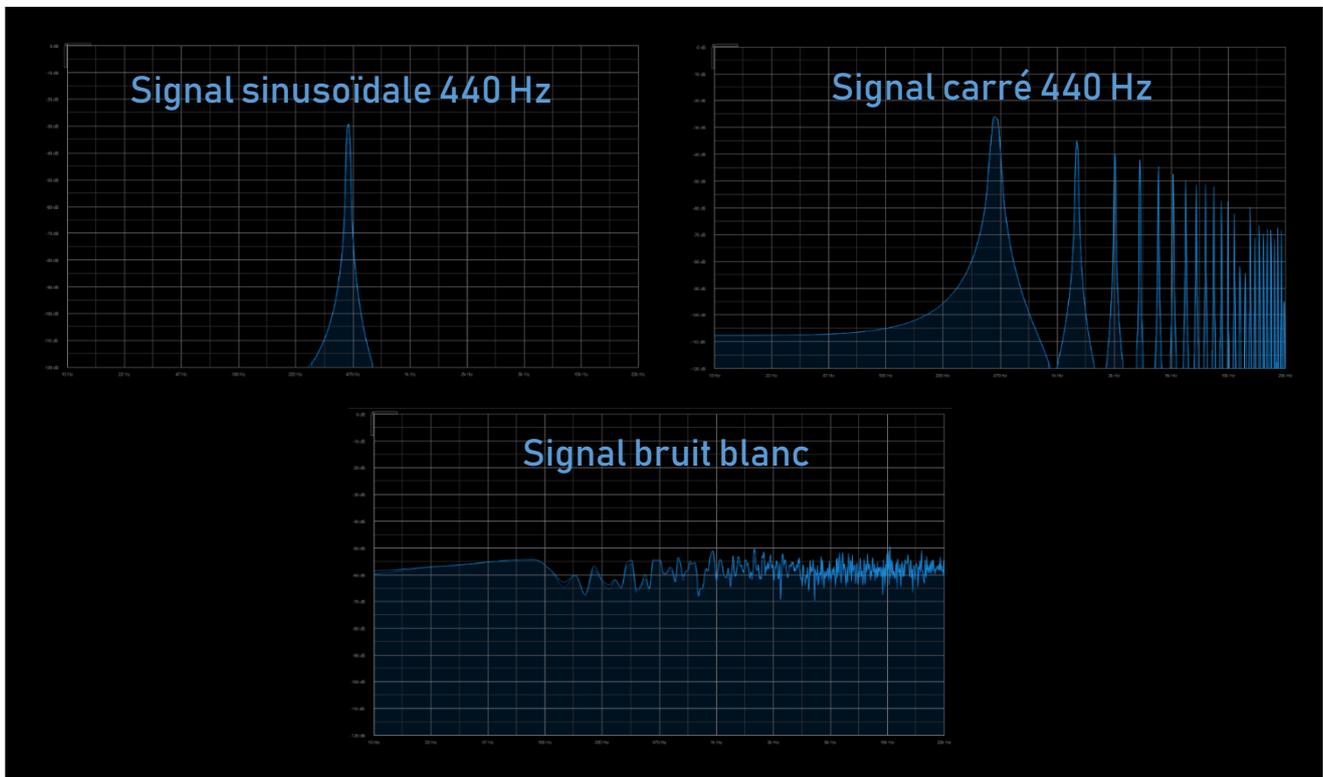


FIGURE B.1.7 – Représentation spectrale d'un signal sinusoïdale (440Hz), d'un signal carré (440Hz) et d'un bruit blanc.

Pour un instrument, la fréquence fondamentale est la partie du spectre qui contient le plus d'énergie : elle définit la hauteur de la note jouée. Les harmoniques caractérisent en partie le timbre de l'instrument, ce qui permet de l'identifier parmi d'autres.



B.1.2 La perception des fréquences basses

Théoriquement, l'oreille humaine en pleine santé (vers l'enfance) est censée capter des sons compris environ entre **20 Hz** et **20 000 Hz**. Les chocs auditifs, les maladies ainsi que le vieillissement normal de l'oreille (presbyacousie) viennent altérer cette perception. La répartition des fréquences que nous percevons peut être représentée de la manière suivante :

			MF (Medium Frequency)			
Infrasons	Subwoofers	LF (Low Frequency)	LMF (Low Medium Frequency)	HMF (High Medium Frequency)	HF (High Frequency)	Ultrasons
>20 Hz	20 Hz – 50 Hz	50 Hz – 100 Hz	100 Hz – 800 Hz	800 Hz – 3 kHz	3 kHz – 20 kHz	<20 kHz

FIGURE B.1.8 – Tableau représentant les différentes bandes de fréquences perçues par l'oreille humaine. [7]

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous nous intéressons aux fréquences dites basses (Low Frequency), et plus particulièrement à celles émises par les subwoofers. Dans le monde de la sonorisation, ce type d'enceinte est généralement capable de produire des sons de fréquences comprises entre environ 30 Hz et 100 Hz, selon les constructeurs. Dans la réalité, cette bande de fréquence est plus étendue, mais des filtres coupe bas et coupe haut sont appliqués pour délimiter la partie utile du signal à reproduire. De plus, ils permettent de rejeter les défauts et fréquences de résonance de l'enceinte. Ces filtres n'ont pas des pentes de coupures élevées (dB/ octaves), c'est pour cette raison que les subwoofers sont capables de produire des infrasons, même si notre oreille ne permet pas de les capter.

Un document donné en [Annexe 1](#), permet de répertorier un ensemble d'instruments concernés par la reproduction des basses fréquences par ce type d'enceintes.



Ces infrasons, même s'ils sont hors d'atteinte de notre acuité auditive, peuvent avoir un fort impact sur le public lors d'un concert. Nous parlons alors de ressenti. Lors de ces événements à fort volume sonore, l'oreille n'est pas la seule partie de notre corps à travailler : c'est celui-ci tout entier qui rentre en vibration selon diverses résonances de nos organes. Nous pouvons alors considérer le corps comme un ensemble de plusieurs systèmes masses-ressorts. Les phénomènes de résonance servent ainsi la sensation musicale.

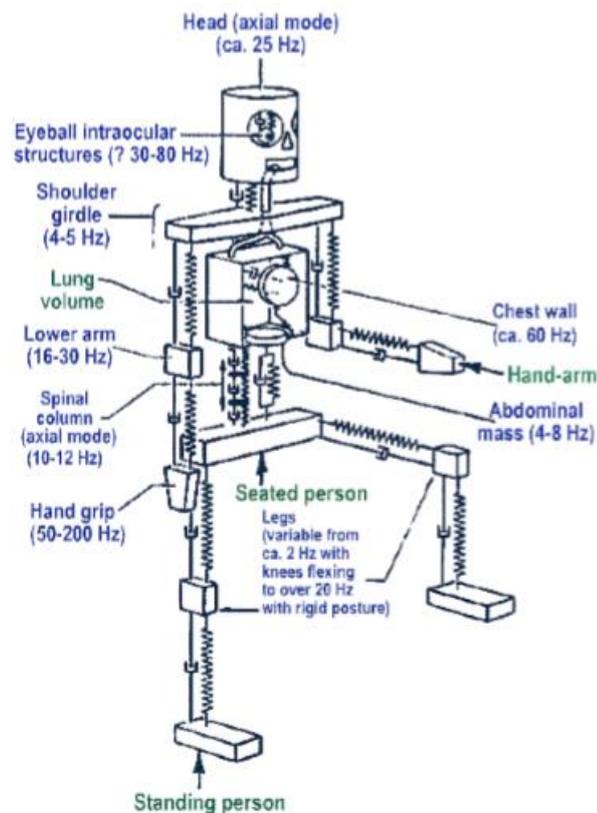


FIGURE B.1.9 – Modélisation des résonances du corps humain. [9]

Remarque : *Il a été observé que la fréquence de 7 Hz émise à fort volume rend malade ; effectivement elle correspond à la fréquence de résonance de notre masse abdominale.*



Étant donné que les longueurs d'onde des basses fréquences sont d'une grandeur conséquente, la vitesse acoustique de celles-ci se retrouve réduite. À faible vitesse, nous pouvons émettre l'hypothèse que les mouvements des molécules se font ressentir lorsque nous sommes exposés à des forts niveaux. Les pressions que nous ressentons dans notre ventre sont le résultat de la pression acoustique ainsi que des résonances organiques engendrées par les mouvements vibratoires. Nous parlons alors de sensation vibratoire.

Pression acoustique :

La pression acoustique est une variation autour de la pression atmosphérique. Cette pression p est définie comme une force F (**Newton**) exercée sur une surface S (m^2) :

$$p = \frac{F}{S}$$

Un **Pa** correspond à une force de un **Newton** exercée sur une surface d'un **mètre carré**.

Elle permet d'introduire une notion de niveau de pression sonore, nommé L_p , en **dB SPL** (Sound Pressure Level). Nous parlons alors de « niveau sonore ».

Ce niveau se mesure en décibel (**dB**), ce qui correspond à un dixième de Bel (unité de mesure de niveau sonore). Le niveau en dB correspond à une différence par rapport à une valeur de référence. Son échelle est logarithmique, c'est pourquoi elle permet de relier la sensation subjective au logarithme de l'excitation physique. Pour donner un exemple, nous ressentons la même sensation d'augmentation de niveau entre un à deux chanteurs, qu'entre cent à deux cents chanteurs.

Le niveau de pression acoustique cité précédemment est une différence entre une pression de référence notée p_0 et une pression X notée p .

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

$$p_0 = 2.10^{-5} \text{ Pa}$$



Le son le plus faible de que nous pouvons percevoir est appelé seuil d'audition (p_0). Il équivaut à une pression de $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ à 1000 Hz. C'est ce que nous considérons comme le **0 dB**. Un autre seuil, appelé seuil de douleur, représente la pression maximale que notre oreille peut supporter sans dommage. Elle correspond à **20 Pa**, soit **120 dB**.

En acoustique, il existe d'autres niveaux utilisés, notamment le niveau d'intensité L_I et le niveau de puissance d'une source L_W :

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$$

$$L_W = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

$$P_0 = 10^{-12} \text{ W}$$

En champ direct, $L_I = L_P$

Le niveau de puissance définit une source seule en dehors de son environnement. Mais à partir de celui-ci, de la directivité de la source et de l'environnement acoustique, nous pouvons calculer le niveau sonore L_p et L_I autour de la source en tout point.

Cependant, il est important de noter que le seuil d'audition dépend de la fréquence. Celui-ci est plus élevé dans le cadre des basses fréquences. Nous faisons alors référence aux courbes d'isophonie de **Fletcher** et **Munson**, ce sont des courbes d'égales sensations de niveau sonore (notion de subjectivité).

Ici, la sensation du niveau sonore perçu dépend donc du niveau de la source et de la fréquence. Chaque courbe correspond à une même sensation auditive de niveau en **phone**. Le **phone** est une unité définissant le niveau sonore perçu. Un son est de N phone s'il produit la même sensation de niveau sonore qu'un son de N dB à 1 kHz.

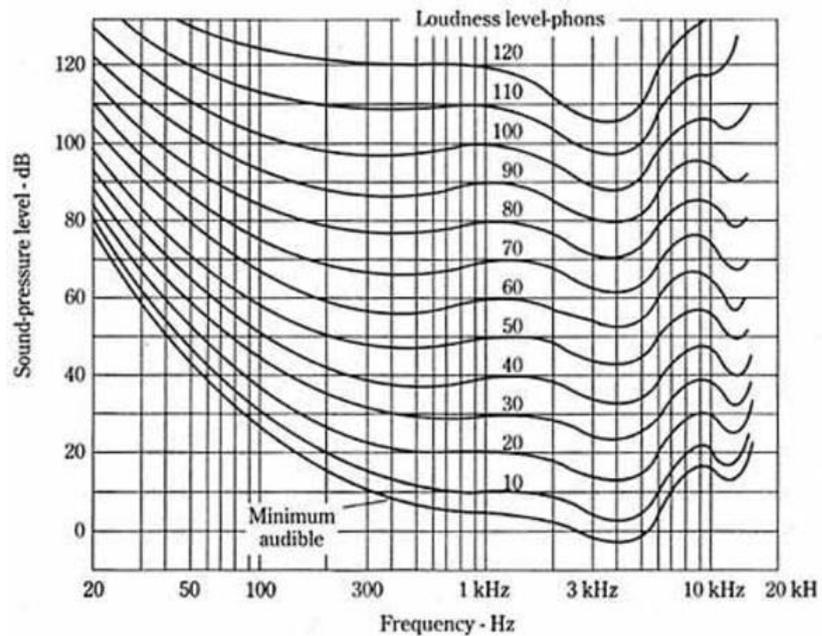


FIGURE B.1.10 – Courbe d’isophonie – Fletcher et Munson
(Lignes isophoniques normales selon la norme ISO 226 :2003). [7]

Le seuil d’audition correspondant à la courbe appelée NR0.

À fort niveau, la sensibilité auditive dépend moins de la fréquence. Nous constatons l’effet inverse à faible niveau.

Notons de légères améliorations de la sensibilité autour de 4kHz et de 10kHz. Celles-ci correspondent aux résonances du conduit auditif, d’ailleurs ce 4kHz étant la zone où la voix humaine est la plus intelligible.

Pour donner un exemple, si une fréquence de 1000 Hz est émise à 60 dB, il faudra émettre une fréquence de 20 Hz à 100 dB pour obtenir la même sensation de niveau sonore.

Les microphones de mesures ont des réponses en fréquences voulues les plus plates possible : ils nous permettent donc de mesurer le niveau réel de la source en fonction de la fréquence, et non pas celui ressenti. En effet, en raison de la variation fréquentielle de la sensibilité de l’oreille, deux sons peuvent avoir le même volume en dB mais offrir à l’écoute des niveaux subjectifs différents.



Pour pallier ce problème et obtenir une réponse représentative de notre sensation, a été mise en place une notion de pondération.

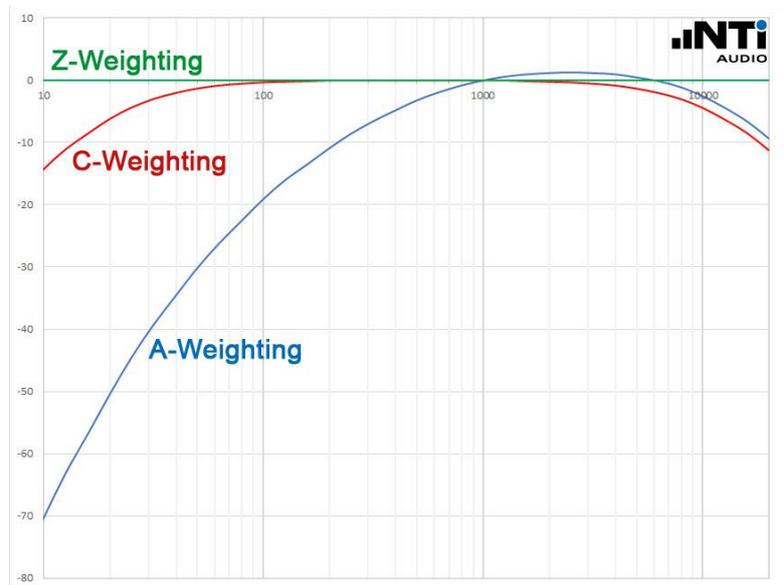


FIGURE B.1.11 – Courbes de pondération A et C fournies par le constructeur NTI Audio (Pondération Z = pas de pondération). [35]

Dans le milieu de la mesure lors des événements sonorisés, les niveaux affichés utilisent la pondération A et C. Le type de pondération utilisé dépend du niveau sonore de la source. Nous pouvons remarquer que la mesure en dB(A) prendra moins en compte les basses fréquences. Son principe consiste en une correction en dB à appliquer par bande d’octave.

<i>Bande d’octave</i>		16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k	Hz
<i>Norme</i>	A	-56.7	-39.4	-26.2	-16.1	-8.6	-3.2	0	1.2	1	-1.1	-6.6	dB
	C	-8.5	-3	-0.8	-0.2	0	0	0	-0.2	-0.8	-3	-8.5	dB

FIGURE B.1.12 – Corrections à appliquer selon de la norme de la pondération. [7]



Localisation des basses fréquences :

L'être humain est capable de localiser une source dans un plan horizontal à l'aide de deux phénomènes : la différence de niveau interaurale (**ILD**) et la différence de temps interaurale (**ITD**).

Cependant, le pavillon de l'oreille et la tête ne sont pas considérés comme des obstacles par rapport aux longueurs d'ondes importantes, ce qui entraîne une très faible différence d'intensité. Il en est de même pour la différence de temps : les longueurs d'ondes importantes entraînent une très faible variation de phase.

Nous pouvons donc conclure que l'être humain n'est pas sensible à la localisation latérale des basses fréquences. Pour cette raison, l'utilisation de la stéréophonie pour les subwoofers lors de concerts n'est pas forcément utile. De plus, les systèmes sont aujourd'hui majoritairement monophoniques, car la stéréophonie en sonorisation est difficile à gérer pour un public imposant. Seule une petite partie de celui-ci serait placée correctement pour profiter pleinement du concert.

L'effet de masquage :

En plus des problèmes de localisation, nous pouvons rencontrer, lors de la diffusion des basses fréquences, des problèmes de masquage fréquentiel et de niveau. Ce genre de phénomène est caractérisé par une incapacité à distinguer clairement deux sons émis au même moment, ayant une différence de niveau et une différence spectrale. Le son le plus faible est masqué par le plus fort, d'autant plus lorsque les sources sont proches en termes de fréquence. L'adaptation et la fatigue de l'oreille sont des facteurs à prendre en compte, car l'effet de masque augmente suite à une exposition prolongée à de trop forts niveaux.

Ce problème de masquage est plus important dans les basses fréquences (fréquences les plus gênantes), venant ainsi altérer la perception des sons aux fréquences voisines plus aiguës (fréquences les plus gênées).

Remarque : *C'est le cas du couplage entre une grosse caisse et une basse, éléments difficiles à traiter et à rendre clairement distincts dans un mixage.*

Nous allons pouvoir le voir, cette perception des basses fréquences peut être altérée par de nombreux obstacles.



B.1.3 Les obstacles rencontrés

Durant sa diffusion, l'onde sonore rencontre de nombreux obstacles qui peuvent changer sa trajectoire, ou encore modifier son niveau sonore. Il est important de connaître ces phénomènes, car ils sont à la source de nombreux problèmes rencontrés lors des concerts. Dans le but de comprendre par la suite ces difficultés, nous allons aborder les différentes notions d'acoustique, notamment la phase, les réflexions, la réverbération ainsi que la diffraction.

La phase :

La phase, notion certes complexe, revêt une importance capitale dans la diffusion des ondes sonores. Elle est à l'origine de nombreux problèmes, car lorsque deux signaux identiques sont émis en même temps, une différence de phase va entraîner des interférences dites constructives ou destructives.

Pour commencer, imaginons un cercle trigonométrique sur lequel nous avons représenté les angles en degrés, dont la lecture se fait dans le sens inverse des aiguilles d'une montre :

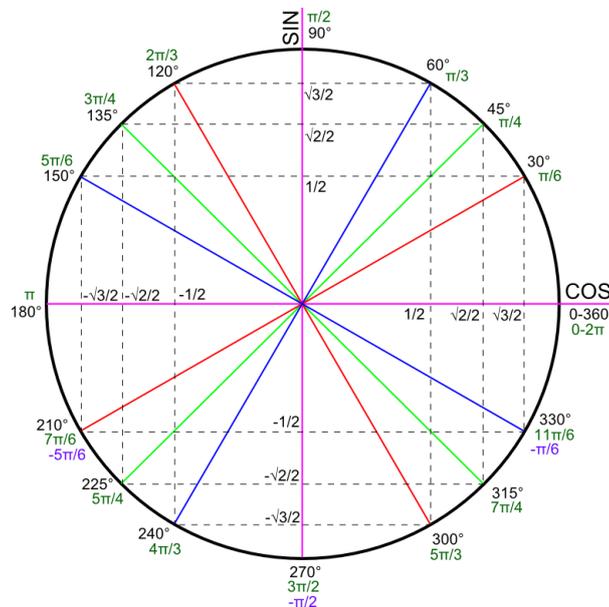


FIGURE B.1.13 – Schéma représentant un cercle trigonométrique. [26]



En audio, l'émission d'un signal pur, et donc d'une seule fréquence, se présente sous la forme d'une onde sinusoïdale. Sinusoïdale car l'ondulation s'effectue sur l'axe des ordonnées du cercle représenté, et donc sur l'axe des sinus en prenant des valeurs comprises entre 1 et -1. Ainsi, si une onde positive est émise au référentiel zéro, l'oscillation sur la valeur sinus initialement égale à zéro va tendre vers 1 pour ensuite, une fois cette valeur atteinte, tendre vers -1 progressivement, et revenir à zéro une fois la valeur -1 atteinte. Nous venons de décrire ici l'oscillation d'une longueur d'onde, celle-ci se répétant continuellement jusqu'à l'extinction de la source.

Cependant, nous pouvons attribuer à la valeur du sinus un angle en degrés en fonction de cette oscillation. Ce principe est illustré dans la **FIGURE B.1.14**.

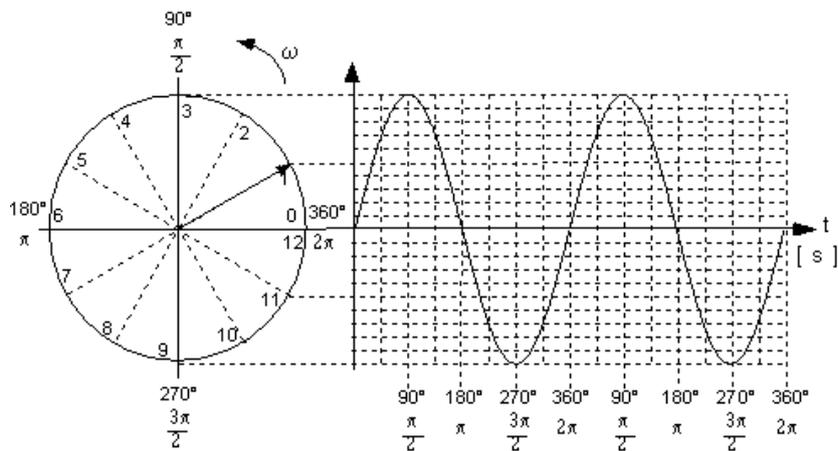


FIGURE B.1.14 – Relation entre un cercle trigonométrique et la représentation temporelle d'une onde sinusoïdale. [27]

Pour simplifier, nous pouvons visualiser un cercle trigonométrique déroulé sur l'axe du temps, permettant de représenter les degrés sur une droite. Ici, pour une fréquence, 360° représenterait une longueur d'onde, 180° une demi-longueur d'onde, et donc 90° un quart de longueur d'onde.



Dans le cas où deux sources émettent la même fréquence, si le début des oscillations pour les deux signaux commence à 0° , alors nous pouvons considérer les ondes en « **phase** » car celles-ci se superposeront.

Mais un des deux signaux peut, suite à un décalage de temps engendré par une différence de distance physique ou un retard électrique entre les sources, voir son oscillation commencer plus tard ou plus tôt, entraînant ainsi un décalage en degrés entre le début des deux ondes sonores, appelé décalage de phase ou **déphasage**.

Lorsque ce déphasage est égal à 360° , nous l'avons vu, nous commençons une nouvelle longueur d'onde, donc nous sommes toujours **en phase (interférences constructives)** mais avec un décalage de temps correspondant à un λ .

De plus, deux ondes ayant un déphasage égal à 180° sont considérées **hors-phases (en inversion de phase (interférences destructives))** (FIGURE B.1.15), si celui-ci est de 90° ou 270° elles sont considérées en **quadrature de phase**.

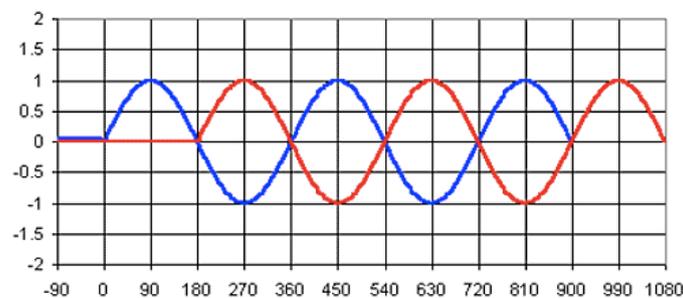


FIGURE B.1.15 – Schéma représentant un déphasage de 180° entre deux sources émettant la même fréquence, rendant les ondes hors-phase. [32]

Remarques : Lorsque deux ondes sont hors phase, le niveau sonore résultant est théoriquement nul, car les signaux s'annulent.



Notons qu'il est important de faire la différence entre l'inversion de phase et l'inversion de polarité. Une inversion de polarité résulte en une oscillation commençant négativement. Par exemple, dans la figure suivante, les ondes sont déphasées de 180° (hors-phase) mais l'inversion de polarité permet de « rétablir la phase » entre les deux signaux.

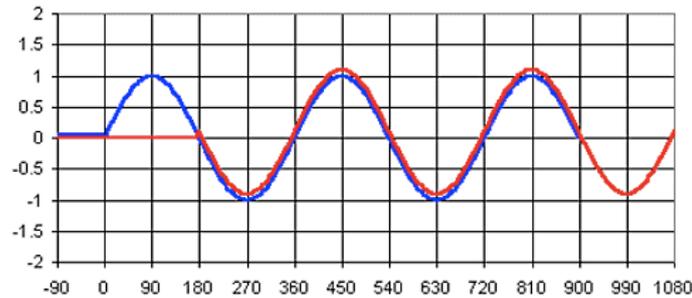


FIGURE B.1.16 – Schéma représentant un déphasage de 180° et une inversion de polarité entre deux sources émettant la même fréquence, rendant les ondes en phase.

[32]

La formule suivante nous permet de trouver la différence de phase en degrés en fonction de la différence de distance entre deux sources émettant une même fréquence, pour un auditeur :

$$\varphi = \frac{d \cdot 360}{\lambda} \leftrightarrow d = \frac{\varphi \cdot \lambda}{360}$$

Les problèmes de phase sont valables à partir du moment où il y a un décalage entre deux signaux identiques. Dans le cas d'un signal large bande, une différence de phase va engendrer un **filtrage en peigne (Comb Filter)**, venant ainsi atténuer les fréquences hors-phases par rapport au déphasage.

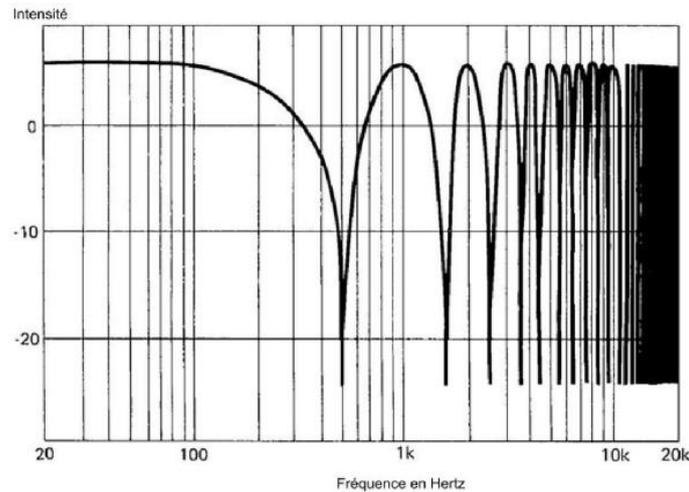


FIGURE B.1.17 – Schéma représentant un filtrage en peigne. [28]

Ici les fréquences atténuées seront données par la relation suivante, avec n nombre entier impair :

$$f = n \cdot \frac{2 \cdot c}{d}$$

Ex : Pour un décalage de 1.36 mètres entre deux sources émettant le même signal large bande, la première fréquence atténuée sera de 500 Hz, la deuxième de 1,5 kHz, etc.

Nous le verrons plus en détail par la suite, mais lorsque deux signaux identiques sont en phase, la sommation de leur niveau de pression nous apporte un gain théorique de +6dB. Mais celui-ci varie en fonction du déphasage. La **FIGURE B.1.18** nous apporte des informations sur la sommation des niveaux de pression en fonction du décalage de phase entre deux sources. Nous remarquons que les problèmes gênants (annulations) apparaissent lorsque le déphasage est compris entre 120° et 240°.

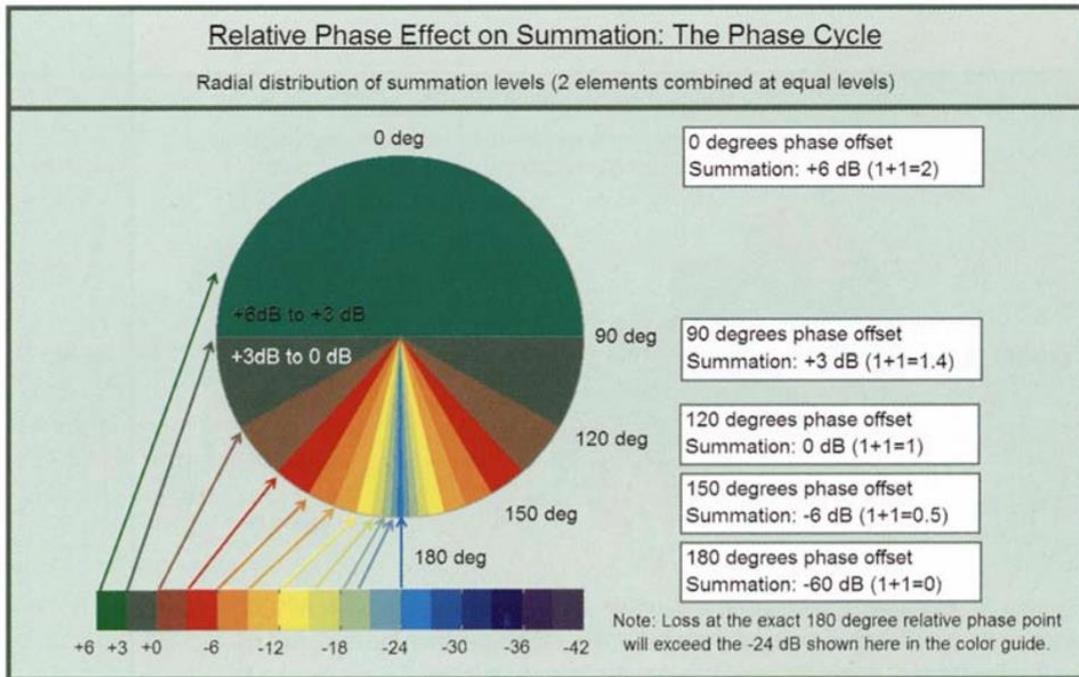


FIGURE B.1.18 – Schéma représentant le cycle de la phase. [2]

Summation Zone Reference Chart	Level Offset (dB)	Maximum (dB) 0 Degrees Phase Offset	Minimum (dB) 180 Degrees Phase Offset	Ripple (dB)	
	0.01	6.0	-60.0	+/- 33	Combining Zone Level offset range: 0 to 4 dB Phase offset range: unlimited Summation range: +6 dB to -60 dB Ripple range: > +/- 6 dB
0.1	6.0	-38.4	+/- 22		
0.25	5.9	-30.5	+/- 18		
0.5	5.8	-25.0	+/- 15		
0.75	5.7	-21.7	+/- 13		
1	5.5	-19.2	+/- 12		
2	5.1	-13.7	+/- 9.4		
3	4.6	-10.7	+/- 7.7		
4	4.2	-8.7	+/- 6.5		
5	3.9	-7.2	+/- 5.5	Combining Zone Level offset range: 4 to 10 dB Phase offset range: unlimited Summation range: +4 dB to -8 dB Ripple range: +/- 6 dB to +/- 3 dB	
6	3.5	-6.0	+/- 4.8		
7	3.2	-5.2	+/- 4.2		
8	2.9	-4.4	+/- 3.7		
9	2.6	-3.8	+/- 3.2		
10	2.4	-3.3	+/- 2.9		
11	2.1	-2.9	+/- 2.5	Isolation Zone Level offset range: > than 10 dB Phase offset range unlimited Summation range: +2 dB to -3 dB Ripple range: < +/- 3 dB	
12	1.9	-2.5	+/- 2.2		
13	1.8	-2.2	+/- 2.0		
14	1.6	-1.9	+/- 1.8		
15	1.4	-1.7	+/- 1.5		
16	1.3	-1.5	+/- 1.4		
17	1.1	-1.4	+/- 1.3		
18	1.0	-1.2	+/- 1.1		
19	0.9	-1.1	+/- 1.0		
20	0.8	-0.9	+/- 0.9		
Coupling Zone Level offset range unlimited Phase offset range: 0 to 120 degrees Summation range: +6 dB to 0 dB Ripple range: < than +/- 3 dB		Cancellation Zone Level offset range unlimited Phase offset range: 120 to 180 deg Summation range: 0 dB to -60 dB Ripple range: < +/- 30 dB			

FIGURE B.1.19 – Schéma représentant les différentes zones de sommation en fonction de la différence de niveau sonore entre deux sources déphasées. [2]



Cependant, comme nous le montre la **FIGURE B.1.19**, une différence de niveau entre deux sources déphasées vient modifier et réduire petit à petit les problèmes de phase. Nous remarquons que lorsque les ondes sont en phase, nous sommes dans une zone couplage, et lorsqu'elles sont hors-phase nous sommes dans une zone d'annulation.

Pour deux sources diffusant le même signal, nous appelons Ripple l'écart maximal du niveau de pression sonore, lors de la sommation tout au long du cycle de la phase, l'atténuation maximale étant à un déphasage de 180° et le couplage maximal à 0° . Le Ripple est égal à ± 33 dB, soit 66 dB, pour deux sources déphasées ayant le même niveau.

Ce tableau nous informe que le filtrage en peigne est présent jusqu'à ce que les sources aient une différence de niveau de pression sonore de 4 dB ; au-delà nous rentrons dans une zone d'agencement où le filtrage en peigne se trouve toujours présent, mais réduit. Lorsque les sources ont une différence de niveau supérieure à 10 dB, nous remarquons que nous sommes dans une zone d'isolation. Le Ripple est inférieur à ± 3 dB, soit 6 dB, différence de niveau estimée convenable et donc peu gênante.

Nous pouvons donc en déduire, que lorsque la différence de niveau de pression entre les sources dépasse 10 dB, alors les problèmes de phase sont négligeables.

Un déphasage peut être obtenu lorsque :

- Deux micros captant une même source sont à une distance différente de la source.
- Deux sources diffusant le même signal ont une différence de distance par rapport à un auditeur (décalage spatial).
- Une source à un retard électrique par rapport à une autre pourtant alignée, entraînant une différence spatiale virtuelle pour l'auditeur.
- Une source est placée à côté d'une surface réfléchissante.
- Décalage temporel de deux pistes dans un logiciel de montage audio.



Remarques :

- Un décalage de phase n'entraîne pas un décalage temporel et/ou spatial entre deux sources.
- Un décalage spatial entraîne un décalage temporel.
- Pas de relation de phase entre deux fréquences différentes.
- Le filtrage en peigne n'est valable que si le décalage temporel est inférieur à 50ms ; au-delà, notre oreille distingue indépendamment les deux sources.

Réflexions spéculaires et diffuses :

Lorsque la longueur d'onde est petite devant un obstacle lisse et rigide, alors l'onde sonore se comporte comme un rayon lumineux, nous pouvons donc appliquer la loi de Descartes : l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.

