

ROCH

Camille

N° Etudiant : 264610

MASTER 2 - LACT - Musique Production Musicale (MPM)



MÉMOIRE DE MASTER 2

L'établissement des connaissances et des caractéristiques définissant une scène sonore et la perception de cette dernière pour une meilleure conception d'une oeuvre musicale 3D :

La perception et la restitution de la spatialisation des instruments et de leur champ diffus du point de vue de l'auditeur dans le contexte d'une production musicale 3D.

Sous la supervision de Monsieur **Philippe Labroue**

Engagement de non-plagiat

Je soussigné Camille Roch, certifie sur l'honneur que les travaux soumis en mon nom dans ce mémoire sont le fruit de mes propres efforts et réflexions personnelles et que toute idée ou tout document utilisé pour étayer ce travail et ne constituant pas une réflexion personnelle, ou une rédaction personnelle sont en conséquence cités en référence.

Paris, le 17 Mai 2023

Camille Roch

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized, cursive 'C' followed by a horizontal line extending to the right.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier :

- Chaleureusement Philippe Labroue pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences et de son expérience. Merci pour vos encouragements et votre soutien qui m'ont permis de mener à bien ce mémoire.
- Martin Laliberté et les autres professeurs m'ayant accompagné par leur cours dans ce Master.
- Marion Delhaye pour m'avoir inculqué des méthodes de travail afin de mener à bien ma pédagogie face à ces travaux conséquents.
- Gaël Martinet, pour sa gentillesse et sa bienveillance vis-à-vis des étudiants et de la recherche pour la production musicale 3D
- Bernard Lagnel et Patrick Thévenot de nous avoir accompagné dans la production musicale 3D.
- Jérémie Porat pour avoir collaboré une année de plus avec moi. Ce que nous entreprenons n'est qu'un début.
- Merci à Eliot qui s'est avéré être un très bon camarade de classe. J'espère qu'on se reverra dans la vie professionnelle.
- Mon père pour m'avoir soutenu dans ce que j'ai entrepris.
- Ma mère pour avoir toujours cru en moi.
- Mes amis et ma copine pour m'avoir toujours inspiré et soutenus dans la rédaction de ce mémoire.
- Merci à mon chat pour avoir accompagné ma solitude dans les moments de page blanche. Miaou Miaou.

RÉSUMÉ

Ce mémoire répertorie les connaissances et les caractéristiques qui définissent une scène sonore 3D. L'objectif est de permettre une optimisation de la perception et de la restitution des instruments de musique et de leur champ diffus au sein d'une production musicale 3D.

Dans un premier temps, il est étudié l'apport d'une connaissance sur l'écologie sonore au sein d'une production sonore 3D. Cette notion est définie et associée au son 3D, puis, est séparée en deux catégories, l'écologie sonore environnementale et mentale.

Ensuite, une définition actuelle du champ diffus est proposée. Il est souligné l'importance des considérations esthétiques sur le champ diffus et le rôle majeur de ce dernier dans une œuvre sonore 3D.

In fine, le mémoire aborde l'ensemble des concepts liés à la perception spatiale :

- L'étude des notions de psycho et de psychologie acoustique.
- L'observation des limites anthropologiques de la perception spatiale.
- L'identification du champ diffus réalisé par l'Homme.
- La description des effets perceptifs afin de comprendre au mieux le rôle qu'ils peuvent avoir sur une scène sonore 3D.

Ces connaissances et la compréhension de ces notions assurent un contrôle complet d'une scène sonore 3D. Ceci permet aux intentions esthétiques et artistiques d'être encore plus pertinentes et intègres vis-à-vis des choix de productions réalisés par l'ingénieur du son ou l'artiste lors de la spatialisation des sources sonores.

Intrinsèquement, l'un des buts de ce mémoire est aussi de proposer des pistes pour la réalisation d'outils afin d'offrir un contrôle accru sur la perception et la restitution d'une scène sonore 3D, et donc, sur une production musicale 3D.

MOTS-CLÉS

Binaural, Champ diffus, Écologie sonore, Impression spatiale, Ingénierie sonore, Objet sonore, Perception spatiale, Production musicale 3D, Psycho-acoustique, Psychologie acoustique, Réverbération, Scène sonore 3D, Spat Revolution, Spatialisation.

SUMMARY

This dissertation determines the knowledge and the characteristics that define a 3D soundscape. The objective is to optimize the perception and reproduction of musical instruments and their diffuse field within a 3D musical production.

Firstly, the contribution of knowledge on acoustic ecology within a 3D sound production is studied.

This notion is defined and associated with 3D sound, then separated into two categories, environmental and mental acoustic ecology.

Subsequently, a current definition of the diffuse field is proposed. The importance of aesthetic considerations for the diffuse field is emphasized, as is its major role in a 3D sound production.

In fine, the dissertation addresses all the concepts related to spatial perception:

- The study of psycho and acoustic psychology notions.
- The observation of the anthropological limits of spatial perception.
- The identification of the diffuse field realized by Man.
- The description of perceptual effects in order to best understand the role they

can have on a 3D soundscape.

This knowledge and understanding ensures complete control of a 3D soundscape. This allows aesthetic and artistic intentions to be even more relevant and coherent with the production choices made by the sound engineer or artist when spatializing sound sources.

In addition, one of the aims of this dissertation is to suggest ideas for the realization of tools to offer greater control over the perception and restitution of a 3D soundscape, and therefore over 3D music production.

KEYWORDS

Acoustic ecology, Acoustic psychology, Binaural, Diffuse field, Object-based, Psycho-acoustic, Reverberation, Scene-based, Sound engineering, Sound object, Spatial Revolution, Spatial impression, Spatial perception, Spatialisation, 3D music production, 3D sound scene.

GLOSSAIRE

ASW	Apparent Source Width
BQI	Binaural Quality Index
DFE	Diffuse Field Modeling
DFM	Diffuse Field Equalization
DRR	Direct-to-Reverberant energy Ratio
HOA	High Order Ambisonic
HRTF	Head-Related Transfer Function
IACC	InterAural Cross-correlation Coefficient
IACC _L	Coefficient InterAurale de la Réverbération Tardive
IACCF	InterAural Cross-correlation Coefficient Function
IAD	InterauralAural Difference
ICCC	InterChannel Cross-correlation Coefficient
ILD	Interaural Level Difference
IPD	Interaural Phase Differences
ITD	Interaural Time Difference
LEV	Listener Envelopment
LLF	Late Lateral Fraction
MAA	Minimum Audible Angle
RMT	Reflexion Masked Threshold

Les acronymes en écriture « Times New Roman » sont exprimés par des équations dans ce mémoire. Cela a été réalisé dans le but que le lecteur puisse savoir quels sont les acronymes associés à des équations abordés dans ce mémoire.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

I - L'ÉCOLOGIE SONORE ET SON IMPLICATION DANS LA CONCEPTION D'UNE OEUVRE MUSICALE 3D.

1.1 - Introduction à la notion de l'écologie sonore dans le cadre d'une production musicale 3D.

1.2 - Le son 3D et l'écologie sonore environnementale.

1.3 - Le son 3D et l'écologie sonore mentale.

1.4 - Conclusion et ouverture.

II - LE CHAMP DIFFUS, SES PRINCIPES THÉORIQUES ET SES DIFFÉRENTES CARACTÉRISTIQUES.

A - Les principes théoriques que revêt le champ diffus.

2.A.1 - Les différentes définitions du champ diffus et proposition d'une définition englobant toutes les propositions scientifiques.

2.A.2 - Le caractère isotrope et l'homogénéité spatiale dans le champ diffus.

B - Les approches discrètes et statistiques/stochastiques permettant de caractériser le champ diffus.

2.B.1 - L'approche modale.

2.B.2 - La fonction de corrélation.

2.B.3 - L'uniformité spatiale.

2.B.4 - Le temps de croisement/recouvrement et le temps de mixage dans un champ diffus.

C - Les éléments optimisables lors de la captation ou de la modélisation d'un champ diffus.

2.C.1 - Le champ diffus "idéal", pourquoi et comment ?

2.C.2 - L'optimisation du champ diffus dans les productions musicales 3D. Entre captations et modélisations numériques.

III - LA PERCEPTION SPATIALE DES SOURCES SONORES CONSTITUANT UNE SCÈNE SONORE 3D.

A - La discrimination de la localisation d'une source sonore et l'identification du champ diffus par l'Homme.

3.A.1 - Introduction à la perception dans une scène sonore 3D.

3.A.2 - Les mécanismes psycho-acoustiques et leur rôle dans la discrimination de la localisation d'une source sonore : la discrimination de la position et de l'élévation de la source sonore vis-à-vis de l'auditeur.

3.A.3 - Les mécanismes psycho-acoustiques et leur rôle dans la discrimination de la localisation d'une source sonore : la discrimination de la distance d'une source sonore vis-à-vis de l'auditeur.

3.A.4 - Les mécanismes psycho-acoustiques et leur rôle dans la discrimination de la localisation d'une source sonore : le rôle du cerveau et l'interprétation des informations que celui-ci réalise pour la perception d'une scène sonore 3D.

3.A.5 - Les limites anthropologiques pour la discrimination correcte de la localisation d'une source sonore.

3.A.6 - L'identification du champ diffus et l'aptitude de l'homme à le différencier du champ direct.

B - La perception spatiale et les impressions spatiales : leur rôle dans l'immersion d'une production musicale 3D

3.B.1 - Définition de la perception spatiale et de l'impression spatiale.

3.B.2 - l'impression spatiale : entre l'enveloppement spatial et la largeur apparente de source.

3.B.3 - les optimisations possibles pour un contrôle de l'immersion dans une scène sonore 3D.

C - Les éléments pouvant altérer la perception d'une scène sonore 3D.

3.C.1 - Le masquage spatial.

3.C.2 - Les différents éléments influent la perception de la réflexion d'une source sonore.

3.C.3 - L'élargissement et le rôle des basses fréquences dans l'enveloppement et le phénomène d'accroissement de la largeur.

3.C.4 - L'effet de précédence.

3.C.5 - Les sources fantômes.