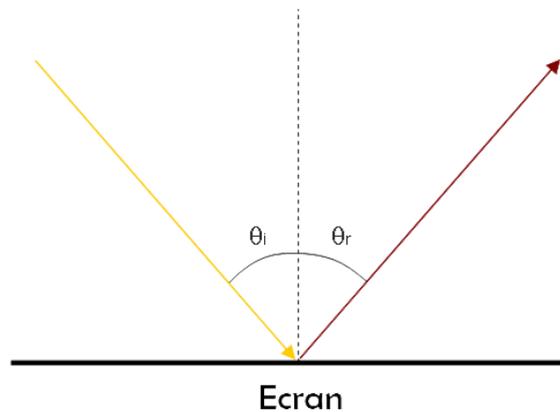


FIGURE B.1.20 – Schéma représentant le principe de la réflexion spéculaire. [7]

Réflexion si : $L_{\text{Ecran}} \gg \lambda$

Afin de présenter un lien entre la longueur d'onde λ et la dimension « a » d'un objet, nous pouvons utiliser ka , avec k le nombre d'onde angulaire tel que :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{et} \quad ka = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a$$



Ainsi :

- $ka = 1$ signifie $\lambda \approx a$ (à un facteur 2π près).
- $ka \geq 1$ signifie $\lambda \leq a$
- $ka \leq 1$ signifie $\lambda \geq a$

Remarque : Si $\lambda \ll a$ alors $ka \rightarrow \infty$

Donc si nous considérons « a » comme la dimension d'un obstacle lisse et rigide, alors nous constatons une réflexion si ka est grand.

Lors d'une réflexion spéculaire, tout se passe comme si le son réfléchi provenait d'une source appelée **source image** symétrique par rapport à la paroi.

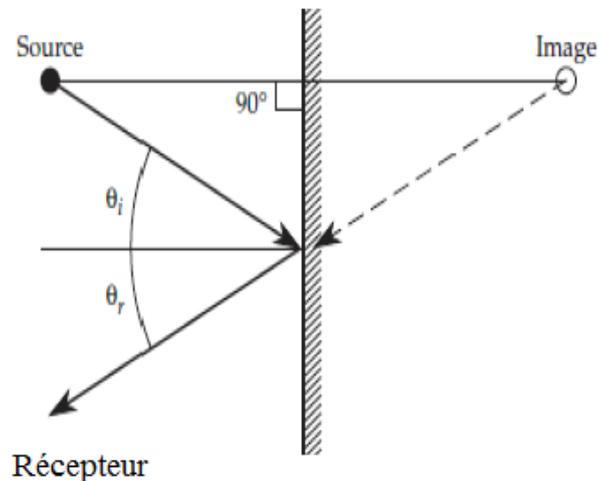


FIGURE B.1.21 – Schéma représentant le principe de la source image lors d'une réflexion spéculaire. [7]

Dans le cas où la paroi réfléchissante possède des irrégularités, nous parlons de réflexion diffuse si :

$$L_{\text{irrégularités}} \approx \lambda$$

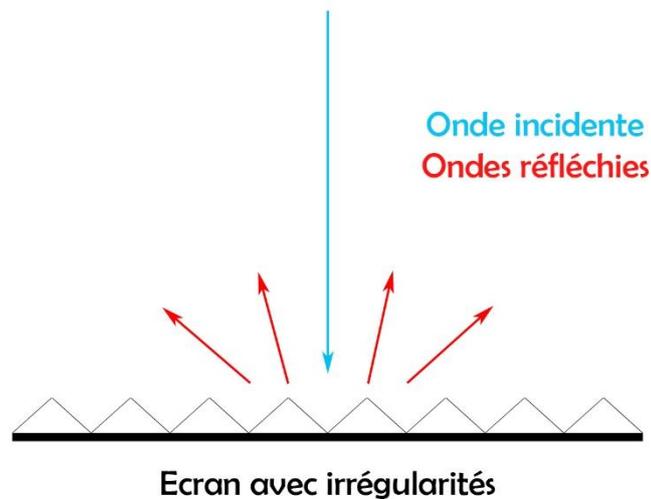


FIGURE B.1.22 – Schéma représentant le principe de la réflexion diffuse. [7]

Réverbération (TR60) :

L'ensemble des réflexions émises dans une pièce peut être perçu et caractérisé par un temps de réverbération exprimé en secondes, souvent appelé TR60. Cette durée est le temps nécessaire, après l'extinction d'une source sonore large bande, pour que l'énergie sonore décroisse de 60 dB. Il existe différentes façons de mesurer ce TR60, mais nous pouvons aussi l'estimer à l'aide de la formule de Sabine :

$$TR60 = 0,16 \cdot \frac{V}{A}$$

Ici V étant le volume du local (m^3) et A l'aire d'absorption équivalent (m^2).

Lorsqu'une enceinte émet un signal sonore dans une pièce, nous constatons la présence d'un champ direct et d'un champ réverbéré. À partir d'une certaine distance, l'intensité due aux réflexions est prépondérante par rapport aux ondes directes : nous l'appelons la distance critique. Il est possible de repousser cette distance en augmentant le niveau d'émission de l'enceinte, dans la limite du possible.



Diffraction :

Une onde est considérée diffractée à partir du moment où elle contourne un obstacle qu'elle rencontre. Ce phénomène est observable lorsque la longueur d'onde est grande devant la dimension de l'obstacle :

$$\lambda \gg L_{\text{Obstacle}}$$

Remarque : L'obstacle doit être très grand pour les basses fréquences.

Dans le cas d'une ouverture, si ses dimensions sont inférieures à la longueur d'onde, alors l'ouverture se comporte comme une source secondaire.

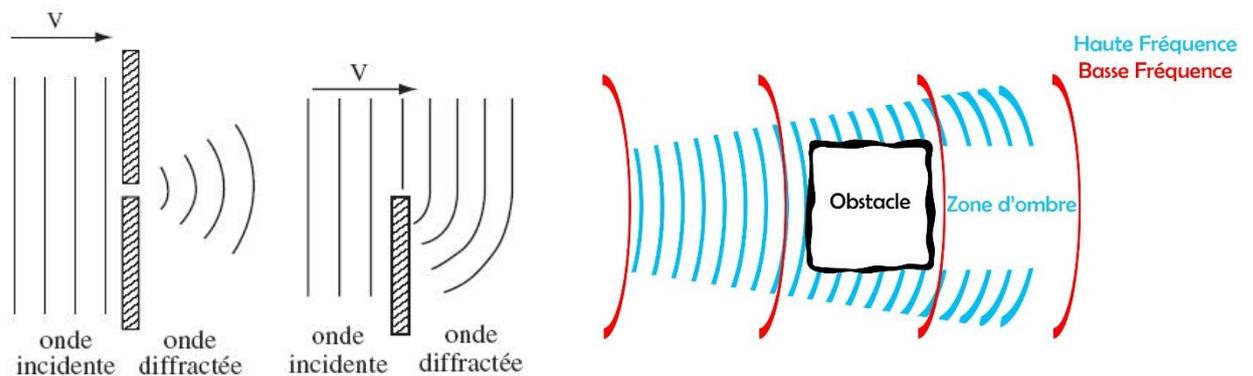


FIGURE B.1.23 – Schéma représentant les principes de la diffraction sonore. [7]

Nous savons à présent que lorsqu'une onde est émise, divers obstacles peuvent venir changer sa direction, voire même altérer cette onde. Pour pouvoir étudier ces phénomènes appliqués aux basses fréquences lors des concerts sonorisés, il serait alors intéressant de comprendre comment ces ondes sont émises, plus précisément comprendre le fonctionnement d'un haut-parleur.



B.2 Les caractéristiques d'un Haut-Parleur électrodynamique

Dans le domaine de la sonorisation de concert, les haut-parleurs utilisés sont de type électrodynamique (à bobine mobile). Ils ont la particularité d'être robustes, moins sensibles à cause du poids de la bobine, et moins chers que les autres technologies existantes (électrostatique). Car en effet, lors des concerts en extérieur et lors du transport des enceintes, les haut-parleurs sont mis à rude épreuve et se doivent d'être solides.

La figure suivante présente les différents éléments constituant un haut-parleur électrodynamique :

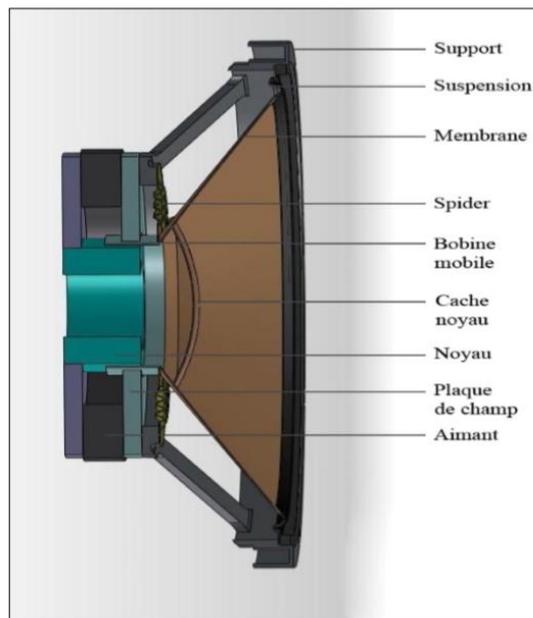


FIGURE B.2.1 – Schéma représentant la constitution d'un haut-parleur à bobine mobile. [8]

- Nous trouvons tout d'abord un châssis dont la principale fonction est de maintenir physiquement en place les différentes pièces non mobiles du haut-parleur.



- Une membrane souvent en plastique ou carton, rigide pour éviter les modes propres, et légère pour obtenir une bonne réponse aux transitoires. Celle-ci est de surface S , reliée à une bobine de longueur l . La taille de la membrane dépend directement de la gamme de fréquence retranscrite.
- Une suspension fixée entre la membrane et le châssis permettant d'amortir le déplacement de la membrane, afin d'éviter des excursions trop importantes et donc l'usure de celle-ci. De plus, la suspension est importante afin de bien retranscrire les transitoires.
- Un aimant cylindrique permanent généralement polarisé dans le sens axial permettant d'affecter un champ magnétique (en Tesla) aux différents éléments du haut-parleur.

En principe, la bobine coulisse dans l'entrefer (noyau), disposé au centre du haut-parleur dans le sens axial, où règne le champ électromagnétique. Ce champ autour de la bobine, le courant i la traversant, du fait de la tension à ses bornes, va créer une force (F) tendant à faire sortir la bobine du champ B de l'entrefer dans le sens axial et ainsi imposer un déplacement de la membrane à laquelle la bobine est rattachée. Le diamètre de la bobine dépendra en partie de la puissance du haut-parleur.

Cette force est appelée **Force de Laplace** :

$$F = B \cdot l \cdot i$$

Remarque : F est proportionnelle à I si : - B est constant (ce qui est le cas si l'ensemble magnétique est bien conçu).

- L est constant quel que soit le déplacement de la bobine (il faut donc veiller à ce que la bobine soit montée symétriquement par rapport au champ).

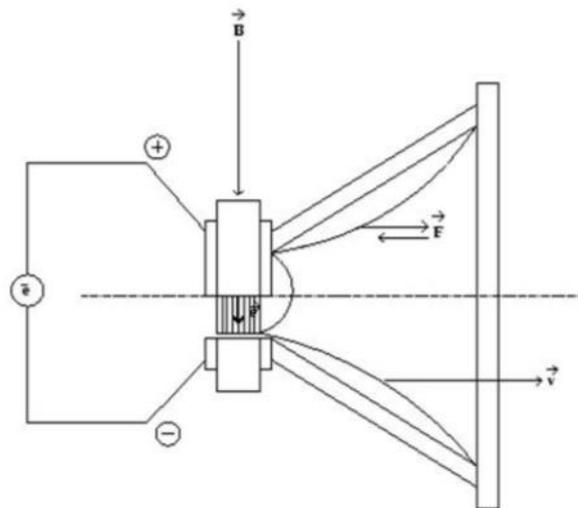


FIGURE B.2.2 – Schéma représentant le principe de la Force de Laplace. [8]

Nous venons ici de décrire une transduction électrodynamique. L'énergie électrique (courant dans la bobine) entraîne la vibration de la membrane (énergie mécanique) et donc la création d'une onde sonore (énergie acoustique).

Notons cependant que cette transduction ne se fait pas sans perte puisque le passage du courant dans la bobine entraîne entre autres un effet Joule, affectant ainsi le rendement global du haut-parleur.

Le **rendement** η d'un haut-parleur est le rapport entre la puissance acoustique rayonnée et la puissance électrique dissipée dans la bobine ; il est exprimé en pourcentages :

$$\eta = \frac{\text{Pacoustique}}{\text{Pélectrique}}$$

L'**efficacité** ou la sensibilité est, quant à elle, le niveau mesuré à 1 m dans l'axe du haut-parleur, lorsque celui-ci reçoit une puissance électrique de 1 W (bruit blanc ou rose). Elle est donnée en **dB/W/1m**.



Une enceinte est caractérisée par une impédance nominale permettant l'adaptation à un système d'amplification, une puissance d'entrée efficace (RMS), programme ou encore crête, et un niveau de pression acoustique maximum qu'elle peut délivrer. Quand nous arrivons à une certaine puissance, approchant des limites de l'enceinte, il en résulte l'apparition de distorsions.

Pour chaque haut-parleur, nous pouvons mesurer une bande passante. Celle-ci correspond à la zone fréquentielle pour laquelle la réponse en fréquence n'est pas inférieure à 3dB du niveau maximal. Pour obtenir seulement une zone utile, cette bande passante est délimitée par des filtres appliqués aux signaux envoyés dans le haut-parleur. Ces filtres sont généralement dans l'enceinte (filtre passif) mais nous les retrouvons aujourd'hui dans les processeurs numériques intégrés aux amplificateurs (filtre actif).

Dans tous les cas, la conception des haut-parleurs est importante pour une bonne restitution des basses fréquences, mais les caractéristiques des amplificateurs jouent elles aussi un rôle primordial, même si nous ne les aborderons pas ici.

La directivité d'un haut-parleur :

La directivité caractérise la capacité d'un émetteur ou d'un récepteur à exercer sa fonction dans les différentes directions. Une source est dite directive lorsque l'énergie n'est pas uniformément répartie autour de la source. Nous constatons alors plus d'énergie dans une direction donnée.

Dans notre cas, si nous considérons un haut-parleur seul, nous pouvons remarquer que celui-ci émet une onde avant et une onde arrière, continuellement, en opposition de phase (court-circuit acoustique). Les interférences entre ces ondes induisent une directivité dite bidirectionnelle, ce que nous appelons un dipôle (deux sources en opposition de phase). Les directivités peuvent être représentées sur des diagrammes polaires, appelés diagrammes de directivité, comme en témoigne la **FIGURE B.2.3**.

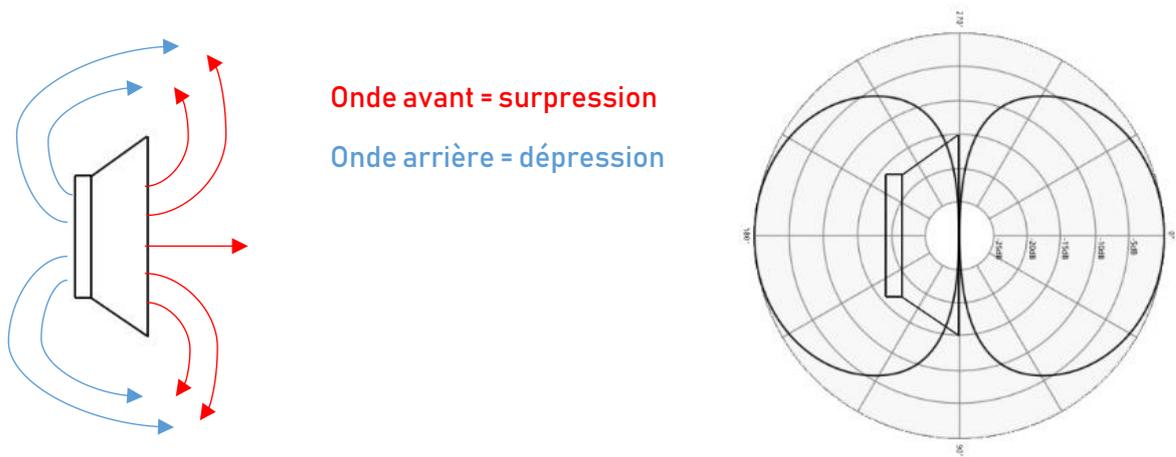


FIGURE B.2.3 – Schéma représentant un court-circuit acoustique dans le cas d'un haut-parleur seul et sa directivité bidirectionnelle. [7]

Étant donné que la distance à parcourir par l'onde arrière pour annuler l'onde avant (diamètre du haut-parleur) est petite devant la longueur d'onde des basses fréquences, nous pouvons en déduire qu'un haut-parleur seul n'est pas capable de diffuser des fréquences basses.

Afin de remédier à ce problème, nous devons utiliser une charge acoustique (ce sur quoi le haut-parleur est monté), dans le but de séparer l'onde avant et l'onde arrière.

Il est possible de monter la source sur un écran, que nous pouvons appeler baffle.

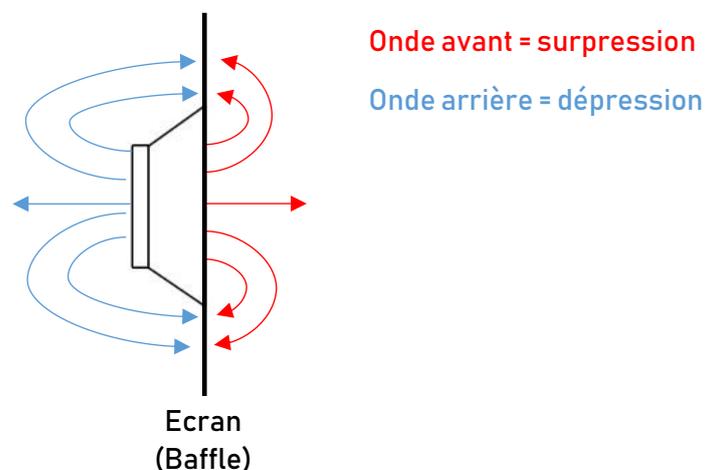


FIGURE B.2.4 – Schéma représentant un haut-parleur chargé sur un écran. [7]



Un papier publié dans le journal de l'AES, « *The Distributed Edge Dipole (DED) Model for Cabinet Diffraction Effects* », a permis de comparer la directivité théorique d'un piston plan sur un écran fini et un écran infini. Lorsqu'on parle de piston plan, nous supposons une surface vibrante qui ne se déforme pas (ce qui est vrai pour le haut-parleur dans les basses fréquences).

Cette étude a permis de démontrer que pour une fréquence donnée, le piston plan monté sur un écran infini possède une directivité omnidirectionnelle, celui-ci rayonne la même quantité d'énergie dans toutes les directions. Pour cette même fréquence, et dans le cas d'un écran fini, nous remarquons l'apparition d'une directivité dans l'axe du piston plan.

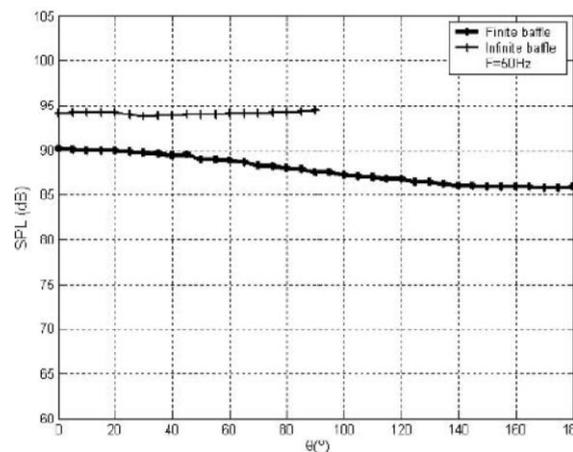


FIGURE B.2.5 – Résultat de la mesure du niveau de pression sonore en fonction de l'angle de la source, dans le cas d'un écran fini et d'un écran infini. [4]

Dans la réalité, il n'est pas possible de monter un haut-parleur sur un écran infini, à moins de l'encaster dans le sol, ce qui ne serait pas judicieux. C'est pour cette raison que nous sommes obligés de nous réduire à l'utilisation d'un écran aux dimensions limitées.

Ainsi un subwoofer n'est pas réellement omnidirectionnel : il possède une légère directivité, souvent de quelques dB.

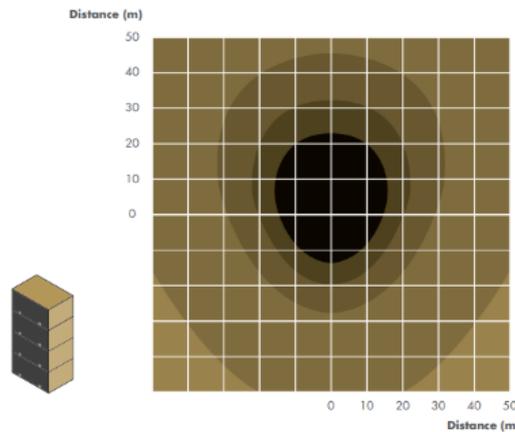


FIGURE B.2.6 – Diagramme de directivité pour un bloc de quatre KS28 en configuration standard en utilisant une échelle de couleur par pas de 3 dB. [36]

Mais comme nous l'avons vu, pour éviter que les basses fréquences soient annulées par l'onde arrière du haut-parleur, dans le cas où l'écran ne serait pas assez grand pour faire obstacle, nous devons trouver un moyen d'isoler cette onde arrière. La solution est de charger le haut-parleur sur un caisson acoustiquement hermétique, manœuvre que nous verrons dans la partie **B.3.**

En pratique une source est omnidirective si ses dimensions sont petites par rapport à la longueur d'onde :

$$d \ll \lambda$$

Pour ainsi dire, pour une même fréquence, plus une source est grande, plus sa directivité est prononcée.

Dans le cas d'un subwoofer, plus la fréquence augmente, plus celui-ci devient directif.



Nous pouvons évaluer la directivité d'une source à l'aide du facteur de directivité noté Q , et de l'indice de directivité noté ID :

$$Q = \frac{I_{\text{axe}}(r)}{I_{\text{moyenne}}(r)} \quad / \quad ID = 10 \log Q$$

$$\text{En sachant que : } I_{\text{axe}}(r) = \frac{P \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad \text{et} \quad I_{\text{moy}}(r) = \frac{P}{S} = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

Remarques : - Intensité dans l'axe de la source à la distance r .

- Intensité moyenne à une distance r pour toutes les directions autour de la source.

- Q ne dépend pas de la distance mais augmente avec la fréquence.

$$\text{Ex : Source omnidirectionnelle : } Q = 1 \quad / \quad ID = 0$$

Types d'ondes :

Il existe trois types d'ondes que peut émettre un haut-parleur ou un ensemble de haut-parleurs, chacun ayant des décroissances de niveau différentes en fonction de la distance :

- **Onde sphérique** (source ponctuelle) : nous constatons une décroissance de -6dB par doublement de distance.
- **Onde cylindrique** (Line-Array) : nous constatons ici une décroissance de -3dB par doublement de distance.
- **Onde plane** (dans la pratique non réalisable) : aucune atténuation géométrique.

Dans ce travail nous allons prendre en compte principalement les ondes sphériques, car c'est ce type d'onde qui est émis par les subwoofers.



Variation des niveaux avec la distance en champ libre :

Lorsqu'un front d'ondes parcourt une certaine distance, il est soumis à ce que nous appelons une décroissance spatiale, expliquée par deux phénomènes.

Il existe tout d'abord une atténuation géométrique, indépendante de la fréquence, car effectivement, la surface de propagation est de plus en plus grande. Dans le cas de l'onde sphérique, la formule suivante nous permet de connaître le niveau de pression sonore à une distance r .

$$L_p(r) = L_p(1m) - 20 \log (r)$$

Ainsi dans le cas d'un doublement de distance :

$$L_p(2r) = L_p(r) - 6dB$$

Nous retrouvons ensuite une atténuation par dissipation atmosphérique, le frottement des molécules entraînant une déperdition par chaleur. Ce phénomène est dépendant de la fréquence, car dans les hautes fréquences, la vitesse acoustique est plus importante, augmentant ainsi le frottement. C'est pour cette raison que les basses fréquences sont audibles beaucoup plus loin.

Lorsque l'humidité augmente, l'atténuation diminue car les frottements sont réduits, donc le son se propage mieux par temps humide.

Addition de niveaux sonores due à l'association des haut-parleurs :

Nous le verrons par la suite, mais généralement les enceintes sont associées entre elles à des fins avantageuses. Cette association engendre une addition des niveaux sonores qui varie en fonction des circonstances.



Il existe principalement deux cas :

- Les sources sont non corrélées : elles n'ont aucune relation de fréquence ou de phase entre elles.
- Les sources sont corrélées : elles diffusent la même fréquence et ont une relation de phase.

Pour n sources non corrélées et ayant des niveaux L différents, le niveau résultant L_{tot} est égal à :

$$L_{tot} = 10 \log \left((10^{\frac{L_1}{10}}) + (10^{\frac{L_1}{10}}) + \dots + (10^{\frac{L_n}{10}}) \right)$$

Dans le cas où les sources ont le même niveau sonore :

$$L_{tot} = L + 10 \log n$$

Ainsi, pour deux sources de même niveau :

$$L_{tot} = L + 3\text{dB} \quad \text{car} \quad 10 \log 2 = 3$$

Remarque : Lorsqu'on double le nombre de sources non corrélées, le niveau augmente de 3dB.

Cette fois-ci, dans le cas où deux sources corrélées de même niveau L sont additionnées, nous constatons une addition de pression, alors :

$$L_{tot} = L + 6\text{dB} \quad \text{car} \quad 20 \log 2 = 6$$

Remarques : - Si les sources sont en opposition de phase, la pression totale est égale à 0, et donc le gain à moins l'infini.

- Si on double la pression, on augmente de +6dB.



Le cas d'une source omnidirectionnelle contre une paroi :

Pour les basses fréquences, donc lorsqu'un subwoofer est placé contre une paroi, la source image réfléchiée et la source directe sont considérées corrélées. Alors le gain en pression résultant est de **+6dB**.

Mais il est possible de voir le phénomène d'une autre manière, à l'aide de la **FIGURE B.2.7** :

- Sans paroi, l'énergie est répartie autour de la sphère (omnidirectionnelle). Donc dans le cas d'un mur ou d'un sol, la sphère est coupée en deux, l'énergie étant répartie sur $\frac{1}{2}$ de la sphère, soit deux fois plus de pression donc **+6dB**.
- Si la source est située à l'intersection de deux parois, alors la sphère est divisée en 4, soit quatre fois plus de pression et donc un gain en pression de **+12 dB**.
- Pour finir, si la source se trouve à l'intersection de trois parois, dans le coin d'un mur par exemple, alors la sphère est divisée en huit, soit huit fois plus de pression, et donc un gain en pression de **+ 18dB**.

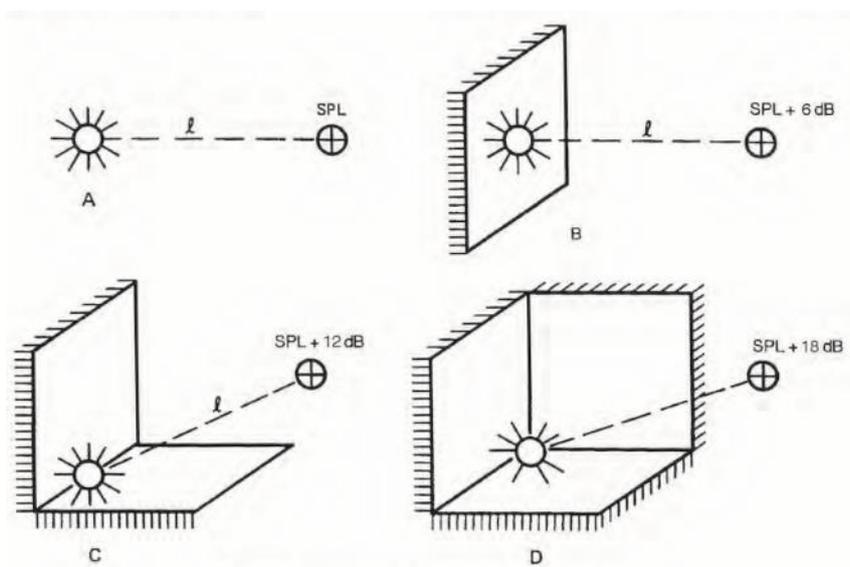


FIGURE B.2.7 – Schéma représentant le gain en pression d'une source omnidirectionnelle contre diverses parois. [7]



B.3 Les différents types de subwoofers présents de nos jours en sonorisation de concerts

Dans le monde de la sonorisation, il existe actuellement deux « catégories » de subwoofers, ayant des caractéristiques et utilités différentes.

Commençons par ce que nous pouvons qualifier de renforts de basses. Ces enceintes sont souvent utilisées et couplées avec des petits systèmes de diffusion, afin de renforcer les basses fréquences non émises par les systèmes Line-Arrays destinés à des audiences peu nombreuses, ou encore pour les systèmes Point Source standards. Elles n'ont pas pour but de diffuser des fréquences extrêmement graves à fort niveau, encore moins des infrasons.

Du fait de leur masse relativement faible, les caissons sont ou posés au sol, ou parfois incorporés à la grappe du Line-Array, au-dessus des enceintes large bande. Un aperçu de leurs caractéristiques est donné dans le tableau ci-dessous.

Masse	Dimensions	Fréquence de coupure Basse (-3dB)	Impédance	Puissance AES	Nombre de HP	Taille des HP en pouces
50Kg – 70Kg	80cm par 70cm	Environ 30Hz	8 Ω	2000W	1	15 ; 18 ; 19

FIGURE B.3.1 – Tableau répertoriant une moyenne des caractéristiques des enceintes dites « renforts de basse ».

Le deuxième type d'enceintes est quant à lui caractérisé ici comme étant exclusivement dédié aux fréquences précédemment définies comme « **Sub** ». Nous parlons alors de subwoofers dédiés. Ces caissons font généralement le double, voire plus, en termes de masse et de dimensions par rapport aux enceintes renforts de graves.



Initialement conçus pour être positionnés au sol, nous pouvons les retrouver sous forme de clusters dans certaines configurations, lorsque les points d'accroches le permettent (masse excessive). Tout comme les renforts de grave, un aperçu de leurs caractéristiques est donné dans le tableau ci-dessous.

Masse	Dimensions	Fréquence de coupure Basse (-3dB)	Impédance	Puissance AES ²	Nombre de HP	Taille des HP en pouces
100Kg – 150Kg	80cm par 140cm	Environ 20Hz pour certaines	4 Ω - 2 Ω	3000W	2 ; 3	18 ; 19 ; 21

FIGURE B.3.2 – Tableau répertoriant une moyenne³ des caractéristiques des enceintes dites « subwoofers dédiés ».

Bien sûr, chaque constructeur a ses caractéristiques, et chaque modèle ses particularités, mais les subwoofers sont relativement tous conçus de la même manière, d'où ces tableaux « généralisés ».

Dans les deux cas mentionnés ci-dessus, lors de la conception des subwoofers, il existe plusieurs méthodes de fonctionnement, plusieurs façons pour ainsi dire de « charger » les haut-parleurs.

2. Puissance nominale mesurée selon la norme AES2 (1984)

3. Moyenne effectuée selon les fiches techniques trouvées sur les sites des constructeurs Adamson, L-Acoustics et MDC



Charge de type close :

Ce type de charge consiste en une radiation directe du haut-parleur, en confinant l'onde arrière dans un baffle, mais entraînant ainsi une perte de rendement et une diminution de la bande passante. Un soin particulier doit être apporté à l'étanchéité de celui-ci pour éviter le retour d'onde arrière et donc l'apparition d'interférences.

Le volume d'air, appelé la charge, à l'intérieur du baffle, agit comme un ressort, entraînant une hausse de la fréquence propre du haut-parleur. Un volume important permet cependant de faire redescendre cette fréquence.

Les modes propres présents dans le baffle sont évités en utilisant des parois non parallèles, des formes non cubiques, et en plaçant des matériaux absorbants à l'intérieur de celui-ci. Les fréquences de résonances des parois sont quant à elles esquivées à l'aide de matériaux rigides et de renforts placés sur les ventres de vibrations (principes que nous retrouvons sur les violons).

Ce type de charge est simple à mettre en place et considéré comme dynamique.

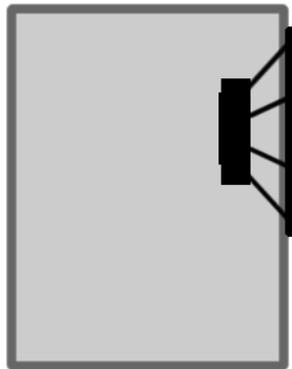


FIGURE B.3.3 – Schéma représentant une charge de type close. [33]



Charge de type Bass Reflex :

Le Bass Reflex fonctionne sur le principe du résonateur de **Helmholtz**. L'air contenu dans l'évent placé sur le baffle, permet de faire office de seconde masse en plus du haut-parleur, et l'air présent dans le baffle toujours de ressort : soit deux masses vibrantes (masse du haut-parleur et masse de l'évent) et deux raideurs (suspension du haut-parleur et cavité du baffle), donc un couplage possible.

L'évent et le haut-parleur se retrouvent en phase à la deuxième fréquence de résonance, il faut donc utiliser les paramètres de **Thiele et Small**⁴ afin de faire varier le volume de la cavité, de la longueur et du diamètre de l'évent, dans le but d'accorder le couplage à une réponse voulue, et donc à cette fréquence selon les caractéristiques du haut-parleur.

Cette technique permet d'étendre la bande passante de 30% vers les basses fréquences. Elle est plus dure à réaliser, mais nous fait profiter d'un meilleur rendement.

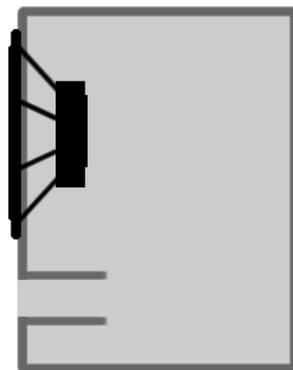


FIGURE B.3.4 – Schéma représentant une charge de type Bass Reflex. [33]

4. Ensemble de caractéristiques électromécaniques qui définissent la performance d'un haut-parleur dans les basses fréquences.



Charge symétrique ou à résonateur interne :

Ces enceintes possèdent des cavités internes qui vibrent à la manière d'oscillations couplées. Ce type de charge utilise la technologie charge close et Bass Reflex, mais leurs résultats ne sont pas combinés. Cependant « elles présentent l'avantage de régulariser la bande passant 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 »⁵.

Elles permettent de descendre très bas, mais sont pourtant dures à réaliser en vue de l'accord de l'évent et du calcul du volume arrière.

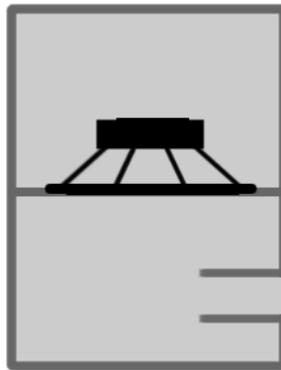


FIGURE B.3.5 – Schéma représentant une charge symétrique. [33]

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



Charge de type pavillonnaire (pavillon) :

À l'époque, l'utilisation de pavillons sur certains haut-parleurs permettait de contourner les problèmes liés aux amplificateurs peu puissants, en amplifiant physiquement l'onde sonore. Effectivement, ces guides d'ondes permettent une très bonne adaptation d'impédance entre l'air et le haut-parleur, tout en amplifiant le son.

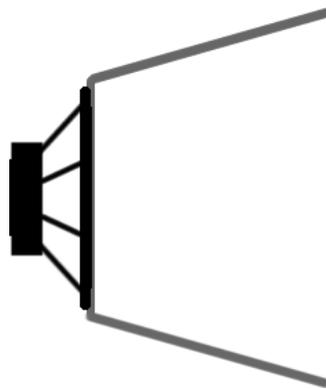


FIGURE B.3.6 – Schéma représentant une charge de type pavillonnaire. [33]

Les pavillons ont beaucoup été utilisés dans les années 80, notamment par JBL dans son système HLA. Nous les retrouvons encore aujourd'hui dans les Sound systems dédiés dans les soirées électro.

Dans les mêmes années, JBL a aussi utilisé la charge de type Scoop ou encore toboggan, celle-ci consistant en une radiation directe du haut-parleur, couplée à son onde arrière remise en phase via un labyrinthe acoustique et ensuite amplifié à l'aide d'un pavillon.

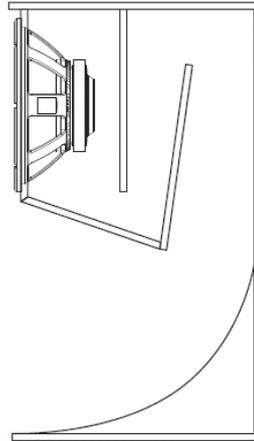


FIGURE B.3.7 – Schéma représentant une charge de type scoop ou toboggan. [34]

Cependant aujourd’hui, les charges les plus utilisées dans les subwoofers de sonorisation sont les charges Bass Reflex et les charges symétriques. Notons d’ailleurs qu’il existe de nombreuses variantes de la charge symétrique. Par exemple, la **FIGURE B.3.8** nous montre l’utilisation d’une double charge symétrique dans la conception de certaines enceintes du constructeur **APG**, ou encore la **FIGURE B.3.9** avec l’utilisation d’une charge dite « Manifold » pour la conception du subwoofer T21 de chez **Adamson**.

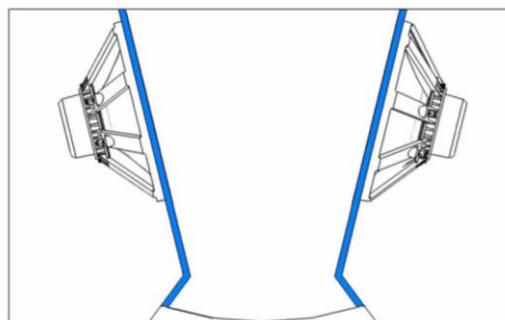


FIGURE B.3.8 – Schéma représentant une double charge symétrique (TB215S et TB218S de chez APG). [31]

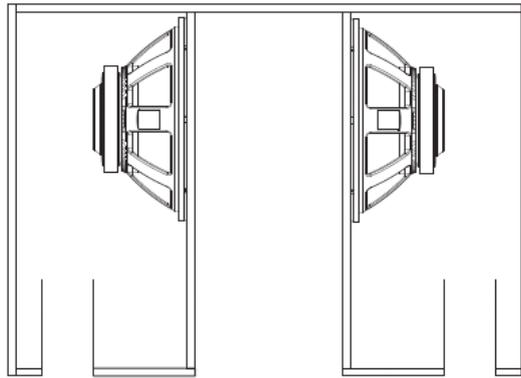


FIGURE B.3.9 – Schéma représentant une charge Manifold (T21 de chez Adamson).
[34]



FIGURE B.3.10 – Photo du TB218S de chez APG (gauche) et du T21 de chez Adamson (droite). [31] [29]

Les subwoofers que nous retrouvons en sonorisation sont très puissants, et sont capables d'émettre des sons très graves. Ces forts niveaux en plus des caractéristiques et obstacles rencontrés par les fréquences basses, ont des conséquences lors de leur diffusion dans le cadre des concerts : c'est ce que nous développerons dans la partie suivante.



C Les conséquences de la diffusion des basses fréquences aujourd'hui

C.1 Les problèmes engendrés

La gestion des subwoofers, dans le cadre de la sonorisation de concerts, entraîne encore aujourd'hui de nombreux problèmes, auxquels les techniciens du son et le public sont confrontés, même si ce dernier n'est pas toujours conscient de ces phénomènes.

Les principales difficultés à contrôler la diffusion des basses fréquences sont causées généralement par le lieu dans lequel les enceintes sont situées, donc l'acoustique qui en résulte, mais aussi par la disposition de ces enceintes. Ces soucis peuvent entraver la qualité des concerts (acoustique des salles) mais aussi créer des gênes pour le voisinage (acoustique urbaine) ou dans le pire des cas, un risque pour le public.

C.1.1 L'acoustique des lieux et le cas du plein air

Comme nous avons pu le mentionner précédemment, l'acoustique d'un lieu est un point déterminant dans la bonne restitution du son. Et il est primordial de traiter la pièce acoustiquement afin de gérer au mieux la diffusion des ondes sonores. Cependant, ici dans le cadre des basses fréquences, le traitement est conséquent et peu de salles sont équipées correctement en termes de correction acoustique, même si elles se font de moins en moins rares. C'est pour cette raison que nous ne nous intéresserons pas en détail à ces solutions existantes pour traiter les lieux.

Toutefois, il me semble judicieux de lister ces différents problèmes liés aux salles pour pouvoir en comprendre l'importance.

L'absence de traitement et notamment d'épaisseur suffisante de matériaux absorbants, entraîne des effets de réflexion spéculaire dans les basses fréquences. Ce sont ces réflexions qui sont à la base de nombreux problèmes :



- Une augmentation de la durée de réverbération pour cette bande d'octave entraînant un effet de rumble qui est un ronflement gênant dans le bas du spectre, et donc de masquage pour les autres fréquences. De plus, cela entraîne une légère augmentation du niveau général émis, dénoncé par les plaignants.
- L'apparition d'ondes stationnaires gênantes pour certaines fréquences en outre de modes propres, donc d'interférences (ce problème diminue lorsque la taille de la salle est importante). D'où une augmentation des niveaux de pressions aux limites du milieu.
- Des réflexions induisant des sources images (une enceinte près d'un mur), et ainsi un déphasage entre les sources donnant des interférences caractérisées par un filtrage en peigne.

Mais hors ces réflexions, il existe un autre souci lié aux subwoofers posés sur le sol. Certaines salles de concerts possèdent un plancher désolidarisé des murs, mais dans le cas contraire, nous pouvons constater des transmissions solidiennes et latérales qui entraînent un effet de membrane sur les autres parois. Les vibrations transmises via le sol sont émises de nouveau par les cloisons. Nous décelons alors un problème pour le voisinage et surtout les habitations contiguës, mais aussi à nouveau un problème d'interférences car la célérité du son étant accrue dans les milieux plus denses (ex : béton), une différence de phase serait notable et gênante entre les différentes sources (réelles et images).

L'ensemble des problèmes cités ici peuvent se résumer en un problème de couplage entre la salle et le système de diffusion.

Les salles qui ont une vingtaine d'années n'ont pas été conçues de manière satisfaisante, contrairement à celles datant de la dernière décennie. De plus, il est impossible de traiter une salle dans le cadre d'une tournée. Il est donc nécessaire de faire un choix pour poursuivre ce travail de recherche. Dans l'objectif de se concentrer sur les systèmes de diffusion uniquement, nous considérerons par la suite seulement le cas du concert en plein air (sans obstacles notables), c'est-à-dire en champ libre, laissant de côté les problèmes liés aux lieux clos.



C.1.2 Le point de vue qualitatif du concert

Par l'emploi du terme qualitatif, nous entendons par là une qualité appréciable par le public situé devant le système de sonorisation mais aussi par les musiciens situés sur scène. Théoriquement, nous avons pu observer selon certaines études que les subwoofers sont « omnidirectionnels », ce qui veut dire que les basses fréquences viennent polluer l'espace scénique que nous appelons plateau. De plus, sur certains shows, les subwoofers délivrent un niveau très important. Ces fréquences viennent gêner dans un premier temps les personnes présentes sur scène, notamment les musiciens qui ne s'entendent plus jouer ou n'arrivent plus à discerner leur système de retours (effet de masquage). Dans un second temps, les micros sensibles de type électrostatiques ou piézoélectriques sont capables de capter ces signaux indésirables et donc de créer des larsens lorsque la source sonorisée possède une bande de fréquence s'étendant dans le bas du spectre. C'est le cas des contrebasses par exemple. Le corps de l'instrument entre en résonance suite aux fréquences émises par les subwoofers, et le micro piézoélectrique posé sur la table d'harmonie capte ces vibrations.

Par ailleurs, les techniciens présents sur le plateau sont majoritairement soumis à ces fréquences, pendant plusieurs heures lors des festivals. Le travail de certains techniciens, ayant pour responsabilité la qualité d'écoute des musiciens, n'est pas compatible avec l'utilisation de protections auditives qui n'ont pas réellement de réponse en fréquence plate. En résultent donc des risques auditifs indéniables.

Du point de vue du public, nous pouvons trouver un problème d'homogénéité du niveau sonore dans les basses fréquences. Effectivement, un système Line-Array est capable de délivrer une diffusion relativement homogène, mais un subwoofer délivre une onde sphérique qui décroît de 6 dB par doublement de distance, une décroissance de 10 dB peut parfois être mesurée entre la régie **FOH** et les **crashes barrières**. Pour les personnes situées à une certaine distance, nous constatons alors une forte modification de l'équilibre tonal du système. Cette décroissance est d'autant plus importante lorsque le public est nombreux, car le coefficient d'absorption de milliers de corps humains n'est pas négligeable.



De ce fait, le niveau sonore des basses fréquences perçu est largement différent entre le technicien façade et les personnes du premier rang. Si ce niveau atteint la limite réglementaire en régie FOH, il est alors bien au-dessus au niveau des crashes barrières. Il y a donc ici une violation de la loi et un danger pour l'audition du public. Car même si les basses fréquences à fort volume ne dérangent pas l'oreille directement, elles sont tout aussi dangereuses qu'un son aigu.

Cette diffusion hétérogène peut aussi être accentuée par des problèmes d'interférences temporelles liées à un décalage spatial entre les enceintes de basses. Nous avons vu précédemment qu'une différence de distance entre deux sources émettant le même signal entraîne un décalage de phase et donc des interférences constructives et destructives dépendantes de la fréquence émise. Nous cherchons donc à trouver ce décalage en prenant en compte plusieurs paramètres.

Effectivement, considérons la **FIGURE C.1.1** comme base pour comprendre ce souci.

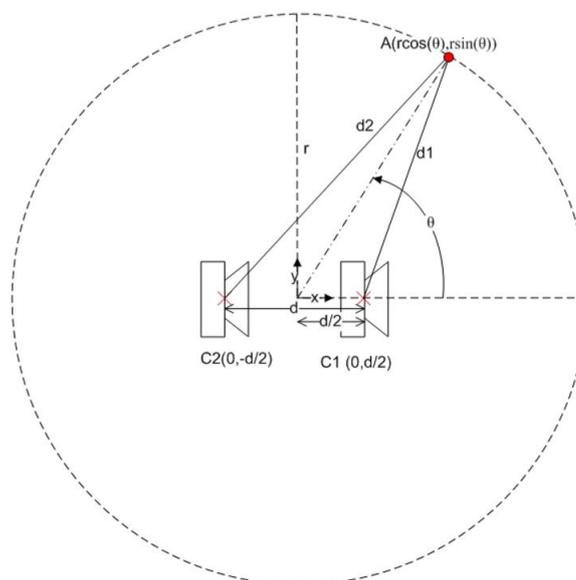


FIGURE C.1.1 – Variation de la différence de marche en fonction de la distance d entre les enceintes, et de la position de l'auditeur A (selon r et θ). [6]



Ici **C1** et **C2** représentent deux sources espacées d'une distance **d**. Le point de réception **A** est l'endroit où se trouve l'auditeur, il dépend de l'angle **θ** et de la distance **r**. Nous pouvons observer une variation de la différence de distance des enceintes (**d1** et **d2**) en fonction de la position du point **A**. C'est cette différence (**Δd**), appelée différence de marche, qui nous permet de trouver le déphasage correspondant :

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

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

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

Afin de simplifier, nous pouvons utiliser l'approximation des ondes planes, mais cette hypothèse est valable seulement si le point de réception est situé à une distance **r** :

$$kr > 1 \leftrightarrow r > \frac{1}{k} \leftrightarrow r > \frac{\lambda}{2\pi}$$

$$k = \text{nombre d'onde} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Donc seulement si le point de réception est situé à une distance supérieure à $\frac{\lambda}{2\pi}$ (en fonction de la fréquence jouée).

Ex : $\lambda_{50 \text{ Hz}} = 6,8 \text{ m} \leftrightarrow \frac{\lambda}{2\pi} \approx 1 \text{ m}$ (pour une fréquence de 50Hz, l'auditeur doit se trouver au minimum à 1m de la source).



Dans ce cas, la distance r ne rentre plus en jeu et nous pouvons simplement utiliser une formule de trigonométrie :

$$\Delta d = | d \cdot \cos(\theta) |$$

Nous remarquons que Δd varie entre $|d|$ et 0 , peu importe l'angle.

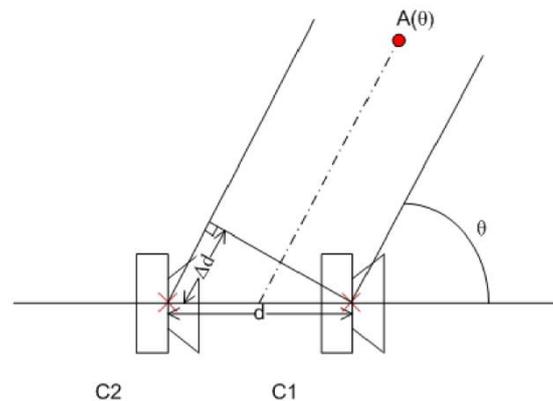


FIGURE C.1.2 – Variation de la différence de marche en fonction de la distance d entre les enceintes, et de la position de l'auditeur A (selon θ). [6]

C'est en reprenant la variation de la phase en fonction de la fréquence et de la distance, que l'on trouve :

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

Le niveau (N) correspondant à la perte ou au gain en niveau de pression, lié aux interférences en un point, peut être calculé de la sorte :

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



Il est intéressant de pouvoir calculer la modification de niveau sonore en fonction des interférences, mais l'outil informatique nous permet à présent de les prédire et de les visualiser directement. C'est notamment le cas avec le logiciel Sound Vision du constructeur L-Acoustics. D'autres applications plus évoluées prennent en compte la température de l'air, l'humidité, et les problèmes des salles.

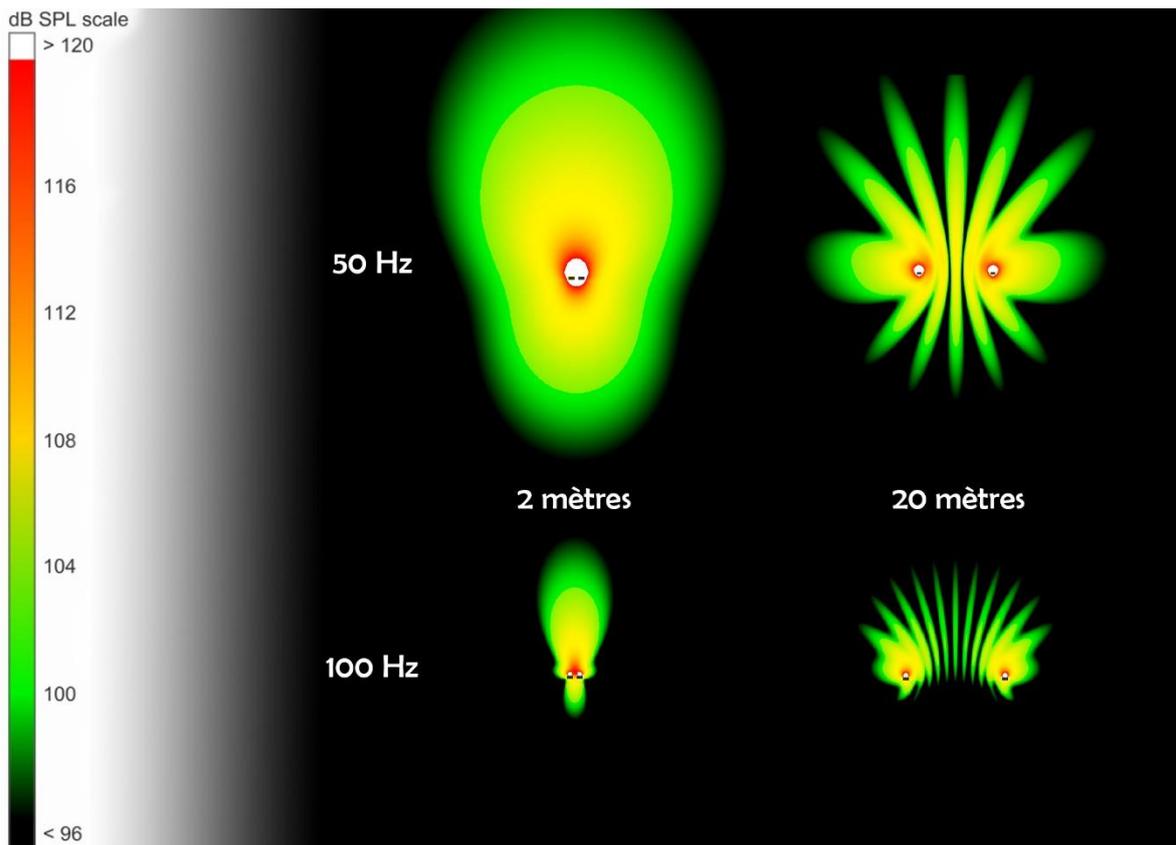


FIGURE C.1.3 – Simulation de deux subs KS28 de chez L-Acoustics, en fonction de la distance inter enceintes et de la fréquence jouée.

Cette simulation nous montre bien l'apparition des raies d'interférences à une certaine distance. Nous parlons alors ici de filtrage en peigne selon un point d'écoute. Comme nous avons pu le voir, celui-ci existe dès que deux signaux identiques ont un temps de parcours différents. Dans ce cas, il dépend de la fréquence émise et de la distance inter-subwoofers.

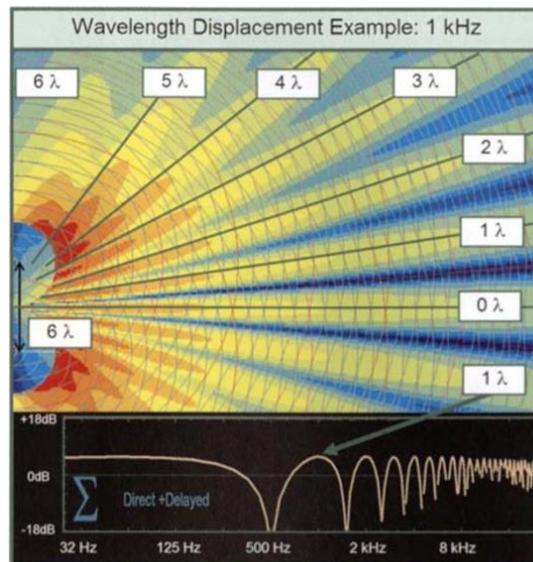


FIGURE C.1.4 – Représentation du lien entre le filtrage en peigne, la longueur d’onde et la distance entre deux sources. [2]

Dans la **FIGURE C.1.4**, nous visualisons le lien entre les raies d’interférences et les fronts d’onde émis par les deux sources distantes l’une de l’autre. Pour chaque point de l’espace, nous obtenons un filtrage en peigne différent, le niveau sonore en ce point variant en fonction de la fréquence jouée.

Il paraît donc évident que positionner les subwoofers de part et d’autre de la scène (dans notre cas avec 20 mètres de distance), est une configuration à éviter.

Ce problème est aussi valable entre les enceintes de basses et le système large bande, car même si leur bande passante est délimitée par une fréquence de coupure, nous constatons un intervalle de chevauchement fréquentielle, ce que nous appelons le recoupement ou recouvrement.

Cependant, si la distance entre les enceintes est trop grande, l’atténuation de niveau liée à la décroissance spatiale entraînera une différence de niveau entre les deux sources. Si cette différence dépasse 10 dB, la source atténuée, celle qui est la plus loin de l’auditeur, sera considérée comme négligeable.



Plusieurs problèmes apparaissent lors de l'utilisation d'un système de sonorisation dans le cadre d'un concert, surtout pour les basses fréquences. Des problèmes qui viennent entraver la qualité du concert pour le public mais aussi pour les artistes et techniciens, pouvant dans certains cas impacter leur santé auditive. De plus, dans certains cas, ces problèmes peuvent aller jusqu'à gêner le voisinage. Des solutions sont alors nécessaires.

C.1.3 La gêne occasionnée sur le voisinage

En plus des forts niveaux en sortie des subwoofers, les rappels acoustiques vus précédemment nous ont permis de comprendre que les basses fréquences se propagent beaucoup plus loin que les hautes fréquences. Les obstacles se doivent d'être plus grands que la longueur d'onde pour altérer le signal, pour ainsi dire très grands. C'est pour cette raison que ces fréquences peuvent être une gêne pour un public n'ayant pas consenti à participer au concert. Une gêne compliquée à gérer puisque les enceintes concernées sont « omnidirectionnelles » et que notre oreille n'est pas capable de localiser les sons graves, surtout quand les niveaux sonores d'exploitation, viables, sont élevés.

Ce problème vis-à-vis du voisinage est récurrent, surtout à la période estivale durant les festivals en extérieur. Parfois certaines personnes portent plainte : ce fut le cas lors du festival We Love Green 2019, comme peut en témoigner l'article tiré de « Le Parisien », que nous retrouvons en **Annexe 2**.

Pourtant les limites sonores fixées à 115 dB(C) sur 15 min et 99 dB(A) sur 15 min, n'ont pas été dépassées une seule fois durant cet événement.

Dans l'optique de réduire ces inconvénients, des réglementations ont été mises en place.



C.2 L'arrivée des réglementations

Afin de réduire les gênes occasionnées et de protéger la santé auditive des personnes, des réglementations sont apparues concernant les niveaux sonores : des niveaux maxima autorisés, mais aussi des règles appliquées aux émergences. Nous retrouvons toutes ces informations dans le **Décret n° 2017-1244 du 7 août 2017 relatif à la prévention des risques liés aux bruits et aux sons amplifiés**.

C.2.1 Les niveaux maxima autorisés

Telles sont les règles définies par ce décret :

- Ne dépasser, à aucun moment et en aucun endroit accessible au public, les niveaux de pression acoustique continus équivalents 102 décibels pondérés A sur 15 minutes glissantes et 118 décibels pondérés C sur 15 minutes glissantes.
Lorsque ces activités impliquant la diffusion de sons amplifiés sont spécifiquement destinées aux enfants jusqu'à l'âge de six ans révolus, ces niveaux de pression acoustique ne doivent pas dépasser 94 décibels pondérés A sur 15 minutes et 104 décibels pondérés C sur 15 minutes.
- Enregistrer en continu les niveaux sonores en décibels pondérés A et C auxquels le public est exposé et les afficher en continu à proximité du système de contrôle. Ces enregistrements se doivent d'être conservés pendant six mois.
- Informer le public sur les risques auditifs et mettre à leur disposition à titre gratuit des protections auditives individuelles adaptées au type de public accueilli dans les lieux.
- Créer des zones de repos auditif ou, à défaut, ménager des périodes de repos auditif, au cours desquels le niveau sonore ne dépasse pas la règle d'égale énergie fondée sur la valeur de 80 décibels pondérés A équivalents sur 8 heures.

À l'exception des discothèques, les dispositions prévues ne sont exigées que pour les lieux dont la capacité d'accueil est supérieure à 300 personnes.



C.2.2 L'émergence autorisée

Lorsque nous parlons d'émergence, nous faisons référence à la différence de niveau entre le bruit ambiant, bruit qui comporte le bruit gênant, et le bruit résiduel. Plus clairement, nous parlons du niveau supplémentaire par rapport au bruit dépourvu de la source indésirable, mesuré à un moment de la journée considéré le plus calme.

Selon le décret, les bruits générés par les activités impliquant la diffusion de sons amplifiés à des niveaux sonores élevés dans les lieux ouverts au public ou recevant du public ne peuvent par leur durée, leur répétition ou leur intensité porter atteinte à la tranquillité ou à la santé du voisinage.

En outre, les émissions sonores des activités qui s'exercent dans un lieu clos n'engendrent pas dans les locaux à usage d'habitation ou destinés à un usage impliquant la présence prolongée de personnes, un dépassement des valeurs limites de l'émergence spectrale de 3 décibels dans les octaves normalisées de 125 hertz à 4 000 hertz ainsi qu'un dépassement de l'émergence globale de 3 décibels pondérés A.

Qui plus est, une étude de l'impact des nuisances sonores est réalisée sur les différentes configurations possibles d'aménagement du système de diffusion de sons amplifiés. Elle peut notamment conclure à la nécessité de mettre en place des limiteurs de pression acoustique. Cette étude doit être mise à jour en cas de modification des aménagements des locaux, de modification des activités ou de modification du système de diffusion sonore, non prévues par l'étude initiale.

En cas de contrôle, l'exploitant doit être en mesure de présenter le dossier d'étude de l'impact des nuisances sonores aux agents de la préfecture de police concernés.

Ces nombreux problèmes nécessitent des solutions pour une diffusion respectueuse des réglementations : un équilibre à trouver entre le respect du voisinage et la qualité du concert.



Deuxième partie

Les technologies et solutions actuelles cherchant à remédier aux contraintes

A Associations de Haut-Parleurs

A.1 Associations entre différents subwoofers

Afin de résoudre les problèmes que nous avons pu déceler précédemment dans la première partie de ce travail de recherche, la solution qui s'offre à nous tout en respectant un confort d'écoute, serait l'association de différentes enceintes consacrées aux basses fréquences. Cette association permet entre autres d'obtenir une plus grande portée et moins de distorsions, car nous profitons de la sommation des niveaux entre les sources sans pour autant augmenter leur puissance.

C'est en mettant à profit et en appliquant quelques règles d'acoustiques que nous pouvons différencier deux types de configurations : le Point Source et le Line Source. Dans un premier temps, nous expliquerons leurs caractéristiques ainsi que leurs avantages, mais nous verrons que par la suite, en faisant évoluer ces deux procédés, nous pouvons arriver à d'importantes améliorations.



A.1.1 Le Point Source

Pour bien définir ce qu'est le Point Source, nous pouvons tout simplement commencer par imaginer un subwoofer positionné au sol, celui-ci engendrant une diffusion en un point. Il délivre alors un front d'onde sphérique. Lorsque nous parlons de plusieurs enceintes positionnées à des endroits différents, le cas des subwoofers disposés de part et d'autre d'une scène, nous parlons alors de diffusion multi-Point Source. Cependant, nous avons constaté ultérieurement qu'une diffusion de la sorte peut entraîner des interférences si nous ne respectons pas quelques précautions.

C'est pour cette raison qu'il est préférable dans ce cas, de concentrer l'ensemble des subwoofers en un stack situé sur un côté de la scène, en un seul Point Source :

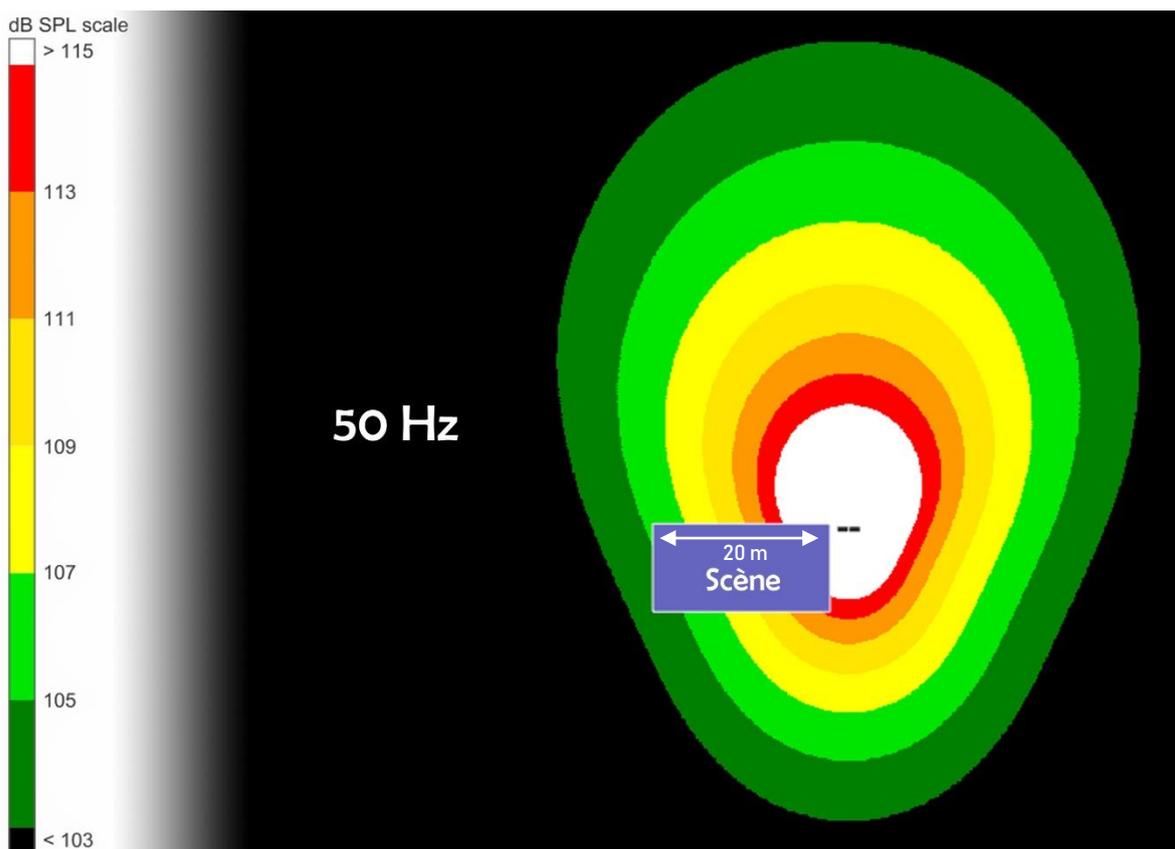


FIGURE A.1.1 – Simulation d'une configuration Point Source avec deux stacks de deux KS28 (L-Acoustics), situés à Jardin d'une scène de 20 mètres d'ouverture.



- Nous profitons alors de l'addition de niveaux de pression sonore entre les boîtes.
- Somme avec les sources images résultant des réflexions spéculaires avec le sol (théoriquement +6 dB).
- Ici notre incapacité à localiser les basses fréquences devient un atout (pas besoin de centrer le stack).
- Peu de distance inter-enceintes donc pas d'interférences résultantes (notion que nous verrons avec le Line Source).

Néanmoins, le fait que l'onde sphérique ici émise soit caractérisée par une décroissance de 6 dB par doublement de distance, l'asymétrie de la diffusion des basses fréquences entraînerait une différence de niveaux sonores sur la zone de couverture, ce qui pourrait être gênant dans le cas d'une grande ouverture de scène (voir **FIGURE A.1.1**).

La solution serait alors d'utiliser une configuration Line Source.

A.1.2 Le Line Source

À l'instar du Point Source, le Line Source correspond à une disposition d'enceintes en ligne. Il est important de faire la différence entre l'appellation Line Source qui désigne la configuration en ligne, et le principe de la diffusion Line Source qui est une diffusion d'onde cylindrique. Cette dernière est valable seulement lorsque tous les critères de la WST sont respectés. Il serait théoriquement possible d'obtenir un système de subwoofers diffusant une onde cylindrique, mais ici nous allons nous intéresser seulement au critère d'**Olson**.

Nous avons remarqué auparavant que l'espacement entre deux sources entraîne des interférences, mais cela n'est vrai qu'à partir d'une certaine distance car selon la loi d'**Olson** :

Lorsque la distance entre deux sources diffusant un signal d'une fréquence F ne dépasse pas une longueur de $\frac{\lambda_{\min}}{2}$, alors nous pouvons considérer l'association des enceintes comme une seule source.



C'est pour cette raison que si nous disposons une ligne de subwoofers espacés de la distance prescrite, nous obtenons une seule source en évitant au maximum ces interférences. Cette affirmation est valable pour les lignes horizontales et verticales (empilement d'enceintes).

Ex : Pour un subwoofer ayant une fréquence de coupure à 100 Hz, la distance entre les enceintes ne doit pas excéder 1,7 mètre. Pour les fréquences émises inférieures à 100 Hz, ce n'est pas un problème car leur longueur d'ondes correspondantes sera plus grande et donc nous ne pourrons en aucun cas dépasser $\frac{\lambda}{2}$ d'une fréquence inférieure.

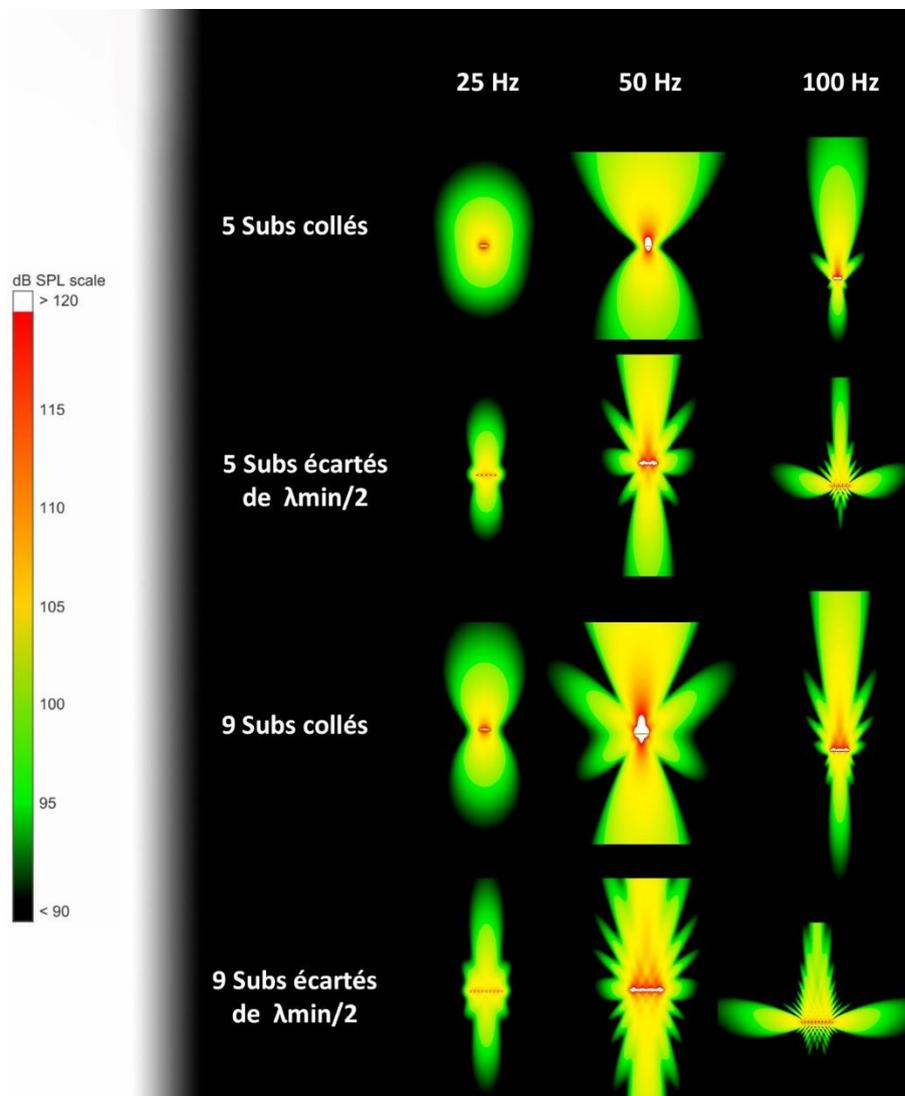


FIGURE A.1.2 – Simulations d'une configuration Line Source en faisant varier le nombre d'enceintes, la distance entre celles-ci et la fréquence émise.



Cette configuration apporte différents avantages :

- Une diffusion homogène du signal sonore en minimisant les interférences
- Une directivité frontale accrue en fonction de la fréquence, de la longueur de la ligne et de la distance inter-enceintes
- Une symétrie de la diffusion des basses fréquences
- Un gain en pression acoustique

Cependant, malgré ce gain de pression, nous ne gagnons pas, voire peu en portée, ou alors il faudrait concevoir une ligne très importante ce qui n'est pas réalisable pour une question de place et de budget. De plus cette ligne apporterait un gain en pression trop important pour les spectateurs situés sur les premiers mètres, sans oublier que le problème de décroissance spatiale est toujours un facteur à prendre en compte.

Mais même si nous gagnons en directivité avec une ligne réalisable, celle-ci peut devenir gênante pour les spectateurs situés aux extrémités hors de portée de la couverture de cette ligne.

La distance entre les enceintes permet de jouer sur la directivité de cette configuration. En aucun cas nous ne devons dépasser la limite fixée par la loi d'**Olson**, mais nous pouvons utiliser la relation suivante :

$$d_0 = \frac{\lambda_{\min}}{2} \cdot \cos(\theta)$$

L'angle 0° est considéré ici comme étant face aux subwoofers, il faut donc comprendre que nous calculons en réalité la moitié de l'angle de diffusion ; il faudra le multiplier par deux pour obtenir l'ouverture réelle de notre système.

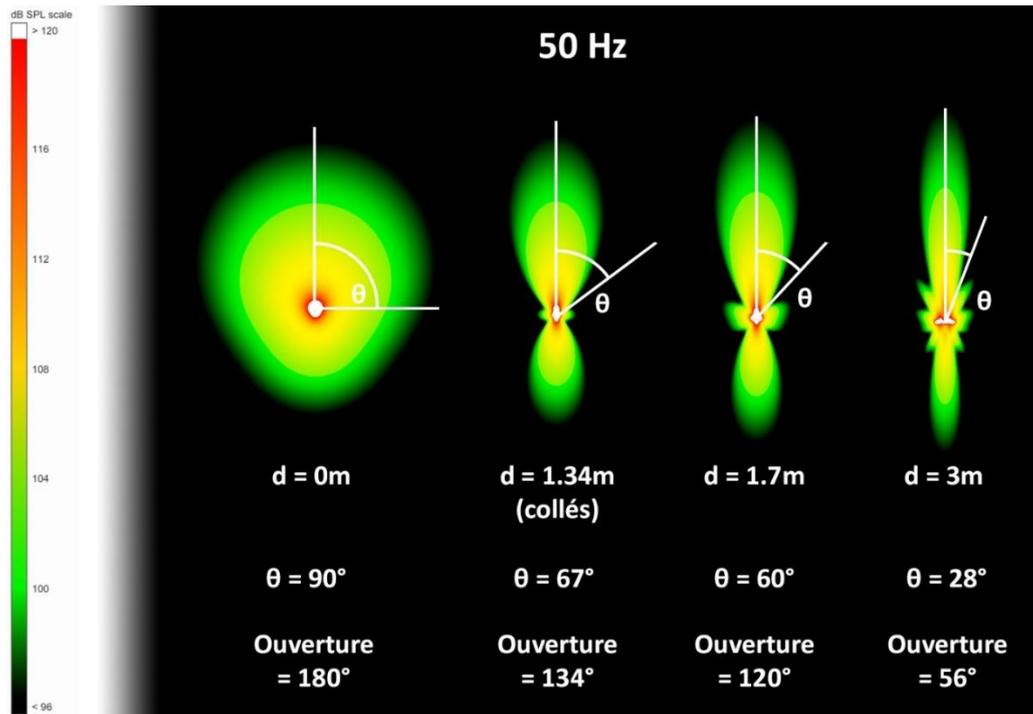


FIGURE A.1.3 – Simulation de l’ouverture de diffusion d’une configuration Line Source en faisant varier la distance entre les subwoofers pour une fréquence de 50Hz émise.

Nous constatons alors que notre système est le plus directif lorsque les enceintes sont éloignées de la distance maximum autorisée par la loi d’**Olson**, et que théoriquement la distance serait nulle pour une diffusion à 90° . Comprenons donc que l’écart entre les enceintes grandissant entraîne l’apparition d’interférences minimales favorisant la directivité.

Selon la **FIGURE A.1.3**, notre simulation semble nous donner l’information qu’il est préférable de coller au maximum les enceintes entre elles, quitte à perdre en directivité, mais à gagner en homogénéité, surtout dans le cas des fréquences élevées, au plus proche de la fréquence de coupure.

Cependant, nous devons prendre en compte la largeur des enceintes : c’est pour cette raison que l’ouverture maximale de la directivité dépend des références de subwoofers.

Nous sommes donc forcément limités physiquement à une directivité.

Il existe cependant une solution pour remédier à ce problème, c’est ce que nous appelons l’arc-sub.



A.2 L'arc-sub

L'arc-sub est une disposition d'enceintes en Line Source, formant un arc où le public serait placé du côté convexe, cet arc pouvant être créé par une différence spatiale, ou bien à l'aide d'un retard électrique permettant de reculer virtuellement une source.

Ici nous allons prendre uniquement comme exemple le cas du retard électrique, car nous partons du principe qu'il est plus judicieux de placer les enceintes en ligne droite et de pouvoir gérer l'arc à notre guise, que d'être contraints à un arc physique (il est impossible d'avancer les subwoofers avec des délais négatifs si l'angle ne convient pas).

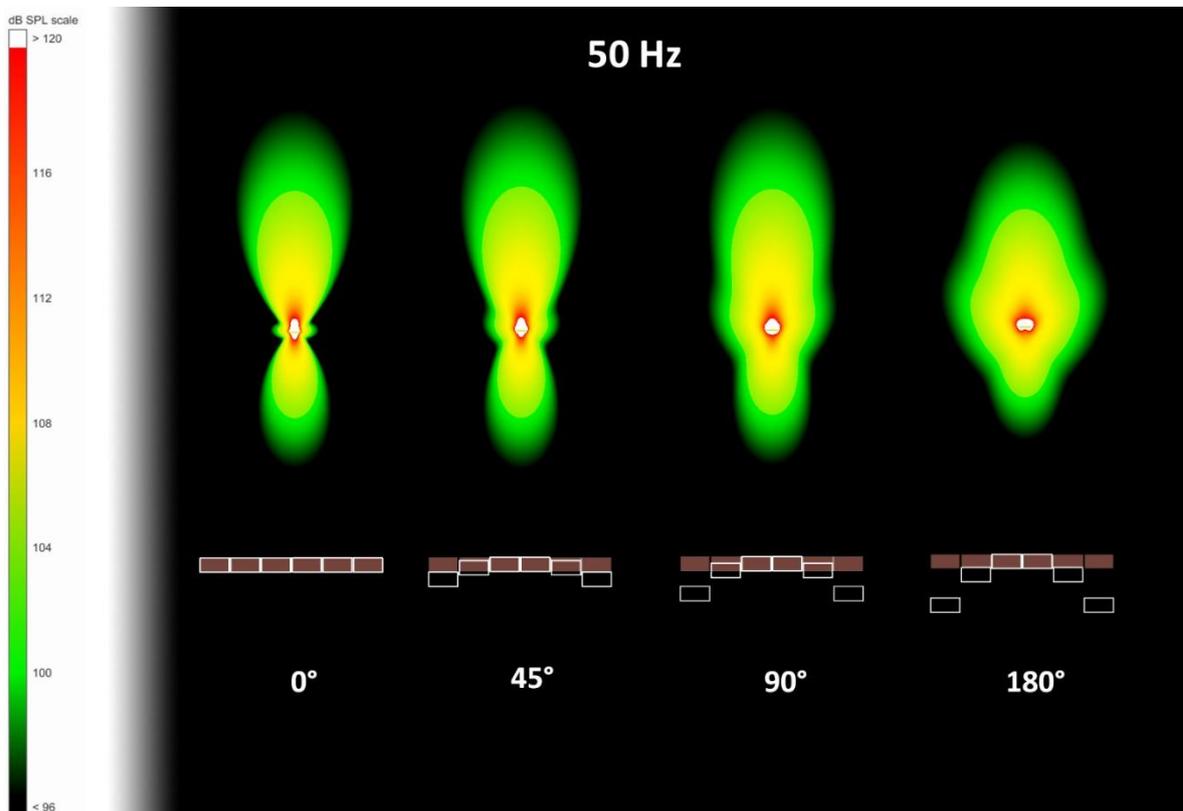


FIGURE A.2.1 – Simulations d'une configuration Arc-sub (Line Source) en faisant varier l'angle de l'arc pour une fréquence de 50 Hz émise.



Les observations que nous pouvons faire suite à ces simulations, sont les suivantes :

- Si nous augmentons l'angle de l'arc-sub, nous augmentons l'angle de diffusion.
- Plus cet angle est important, plus le lobe de sommation central, qui peut être gênant, diminue.
- Le degré de l'arc-sub peut varier entre 0° et 180° .

Nous pouvons imaginer utiliser l'arc non plus de manière convexe, mais concave, afin de resserrer une directivité trop importante, dans l'hypothèse d'approcher le modèle de la parabole.

L'arc-sub est une configuration très utile qui permet d'obtenir une plus grande directivité par rapport à ce que propose une configuration Line Source, mais tout en réduisant les interférences. Nous gagnons une fois de plus en homogénéité pour les niveaux fréquentiels sur la zone couverte par le système de diffusion.

Dans l'utilisation de ces configurations, que ce soit le Line Source ou l'arc-sub, les subwoofers sont empilés au sol. Mais, nous l'avons vu, celui-ci est considéré comme un obstacle pour les ondes sonores : il faut donc porter une attention particulière à la façon dont les enceintes sont empilées.



A.3 Le cas des subwoofers empilés au sol

Il est courant de voir certaines configurations de subwoofers, notamment les Line Source Cardioïdes (que nous verrons par la suite) , utilisées avec des stacks de deux ou trois enceintes au lieu d'une seule comme vu précédemment ; ou bien encore, plusieurs enceintes empilées dans le cas d'une disposition LR classique, cette fois-ci dans le but d'augmenter la pression.

Nos rappels acoustiques nous ont permis de comprendre que dans le cas d'une enceinte posée au sol, nous obtenons, via l'effet de couplage dû à la réflexion spéculaire, un gain en pression théorique de **+6 dB**.

Une différence est notable dans la pratique, car un sol n'est jamais cent pour cent réfléchissant.

Lorsque plusieurs enceintes sont empilées, ce gain en plus de la sommation des sources, est toujours valable, mais nous remarquons une différence dans la réponse fréquentielle entre chaque enceinte selon un point d'écoute, notamment un filtrage en peigne, une fois de plus !

Effectivement, lorsque nous superposons les caissons de basses, nous décalons à chaque fois le centre acoustique de chacun du sol, et ce en fonction de la hauteur. On note donc une différence de phase différente selon le subwoofer par rapport à son onde directe émise (différence source image et source réelle).

C'est pour cette raison qu'il est préférable de disposer les caissons à la verticale, afin d'obtenir la même distance entre le sol et les centres acoustiques de chaque enceinte. Nous obtenons ainsi un filtrage en peigne similaire pour chaque caisson.



Stack Horizontal



Stack Vertical

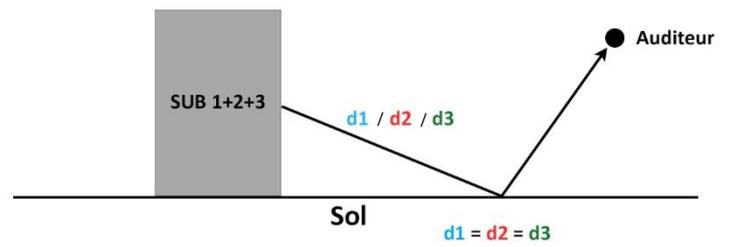
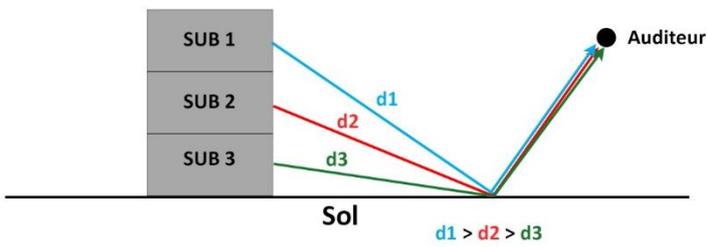


FIGURE A.3.1 – Comparaison des différences de marche entre un stack de subwoofers horizontal et vertical.

Comme nous allons le voir dans la partie suivante, cet effet de couplage avec le sol est aussi valable lorsque les subwoofers sont accrochés.



A.4 Les subwoofers accrochés

Une autre technique consiste à accrocher les subwoofers, afin de former une grappe lorsque plusieurs boîtes sont suspendues. L'utilisation de cette configuration peut être due à des raisons pratiques, comme un manque de place au sol à cause de la scénographie, mais le plus souvent nous l'utilisons pour des raisons techniques, et ce à notre avantage.

Une croyance largement répandue affirme que les enceintes basses fréquences accrochées, sont moins efficaces de -6 dB que les mêmes enceintes posées au sol, à cause de la perte du couplage avec celui-ci. Mais cette affirmation a été démentie par des chercheurs de chez L-Acoustics, ayant effectué des mesures publiées dans le journal de l'AES⁶.

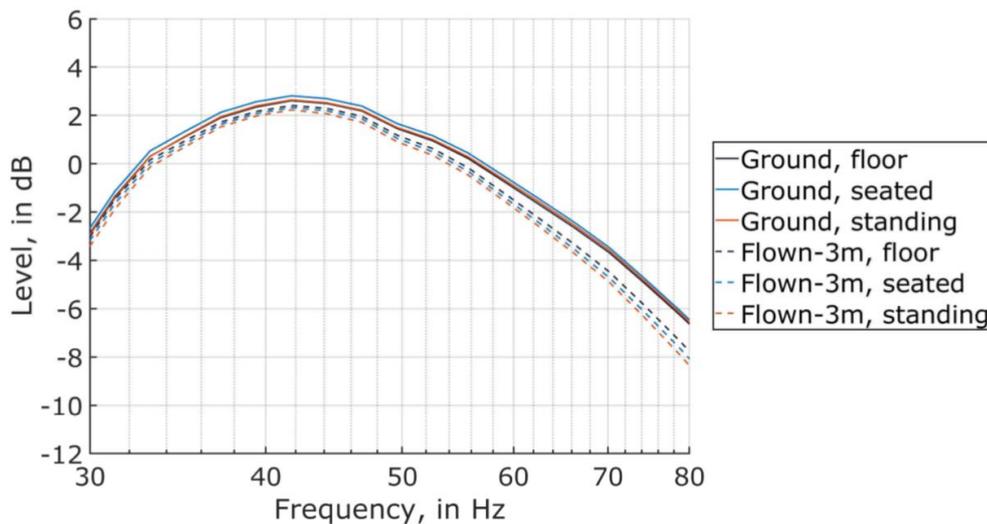


FIGURE A.4.1 – Mesure à une distance de 20 mètres en divers points, de la réponse en fréquence d'un subwoofer KS28 posé au sol ou accroché à 3 mètres de hauteur. [5]

Ici la **FIGURE A.4.1** nous donne des résultats de mesures effectuées entre une enceinte KS28 (L-Acoustics) posée au sol, et la même enceinte accrochée à 3 mètres de hauteur. Les mesures ont été réalisées à une distance de 20 mètres avec un micro posé au sol (floor), un micro à 1,20 mètre de hauteur (seated), puis un micro positionné à 1,60 mètre de hauteur (standing).

6. Corteel E., Coste-Dombre H., Combet C., Horyn Y., et Montignies F. : *On the efficiency of flown vs. ground-stacked subwoofer configurations*. Audio Eng. Soc., Convention Paper 10051, octobre 2018.



Les résultats nous montrent qu'en réalité, même si nous observons une légère variation de l'efficacité en fonction de la fréquence, de la hauteur du micro, et de la hauteur du subwoofer, l'effet de couplage avec le sol est toujours valable. Nous mesurons seulement une perte de 2 dB d'efficacité sur l'enceinte accrochée dans le cas représenté.

En effet, nous l'avons vu, les fréquences basses ayant de grandes longueurs d'ondes sont moins facilement sujettes au problème de phase. Cependant, lorsque nous constatons des interférences, celles-ci sont très gênantes.

Ces mêmes chercheurs ont pu ainsi déterminer un graphique permettant de trouver la distance de l'auditeur à laquelle l'effet de couplage commence à diminuer, pour une hauteur d'écoute correspondant à 1,60 mètre sur une plage de fréquence comprise entre 30 Hz et 80 Hz (FIGURE A.4.2). Cette distance varie en fonction de la hauteur de l'enceinte. Nous remarquons alors un rapport de 5 à respecter pour éviter une perte d'efficacité sur le couplage avec le sol.

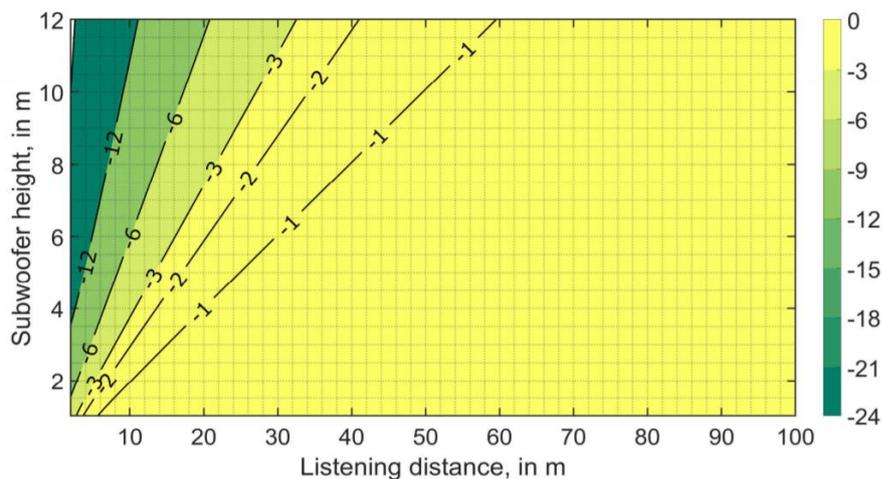


FIGURE A.4.2 – Réduction de niveau sonore entre un subwoofer posé au sol et un subwoofer accroché, pour hauteur d'écoute de 1.6 mètre et une bande de fréquence comprise entre 30 Hz et 80 Hz. [5]

Par exemple, pour une hauteur d'enceinte de 10m, il est conseillé d'être – idéalement - à une distance d'écoute supérieure à 50m afin d'avoir la même efficacité entre l'enceinte accrochée et celle qui est stackée.

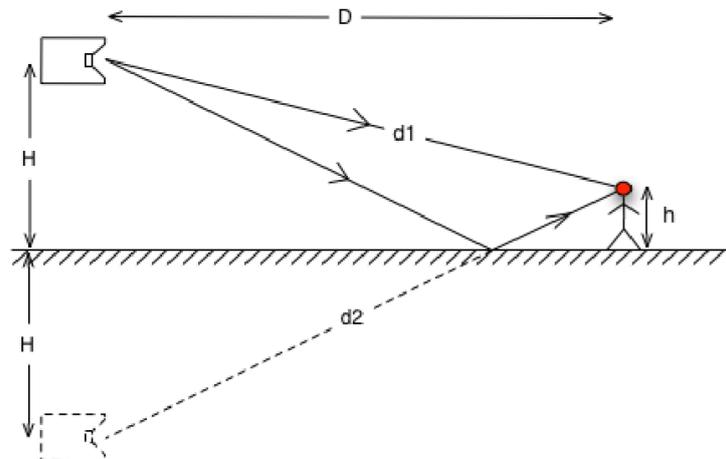


FIGURE A.4.3 – Schéma représentant l'effet du sol pour l'enceinte accrochée. [6]

La **FIGURE A.4.3** nous permet d'illustrer le phénomène afin de mieux le comprendre. Car en effet, le réel problème ici est la différence de phase entre l'onde directe et l'onde réfléchie, qui se caractérise par une différence de distance entre la source réelle et la source image. Ce problème impacte directement le niveau de pression global du subwoofer en un point d'écoute.

Nous pouvons calculer cette différence avec la relation suivante :

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

Donc :

$$\text{Quand } D \rightarrow 0 \text{ alors } \Delta d \rightarrow 2h \text{ et Quand } D \rightarrow +\infty \text{ alors } \Delta d \rightarrow 0$$

À partir d'une certaine distance **D** dite critique ici, la différence de phase **Δd** devient négligeable et n'interfère plus sur l'efficacité de l'enceinte accrochée par rapport à une enceinte au sol (**FIGURE A.4.3**).

Néanmoins, cette différence de phase engendre forcément un filtrage en peigne, dont la première fréquence d'atténuation dépend de la hauteur d'écoute, de la hauteur de l'enceinte, et de la distance de l'auditeur. Ce genre de problème existera toujours dans le cas d'enceintes accrochées, c'est inévitable.



Pour que ce filtrage ne soit pas un inconvénient, il serait éventuellement possible de repousser cette première fréquence au-delà de la fréquence de coupure des subwoofers, mais des limites physiques et techniques peuvent empêcher ce phénomène.

Nous remarquons avec cette formule, que plus la hauteur de l'enceinte est importante plus cette première fréquence (première annulation du filtrage en peigne) diminue. Cependant, plus l'auditeur s'éloigne du système, plus la fréquence augmente, et inversement.

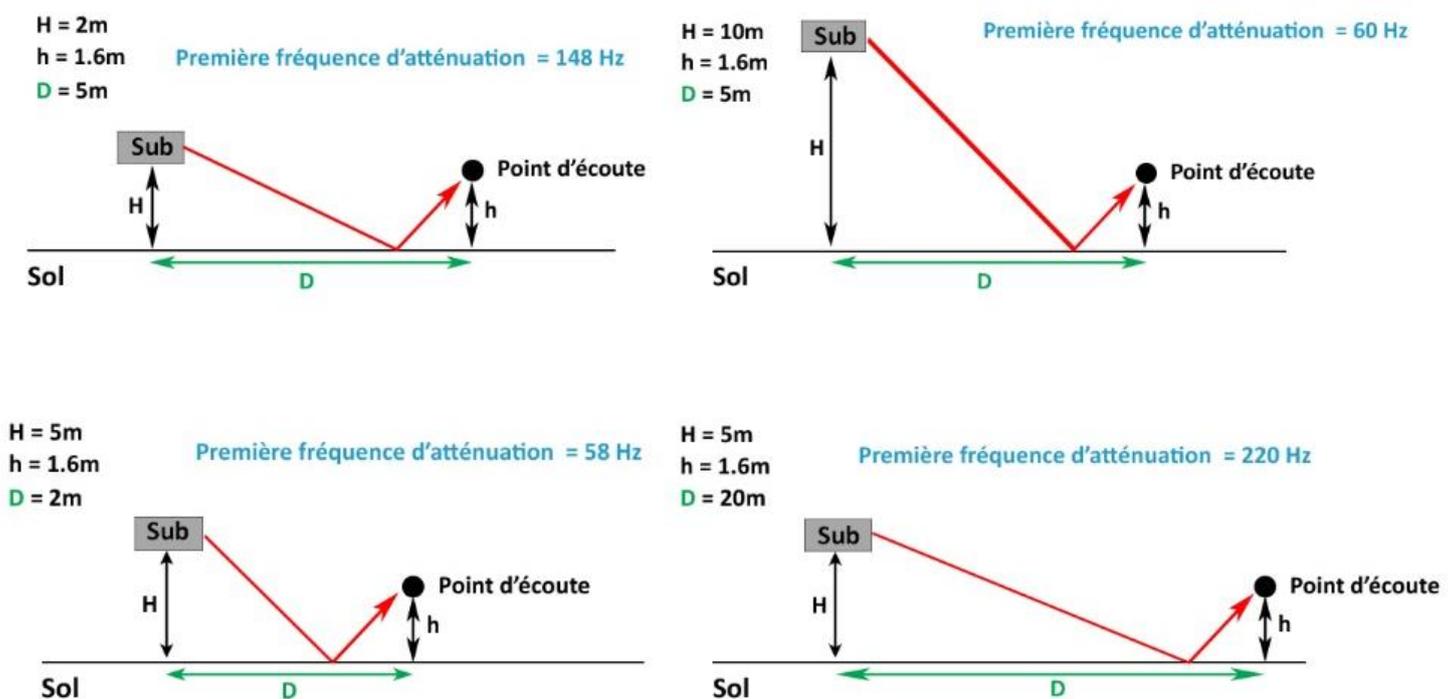


FIGURE A.4.4 – Schémas représentant la variation de la première fréquence d'atténuation du filtrage en peigne, en fonction des divers paramètres rencontrés.

Dans la logique, si nous désirons une première fréquence d'atténuation assez haute en étant près des enceintes, nous devons baisser la hauteur des subwoofers. De cette façon, la fréquence ne fera qu'augmenter en éloignant le point d'écoute. Mais dans ce cas, nous perdons certains avantages des caissons accrochés en hauteur, et le fait de les descendre peut gêner le travail des techniciens lumières ou vidéo.



Dans l'idéal, il serait intéressant d'utiliser une grappe de subwoofers très directifs et de monter la hauteur de chaque enceinte indépendamment en fonction de la distance à laquelle est - doit être- leur zone de couverture, voire même utiliser des délais pour augmenter virtuellement des hauteurs non atteignables physiquement. Ainsi nous pourrions théoriquement obtenir le même filtrage en peigne pour l'ensemble du public. Il suffirait donc finalement de corriger ce filtrage en peigne avec un égaliseur à phase linéaire afin d'homogénéiser les niveaux sonores selon la fréquence jouée, pour l'ensemble du public.

Toutefois, nous devons garder en tête que ce problème n'est pas forcément présent car les sols ne sont jamais parfaitement réfléchissants et un public conséquent fera office d'absorbant pour ces fréquences. C'est pour cette raison que certains techniciens systèmes sacrifient ce paramètre de filtrage en peigne souvent négligeable par rapport aux avantages apportés par les subwoofers accrochés.

Un des plus gros avantages de cette configuration est l'homogénéité du niveau de pression acoustique sur la zone de couverture du système.

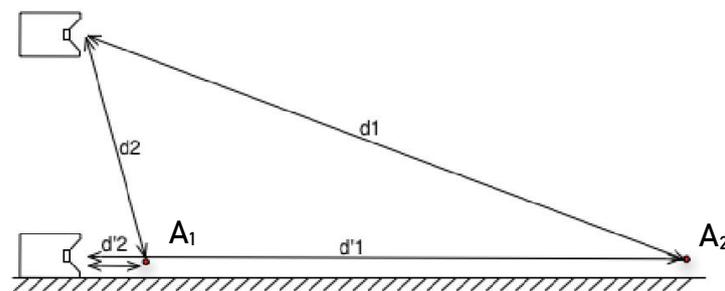


FIGURE A.4.5 – Schéma représentant la variation des distances entre deux points d'écoute, selon la position du subwoofer. [6]

À l'aide de le **FIGURE A.4.5**, nous constatons que pour deux points d'écoute différents, un près du système (A_1), et un autre situé à plusieurs mètres (A_2), la différence de distance entre d_2 et d_1 est plus importante dans le cas d'une enceinte située au sol que dans le cas d'une enceinte accrochée.

$$d_1 - d_2 < d'_1 - d'_2$$



Nous savons de plus qu'une onde sonore émise par une enceinte de basses fréquences, est soumise à une décroissance spatiale de -6 dB par doublement de distance.

Donc plus la différence de distance est grande, plus l'atténuation spatiale est importante, plus la différence de niveau entre les deux points d'écoute va être considérable.

C'est pour cette raison qu'il est préférable d'accrocher les subwoofers afin de gagner en homogénéité, en réduisant la différence de niveau entre le point A_1 et le point A_2 . **Nous pouvons ainsi approcher les niveaux maximaux en dB(C) à la régie FOH, sans pour autant les dépasser au niveau de la crash barrière devant la scène.**

Dans le cadre du concert en plein air, il est difficile d'utiliser ce genre de configuration, car les enceintes surélevées émettent une onde sonore passant par-dessus de nombreux obstacles (public, bâtiments, etc.). Ainsi les basses fréquences, ayant une plus grande portée, viennent perturber la tranquillité du voisinage. De plus, la ligne formée par la grappe nous permet de gagner en directivité, donc de privilégier une réception lointaine tout en augmentant légèrement la portée.

Remarque : À l'inverse, ce problème peut être un atout dans les grandes salles de spectacles (stades ou autres), car les enceintes peuvent ainsi arroser des spectateurs situés assez loin dans des gradins ou tribunes.

Hors système de rappels, la meilleure disposition pour des subwoofers accrochés serait de placer une seule grappe au centre. De cette façon, nous évitons les interférences engendrées par une disposition LR, problème similaire avec la disposition LR stackée au sol. C'est pour cette raison que sont apparus de nouveaux systèmes de sonorisation utilisant seulement un cluster de caissons de basse centrale : c'est le cas notamment du L-ISA de chez L-Acoustics (WFS).



Cette configuration n'est pas toujours réalisable en fonction des points d'accroches disponibles et peut gêner, par exemple, le travail des techniciens lumières. Il est donc courant, dans ce cas, de retrouver une grappe de subwoofers suspendue de part et d'autre de la scène afin de garder une symétrie.

Évidemment, en corrigeant un problème, nous en avons créé d'autres :

- Interférences dues à l'écart entre la grappe L et la grappe R.
- Légère perte de volume sonore pour les premiers rangs à cause de la directivité verticale de la grappe.
- Perte de « l'impact » ressenti lorsque nous sommes devant les subwoofers.

La solution serait donc ici de coupler le système accroché avec un deuxième système Line Source situé au sol, comme nous avons pu le voir précédemment, le but étant de trouver un compromis général entre les problèmes et avantages rencontrés, en jouant avec le niveau des enceintes posées.

Lorsque nous sommes en présence de deux systèmes diffusant des fréquences basses à des niveaux équivalents, un posé au sol et l'autre suspendu, et dans le cas d'un sol plat, nous remarquons que le point de mise en phase entre ces deux systèmes est situé à l'infini.

Il est donc judicieux d'appliquer un retard sur le système situé au sol, dans le but d'approcher ce point de mise en phase (cf. **Associations des subwoofers avec le système large bande**). Dans le schéma suivant, le subwoofer décalé est reculé virtuellement.



$(d1 - d2)$ tend vers 0 quand le point de mise en phase tend vers ∞

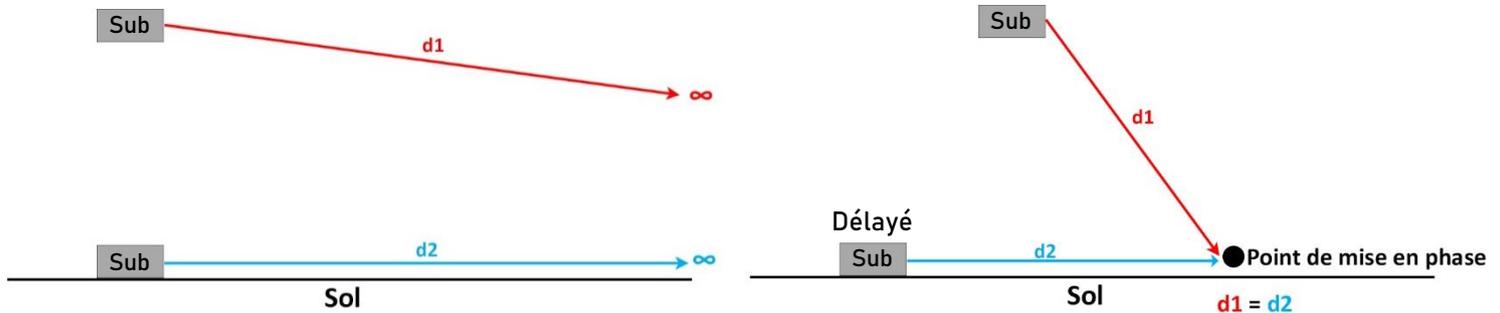


FIGURE A.4.6 – Schéma représentant la distance du point de mise en phase en fonction du délai appliqué au subwoofer positionné au sol.

Si les enceintes sont distantes l'une de l'autre et qu'elles diffusent le même signal, il est impossible d'obtenir une mise en phase parfaite sur l'ensemble de la bande de fréquence utile, et sur l'ensemble de la zone couverte, à part en un point. Il faut donc faire un choix sur la position de ce point de mise en phase et donc de l'endroit où nous effectuons la mesure pour trouver le délai correspondant.

- Soit nous faisons le choix d'effectuer la mesure à la régie FOH. Dans ce cas, nous privilégions l'écoute du technicien dans le but d'obtenir un mixage non faussé, au détriment de l'homogénéité d'écoute normalement voulue pour l'ensemble du public.
- Soit nous faisons la mesure à l'endroit où le public est le plus nombreux, afin de rendre le système cohérent pour le maximum de personnes.

Toutefois, les gens situés à une certaine distance de la scène n'ont pas forcément besoin de percevoir les fréquences très basses : certaines personnes choisissent justement un emplacement éloigné pour éviter les niveaux de pression sonore trop importants, surtout dans le bas du spectre.



C'est pour cette raison que nous pouvons opter pour le fait de faire travailler nos subwoofers dans deux bandes de fréquences différentes. Par exemple le système accroché pourrait travailler dans une bande comprise entre 60Hz et 100Hz, et le système au sol diffuserait quant à lui, les fréquences inférieures à 60Hz.

Ainsi les personnes voulant ressentir les basses fréquences chatouiller leur ventre n'auront qu'à se positionner au plus près de la scène.

Cette répartition de la bande de fréquence permet à présent de réduire le besoin de mise en phase à seulement une plage fréquentielle présente autour de la fréquence de coupure. Cela réduit considérablement les problèmes de phases dans les basses fréquences sur l'ensemble de la zone couverte lors d'une configuration de la sorte. Ce point sera approfondi et expliqué plus en détail dans la partie suivante.

De plus, le fait de réduire la plage de fréquence à laquelle une enceinte travaille, permet d'augmenter son rendement. Pour simplifier, nous soulageons le subwoofer pour qu'il puisse se concentrer et être plus efficace sur sa bande de fréquence assignée. La puissance qu'il peut délivrer est maintenant répartie sur une zone fréquentielle plus courte, ce qui accroît ses performances. Pour s'aider d'un exemple, on constate donc une différence entre un système large-bande ayant une fréquence de coupure à 100 Hz et une fréquence de coupure à 60 Hz. Le fait de diffuser les basses fréquences sur des subwoofers dédiés permet d'améliorer leur rendu tout en soulageant le système large bande. Le rendement est augmenté si nous utilisons deux systèmes de subwoofers ne travaillant pas sur la même plage fréquentielle.

Nous remarquons que la plupart des solutions proposées apportent des avantages, mais nous nous devons d'être très vigilants au regard des relations de phases entre les différentes sources. C'est notamment le cas lorsque nous couplons des subwoofers avec des systèmes large bande.



A.5 Associations des subwoofers au sol avec le système large bande

Effectivement, lorsque nous utilisons un système de diffusion de basses fréquences, celui-ci est régulièrement - voire toujours - couplé avec un système large bande, le plus souvent de type Line-Array lors de gros événements. Ce dernier est conçu pour être suspendu, alors que généralement, en extérieur, nous utilisons des subwoofers situés au sol. Nous rencontrons alors le même problème qu'avec des caissons de basses accrochés, soit un souci d'interférences sur une plage de fréquence similaire. Ici la difficulté est de bien gérer notre phase à la fréquence de coupure (dite zone de **crossover**).

En réalité, il existe, aux alentours de cette fréquence, une zone dite de chevauchement : les filtres passe-haut et passe-bas utilisés pour créer les délimitations ont dans la plupart des cas une pente variable, celle-ci dépend de l'ordre du filtre. Mais le plus souvent, ces pentes sont à **-24 dB/octaves**. La délimitation fréquentielle est progressive, il peut donc exister des interférences pour des fréquences comprises dans cette zone. Pour rappel, elles sont négligeables lorsque la différence de niveau entre deux sources excède **10 dB**. Nous devons prendre en compte le fait qu'un filtre modifie la phase du signal : il serait alors intéressant d'utiliser des filtres à phase linéaire afin d'éviter ce problème.

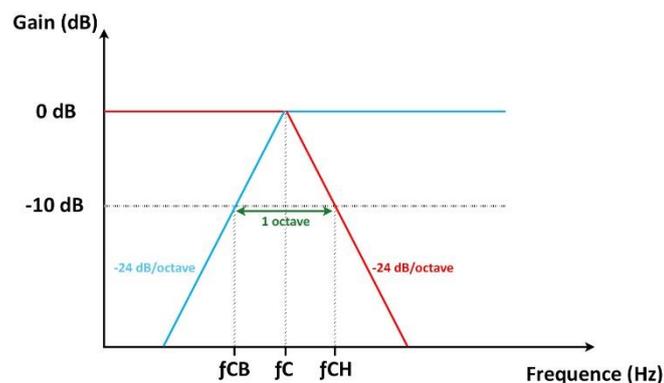


FIGURE A.5.1 – Schéma représentant un filtre crossover.



Dans le cas de pentes à **-24 dB/octave**, nous constatons une zone correspondante à deux octaves pour un niveau de -24 dB, soit une zone d'une octave pour un niveau de -12 dB.

Il est alors facile d'en déduire qu'à un niveau de -10 dB, la zone de chevauchement correspondra environ à une étendue fréquentielle d'une octave autour de la fréquence de coupure.

Une octave correspond à 12 demi-tons, soit 6 demi-tons au-dessus et en dessous de la fréquence de coupure. Avec la formule suivante, nous pouvons trouver les limites fréquentielles de la zone de chevauchement, source d'éventuelles interférences en fonction de cette fréquence centrale :

$$f_{CB} = \frac{f_c}{(\sqrt[12]{2})^6} \quad \text{et} \quad f_{CH} = f_c \times (\sqrt[12]{2})^6$$

Avec : f_{CB} = Fréquence de coupure basse (Hz)

f_{CH} = Fréquence de coupure haute (Hz)

f_c = Fréquence de coupure centrale (Hz)

f_c	60 Hz	80 Hz	100 Hz
f_{CB}	42 Hz	57 Hz	71 Hz
f_{CH}	85 Hz	113 Hz	141 Hz
$\frac{\lambda(CH)}{2}$	2 m	1.50 m	1.20 m

FIGURE A.5.2 – Tableau représentant les fréquences de coupures hautes et basses en fonction de la fréquence de coupure centrale pour des filtres ayant des pentes à -24 dB/octave, ainsi que la demi longueur d'onde de la fréquence de coupure haute.

Pour rappel, selon la loi d'**Olson**, les interférences deviennent gênantes lorsque la différence de phase, ici en distance (Δd), est supérieure à $\frac{\lambda \text{ min}}{2}$.

Théoriquement, nous pouvons donc faire varier Δd entre $-\frac{\lambda \text{ min}}{2}$ et $\frac{\lambda \text{ min}}{2}$.



Dans le cas présent, Δd se calcule en fonction de la distance du point d'écoute et de la hauteur de la grappe, avec la formule suivante :

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

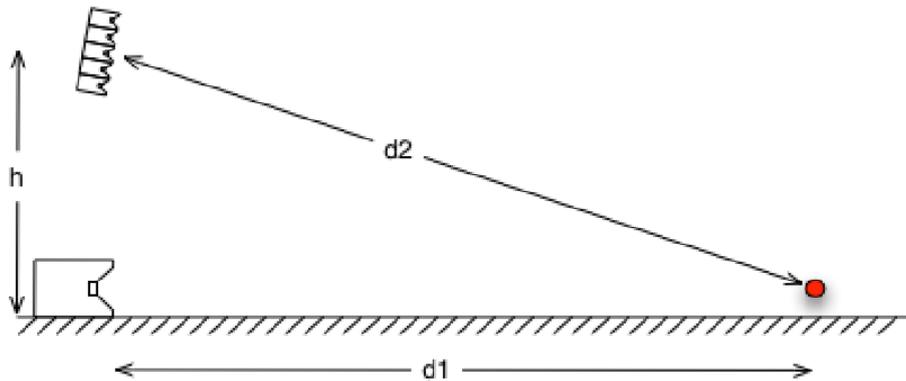


FIGURE A.5.3 – Schéma de l'association d'un système large bande accroché et d'un subwoofer positionné au sol. [6]

Cependant, comme pour les subwoofers accrochés, nous devons ajouter un délai aux enceintes situées au sol afin de rapprocher le point de mise en phase. Sans cela, celui-ci serait situé à l'infini.

Nous pouvons donc reprendre notre formule en prenant en compte ce délai :

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

Ici, ce qui nous intéresse est d'avoir la plus grande marge possible en termes de Δd afin d'élargir la zone de mise en phase tout en respectant la loi d'**Olson** ; donc d'avoir un $\frac{\lambda \min}{2}$ le plus grand possible, et ce en baissant la fréquence de coupure dans la limite du réalisable (en prenant en compte les autres paramètres vus précédemment).



Nous remarquons que pour une même hauteur et une même fréquence de coupure, plus cette zone de mise en phase est loin, plus elle grandit.

Plus on s'éloigne, plus Δd diminue : il faut donc une distance de plus en plus grande entre les extrémités de la zone pour avoir une même marge de Δd .

L'idée est d'effectuer la mesure de mise en phase à une distance assez importante du système, en prenant en compte l'ouverture de la boîte du Line-Array, la plus basse, le point de mesure se situant à peu près à la limite de la zone de couverture de l'enceinte.

Le but n'est pas d'appliquer un délai pour obtenir un Δd se rapprochant de 0 à ce point, mais plus d'appliquer un délai permettant au Δd d'avoisiner $\frac{\lambda_{min}}{2}$ à cette distance. Ainsi nous augmentons la zone de mise en phase au maximum.

Aux extrémités de cette zone, nous pouvons commencer à constater l'apparition d'interférences, mais ce problème n'en est pas forcément un, car nous nous approchons du -10 dB de la pente du filtre passe-bas. Qui plus est, la fin de zone étant éloignée, un effet de décroissance spatiale peut être pris en compte, ce qui réduit les problèmes d'interférence.

De même, pour les premiers rangs situés devant le système, nous pouvons nous permettre de ne pas être en phase en éloignant le point de mesure, car un Line-Array étant directif même un minimum dans les basses fréquences, il ne vient pas arroser les premiers mètres, donc peu d'interférences sont possibles.

Dans le cas où le public est très nombreux, il arrive parfois d'utiliser ce que nous appelons des rappels. Étant donné la perte de niveau sonore des subwoofers par rapport au Line-Array, en fonction de la distance, un déséquilibre tonal peut apparaître. C'est pour cette raison que nous retrouvons des caissons de basses situés dans le public, à une distance critique, là où le système principal n'est plus capable d'émettre les basses fréquences à un niveau de pression suffisant (valable aussi pour les systèmes large-bande).



FIGURE A.5.4 – Photographie d’un système de rappel (Line-Array). [30]

Ces enceintes sont censées prendre le relais, donc se doivent d’être couplées correctement avec la diffusion de façade. Elles rappellent le système principal, d’où leur nom.

Afin de respecter la phase, il est important d’appliquer un délai sur ces enceintes. Celui-ci correspond au temps mis par l’onde sonore émise par le système principal pour arriver jusqu’à l’enceinte de rappel.

Pour que cette configuration soit parfaite, il faudrait que l’enceinte soit très directive, ce qui n’est pas le cas des caissons de basses. L’onde émise à l’arrière peut poser différents problèmes :

- Des interférences avec le système principal dans la zone entre celui-ci et le rappel (à cause du délai).
- L’impression que les basses fréquences viennent de derrière pour les spectateurs situés dans cette même zone mais plus proche des rappels, ce qui n’est pas agréable et casse le synchronisme image/son.



Ces problèmes sont d'autant plus gênants lorsque la ligne de rappels est située juste derrière la régie FOH. Il faut donc trouver un moyen de rendre les subwoofers directifs, sujet que nous allons aborder dans la partie suivante.

Il est important de comprendre qu'il n'y a pas d'exemple parfait : chaque cas est différent et il est donc compliqué de généraliser. Beaucoup de paramètres rentrent en compte, des configurations peuvent être avantageuses dans certaines circonstances, mais inenvisageables dans d'autres. Il serait plus intéressant d'effectuer une étude complète d'un cas précis mais ce n'est pas le but de ce travail. Nous ne détaillons pas un guide pour apprendre à caler un système, nous cherchons et présentons des solutions aux problèmes rencontrés.

Malgré les solutions trouvées, certaines pratiques ne sont pas compatibles avec d'autres : des choix sont toujours à faire, notamment sur les délais. De plus, avoir un niveau sonore homogène n'est pas forcément le but recherché, peut-être du point de vue du technicien, mais nous devons prendre en compte le fait que certaines personnes se positionnent loin du système principal, justement pour profiter du concert sans être soumis à des niveaux sonores excessifs.

Jusqu'à présent, nous nous sommes beaucoup souciés des problèmes rencontrés par le public, notamment d'un point de vue de perception qualitative. Il serait donc maintenant intéressant de nous concentrer sur les solutions existantes permettant de régler les problèmes d'émergence pour le voisinage et qualitatifs pour les techniciens et musiciens présents sur scène.



B Les montages des caissons de basses permettant une directivité cardioïde

Dans les années 90, les techniciens ont commencé à contrôler la directivité des basses fréquences, et cela en employant divers procédés que nous retrouvons encore aujourd'hui : des dispositifs permettant d'obtenir des **directivités cardioïdes** ; diffusion en forme de cœur, permettant une **réjection (en électronique, perte de signal)** à l'arrière. Ainsi les problèmes cités se retrouvent fortement atténués.

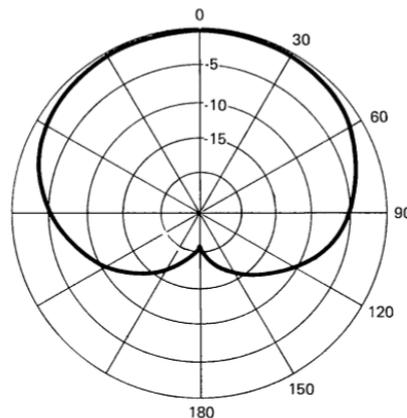


FIGURE B.1.1 – Diagramme polaire représentant une directivité cardioïde. [7]

Ce contrôle sur la directivité est rendu possible à l'aide de différents montages et assemblages de subwoofers, sur lesquels nous allons pouvoir nous pencher dans cette partie. Il existe trois différents procédés permettant ce phénomène, le montage Front Back Front, pouvant être décliné en plusieurs configurations, le End Fire et le montage dipôle.

Nous allons nous épargner les nombreux calculs pouvant troubler notre compréhension et préférer une explication plus simple et visuelle des phénomènes physiques.



B.1 Front Back Front ou autres

La configuration **Front Back Front (FBF)** est la méthode la plus simple à mettre en place, elle peut se décliner en plusieurs montages. Son appellation nous renseigne sur le nombre de subwoofers à utiliser et leur sens d'émission. Par exemple, FBF désigne un stack de trois enceintes, une au sol en direction du public, une par-dessus cette fois-ci retournée, puis enfin une dernière toujours empilée, tournée en direction du public de nouveau. N'oublions pas que le stack peut être placé à la verticale pour éviter les problèmes d'interférences.

L'idée ici est de construire un système « hors-phase » des deux côtés des caissons, et de se servir de la supériorité en nombre des enceintes Front afin de créer la directivité cardioïde. Il y a ainsi plus de niveau de pression pour le public, créant un déséquilibre de ce hors-phase, résultant en un renforcement d'une directivité.

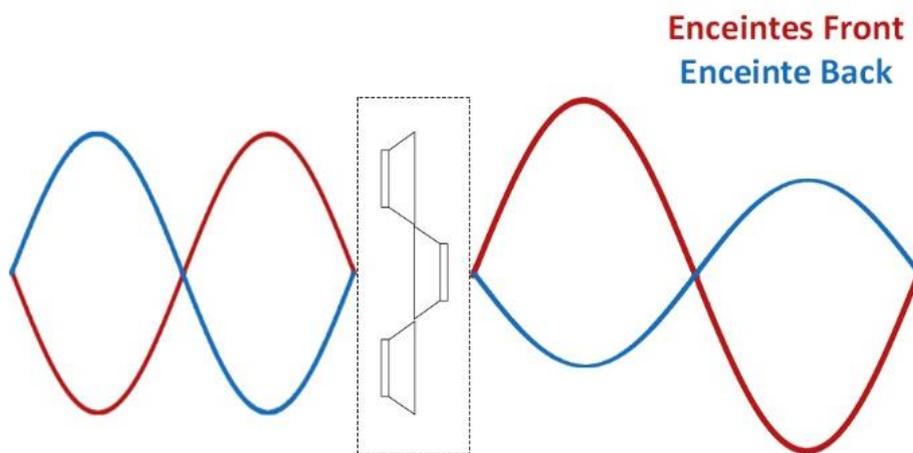


FIGURE B.1.2 – Schéma représentant le principe physique de la configuration Front Back Front.

Remarque : Plus les subwoofers sont naturellement directifs, plus la directivité sera renforcée.



Cette différence de niveau peut aussi être obtenue en baissant le gain des enceintes « back », manœuvre pratique lorsque nous voulons seulement utiliser une configuration Front Back.

Pour la mise en place d'un système de la sorte, nous devons inverser la polarité des enceintes back pour créer l'effet de hors-phase. De plus, il est important de retourner ces subwoofers car ce type d'enceinte n'est pas parfaitement omnidirectionnel dans la pratique, et les retourner permet d'améliorer l'effet recherché.

La dernière étape consiste à aligner les centres acoustiques des caissons, dans le but d'obtenir une différence égale à $\frac{\lambda}{2}$.

Pour cela il existe deux méthodes :

- Utiliser un délai correspondant au temps mis par l'onde du subwoofer Front pour aller au centre acoustique du subwoofer Back. Cette méthode permet une directivité cardioïde parfaite pour une seule fréquence, car c'est ce retard qui conditionne la fréquence d'annulation.
- Utiliser un filtre passe-tout. Celui-ci permet une directivité cardioïde pour une plage de fréquence variable en fonction de la fréquence centrale du filtre, son gain et son facteur Qualité.

Ce type de filtre permet de retarder seulement une zone fréquentielle du signal. Dans le cas de deux enceintes large bande par exemple, un délai alignerait les sources. Cependant nous remarquons parfois des différences de phase pour certaines fréquences. Le filtre permettrait donc d'obtenir une zone de coupure imperceptible et une homogénéité dans la réponse tonale du système, ainsi peu de différence entre les différentes zones de couvertures des enceintes.

Dans la pratique, un micro situé derrière le système et un autre devant à une même distance permettent d'effectuer des mesures de phase pour aligner les différents centres acoustiques, la polarité étant inversée une fois le système aligné. Des filtres en cloches peuvent être appliqués aux subwoofers Back, afin d'obtenir la même réponse en fréquence que les subwoofers Front pour un point de mesure derrière le système, dans le but d'obtenir la meilleure réjection possible.

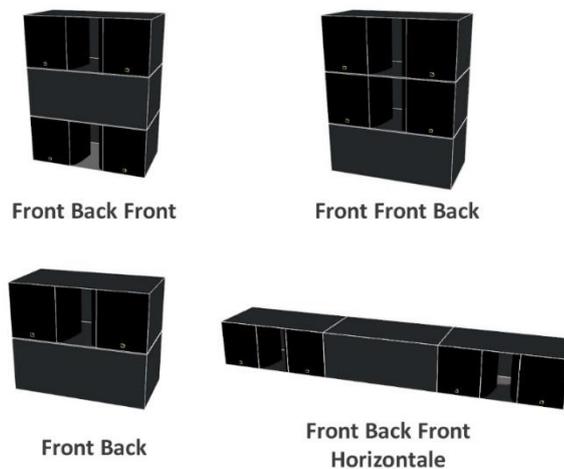


FIGURE B.1.3 – Diverses variantes de la configuration Front Back Front.



B.2 End Fire

Il est difficile de trouver l'origine du nom de cette configuration, même si nous retrouvons pourtant ce terme dans l'appellation de certaines antennes radio (End Fire Array). End pouvant signifier une extrémité et Fire le fait d'émettre le son (tirer en anglais). La diffusion dans une direction, soit une directivité cardioïde.

Cette technique permettant de maîtriser l'émission des basses fréquences se met en place de la manière suivante :

- Positionner deux subwoofers l'un devant l'autre, orientés dans la même direction.
- Définir une fréquence de référence, et espacer les enceintes d'une certaine distance afin d'obtenir deux ondes en quadrature de phase : distance correspondante à $\frac{\lambda}{4}$; $\frac{3\lambda}{4}$ ou encore $\frac{5\lambda}{4}$ (préférence pour $\frac{\lambda}{4}$ afin de rester dans des écarts envisageables au vu des grandes longueurs d'ondes).
- Appliquer un délai au subwoofer avant, correspondant à la distance entre les centres acoustiques des deux enceintes.

Cette disposition permet d'apprécier une sommation des ondes sonores devant le système, et une réjection à l'arrière de celui-ci.

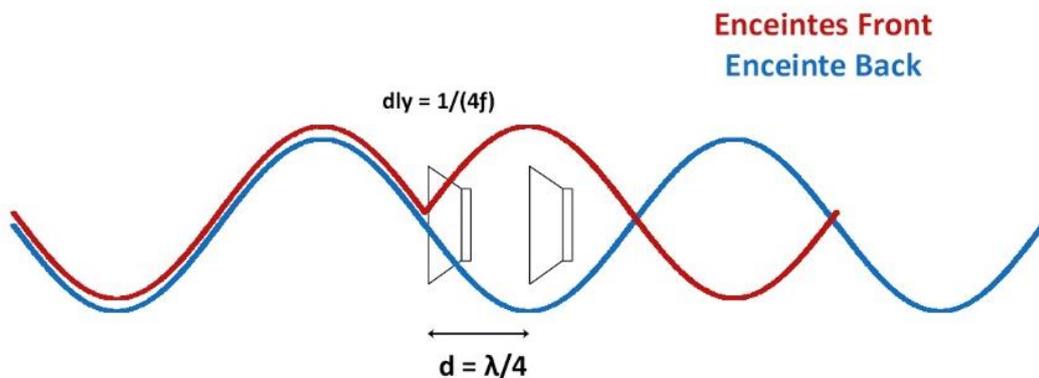


FIGURE B.2.1 – Schéma représentant le principe physique de la configuration End Fire.



La configuration End Fire a l'avantage de pouvoir fonctionner avec plusieurs enceintes, dans le but de créer plusieurs fréquences d'annulation en fonction de la distance. Pour ce faire, il est important de toujours respecter un même écart d de $\frac{\lambda}{4}$ entre les subwoofers, et un délai t correspondant. Par exemple, si nous trouvons une distance égale à $3 \times d$ entre une enceinte décalée et celle de référence (sans délai), il faudra alors appliquer un retard égal à $3 \times t$, et ainsi de suite.

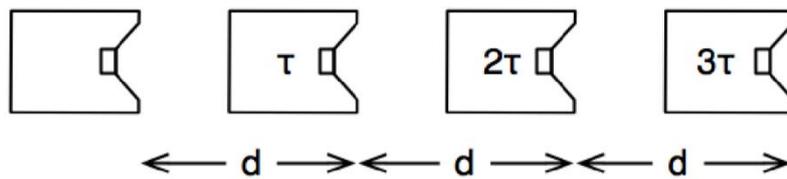


FIGURE B.2.2 – Schéma d'une configuration End Fire avec 4 subwoofers. [6]



B.3 Dipôle

Lors de l'utilisation de ce type de configuration, il est compliqué de ne pas confondre le dipôle avec un montage End Fire à deux enceintes. Effectivement, leur disposition physique est identique, seuls les traitements sur les signaux que reçoivent les subwoofers diffèrent.

Pour illustrer le principe du dipôle, nous pouvons nous permettre de faire une analogie avec la directivité des microphones. Il en existe deux types : les capteurs de pression, qui sont omnidirectionnels, et les capteurs à gradients de pression, qui sont bidirectionnels. Leur directivité cardioïde est obtenue en combinant ces deux types de capteurs, soit par traitement analogique, soit par des principes acoustiques (**ex : labyrinthe**).

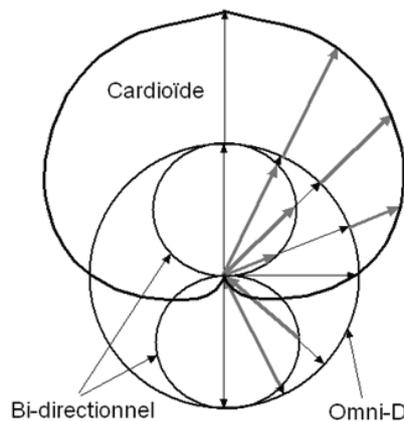


FIGURE B.3.1 – Schéma représentant l'obtention d'une directivité cardioïde à l'aide du couplage d'une directivité omnidirectionnelle et bidirectionnelle. [7]

Pour obtenir le même résultat avec des subwoofers, il faudrait posséder deux enceintes dont une forcément bidirectionnelle. Un haut-parleur à vide, hors du caisson, permet d'avoir cette directivité, mais dans la réalité, cette solution n'est pas envisageable.



Il existe néanmoins une configuration permettant d'approcher un rendu similaire :

- En se basant sur le même principe que le End Fire, nous devons choisir une fréquence de référence cardioïde et espacer les deux centres acoustiques des enceintes d'un quart d'onde.
- Cette fois-ci, le délai correspondant à la distance d est appliqué au subwoofer situé derrière, et sa polarité est inversée.

Nous obtenons ainsi une directivité cardioïde pour une fréquence de référence, des lobes et interférences apparaissant quand celle-ci varie. Un schéma représentant le phénomène physique est présent en **Annexe 2**, pour une meilleure compréhension.

À présent, il serait intéressant de comparer ces différents dispositifs.



C Comparaison entre les différents dispositifs

Selon la configuration choisie, des avantages et inconvénients peuvent apparaître, poussant à choisir un dispositif en fonction de la situation rencontrée. Afin d'identifier les caractéristiques et de comparer les différents montages, il serait intéressant de réaliser plusieurs simulations et de confronter les résultats théoriques aux résultats pratiques en effectuant des mesures. Pour cela nous allons choisir un modèle de subwoofer, qui sera le même pour les simulations et les mesures.

Ayant effectué mon stage l'année précédente, chez le prestataire Breton **Audiolite**, j'ai pu les contacter dans le but d'utiliser leur dépôt et leur matériel pour mener à bien cette recherche. Le choix d'enceinte s'est porté sur les KS28 de chez L-Acoustics, subwoofer réputé dans le monde de la sonorisation aujourd'hui, et disponible à l'entrepôt d'Audiolite.

Ainsi, nous pourrions déterminer les limites des logiciels de simulations et définir les qualités et défauts des différentes configurations.

C.1 Les simulations

Les simulations sont effectuées sur le logiciel Soundvision, développé par L-Acoustics. Ici nous nous considérons en champ libre, tout en laissant de côté les problèmes de réflexions causés par le sol. Les points de projection sont donc au plus près du sol. Étant donné que le logiciel ne prend pas en compte les réflexions, l'audience peut être considérée comme étant à 1,6 mètre de hauteur (hauteur moyenne de l'oreille humaine par rapport au sol).

Pour chaque montage, nous prenons en compte les fréquences jouées par les subwoofers, et nous faisons le choix de définir la fréquence cardioïde de référence sur 50 Hz. Pour ce qui est du dispositif Front Back Front, seulement une configuration sera simulée.

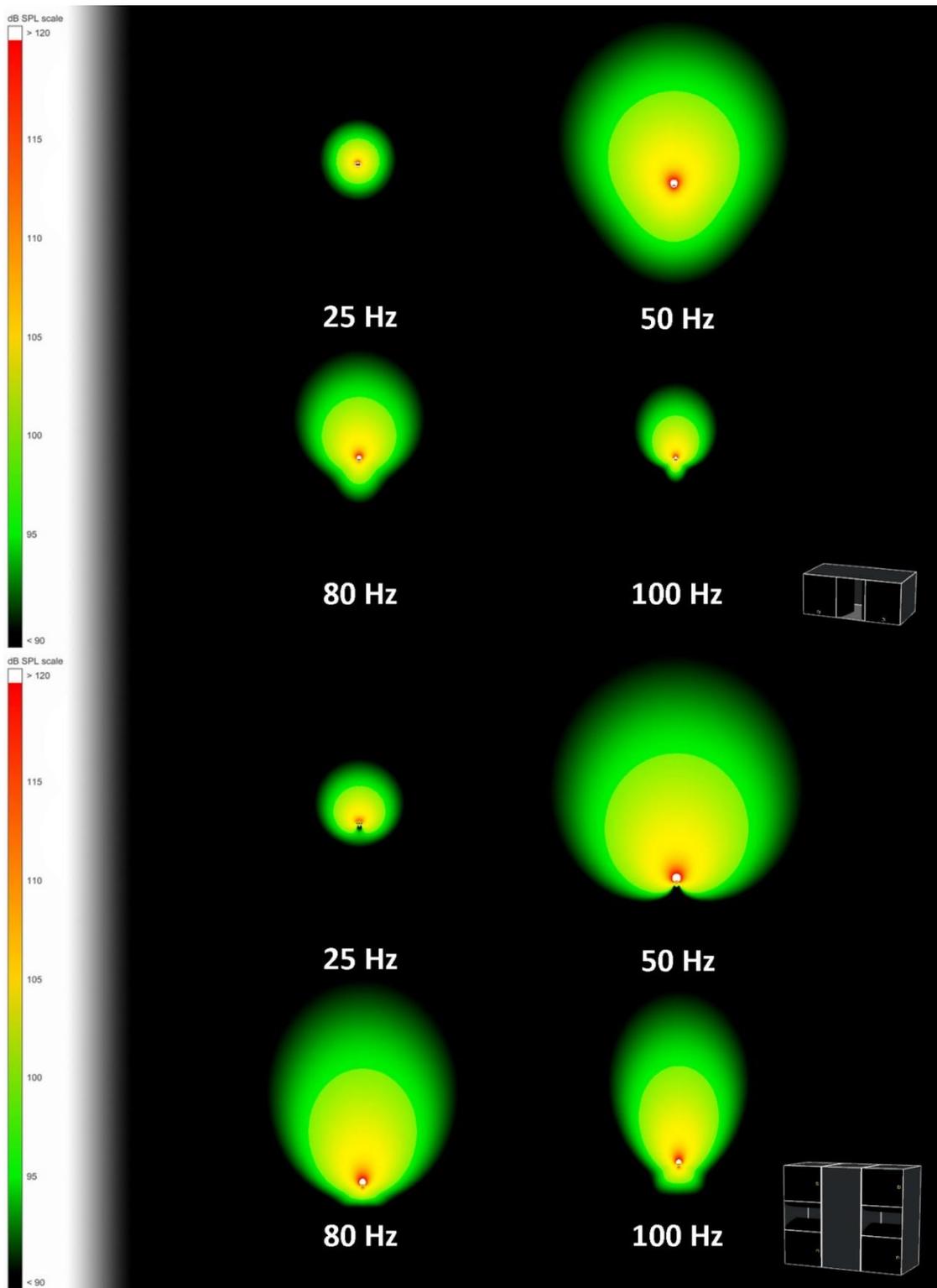


FIGURE C.1.1 – Simulation d'un subwoofer (haut) et d'un montage FBF vertical (bas) en fonction de la fréquence émise : un délai sur l'enceinte retournée permet juste d'aligner les centres acoustiques (il correspond à la profondeur du subwoofer).

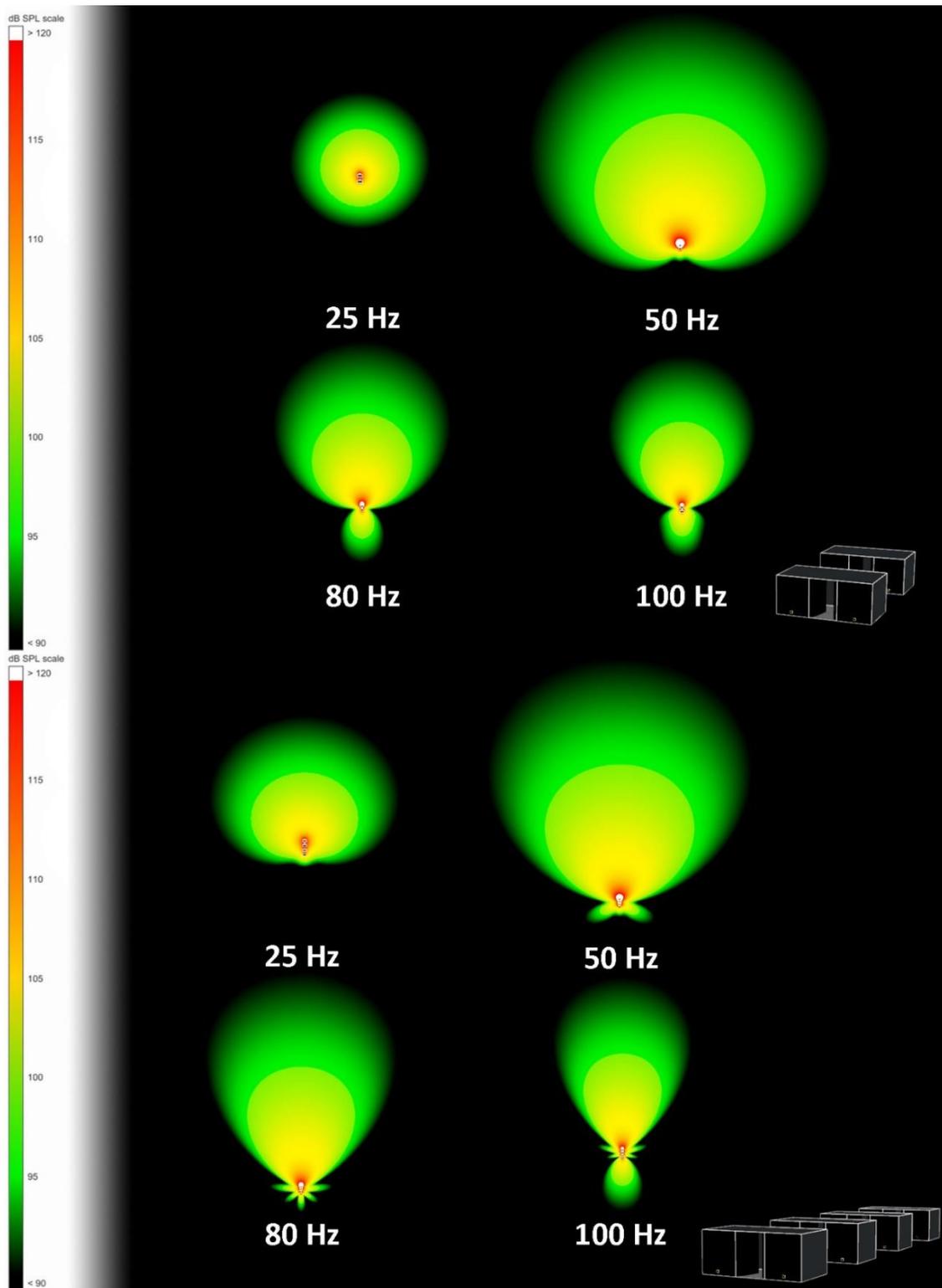


FIGURE C.1.2 - Simulation d'un montage End Fire avec deux (haut) et quatre (bas) subwoofers en fonction de la fréquence émise (fréquence cardioïde de référence égale à 50 Hz).

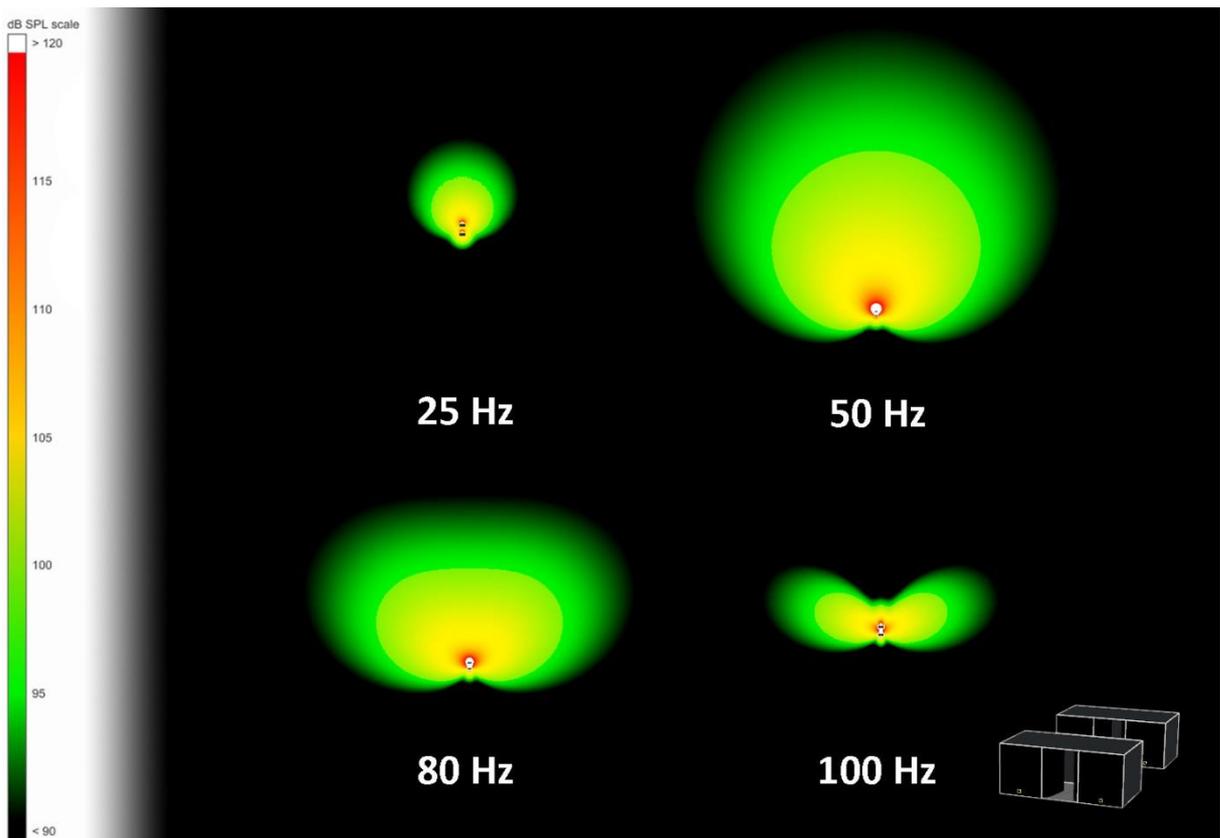


FIGURE C.1.3 – Simulation d'un montage dipôle avec délai fixe en fonction de la fréquence émise (fréquence cardioïde de référence égale à 50 Hz).

Il est important de comprendre que les configurations cardioïdes sont particulièrement pratiques dans le cas des concerts en plein air, mais leur efficacité se trouve diminuée lorsqu'elles sont utilisées dans un lieu clos non traité. Effectivement, les systèmes cardioïdes étant basés sur un principe d'inversion de phase, les interférences et ondes stationnaires causées par l'acoustique des lieux viendraient altérer cette atténuation voulue, et même dans certains cas créer des problèmes supplémentaires.

Il serait alors intéressant de comparer nos simulations avec différentes mesures, notamment dans le but d'identifier les principales distinctions entre ces genres de systèmes présents, dans des lieux clos, et en champ libre.



C.2 Les mesures

Dans cette période compliquée que nous avons rencontrée suite à l'épidémie de Covid-19, j'ai été dans l'incapacité de réaliser les nombreuses mesures prévues. L'entreprise Audiolite, par un souci de sécurité sanitaire, n'a pu m'ouvrir ses portes. Nous sommes alors réduits à nous contenter des informations apportées par le logiciel. Les résultats observés sont donc à prendre avec du recul, car ils découlent seulement de simulations purement théoriques.

Cependant nous pouvons tout de même détailler le protocole de mesure qui était initialement envisagé.

C.2.1 Protocole de mesure

Les différentes mesures devaient être réalisées avec un micro de classe 1 **NTI Audio**, transmettant les informations au logiciel Smaart Live. Chaque simulation effectuée préalablement, étant toujours mesurée avec le même protocole :

- Le système cardioïde est placé au centre d'un cercle de rayon **r**.
- Une mesure est effectuée tous les **10°**, ce qui revient à **36** mesures autour du système.
- Le signal envoyé dans le système est un **sweep** : balayage de toutes les fréquences en continu, des plus basses aux plus aiguës (20 Hz – 20 kHz).

Les résultats obtenus nous permettent de connaître les niveaux de pression sonore en plusieurs points autour des subwoofers, et pour chaque fréquence. Il est donc facile par la suite de tracer des diagrammes polaires, permettant de visualiser la directivité du système pour une fréquence donnée (nous parlons de pattern).

Les mesures nous donnent aussi des informations sur la magnitude, la phase du système, ainsi que sur la réponse impulsionnelle de celui-ci.



C.3 Les résultats des simulations

Faute de ne pas pouvoir effectuer de mesures, nous allons devoir tirer des conclusions uniquement de nos simulations. Celles-ci vont nous permettre de dresser deux tableaux répertoriant les avantages et inconvénients des diverses configurations. Ainsi nous pourrons déterminer les montages à privilégier en fonction des conditions rencontrées.

Notons que certains constructeurs proposent directement des presets cardioïdes, mais pour mener à bien cette étude, nous réaliserons ces montages manuellement afin d'avoir la main sur la totalité des paramètres.

C.3.1 Avantages

	<ul style="list-style-type: none">• Facilité de mise en place, pas besoin de faire attention aux distances entre les enceintes, il suffit simplement de retourner un subwoofer.• Gain de place : cette configuration est semblable à un stack normal.
Front Back Front	<ul style="list-style-type: none">• Une grappe de subwoofers accrochée peut être facilement rendue cardioïde avec cette technique, de même pour une configuration Line Source.• Possibilité d'utiliser un filtre passe-tout.
End Fire	<ul style="list-style-type: none">• Sommation parfaite à l'avant pour une fréquence.• Possibilité d'obtenir plusieurs fréquences de réjection en ajoutant davantage d'enceintes au système.
	<ul style="list-style-type: none">• Meilleure réjection à l'arrière indépendamment de la fréquence.
Dipôle	<ul style="list-style-type: none">• Sommation à l'avant pour une fréquence, mais avec décalage de phase correspondant à 540°.



C.3.2 Inconvénients

Front Back Front

- Nous obtenons théoriquement une inversion de phases des deux côtés, donc forcément une perte de niveau général.
- En règle générale, la directivité est moins bonne sur ce type de configuration.

End Fire

- Réjection à l'arrière moins bonne par rapport au dipôle, notamment pour les transitoires.
- Directivité vraiment intéressante pour une petite plage de fréquence.
- Présence d'un lobe arrière différent en fonction de la fréquence lorsque nous utilisons cette configuration avec plusieurs subwoofers.
- Difficulté à rendre une grappe suspendue cardioïde, car nécessité d'un point d'accroche supplémentaire.
- Dans la globalité, ce type de configuration prend beaucoup de place et demande au moins le double du nombre d'enceintes. C'est compliqué en termes de coût lorsque nous voulons rendre une disposition Line Source directive.

Dipôle

- Directivité vraiment intéressante pour une petite plage de fréquence.
 - Difficulté à rendre une grappe suspendue cardioïde, car nécessité d'un point d'accroche supplémentaire.
 - Dans la globalité, ce type de configuration prend beaucoup de place et demande au moins le double du nombre d'enceintes. C'est compliqué en termes de coût lorsque nous voulons rendre une disposition Line Source directive.
 - Soucis lors de la sommation à l'avant à cause du retard de phase, notamment pour les sons de faible durée (transitoires).
-



Dans la réalité, la configuration que nous retrouvons le plus est le **Front Back Front**. Sa facilité de mise en place et son faible coût par rapport aux autres dispositifs le rend beaucoup plus abordable, au détriment de la directivité.

Nous constatons que le End Fire et le dipôle ont beaucoup de points communs : ils sont certes plus compliqués à mettre en place et nécessitent un nombre conséquent d'enceintes, mais la directivité qui en résulte est de meilleure qualité. Les problèmes qualitatifs liés à la directivité des enceintes sont ainsi atténués. De plus, il est possible à l'aide de ces types de configuration d'atténuer les problèmes d'émergence, en positionnant la scène dos aux habitations les plus touchées (direction de la réjection).

Ces dispositifs ont la possibilité d'être couplés avec des configurations Line Source, arc-sub, ou encore Point Source en montage LR, dans le but de toujours améliorer le contrôle de la diffusion. Par exemple, en mettant en place un stack cardioïde de chaque côté d'une scène, et en pivotant les enceintes vers l'extérieur, il est possible de limiter les interférences normalement rencontrées.

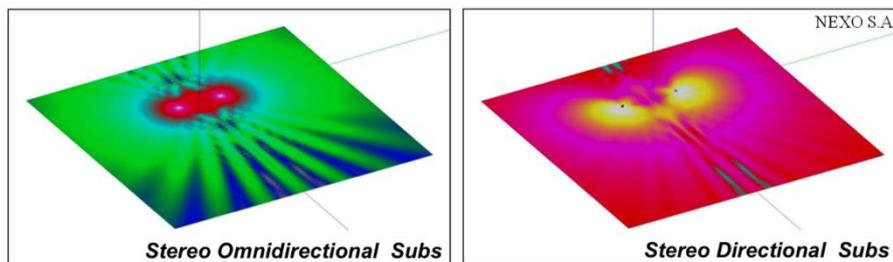


FIGURE C.3.1 – Simulation représentant les raies d'interférences entre un système de subwoofers stéréo omnidirectionnel, et un système de subwoofers stéréo cardioïdes désaxé. [37]

Néanmoins un montage cardioïde n'aura jamais la même efficacité que deux subwoofers omnidirectionnels alignés. Les décalages de phases entre les deux sources causés par les délais entraînent des variations de la sommation ou de la réjection des niveaux sonores, spécialement pour une configuration End Fire avec plusieurs enceintes.



Pour ainsi dire, dans le cas du End Fire le début de l'onde de l'enceinte arrière - que nous pouvons appeler front d'onde - sera en phase avec le front d'onde de l'enceinte avant, devant le système. Cependant derrière celui-ci, les fronts d'onde des deux enceintes seront en inversion de phase mais avec un décalage de 180° .

Dans le cas du montage dipôle, nous constatons l'inverse. Devant le système, les ondes sont en phase mais les fronts d'ondes ont un décalage de 540° , et derrière le système, les fronts d'ondes sont directement en inversion de phase.

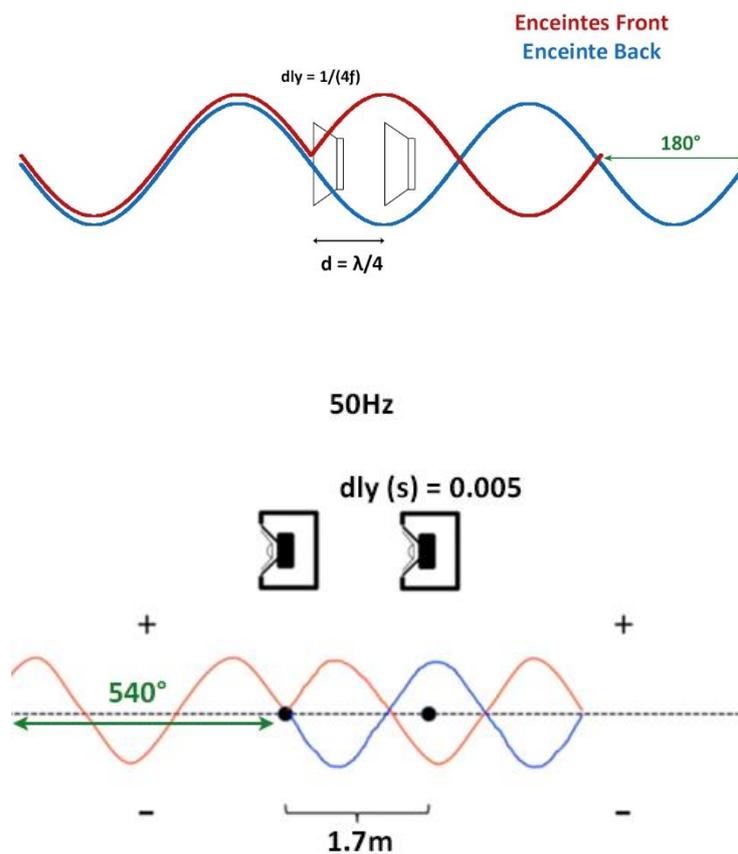


FIGURE C.3.2 – Schéma représentant les problèmes de phases lors de la sommation ou de la réjection pour un montage End Fire (haut) et un montage dipôle (bas).



Ces problèmes de sommation et de réjection sont surtout observables pour des sons de courte durée, en particulier les transitoires présentes dans un coup de grosse caisse par exemple. Imaginons qu'un signal ne dure qu'une longueur d'onde : alors une sommation sera parfaite si les fronts d'ondes sont en phase (End Fire) et une sommation déséquilibrée (gain en niveau plus faible, voire nul) si les fronts d'ondes ont un décalage de phase (dipôle). En effet, la sommation ne sera vraie que sur une partie du signal.

Pour ce qui est de la réjection, le principe est exactement le même avec les ondes en inversion de phases. Dans le cas du End Fire, la réjection à l'arrière sera déséquilibrée, donc toujours avec un niveau sonore conséquent (réjection valable seulement sur une partie du signal), alors que pour le Dipôle, la réjection sera théoriquement parfaite et donc le niveau obtenu sera nul.

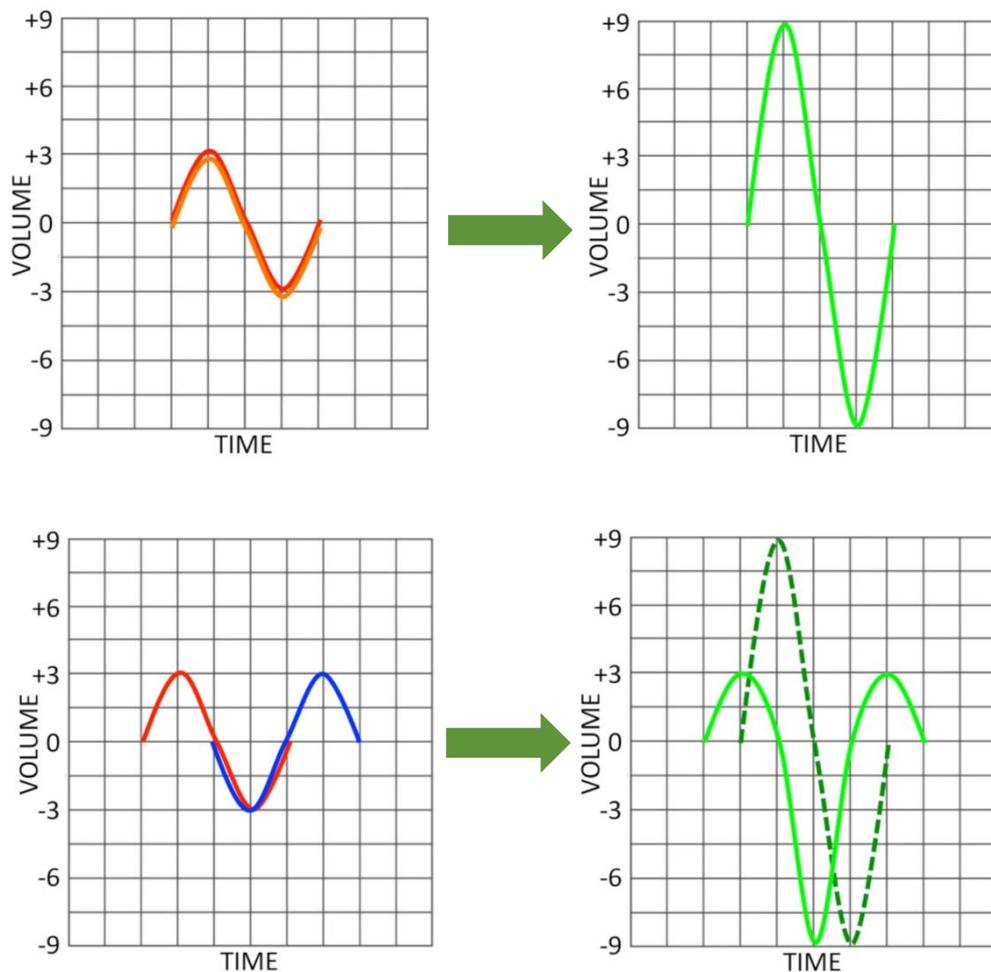


FIGURE C.3.3 – Schéma représentant la sommation complète et partiel de signaux en phase. [33]



Nous observons ici les limites des logiciels de simulation, car leurs calculs ne prennent pas en compte ce type de signaux : ils se contentent seulement d'ondes sinusoïdales créées mathématiquement, et donc ayant des durées infinies.

De plus, dans tous les cas rencontrés, la directivité se limite à une petite plage de fréquence : c'est un souci puisque la totalité des fréquences émises par les subwoofers sont gênantes.

Nous décelons alors un besoin de technologies permettant de maîtriser totalement la directivité des enceintes de grave.

Afin de compléter ces observations et ces hypothèses personnelles, nous pouvons nous pencher sur le point de vue de certains professionnels spécialisés dans ce domaine. Ainsi nous pourrions réellement déceler ces besoins d'amélioration.

C.3.3 Avis des professionnels

Dans le but d'obtenir ce point de vue qui me semble important dans l'élaboration de ce travail, nous avons pu poser quelques questions à des membres de la société **Intelligence Audio**⁷ spécialisée dans l'ingénierie et la conception technique de systèmes de sonorisation. **Sébastien Roblin, Patrick Passerel**, ainsi que **Maxime Menelec** ont accepté d'y répondre.

Aujourd'hui, selon vous, quels sont les principaux problèmes causés par les subwoofers, auxquels il n'existe pas forcément (encore) de solutions simples ?

Nous constatons aujourd'hui une décroissance à -3 dB au lieu de -6 dB comparée aux aigus pour un système line-array, se résumant en un niveau de grave souvent mal vécu pour les riverains... Mais aussi des problèmes pour contrôler la directivité en fonction de la distance, ainsi qu'une difficulté à éviter les transmissions solidiennes des fréquences infras...

7. <https://www.intelligence-audio.com/fr>



**Quels sont les inconvénients des configurations cardioïdes ? Dans quels cas les utiliser?
Quelles configurations (Front Back Front / End Fire / Dipôle) ?**

Tout dépend des contraintes de production et des demandes des artistes (est-ce qu'ils veulent du grave sur scène par ex. ?). Toutes les configurations fonctionnent, on peut avoir à peu près les mêmes résultats avec n'importe quelle configuration. On choisit la configuration en général en fonction des possibilités physiques sur site avant tout. Nous trouvons un inconvénient financier pour les productions uniquement. Il existe une petite latence due au processing nécessaire au montage cardioïde mais différents types d'optimisations sont possibles : fréquentiel, SPL...

Quelles sont les limites des simulations (inconvénients) pour les basses fréquences (logiciels tels que Soundvision) ?

Dans le logiciel EASE, rien n'existe en dessous de 100hz donc pour l'instant inexistant. Dans Soundvision nous pouvons voir toutes les fréquences ; en revanche, pas de mode interférentiel entre les enceintes Low-Mid-Hi et les enceintes de type Subs. Cependant avec le logiciel de chez Meyer Sound nous pouvons spécifier que le sol est réfléchissant et voir les problèmes générés.

Quel avenir attend les basses fréquences dans le monde de la sonorisation ?

Il y aura toujours un vrai besoin dans ces fréquences, et encore plus pour certains styles de musique. Même si les voisins se plaignent, les Subs resteront nécessaires !

Pensez-vous qu'un logiciel permettant une directivité cardioïde à toutes les fréquences serait utile aujourd'hui ?

Notre réponse est OUI, cela serait très utile. En revanche, une attention particulière doit être accordée aux lobes secondaires créés en utilisation « acoustique active » sur les autres directions que celle traitée, et pour le mode cardioïde multi-fréquentiel, bien faire attention à ce qui se passe devant...

Après confirmation de la nécessité d'un outil de la sorte, il serait intéressant de nous pencher sur la conception d'une solution dans l'éventualité de la mettre à disposition dans un futur proche.





Troisième partie

La directivité cardioïde à toutes les fréquences

A Les dispositifs existants pour obtenir une directivité cardioïde homogène à toutes les fréquences

Comme nous l'avons remarqué dans les parties précédentes, les configurations cardioïdes apportent de nombreux avantages, mais malheureusement leur efficacité se concentre sur une seule zone fréquentielle émise par le subwoofer. Leur utilisation est cependant toujours intéressante mais l'amélioration de la technologie serait appréciable.

Récemment, certains constructeurs se sont lancés sur ce marché de la directivité des basses fréquences. C'est notamment le cas de **Nexo** avec le système **RS SubBass**, ou encore **D&B** et leur système **V-Sub**. Les produits qu'ils proposent approchent un modèle de diffusion cardioïde à toutes les fréquences, mais sans que les constructeurs donnent réellement des informations précises sur leur fonctionnement. Quelques renseignements ont pu être trouvés sur ce principe : ils proviennent d'une publication de demande de brevet, donnée en **Annexe 4**.

Dans tous les cas, cette avancée n'est valable que pour les produits de la gamme de ces constructeurs et sont uniquement spécifiques à certaines références de subwoofers.

Il serait alors intéressant d'envisager un outil permettant d'offrir cette directivité à toutes les fréquences, mais de façon standalone : un accessoire supplémentaire et indépendant du système de diffusion, transformant la directivité omnidirectionnelle d'une enceinte en cardioïde, et ce pour toutes les marques et références de subwoofers, un outil interopérable.



B Préconisations

B.1 Le dipôle, meilleur compromis

Dans le but d'améliorer la directivité cardioïde de ces enceintes, sans pour autant la restreindre à une minorité, il paraît judicieux de partir d'une configuration réalisable avec n'importe quelle référence. Les possibilités s'offrant à nous sont donc les suivantes : **le Front Back Front, le End Fire, ainsi que le dipôle**. Nous savons que les deux derniers montages que nous venons de citer ont de nombreuses similitudes et offrent une meilleure directivité que le Front Back Front que nous pouvons donc écarter.

Cependant, malgré les points communs, nous avons pu constater que théoriquement le dipôle propose une bien meilleure réjection à l'arrière du système par rapport au End Fire, et ce même pour les transitoires. Comme ici, le but est de minimiser les problèmes engendrés par un subwoofer à l'arrière de celui-ci, nous pouvons prendre l'initiative d'améliorer la configuration dipôle.

B.2 Le choix du délai

Cette amélioration envisagée est directement inspirée d'un raisonnement tenu par Devin Sheets, technicien son chez Alpha Sound, société événementielle située à Salem dans l'Oregon aux États-Unis. L'idée est simple : il suffit de changer le délai appliqué au subwoofer arrière, d'opter non pas pour un délai fixe, mais plutôt pour un délai variable.

Afin de bien comprendre l'avantage de celui-ci, nous pouvons analyser et comparer les effets du délai fixe et du délai variable.



B.2.1 Le délai fixe

Comme nous pouvons le voir dans la figure ci-dessous, le délai fixe fonctionne principalement pour une seule fréquence. Si nous choisissons une fréquence cardioïde de référence égale à **50 Hz** (comme dans l'exemple), alors la distance à appliquer doit être égale à un quart de la longueur d'onde, soit **1,7m**. Le délai à appliquer est donc de **5ms**.

Une distance d'un quart de longueur d'onde revient à positionner les sources en quadrature de phases, c'est pour cette raison que la directivité cardioïde est en réalité aussi valable dans ce cas pour **150 Hz** (**1,7m** étant ici trois quarts de la longueur d'onde, soit en quadrature de phases). Mais les subwoofers ont une fréquence de coupure généralement bien en-dessous de cette fréquence.

Cependant nous remarquons ici que lorsqu'on multiplie la fréquence de référence, on déplace la relation de phase d'un quart de longueur d'onde, ce qui revient à alterner entre quadrature de phases et inversion de phases.

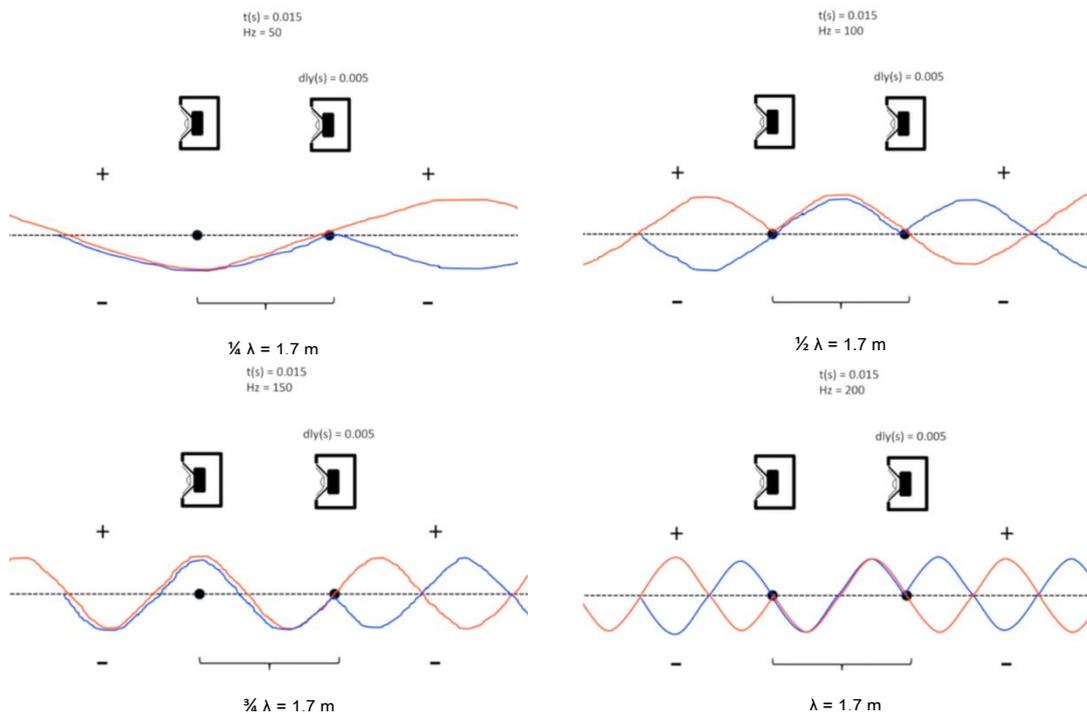


FIGURE B.2.1 – Schéma représentant le phénomène physique lors de la variation de fréquence émise (multiple) dans le cas d'un montage dipôle avec une fréquence cardioïde de référence à 50 Hz et un délai fixe correspondant. [33]



Nous remarquons que cette alternance nous apporte soit une sommation soit une inversion en face du système, mais toujours une annulation à l'arrière de celui-ci.

De plus entre 50 Hz et 100 Hz, l'ensemble des fréquences correspondent chacune à un déphasage particulier, ce qui revient à faire varier progressivement l'addition en niveau des deux sources, et donc leur sommation.

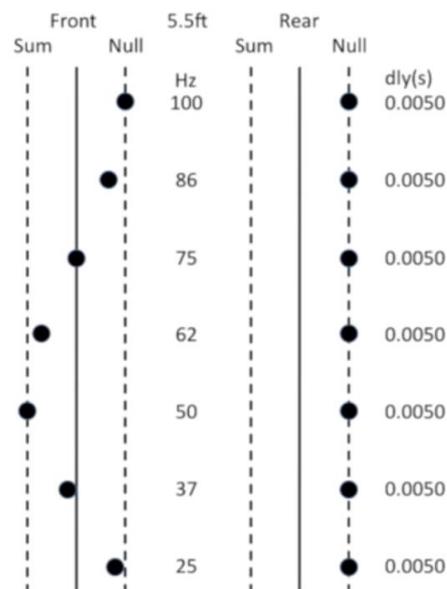


FIGURE B.2.2 – Vue d'ensemble des sommations et réjections devant et derrière un montage dipôle avec délai fixe en faisant varier la fréquence émise (fréquence cardioïde de référence à 50 Hz). [33]



B.2.2 Le délai variable

Nous remarquons que tout changement de paramètre, que ce soient le délai, la distance, ou encore particulièrement la fréquence, entraîne une modification de la directivité. Nous devons alors trouver une solution. Pour cela, partons encore du même exemple avec une fréquence de référence cardioïde à **50 Hz**, une distance de **1,7m** et un délai fixe de **5ms**.

Dans la figure suivante, nous remarquons des problèmes de phases à l'avant du système lorsque la fréquence jouée est de 75 Hz.

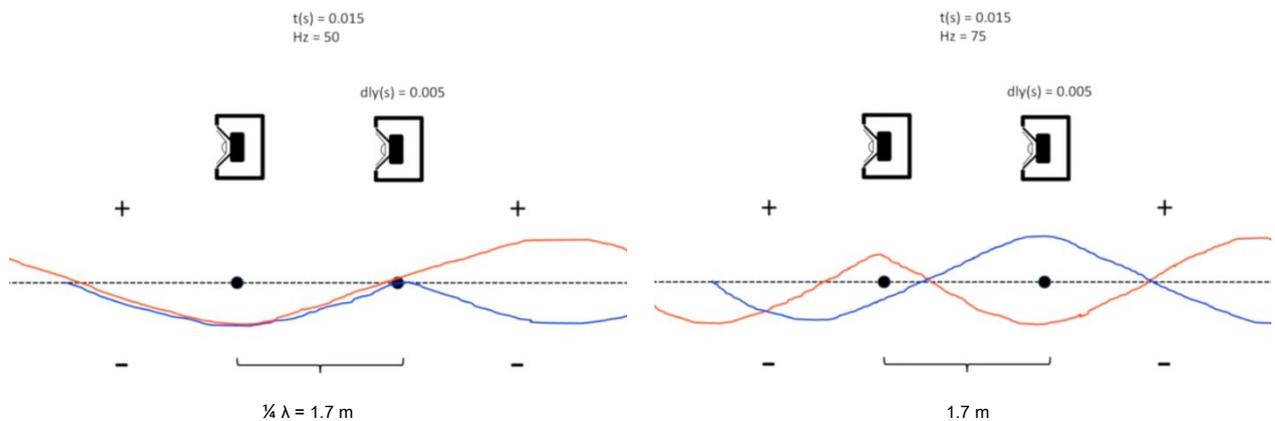


FIGURE B.2.3 – Schéma représentant le phénomène physique lors de la variation de fréquence émise dans le cas d'un montage dipôle avec une fréquence cardioïde de référence à 50 Hz et un délai fixe correspondant. [33]

Pour remédier à ce problème, il est alors possible de garder le même délai (5ms) et de changer la distance physique entre les subwoofers, ou alors espacer les enceintes d'une distance correspondant à un quart de la longueur d'onde de la fréquence jouée et appliquer le délai correspondant. Cependant, pour des fréquences basses, les distances commencent à être importantes. De plus, la fréquence variant au cours du temps, il est impossible de faire varier physiquement l'espacement entre les subwoofers, qui plus est en temps réel.

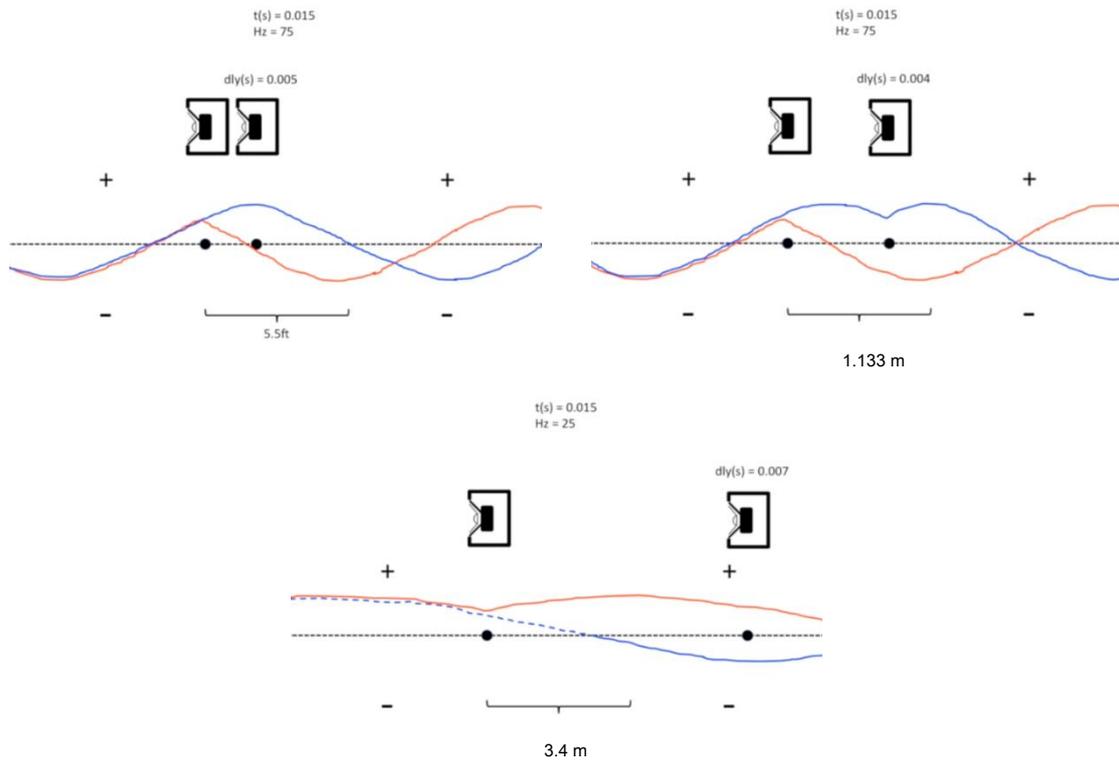


FIGURE B.2.4 - Schéma représentant le phénomène physique lors de la variation de fréquence émise dans le cas d'un montage dipôle avec une fréquence cardioïde de référence à 50 Hz et un délai fixe correspondant, en fonction de la distance entre les enceintes. [33]

La solution la plus envisageable serait de faire varier le délai en fonction de la fréquence jouée, car celui-ci permet de modifier virtuellement la distance entre les subwoofers tout en gardant un délai correspondant à la distance inter-enceintes, celui-ci correspondant au temps mis par l'onde pour parcourir un quart de la longueur d'onde de la fréquence jouée.

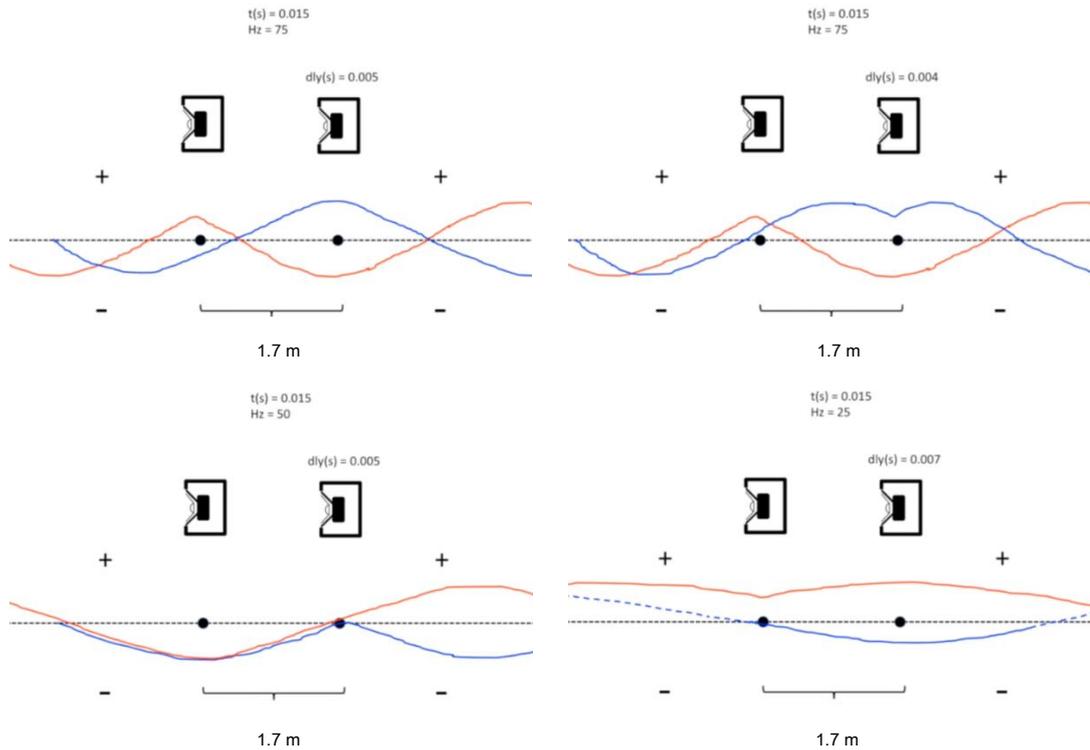


FIGURE B.2.5 – Schéma représentant le phénomène physique lors de la variation de fréquence émise dans le cas d'un montage dipôle avec une fréquence cardioïde de référence à 50 Hz et un délai variable correspondant. [33]

De cette façon nous évitons les annulations en face du système, ce qui permet d'avoir une sommation beaucoup plus cohérente par rapport au délai fixe. Cependant nous pouvons remarquer une légère perte d'efficacité au niveau de la réjection.

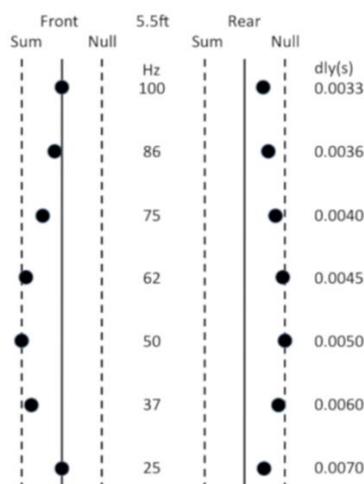


FIGURE B.2.6 - Vue d'ensemble des sommations et réjections devant et derrière un montage dipôle avec délai variable en faisant varier la fréquence émise (fréquence cardioïde de référence à 50 Hz). [33]



En comparant le délai fixe et le délai variable, nous remarquons que les deux procédés ont chacun leurs avantages et inconvénients. Le délai fixe offre une parfaite réjection à l'arrière du système indépendamment de la fréquence, mais la sommation à l'avant de celui-ci est chaotique. Le délai variable apporte, quant à lui, une sommation beaucoup plus homogène dans l'axe d'émission, mais nous remarquons l'apparition de lobes de réjection à l'arrière du montage lorsque la fréquence augmente, d'où une perte d'efficacité dans la baisse de niveau souhaité.

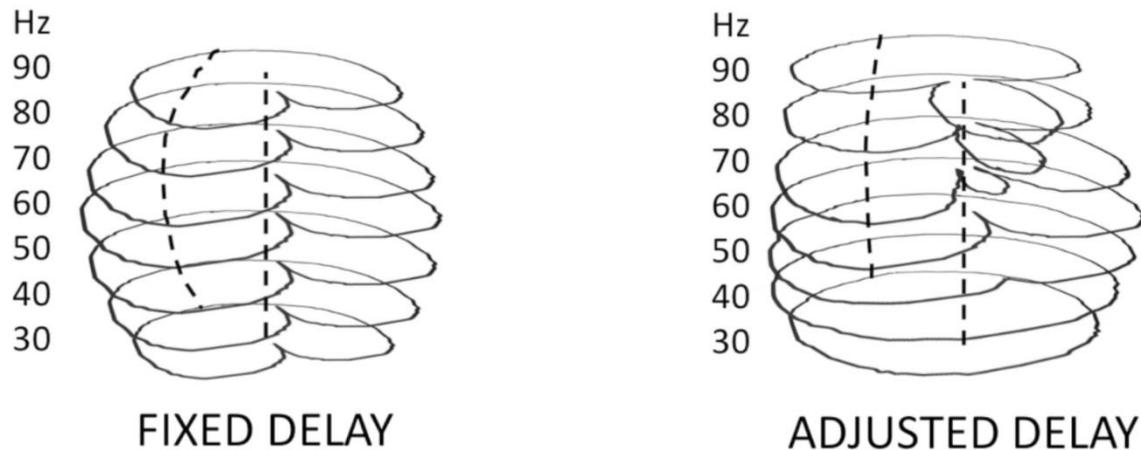


FIGURE B.2.7 – Directivité des montages dipôles selon la fréquence jouée dans le cas d'un délai fixe et d'un délai variable. [33]

Dans les deux cas, nous remarquons que le gain en niveau dû à la sommation sera maximal pour la fréquence cardioïde de référence : celle-ci sera donc déterminée en fonction du résultat voulu. Au contraire, si nous souhaitons obtenir le même niveau de pression sonore pour chaque fréquence, il est possible d'utiliser des filtres à phase linéaire, en cloche, sur les deux enceintes pour obtenir une réponse en fréquence plate, et ainsi contrer les effets de la sommation.

Afin d'obtenir une sommation et une réjection parfaites à toutes les fréquences, Devin Sheets propose un idéal en imaginant une enceinte contenant plusieurs haut-parleurs traitant chacun des petites bandes de fréquences, plusieurs systèmes dipôles ayant une distance inter haut-parleurs dépendante de la bande de fréquence concernée, et donc un délai variable par dipôle, soit différentes fréquences cardioïdes de références.

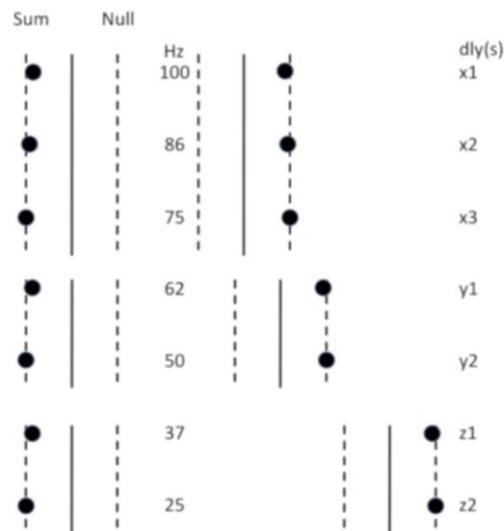


FIGURE B.2.8 - Vue d'ensemble des sommations et réjections devant et derrière plusieurs montages dipôles avec délai variable en faisant varier la fréquence émise (plusieurs fréquences cardioïdes de référence). [33]

Pour toujours éviter de se réduire à un type d'enceinte, il serait possible d'appliquer ce principe sur plusieurs montages dipôles avec plusieurs enceintes, en filtrant les subwoofers. Le problème est que cette technique serait très compliquée à mettre en place et demanderait beaucoup trop de matériel, ce qui reviendrait à un coût énorme.

Maintenant que nous avons pu identifier les différences entre les deux façons d'utiliser les délais, nous pouvons nous intéresser à leurs différentes utilisations en fonction des cas rencontrés.



B.3 Son utilisation

B.3.1 Le principe

Voilà quelques années, le délai variable n'aurait pas pu être envisagé, car le principe de changer un délai en temps réel selon une fréquence jouée aurait demandé beaucoup de ressources et donc beaucoup de temps de calcul. Cependant, les ordinateurs qui existent à présent sont de plus en plus puissants et ont la capacité de réaliser des traitements de signaux très rapidement. Dans tous les cas, même des latences de quelques millisecondes sont acceptables.

L'idée ici du délai variable est de pouvoir analyser le signal envoyé dans les subwoofers en temps réel, et de déterminer la fréquence fondamentale de ce signal, car c'est celle-ci qui possède le plus d'énergie. Une fois cette fréquence trouvée, nous pouvons facilement déterminer sa longueur d'onde, et donc le délai correspondant à un quart de celle-ci :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{donc} \quad \frac{1}{4} \lambda = \frac{c}{f} \cdot \frac{1}{4} = \frac{c}{4.f}$$

Nous savons qu'une vitesse est égale à une distance sur un temps, ainsi nous pouvons déterminer le délai correspondant à la longueur obtenue précédemment et simplifier cette formule :

$$c = \frac{d}{t} \leftrightarrow t = \frac{d}{c} \leftrightarrow t = \frac{\frac{c}{4.f}}{c} \leftrightarrow t = \frac{c}{4.f} \cdot \frac{1}{c} = \frac{1}{4.f}$$

$$\text{Donc} \quad t = \frac{1}{4.f}$$

Rappelons que l'objectif est d'analyser le signal envoyé dans les subwoofers, de déterminer la fréquence fondamentale et d'appliquer le délai trouvé avec la formule au subwoofer arrière, tout cela continuellement et en temps réel.



Nous pouvons effectuer une simulation d'un montage dipôle, en faisant varier la fréquence, tout en modifiant le délai trouvé avec la formule, afin de simuler le délai variable. Ainsi nous pourrions vérifier notre approche théorique.

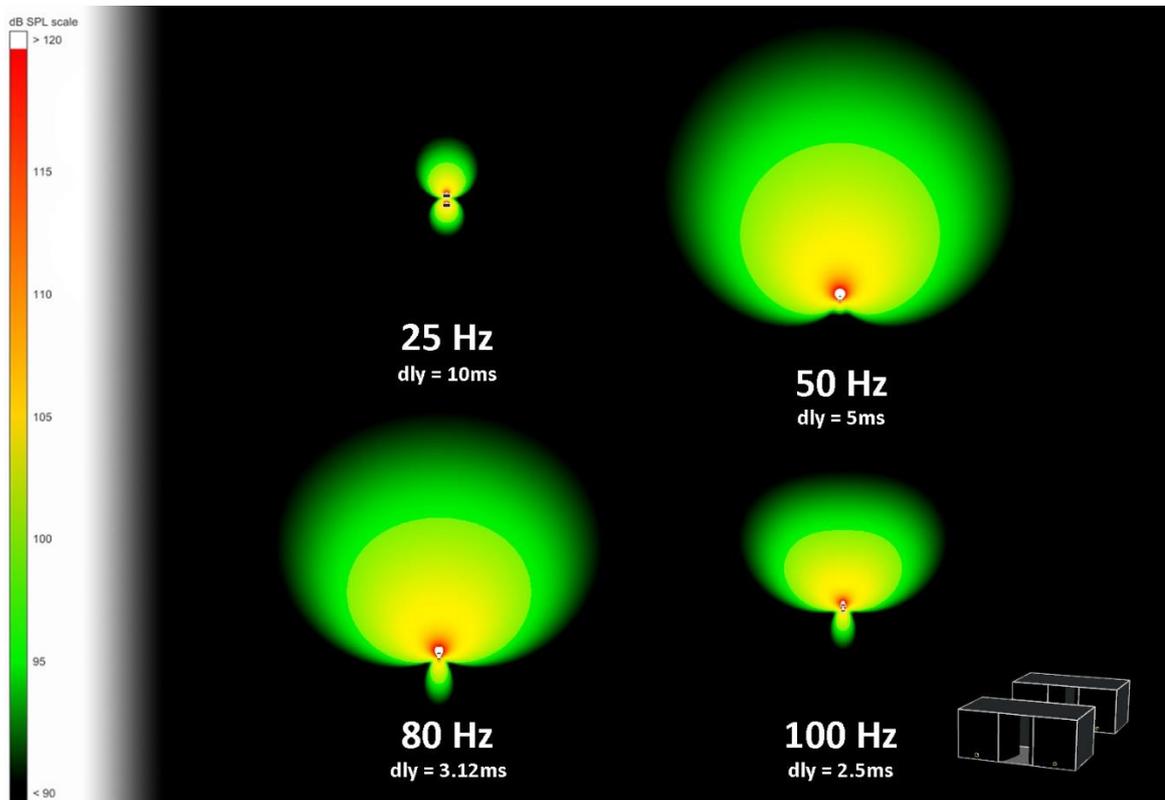


FIGURE B.3.1 - Simulation d'un montage dipôle avec délai variable en fonction de la fréquence émise (fréquence cardioïde de référence égale à 50 Hz).

En effet, suite à cette simulation, nous constatons un gain en pression devant le système, mais l'apparition d'un lobe à l'arrière de celui-ci. Nous pouvons donc en déduire que la configuration à utiliser (délai fixe ou délai variable) dépendra de son application en fonction des cas.



B.3.2 Les applications en fonction des cas

Même si le délai variable apporte des avantages, il présente aussi des défauts que nous ne retrouvons pas avec le délai fixe. Nous devons garder à l'esprit que l'un n'est pas meilleur que l'autre. C'est pour cette raison qu'il serait judicieux d'analyser les cas rencontrés pour employer la configuration la plus adaptée.

Par exemple, dans le cas où un micro très sensible, avec beaucoup de gain, est placé sur scène, il sera facilement source de larsen. Ici, il est conseillé d'utiliser un délai fixe pour avoir le maximum de réjection à l'arrière et ainsi éviter un départ de larsen dans les fréquences basses. Les lobes de réjection présents avec le délai variable poseraient problème.

Cependant, dans le cas d'un concert de rap où les basses fréquences sont très importantes pour le public, il serait plus judicieux d'utiliser un délai variable afin d'obtenir la meilleure sommation possible. Le niveau de pression sonore à l'arrière du système serait plus important qu'avec un délai fixe, mais il sera tout de même atténué.

Le choix est à effectuer en fonction du paramètre le plus important selon les cas rencontrés. De plus ce choix de délai peut venir compléter une configuration utilisée dans le but de l'améliorer.

B.3.3 Les configurations compatibles

Les montages dipôles, que ce soit avec délai fixe ou délai variable, peuvent être couplés avec d'autres configurations, notamment le Line Source et l'arc-sub, dans le but d'obtenir un système homogène et directif. Mais nous pouvons remarquer que lorsqu'on décale les subwoofers arrière vers la droite ou vers la gauche, tout en gardant le même écart inter-enceintes, alors nous pouvons modifier la direction de notre diffusion cardioïde. Ainsi, si nous reprenons l'exemple du micro sur scène, nous pouvons positionner les subwoofers de manière à avoir la réjection dans la direction du microphone, pour minimiser encore plus les risques de larsen.

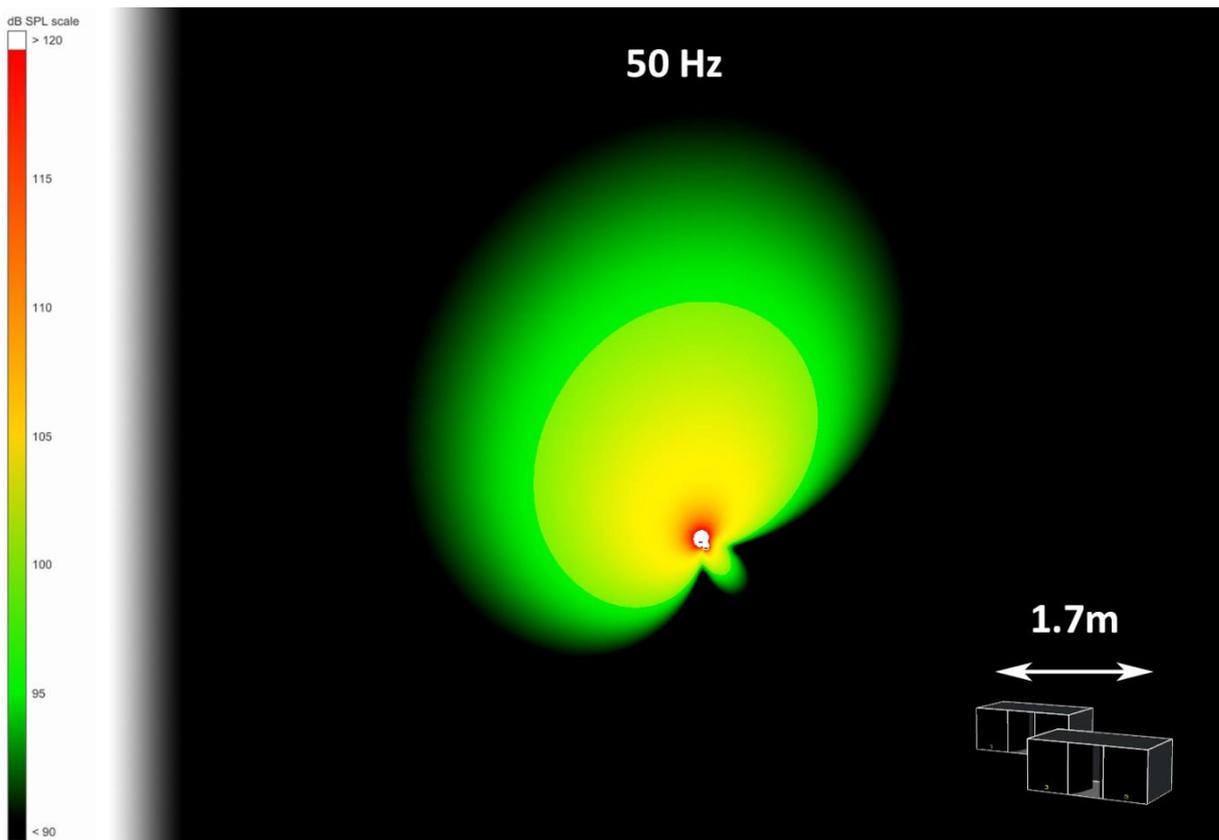


FIGURE B.3.2 - Simulation d'un montage dipôle « orienté » en décalant les enceintes de 1.7m sur la largeur (fréquence cardioïde de référence égale à 50 Hz).

Afin d'avoir le contrôle sur ces différents choix dans le cadre d'une configuration fixe et de pouvoir mettre en place un délai variable, nous devons mettre au point une application. Celle-ci sera définie dans la partie suivante.



C Mon application

Le réel but dans ce mémoire est de vous présenter une idée, une application permettant de mettre en place ce principe de délai variable en temps réel. Nous parlons ici d'une idée car la réalisation d'un tel outil, poussé à son terme, n'aurait pas été envisageable dans le cadre d'un mémoire comme celui-ci. Le travail demandé aurait été considérable et aurait nécessité une équipe où chaque personne aurait eu des compétences particulières, en programmation ou encore en design de logiciel. Cependant, ce projet me tient à cœur, et je compte bien le poursuivre dans le futur.

L'application imaginée est purement théorique et a obligatoirement dans la pratique des défauts qui ne pourront être détectés et corrigés qu'à partir du moment où un prototype sera testé.

Ici, nous pouvons considérer que celle-ci est terminée, fonctionnelle et sur le marché : ainsi nous pourrions nous projeter dans le futur et décrire cette application idéalisée.

C.1 L'amélioration proposée

Comme nous avons pu le voir, les subwoofers engendrent de nombreux problèmes qui sont corrigés aujourd'hui à l'aide de diverses techniques, notamment les configurations cardioïdes, tout en ayant des limites. Des améliorations ont été proposées par certains constructeurs mais toujours en gardant l'exclusivité et en appliquant leurs avancées à leurs produits. C'est donc un marché à prendre, une place pour un outil permettant de proposer une amélioration dédiée à n'importe quel type de subwoofers, sans déboursier des sommes considérables dans du matériel supplémentaire, à part dans un simple logiciel.



Un logiciel souhaité présent sur ordinateur et Mac pour plusieurs raisons :

- Tout d'abord les ordinateurs d'aujourd'hui sont assez puissants pour effectuer des tâches compliquées en un court laps de temps, ce qui évite des coûts supplémentaires dans des appareils hardware dédiés à ces tâches.
- Deuxièmement cette manière de procéder permet de faciliter l'utilisation, car l'application peut être téléchargée sur n'importe quel ordinateur sans nécessité de matériel supplémentaire, dans l'optique de favoriser le principe de plug and play.
- De plus, le fait d'avoir cet outil sur ordinateur permet de centraliser le contrôle du système de diffusion sur une même interface, car aujourd'hui les amplificateurs sont contrôlés via des applications dédiées.

Le but ici est de rendre l'outil interopérable, facile et fonctionnel.

Aujourd'hui en sonorisation, nous nous dirigeons vers une transmission du signal que ce soit audio ou autre, de plus en plus numérique, notamment avec le protocole Dante passant dans des câbles de type RJ45. C'est pour cette raison que nous faisons le choix de faire travailler notre application avec ce protocole. Ainsi l'ordinateur n'aura qu'à être connecté au switch de la régie FOH pour pouvoir recevoir le signal à traiter et le renvoyer vers les amplificateurs. Nous reviendrons par la suite sur l'explication de la mise en place de l'application, à l'aide d'un synoptique représentant le câblage type d'une régie en sonorisation que nous pouvons trouver de nos jours.

Au préalable, pour que l'ordinateur soit capable de comprendre le flux Dante arrivant via le câble RJ45, nous devons installer le driver Dante Virtual Soundcard proposé par Audinate. Celui-ci permet de transformer le signal reçu en signal lisible par l'ordinateur : ainsi nous pouvons le traiter et le renvoyer sous forme de flux Dante.



C.1 Le fonctionnement du programme

Le programme fonctionnera de la manière suivante :

- Nous sélectionnons en entrée les deux canaux Dante correspondant à la sortie master LR de la console (stéréo), et nous précisons de même en sortie les canaux Dante souhaités.
- Nous dupliquons ce signal stéréo, afin d'obtenir un signal décalé pour les subwoofers arrière, et un signal THRU (identique à l'entrée) qui sera destiné pour les subwoofers avant et le système large bande.
- Le programme nous demande la fréquence de référence à laquelle nous voulons être cardioïde, ainsi que la fréquence de coupure des subwoofers.
- Ensuite nous appliquons un filtre passe-bas au signal traité, correspondant à la fréquence de coupure, afin de réduire la bande de fréquence à analyser et ainsi soulager les calculs.
- Suite à cela, la boucle peut commencer : le logiciel applique une transformée de Fourier et nous donne la fréquence ayant le plus d'amplitude, pour ainsi dire la note fondamentale. Nous pouvons alors déduire le délai avec la formule suivante, et donc l'appliquer :

$$\text{Délai en secondes} = \frac{1}{4 \cdot \text{fréquence fondamentale}}$$

- Cette boucle est rafraîchie en fonction du tempo du morceau qui est analysé lui aussi en temps réel. De cette façon le délai ne varie pas constamment, car cela s'entendrait, mais change sur les temps du morceau afin de masquer au mieux ce changement. Nous pouvons décider de la division de ce tempo (blanche/noir/croche...etc.), dans le but de rendre plus ou moins précis le délai variable.



Le tempo doit être stable pour pouvoir définir un intervalle de changement, donc la précision de sa détection doit être réglée correctement. Ce paramètre peut être modifiable dans les réglages mais une base de référence sera donnée.

Le tempo est obligatoirement analysé sur une durée du signal et son analyse évolue dans le temps : donc nous devons comprendre que le changement de délai ne prendra effet que lorsque le tempo sera défini. Ainsi il existe un temps avant que le délai variable prenne effet, donc un temps entre la variation de tempo et sa nouvelle détection (donc la nouvelle fréquence de rafraîchissement de la boucle).

Dans le cas où le tempo n'est pas encore trouvé ou n'est pas discernable, nous pouvons définir un délai fixe à appliquer afin de garder une directivité cardioïde pour le système.

Ce délai fixe est donné avec la formule suivante :

$$\text{Délai en secondes} = \frac{1}{4 \cdot \text{fréquence de référence cardioïde}}$$

La fréquence de référence cardioïde est celle demandée au lancement du logiciel.

- De cette façon, cette boucle nous permet d'appliquer un délai variable sur le signal traité. Ce signal stéréo se trouve envoyé dans deux canaux Dante afin d'alimenter l'entrée des amplificateurs. Le signal stéréo non traité est quant à lui envoyé dans deux autres canaux alimentant là aussi d'autres amplificateurs.
- Néanmoins, nous devons prendre en compte le temps de traitement de la boucle, pour que les deux signaux stéréo soient en phase en sortie de programme. Nous pouvons alors définir un buffer pour le traitement du signal délayé, ce qui nous permettra d'obtenir un temps fixe pour le traitement. Ce temps sera appliqué sous forme de délai fixe au signal non traité, une sorte de compensation de latence. Ainsi le logiciel pourra envoyer sous forme de flux Dante les deux signaux stéréo au même moment.



Dans tous les cas, un léger retard sera induit par le traitement. Nous devons prendre garde à ce que cette latence ne soit pas trop importante, car elle viendrait casser le synchronisme image/son pour le public, et viendrait gêner le technicien son dans ses modifications en temps réel sur le mixage. De plus, il est important que les systèmes de retour sur scène ne viennent pas trop polluer le système principal, car la latence viendrait créer un filtrage en peigne. Inversement, si nous retardons les retours pour les mettre en phase avec le système de face, alors la latence trop importante occasionnée par le traitement viendrait perturber les musiciens dans leur jeu.

Un synoptique du programme et un schéma de son utilisation dans le cadre d'un câblage de régie numérique « standard », sont donnés en [Annexe 5](#).

Dans l'optique d'améliorer l'utilisation de notre application nous pouvons imaginer et décrire quelques outils supplémentaires proposés par le programme :

Mode jour/nuit :

Cette fonctionnalité permet de changer la couleur de l'interface afin de l'adapter à l'environnement. Le mode jour permettra d'utiliser un fond blanc avec une couleur de police noir pour rendre l'écran visible en cas de fort soleil (lors de festivals par exemple). Le mode nuit permettra d'inverser les couleurs, d'utiliser un fond noir avec une couleur de police blanche afin de ne pas éblouir le technicien et de rester discret dans le cadre d'un concert en intérieur (dans une salle de spectacle plongée dans le noir par exemple).

Mode Dipôle ou End Fire :

Dans l'objectif d'être toujours plus polyvalents, nous pouvons imaginer utiliser cette application avec un montage End Fire en faisant varier le délai sur le même principe. Ainsi nous aurons le choix entre une utilisation Dipôle ou End Fire.



Le ON/OFF :

La fonction ON/OFF permettra d'activer ou de désactiver le délai variable. Lorsque celui-ci sera désactivé, un délai fixe sera appliqué en fonction de la fréquence de référence choisie.

La directivité représentée :

Dans l'idéal, il serait intéressant de pouvoir représenter la directivité du système en temps réel. C'est pour cette raison que nous pouvons imaginer un diagramme polaire affichant des simulations déjà réalisées à l'avance et présentes dans le logiciel, en fonction de la fréquence de référence cardioïde entrée et la fréquence jouée. Ainsi le logiciel affichera les images des simulations en fonction des paramètres cités et nous donnera la directivité théorique du système en temps réel.

Une représentation spectrale pourra être donnée afin de visualiser la fréquence fondamentale jouée.

Les références de subwoofers :

Lorsque nous précisons la fréquence de référence cardioïde, le logiciel nous donnera le quart de la longueur d'onde de cette fréquence, pour nous indiquer la distance à instaurer entre les centres acoustiques des enceintes. Cependant, si nous incorporons une base de données contenant les dimensions d'un grand nombre de références de subwoofers, en sélectionnant selon les cas la référence concernée, le logiciel pourra nous donner précisément la distance inter-enceintes.

Une idée du visuel de l'application est donnée en [Annexe 6](#).



C.1 Le futur de l'application

Pour l'instant, cette application n'est que pure théorie et n'existe seulement que sur papier. Cependant, même s'il n'a pas été possible de réaliser ce programme dans le cadre de ce mémoire, celui-ci se verra dans le futur, développé. Ainsi nous pourrons effectuer plusieurs mesures cherchant à déterminer son efficacité et les différents problèmes rencontrés lors des mises en application, dans l'optique de les résoudre.

Le but ici est de rendre ce logiciel le plus interopérable possible afin de répondre à la demande des techniciens, dans la plupart des cas rencontrés. Pour ce faire, nous pourrons compléter la liste des protocoles de réseaux numériques compatibles afin d'élargir le champ d'application (AVB, MADI, Ravenna,...etc.).

Si ce dernier se trouve être efficace et considéré comme une solution fiable aux divers problèmes rencontrés lors de l'utilisation des configurations cardioïdes dipôles, nous pourrons alors imaginer une distribution à dimension commerciale destinée au monde professionnel.

En cherchant à résoudre les problèmes rencontrés, et particulièrement ceux qui gênent le voisinage, nous pouvons imaginer donner une deuxième facette à notre application. Effectivement, en utilisant les défauts des montages dipôles mal configurés, il serait possible de transformer un système de diffusion supplémentaire en une « barrière » sonore venant atténuer les niveaux dans la direction d'une zone sensible (immeubles ou lotissements par exemple).

Ainsi nous pourrons faire travailler ce logiciel dans le domaine de l'acoustique active, une option supplémentaire qui permettrait une avancée importante dans le contrôle de la diffusion sonore, alliant qualité pour les personnes assistant aux concerts, et respect pour le voisinage.

Un sujet à approfondir !



CONCLUSION

Ce travail de recherche, de réflexion et d'échanges a permis d'identifier diverses solutions permettant de maîtriser la diffusion des basses fréquences dans le cadre de la sonorisation de concerts. Des solutions efficaces proposant une manière différente de procéder. Néanmoins nous n'avons pas abordé en détails les soucis liés à l'acoustique des lieux, même si ces derniers restent d'une importance capitale.

Le principal problème vient du fait que l'importance des basses fréquences ne décroîtra jamais, même si la gêne occasionnée se voit accentuée. Encore une fois un équilibre à trouver entre la qualité du concert et le respect du voisinage.

Dans le but de proposer une expérience optimale pour l'ensemble du public, la nécessité de diminuer les problèmes d'interférences dans les basses fréquences s'est fait ressentir. Les configurations Line Source et arc-sub permettent de répondre à cette demande, tout en proposant un contrôle sur l'ouverture du système de diffusion. Un problème d'homogénéité des niveaux sonores, aussi présent et venant impacter la réponse en fréquence du système, a pu se voir diminué en employant la configuration des subwoofers accrochés. Cependant cette solution cause des problèmes d'interférences supplémentaires.

Effectivement, le désir du technicien est d'avoir une zone de couverture optimale avec la même réponse en fréquence en tout point, ce qui n'est pas possible, même si les technologies actuelles permettent de s'en rapprocher.

Les configurations cardioïdes ont quant à elles permis de maîtriser et de diminuer les niveaux sonores à l'arrière des systèmes, lors de la diffusion des basses fréquences. Mais comme pour tout montage permettant cet effet, nous constatons des faiblesses et des limites.

Il est possible de lier et mixer diverses configurations dans le but d'optimiser la diffusion sonore ; mais nous remarquons dans ce cas que les paramètres respectifs des divers montages sont souvent incompatibles et agissent négativement entre eux. Plus le nombre de sources est important, plus nous constatons l'apparition d'interférences selon leurs positions, et une complexité à maîtriser la cohérence de phase générale, ce d'autant plus que les nombreux délais sont souvent difficiles à gérer et deviennent gênants.



Ainsi le mot d'ordre ici est compromis. Il est en notre devoir de faire des choix en fonction des priorités liées au contexte de l'exploitation, selon les réglementations, mais aussi par rapport aux demandes des productions et des artistes (notamment les restrictions de budget).

De nombreuses solutions existent et sont à la portée des techniciens, mais nous devons garder à l'esprit qu'il n'existe pas de configuration parfaite applicable à l'ensemble des cas rencontrés. Effectivement certaines règles sont à respecter, mais chaque concert est différent, selon le style de musique et selon le lieu. Nous devons nous adapter.

Dans un futur proche, nous pouvons faire l'hypothèse que d'autres solutions seront amenées à apparaître, toujours plus performantes les unes que les autres. Cependant nous constatons aujourd'hui une valorisation de la qualité des concerts, comme en témoigne l'arrivée des systèmes WFS. Des progrès sont alors à effectuer au niveau des soucis d'émergences, notamment lors des concerts en extérieur. C'est pour cette raison que l'application présentée dans ce mémoire pourrait apporter un réel avantage et une avancée dans le monde de la sonorisation.

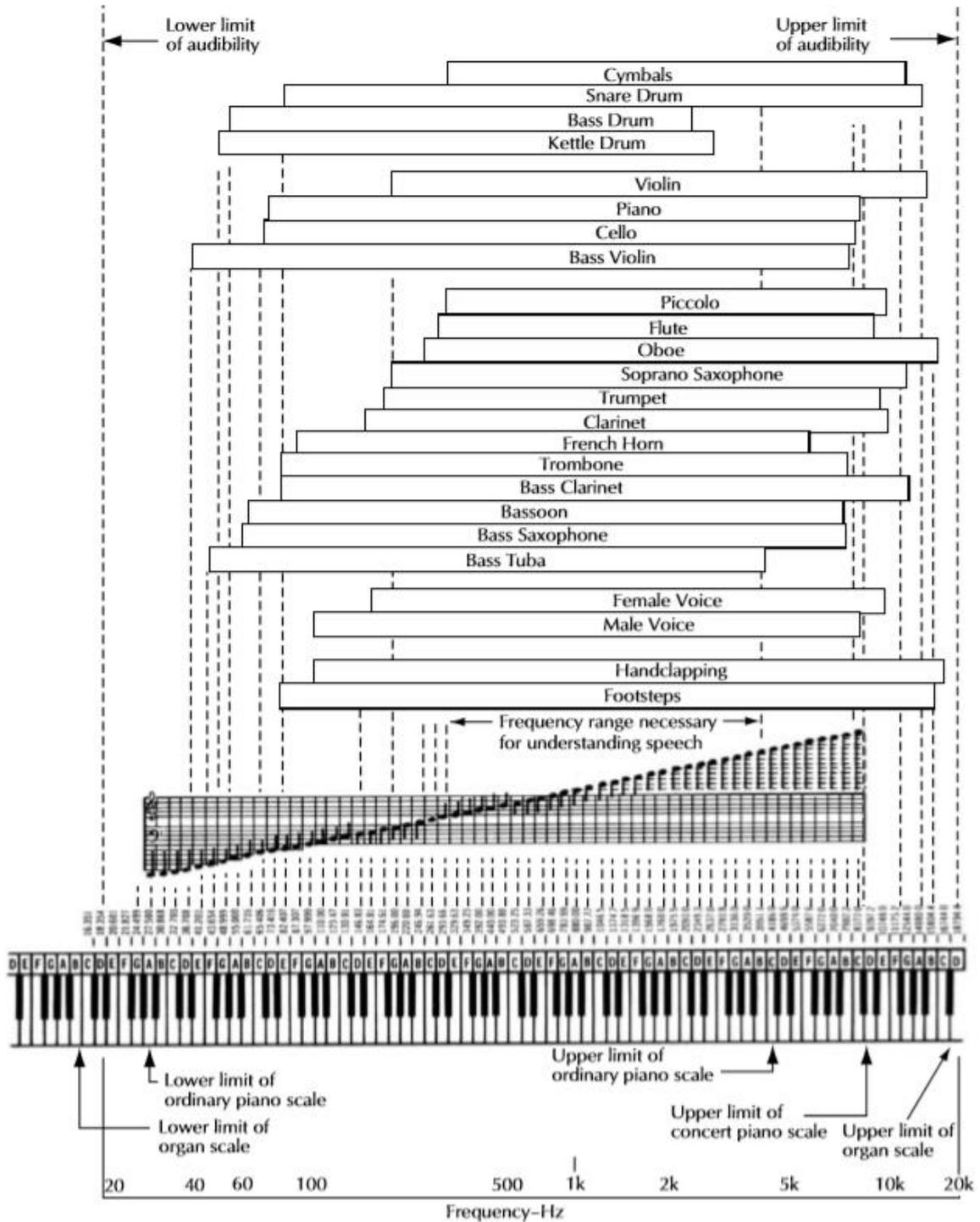
Actuellement, il existe des solutions assez récentes proposant aux spectateurs d'assister aux concerts avec un casque audio individuel diffusant le mixage effectué par le technicien FOH. Ainsi nous obtenons une qualité optimale pour tout le monde en tout point, tout en contournant les problèmes acoustiques de la salle, entraînant de plus une émergence nulle pour le voisinage, à part les cris du public.

Malheureusement, cette technologie crée une sorte d'individualisation de l'expérience, une gêne pour la tête et une perte des effets physiques que le son peut avoir sur notre corps, une expérience qui se trouve donc moins sensitive. Cependant cette solution est à explorer, elle propose de nombreux avantages et se trouve être déjà utilisée dans certaines boîtes de nuit. Peut-être la solution de demain destinée à certains cas extrêmes ?



ANNEXE

Annexe 1 [1]







Annexe 2 [39]

Bois de Vincennes : les riverains exaspérés par le bruit du festival We Love Green

Comme lors des années précédentes, de nombreux riverains du Bois de Vincennes pestent contre les nuisances subies ce week-end.

Ils étaient plus de 70 000 à assister au festival de musiques actuelles « We love green » ce week-end. Mais, à leur grand dam, ils étaient beaucoup plus nombreux à profiter des basses, qui se propageaient bien au-delà des barrières dressées dans le Bois de Vincennes. Et, une fois de plus, les riverains et voisins s'en sont largement plaints sur les réseaux sociaux ou auprès de leurs élus.

Le festival des plaintes allait bon train dès samedi après-midi. « Le boum boum était continu, affirme un Saint-Mandéen. Un bruit de fond très pénible jusqu'à plus de minuit. ». À Champigny, Flo s'exaspère : « On est dimanche, il est près de minuit, pas possible d'ouvrir la fenêtre sous peine de se retrouver en plein concert ».

A Joinville, on s'énerve aussi, même si la mairie a fait passer l'information en amont à travers ses propres réseaux. Sylvain Berrios, maire LR de Saint-Maur fulmine : « Paris s'essuie les pieds sur les villes riveraines. Nous avons déjà écrit mais rien n'a été fait. Il va falloir réfléchir à d'autres modes d'action ».

La mairie de Paris « à disposition des riverains »

D'autres riverains, à Vincennes et Saint-Mandé, notamment ont aussi dû subir le bruit des festivaliers perdus, et souvent éméchés, bien après la fin des concerts et la fermeture du métro. « Ça a duré jusqu'à 3 heures du matin », peste un habitant de Saint-Mandé.

Du côté du festival, on est pourtant en règle : contrat précis avec la mairie de Paris, conformité avec les prescriptions de la Préfecture de police pour le respect des décibels, étude, inspections, mesures et tests de son réalisés avant le festival... « Nous ne sommes pas négligents sur la maîtrise d'un festival de cette ampleur », assure Marie Sabot, la directrice du festival.

Elle assure que « les festivaliers qui le souhaitent ont pu prendre les transports en commun à l'issue des concerts » et dit regretter que « certains aient décidé de rester dans le quartier et ont perturbé la tranquillité publique ». Par ailleurs, Paris affirme réclamer depuis plusieurs années auprès de la région IDF la proposition d'une prolongation des horaires d'ouverture des métros, en particulier en marge de ces événements que sont les festivals d'été.

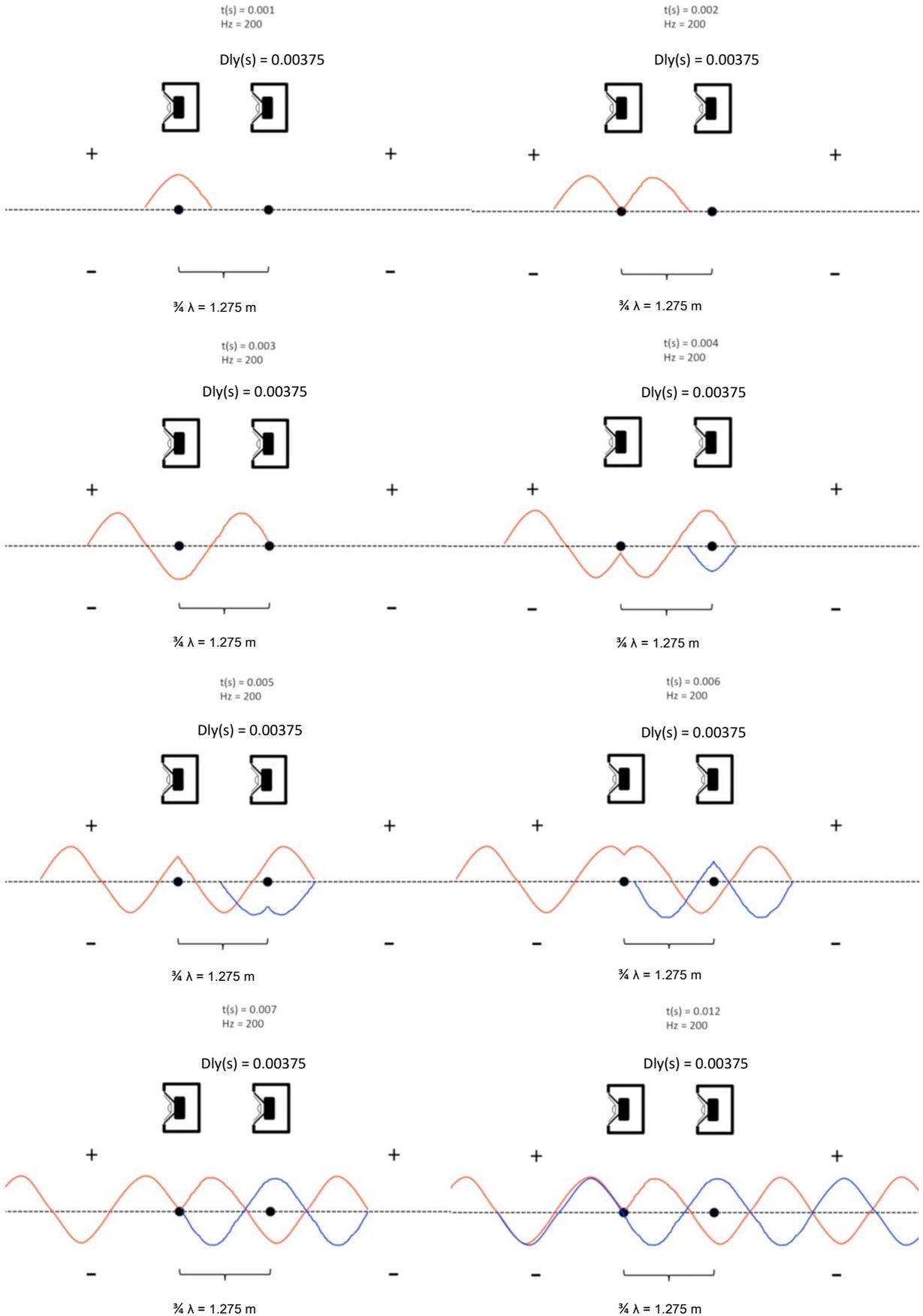
Le Parisien

Par Corinne Nèves (avec Valentin Bialé)
(03/06/2019).





Dipôle (FC = 200 Hz ; $\frac{3}{4} \lambda$)







Annexe 4 [38]

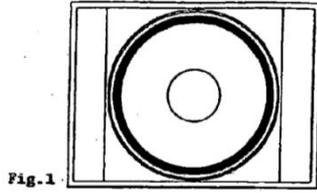


Fig. 1

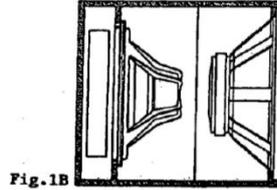


Fig. 1B

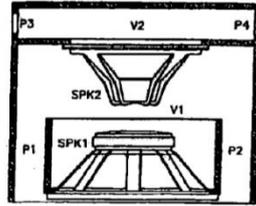


Fig. 1A

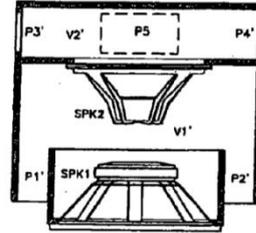


Fig. 2

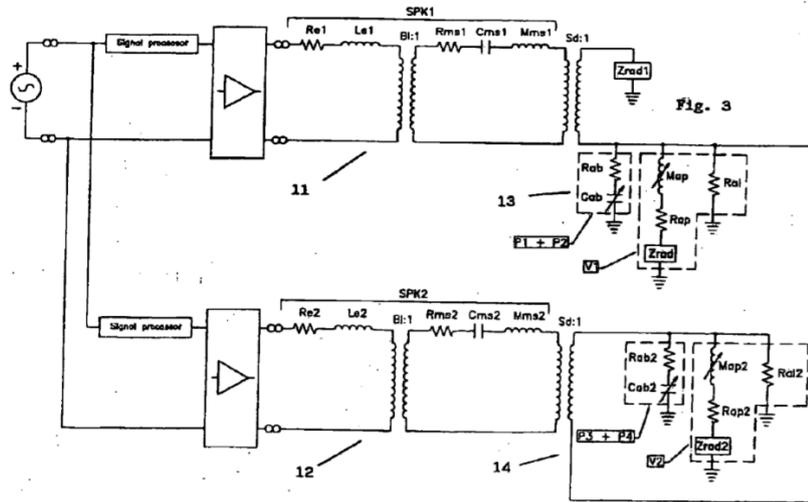
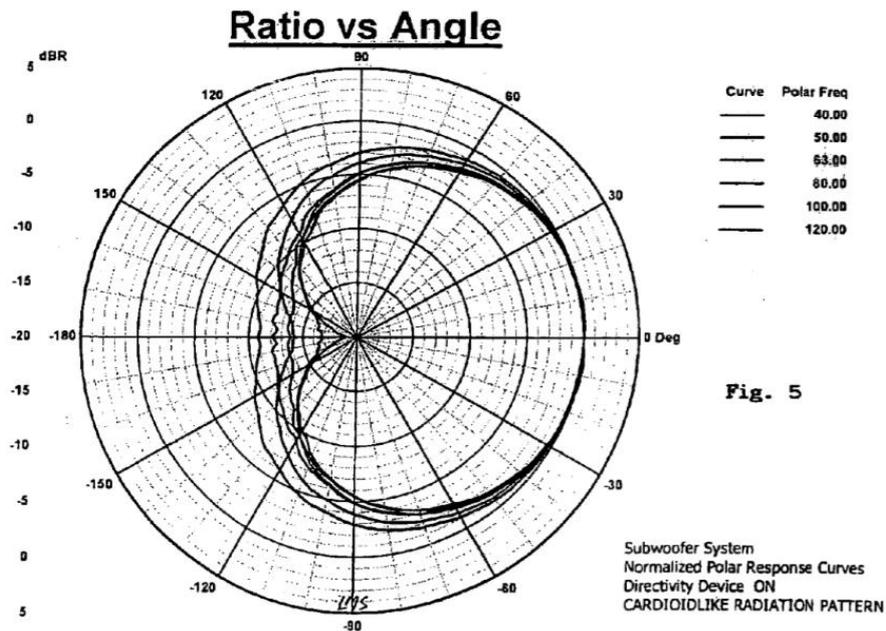


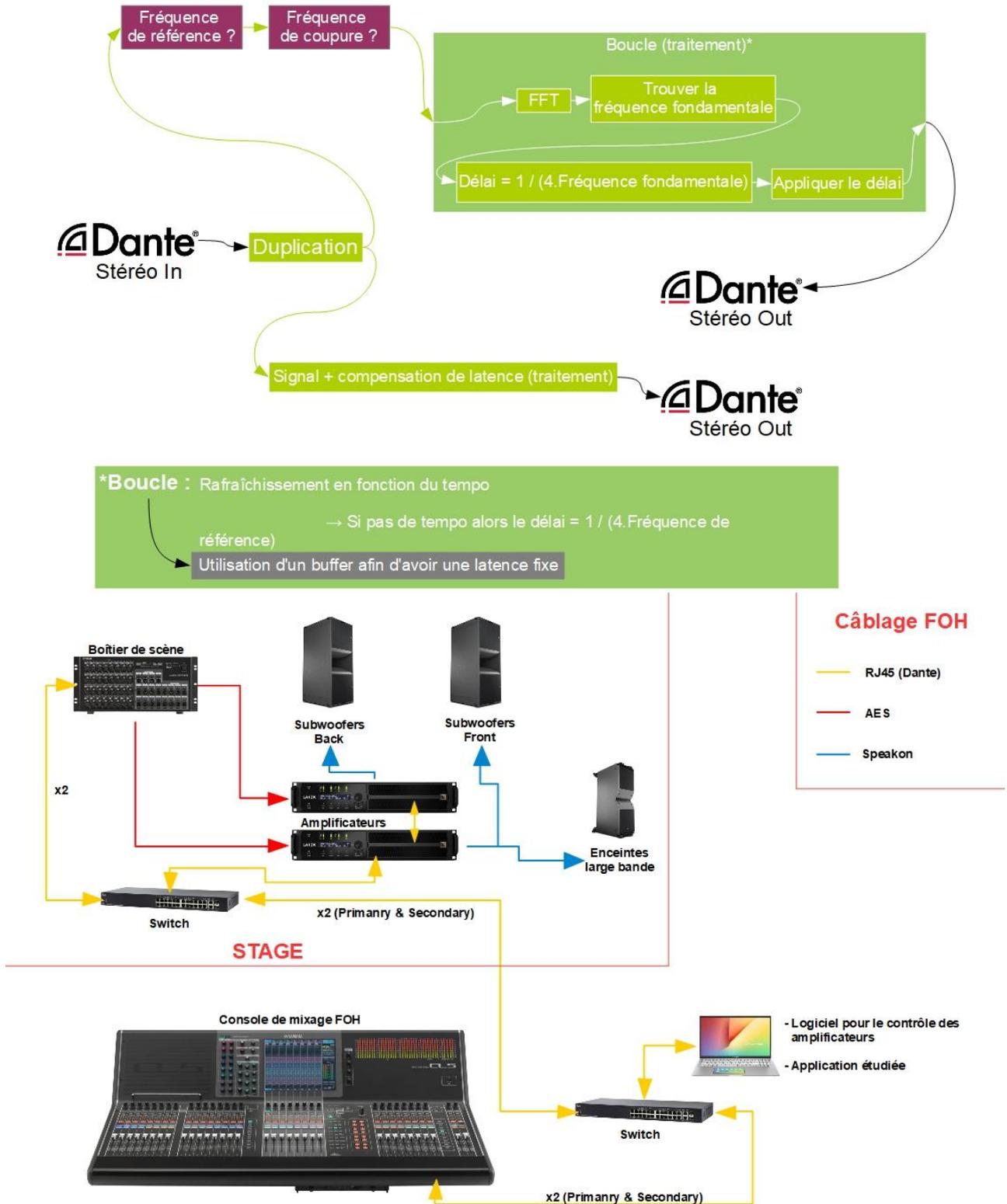
Fig. 3







Annexe 5







Annexe 6

The screenshot displays a software interface with a dark theme. At the top, there are navigation icons and a search bar. The main content area is divided into several sections:

- Settings Section:**
 - ON/OFF toggle: ON (green)
 - IN : Dante 1&2
 - OUT : Dante 3&4
 - Fréquence de référence : 50Hz
 - Fréquence de coupure : 100Hz
 - Référence de Subwoofers: KS28 L-Acoustics
 - Distance inter-subwoofers : 1m
 - Temps de latence : 2ms
- Frequency Section:**
 - 50 HZ (large purple text)
 - Délai fixe : 5ms (blue text)
 - Délai variable : 5ms (red text)
 - Tempo : 120 BPM (green text with a musical note icon)
- Analysis Graphs:**
 - A polar plot (top) showing a cardioid-like pattern with a peak at 0° and a null at 180°. The plot has concentric circles labeled with values: 5.4dB, 12.8dB, 15.4dB, 22.8dB, 25.4dB, and 32.8dB. The axes are labeled with angles: 270°, 180°, 90°, and 0°.
 - A frequency response graph (bottom) showing a sharp peak at 50 Hz. The vertical axis is labeled 'A' and ranges from 0.0 to 0.7. The horizontal axis is labeled 'f' and has a marker at 50 Hz.

The bottom of the interface shows a Windows taskbar with various application icons and a system tray with the date and time: 0004, 24/04/2020.





GLOSSAIRE

- **Baffle** : Écran plan rigide, monté sur un haut-parleur pour éviter le rayonnement vers l'avant des ondes sonores émises par la partie arrière de l'appareil.
- **Cardioïde** : Diffusion en forme de cœur, présentant une réjection à l'arrière du système.
- **Château** : Configuration d'enceintes empilées au sol formant ainsi un « château ».
- **Cluster** : Grappe d'enceintes suspendues.
- **Crash barrière** : Barrière présente devant la scène lors des concerts, servant à séparer le public des artistes.
- **Crossover** : Zone de recouvrement fréquentiel entre deux enceintes ne travaillant pas dans la même bande de fréquence.
- **Délai** : Retard temporel engendré par un retard électrique appliqué au signal.
- **Event** : Tube plus ou moins long disposé sur la façade avant ou arrière de l'enceinte et qui pénètre à l'intérieur de celle-ci.
- **FOH** : Front Of House, désigne la régie placée devant la scène.
- **Fonction de transfert** : La fonction de transfert est une mesure bi-canal qui détermine la réponse en fréquence d'un système en comparant son signal de sortie (mesure) à son signal d'entrée (référence).
- **Impédance** : En électricité l'impédance est l'effet de résister au courant en fonction de la fréquence. En acoustique, l'impédance caractérise la réaction d'un milieu face au mouvement d'une source.



- **Interopérabilité** : Se définit comme la capacité que possède un produit ou un système dont les interfaces sont intégralement connues à fonctionner avec d'autres produits ou systèmes existants ou futurs.
- **Isosonie** : En acoustique, terme désignant une puissance sonore égale causée par différents sons ou bruits.
- **Larsen** : Oscillation parasite se manifestant par un sifflement, qui prend naissance lorsque la sortie d'une chaîne électroacoustique, par exemple le haut-parleur, réagit sur son entrée, en général le microphone.
- **Magnitude** : Cohérence de la fonction de transfert, exprimée en pourcentages.
- **Pavillon** : Guide d'onde permettant une bonne adaptation d'impédance entre les milieux et aux propriétés amplifiantes.
- **Piézoélectricité** : Propriété que possèdent certains matériaux de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique.
- **Réponse plate** : Réponse en fréquence neutre, la plus fidèle possible.
- **Réjection** : Phénomène d'annulation des ondes sonores se caractérisant par une baisse du niveau, à un « rejet » de celui-ci.
- **Rumble** : Vibration basse fréquence qui produit un effet sonore de ronflement continu.
- **Solidien** : Qui concerne la vibration des solides.
- **Spéculaire** : Qui réfléchit, ici le son, de la même manière qu'un miroir réfléchit la lumière.
- **Stack** : Désigne plusieurs enceintes empilées au sol.
- **Standalone** : Une application logicielle est dite standalone quand il est possible de l'utiliser, soit seule (comme toute application), soit comme plugin mais avec un protocole d'échange d'informations.



- **Subwoofer** : Enceinte destinée à reproduire les très basses fréquences.
- **Sweep** : Signal sonore continu et pur, dont la fréquence augmente de façon logarithmique au cours du temps.





TABLE DES FIGURES

Première partie :

FIGURE A.1.1 - Microphone à charbon [10].....	17
FIGURE A.1.2 - Démonstration en public du Magnavox par Fritzi Scheff, actrice et chanteuse Américaine [11].....	18
FIGURE A.1.3 - Photo de l'audion inventé par Lee de Forest [12].....	19
FIGURE A.1.4 - Concert des Beatles au Shea Stadium de New York le 15/08/1965 [13]....	20
FIGURE A.1.5 - Amplificateur de puissance ALTEC 1570 [14].....	20
FIGURE A.1.6 - Enceinte utilisée lors du concert (extrait de la captation vidéo du Live) [15].....	21
FIGURE A.1.7 - Utilisation de « Wedges » lors de l'American Tour des Rolling Stones en 1969 [16].....	22
FIGURE A.1.8 - Wall of Sound du Grateful Dead [17].....	23
FIGURE A.1.9 - Système Line Array et Line Source, V-DOSC de chez L-Acoustics [18]....	24
FIGURE A.1.10 - Lieu de rassemblement du parlement Althing à Thingvellir (930) [19].....	27
FIGURE A.1.11 - Schéma représentant la diffusion des ondes sonores dans le Grand Théâtre de Pompéi [20].....	28



FIGURE A.1.12 - Schéma représentant la diffusion des ondes sonores dans le cadre d'une voûte elliptique [21].....	29
FIGURE A.1.13 - Salle de projection de l'IRCAM [22].....	29
FIGURE A.2.1 - Historique des subwoofers représentant les moments clés dans l'évolution de la sonorisation.....	31
FIGURE A.2.2 - Analyse spectrale moyenne de deux morceaux de rap : « Without me » de Eminem (haut) ; « Chaud » de Roméo Elvis (bas).....	33
FIGURE B.1.1 - Représentation du phénomène physique lors de la transmission d'une onde sonore [23].....	34
FIGURE B.1.2 - Rappel de la vitesse du son en fonction de la température de l'air et du milieu [24].....	35
FIGURE B.1.3 - Tableau représentant la longueur d'onde et la période selon la fréquence...	36
FIGURE B.1.4 - Représentation temporelle d'un son pur [7].....	37
FIGURE B.1.5 - Représentation temporelle d'un son complexe [7].....	37
FIGURE B.1.6 - Représentation temporelle d'un bruit [25].....	38
FIGURE B.1.7 - Représentation spectrale d'un signal sinusoïdale (440Hz), d'un signal carré (440Hz) et d'un bruit blanc.....	39
FIGURE B.1.8 - Tableau représentant les différentes bandes de fréquences perçues par l'oreille humaine [7].....	40



FIGURE B.1.9 - Modélisation des résonances du corps humain [9].....	41
FIGURE B.1.10 - Courbe d'isotonie – Fletcher et Munson (<i>Lignes isotoniques normales selon la norme ISO 226 :2003</i>) [7].....	44
FIGURE B.1.11 - Courbes de pondération A et C fournies par le constructeur NTI Audio (Pondération Z = pas de pondération) [35].....	45
FIGURE B.1.12 - Corrections à appliquer selon de la norme de la pondération [7].....	45
FIGURE B.1.13 - Schéma représentant un cercle trigonométrique [26].....	47
FIGURE B.1.14 - Relation entre un cercle trigonométrique et la représentation temporelle d'une onde sinusoïdale [27].....	48
FIGURE B.1.15 - Schéma représentant un déphasage de 180° entre deux sources émettant la même fréquence, rendant les ondes hors-phase [32].....	49
FIGURE B.1.16 - Schéma représentant un déphasage de 180° et une inversion de polarité entre deux sources émettant la même fréquence, rendant les ondes en phase [32].....	50
FIGURE B.1.17 - Schéma représentant un filtrage en peigne [28].....	51
FIGURE B.1.18 - Schéma représentant le cycle de la phase [2].....	52
FIGURE B.1.19 - Schéma représentant les différentes zones de sommation en fonction de la différence de niveau sonore entre deux sources déphasées [2].....	52
FIGURE B.1.20 - Schéma représentant le principe de la réflexion spéculaire [7].....	54



FIGURE B.1.21 - Schéma représentant le principe de la source image lors d'une réflexion spéculaire [7].....	55
FIGURE B.1.22 - Schéma représentant le principe de la réflexion diffuse [7].....	56
FIGURE B.1.23 - Schéma représentant les principes de la diffraction sonore [7].....	57
FIGURE B.2.1 - Schéma représentant la constitution d'un haut-parleur à bobine mobile [8].....	58
FIGURE B.2.2 - Schéma représentant le principe de la Force de Laplace [8].....	60
FIGURE B.2.3 - Schéma représentant un court-circuit acoustique dans le cas d'un haut-parleur seul et sa directivité bidirectionnelle [7].....	62
FIGURE B.2.4 - Schéma représentant un haut-parleur chargé sur un écran [7].....	62
FIGURE B.2.5 - Résultat de la mesure du niveau de pression sonore en fonction de l'angle de la source, dans le cas d'un écran fini et d'un écran infini [4].....	63
FIGURE B.2.6 - Diagramme de directivité pour un bloc de quatre KS28 en configuration standard en utilisant une échelle de couleur par pas de 3 dB [36].....	64
FIGURE B.2.7 - Schéma représentant le gain en pression d'une source omnidirectionnelle contre diverses parois [7].....	68
FIGURE B.3.1 - Tableau répertoriant une moyenne des caractéristiques des enceintes dites « renforts de basse ».....	69
FIGURE B.3.2 - Tableau répertoriant une moyenne des caractéristiques des enceintes dites « subwoofers dédiés».....	70



FIGURE B.3.3 – Schéma représentant une charge de type close [33].....	71
FIGURE B.3.4 – Schéma représentant une charge de type Bass Reflex [33].....	72
FIGURE B.3.5 – Schéma représentant une charge symétrique [33].....	73
FIGURE B.3.6 – Schéma représentant une charge de type pavillonnaire [33].....	74
FIGURE B.3.7 – Schéma représentant une charge de type scoop ou toboggan [34].....	75
FIGURE B.3.8 – Schéma représentant une double charge symétrique (TB215S et TB218S de chez APG) [31].....	75
FIGURE B.3.9 – Schéma représentant une charge Manifold (T21 de chez Adamson) [34]..	76
FIGURE B.3.10 - Photo du TB218S de chez APG (gauche) et du T21 de chez Adamson (droite) [31][29].....	76
FIGURE C.1.1 - Variation de la différence de marche en fonction de la distance d entre les enceintes et de la position de l'auditeur A (selon r et θ) [6].....	80
FIGURE C.1.2 - Variation de la différence de marche en fonction de la distance d entre les enceintes et de la position de l'auditeur A (selon θ) [6].....	82
FIGURE C.1.3 - Simulation de deux subs KS28 de chez L-Acoustics, en fonction de la distance inter enceintes et de la fréquence jouée.....	83
FIGURE C.1.4 - Représentation du lien entre le filtrage en peigne, la longueur d'onde et la distance entre deux sources [2].....	84



Deuxième partie :

- FIGURE A.1.1** - Simulation d'une configuration Point Source avec deux stacks de deux KS28 (L-Acoustics), situés à Jardin d'une scène de 20 mètres d'ouverture.....**89**
- FIGURE A.1.2** - Simulations d'une configuration Line Source en faisant varier le nombre d'enceintes, la distance entre celles-ci et la fréquence émise.....**91**
- FIGURE A.1.3** - Simulation de l'ouverture de diffusion d'une configuration Line Source en faisant varier la distance entre les subwoofers pour une fréquence de 50Hz émise.....**93**
- FIGURE A.2.1** - Simulations d'une configuration Arc-sub (Line Source) en faisant varier l'angle de l'arc pour une fréquence de 50 Hz émise.....**94**
- FIGURE A.3.1** - Comparaisons des différences de marche entre un stack de subwoofers horizontal et vertical.....**97**
- FIGURE A.4.1** - Mesure à une distance de 20 mètres en divers points, de la réponse en fréquence d'un subwoofer KS28 posé au sol ou accroché à 3 mètres de hauteur [5].....**98**
- FIGURE A.4.2** - Réduction de niveau sonore entre un subwoofer posé au sol et un subwoofer accroché, pour hauteur d'écoute de 1.6 mètre, et une bande de fréquence comprise entre 30 Hz et 80 Hz [5].....**99**
- FIGURE A.4.3** - Schéma représentant l'effet du sol pour l'enceinte accrochée [6].....**100**
- FIGURE A.4.4** - Schémas représentant la variation de la première fréquence d'atténuation du filtrage en peigne, en fonction des divers paramètres rencontrés.....**101**



FIGURE A.4.5 - Schéma représentant la variation des distances entre deux points d'écoute, selon la position du subwoofer [6].....102

FIGURE A.4.6 - Schéma représentant la distance du point de mise en phase en fonction du délai appliqué au subwoofer positionné au sol.....105

FIGURE A.5.1 - Schéma représentant un filtre crossover.....107

FIGURE A.5.2 - Tableau représentant les fréquences de coupures hautes et basses en fonction de la fréquence de coupure centrale pour des filtres ayant des pentes à -24 dB/octave, ainsi que la demi longueur d'onde de la fréquence de coupure haute.....108

FIGURE A.5.3 - Schéma de l'association d'un système large bande accroché et d'un subwoofer positionné au sol [6].....109

FIGURE A.5.4 - Photo d'un système de rappel (Line-Array) [30].....111

FIGURE B.1.1 - Diagramme polaire représentant une directivité cardioïde [7].....113

FIGURE B.1.2 - Schéma représentant le principe physique de la configuration Front Back Front.....114

FIGURE B.1.3 - Divers variantes de la configuration Front Back Front.....116

FIGURE B.2.1 - Schéma représentant le principe physique de la configuration End Fire...117

FIGURE B.2.2 - Schéma d'une configuration End Fire avec 4 subwoofers [6].....118

FIGURE B.3.1 - Schéma représentant l'obtention d'une directivité cardioïde à l'aide du couplage d'une directivité omnidirectionnelle et bidirectionnelle [7].....119



FIGURE C.1.1 - Simulation d'un subwoofer (haut) et d'un montage FBF vertical (bas) en fonction de la fréquence émise (un délai sur l'enceinte retournée permet juste d'aligner les centres acoustiques (il correspond à la profondeur du subwoofer).....122

FIGURE C.1.2 - Simulation d'un montage End Fire avec deux (haut) et quatre (bas) subwoofers en fonction de la fréquence émise (fréquence cardioïde de référence égale à 50 Hz).....123

FIGURE C.1.3 - Simulation d'un montage dipôle avec délai fixe en fonction de la fréquence émise (fréquence cardioïde de référence égale à 50 Hz).....124

FIGURE C.3.1 - Simulation représentant les raies d'interférences entre un système de subwoofers stéréo omnidirectionnel, et un système de subwoofers stéréo cardioïdes désaxé [37].....128

FIGURE C.3.2 - Schéma représentant les problèmes de phases lors de la sommation ou de la réjection pour un montage End Fire (haut) et un montage dipôle (bas)...129

FIGURE C.3.3 - Schéma représentant la sommation complète et partiel de signaux en phase [33].....130



Troisième partie :

- FIGURE B.2.1** - Schéma représentant le phénomène physique lors de la variation de fréquence émise (multiple) dans le cas d'un montage dipôle avec une fréquence cardioïde de référence à 50 Hz et un délai fixe correspondant [33].....136
- FIGURE B.2.2** - Vue d'ensemble des sommations et réjection devant et derrière un montage dipôle avec délai fixe en faisant varier la fréquence émise (fréquence cardioïde de référence à 50 Hz) [33].....137
- FIGURE B.2.3** - Schéma représentant le phénomène physique lors de la variation de fréquence émise dans le cas d'un montage dipôle avec une fréquence cardioïde de référence à 50 Hz et un délai fixe correspondant [33].....138
- FIGURE B.2.4** - Schéma représentant le phénomène physique lors de la variation de fréquence émise dans le cas d'un montage dipôle avec une fréquence cardioïde de référence à 50 Hz et un délai fixe correspondant, en fonction de la distance entre les enceintes [33].....139
- FIGURE B.2.5** - Schéma représentant le phénomène physique lors de la variation de fréquence émise dans le cas d'un montage dipôle avec une fréquence cardioïde de référence à 50 Hz et un délai variable correspondant [33]....140
- FIGURE B.2.6** - Vue d'ensemble des sommations et réjections devant et derrière un montage dipôle avec délai variable en faisant varier la fréquence émise (fréquence cardioïde de référence à 50 Hz) [33].....140
- FIGURE B.2.7** - Directivité des montages dipôles selon la fréquence jouée dans le cas d'un délai fixe et d'un délai variable [33].....141



FIGURE B.2.8 - Vue d'ensemble des sommations et réjections devant et derrière plusieurs montages dipôles avec délai variable en faisant varier la fréquence émise (plusieurs fréquences cardioïdes de référence) [33].....142

FIGURE B.3.1 - Simulation d'un montage dipôle avec délai variable en fonction de la fréquence émise (fréquence cardioïde de référence égale à 50 Hz).....144

FIGURE B.3.2 - Simulation d'un montage dipôle « orienté » en décalant les enceintes de 1.7m sur la largeur (fréquence cardioïde de référence égale à 50 Hz).....146



RÉFÉRENCES

- **Don Davis ; Eugene Patronis, Jr. ; Pat Brown** : *Sound System Engineering*, Focal Press, fourth edition, Burlington, 2013. [1]
- **McCarthy B.** : *Sound systems : design and optimization*. Focal press, Oxford, seconde édition, 2010. [2]
- **Laurent de Wilde** : *Les fous du son*, Grasset, première édition, France, 2016.
- **Denis Mercier** : *Le livre des techniques du son - Tome 1 - Notions fondamentales*, Dunod, cinquième édition, France, 2015.
- **Denis Mercier** : *Le livre des techniques du son - Tome 2 – La technologie*, Dunod, cinquième édition, France, 2015.
- **Denis Mercier** : *Le livre des techniques du son - Tome 3 – L'exploitation*, Dunod, cinquième édition, France, 2015.
- **Bergame Périaux ; Jean-Luc Ohl ; Patrick Thévenot** : *Le son multicanal : De la production à la diffusion du son 5.1, 3D et binaural*, Dunod, France, première édition, 2015.
- **Jouhaneau J.** : *Notion élémentaire d'acoustique. Electroacoustique*. Tech et Doc, Paris, seconde édition, 2000. 2, 4.4.1.[3]
- **Heil C., Urbanm., 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]
- **Corteel E., Coste-Dombre H., Combet C., Horyn Y., et Montignies F.** : *On the efficiency of flown vs. ground-stacked subwoofer configurations*. Audio Eng. Soc., Convention Paper 10051, octobre 2018. [5]
- **Pierrick Saillant** : *Les dispositifs de reproduction des fréquences les plus basses en sonorisation*, Mémoire de l'E.N.S. Louis Lumière, Paris, 2010. [6]
- **Jeff Berryman** : *Subwoofer Arrays : A practical guide*, Electro-Voice, Version 1, Burnsville, 2009.



- **John Eargle** : *Sound System Design Reference Manual*, JBL Professional, third edition, 1999.
- **Joan La Roda** : *Technical report, Setting up a cardioid subwoofer system*, DAS Audio, Engineering Department, 2009.
- **Boone M. M. et Ouweltjes O.** : *Design of a loudspeaker system with a low-frequency cardioidlike radiation pattern*. J. Audio Eng. Soc., Vol. 45, No. 9, septembre 1997.
- **Henocq J., Marc M., Rettel G., Périaux B., Jegaden H.** : *Cours ISTS 1, 2, et 3*, ESRA Bretagne, 2017-2020. [7]
- **Brusson D., Girard G., Siago E., Si Mohammed A.** : *La modélisation numérique et l'étude de la suspension en caoutchouc de la membrane d'un haut-parleur*, Université du Maine. [8]
- **Rasmussen G.,** : *Human body vibration exposure & its measurement*, Bruel & Kjaer Technical Paper, No. 1, Naerum, Denmark, 1982. [9]
- **Noselli G., Noselli S., Noselli M.,** : *Low frequency loudspeaker enclosure with configurable directivity*, Patent Application Publication, United States, 2005. [38]
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Microphone_%C3%A0_charbon [10]
- https://www.flickr.com/photos/powerhouse_museum/3332675328 [11]
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Audion> [12]
- <https://www.stumptownblogger.com/2015/08/august-15-1965-at-shea-stadium-.html> [13]
- <http://www.audioheritage.org/vbulletin/showthread.php?33062-Altec-1570-b> [14]
- <https://www.youtube.com/watch?v=M6DfG7sml-Q> [15]
- <https://www.loudersound.com/features/the-rolling-stones-1969-live-r-than-you-ll-ever-be> [16]
- <https://www.soundandcommunications.com/scaling-wall-sound/> [17]



- <https://www.pinterest.fr/pin/687221224361482783/> [18]
- <https://pixabay.com/fr/photos/l-islande-thingvellir-parlement-1601407/> [19]
- <https://sites.google.com/site/archimusiquetpe/iii-l-architecture-au-service-de-la-musique/3-musiques-amplifiees-et-musiques-non-amplifiees-des-architectures-differentes> [20]
- <https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/mathematiques-peut-on-parler-quai-autre-metro-8333/> [21]
- <http://web4.ircam.fr/1039.html> [22]
- <https://www.sciences-faits-histoires.com/blog/robotique-cybernetique-ia/des-progres-impressionnants-sur-la-levitation-acoustique.html> [23]
- <http://sciencesphysiques.e-monsite.com/pages/cours-4eme/chapitre-2-son-et-lumiere.html> [24]
- <https://sites.google.com/site/tpe1ssaintmichel/son/i?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1> [25]
- <http://ilsenseignentilsapprennentpou2c.weebly.com/comprendre-le-cercle-trigonomeacutetrique.html> [26]
- <https://www.epsic.ch/cours/electrotechnique/theorie/altermono/elt-250.html> [27]
- <http://www.techniquesduson.com/phase1.html> [28]
- <https://www.adamsonsystems.com/> [29]
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne_%C3%A0_retard_\(sonorisation\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne_%C3%A0_retard_(sonorisation)) [30]
- <https://www.apg.audio/fr/> [31]
- <https://deveniringeson.com/> [32]
- <http://www.alphasound.org/> [33]
- <https://www.toutlehautparleur.com/> [33]



- <http://hornplans.free.fr/> [34]
- <https://www.nti-audio.com/en/> [35]
- <https://www.l-acoustics.com/fr/> [36]
- <https://www.nexo-sa.com/> [37]
- <https://www.leparisien.fr/val-de-marne-94/bois-de-vincennes-les-riverains-exasperes-par-le-bruit-du-festival-we-love-green-03-06-2019-8085624.php> [39]