3.C.6 - Les optimisations possibles pour corriger les éléments altérant la restitution de la scène sonore 3D.

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

L'arrivée du son 3D dans la musique a permis la démocratisation de la composition spatiale et l'émergence de nouvelles méthodes de productions musicales. Les productions musicales 3D prennent de plus en plus d'ampleur dans l'industrie de la musique avec la diffusion binaurale.

L'un des objectifs principales du son 3D est de reproduire une sensation d'immersion par la restitution d'une scène sonore 3D autour de l'auditeur. Ce type de production permet d'ajouter une sensation d'espace et la spatialisation des sources sonores. Celui-ci révolutionne alors les méthodes de productions et notre façon de gérer l'espace dans une production sonore, notamment avec la réverbération, et donc, le champ diffus.

Dans le cadre de mon mémoire de Master 1, l'objet d'étude était les méthodes de productions dans la musique 3D. Une production musicale avait été faite associant deux méthodes de productions : l'ambisonie d'ordre élevé (HOA) et le mixage objet. Mon mémoire de Master 1 présentait aussi ces deux types de productions en profondeur et définissait les principes sur lesquels se basent la production musicale 3D : le *scene-based* et l'*object-based*.

Certains problèmes avaient été identifiés : la perception de la scène sonore n'était pas très bonne et les localisations des sources sonores étaient assez floues. L'optimisation des différents éléments composant une scène sonore 3D s'était alors imposée comme étant la suite logique qui serait abordée dans ce mémoire de Master 2.

En général, on considère que ce sont les limites technologiques qui ont un impact sur ce type de production sonore.

Une prise de recul vis-à-vis de cette idée a été réalisée dans ce travail. Ce mémoire étudie les notions de physique acoustique, de psycho-acoustique et de psychologie acoustique, plutôt que les différentes technologies de productions musicales 3D. L'objectif étant d'établir une liste des connaissances nécessaires à ce genre de production immersive.

Le son 3D est un nouveau concept impliquant de nouvelles connaissances qu'il faut acquérir pour ce type de production sonore.

Dans ce travail, il sera défendu l'importance de la compréhension de ces notions pour une production musicale 3D. Une connaissance de celles-ci permettrait d'optimiser les choix spatiaux lors de la constitution d'une scène sonore 3D. Les choix spatiaux englobent les différentes décisions prises par un ingénieur du son et/ou artiste sur les spatialisations des instruments ou encore les paramètres de réverbérations.

Ces connaissances sont également importantes au regard des outils qu'il est possible d'utiliser dans les logiciels de spatialisation pour réaliser une scène sonore 3D. De cela, il en est ressorti que l'écologie sonore environnementale et mentale, le champ diffus et la perception spatiale sont des éléments importants à prendre en compte lors de la constitution d'une scène sonore immersive.

L'écologie sonore est une notion qui se lie parfaitement avec le son 3D. Elle implique qu'une attention soit portée sur les différents éléments constituant une scène sonore immersive. En d'autres termes, l'association de l'écologie sonore à la production musicale 3D indique qu'il est important de maîtriser certaines connaissances.

De ce fait, les notions principales ressortant d'une scène sonore 3D sont le champ diffus et la perception spatiale. D'où l'intérêt de les définir.

Le champ diffus caractérise un état de la réverbération tardive. Celui-ci amène une sensation d'enveloppement de l'auditeur dans lequel la localisation sonore est difficile. C'est un élément qui se retrouve dans la plupart des productions musicales du fait de l'importance de la réverbération dans le contexte musical. Le champ diffus occupe également une place importante dans la production musicale 3D puisque celui-ci est mis en avant par le principe même du son 3D.

La perception spatiale est invoquée avec les principes que revête la production musicale 3D. Celle-ci est fondamentale à la perception d'une scène sonore 3D.

Cette notion englobe la perception sonore réalisée par l'Homme, les impressions spatiales et les effets perceptifs.

La compréhension et la connaissance de ces éléments est importants puisque ces derniers caractérisent de manière significative une production musicale 3D.

Il sera ajouté que le son 3D, dans le cadre d'une diffusion binaurale, amène la notion d'esthétique binaurale qui mérite d'être définie.

Cette esthétique apporte un renouveau dans les modes de diffusions les plus courants (stéréophonie, monophonie) car le son 3D via une diffusion binaurale permet un démasquage et une impression d'espace avec l'externalisation. Cette esthétique étant toute nouvelle et ne faisant qu'évoluer avec la démocratisation du son 3D avec la musique, il n'existe encore que très peu de recherche dessus.

Mon collègue Jérémie Porat achève son mémoire de Master 2 sur cette notion qui est très liée à mon objet d'étude.

Par conséquent, ce mémoire tentera de démontrer en quoi les connaissances des caractéristiques du champ diffus et de la perception spatiale permettent d'optimiser la conception d'une scène sonore 3D, afin de prouver qu'il est pertinent d'utiliser ces notions pour constituer une scène sonore 3D.

Leur application permettrait à l'ingénieur du son et/ou l'artiste un contrôle bien plus complet d'une scène sonore 3D. Grâce à ces connaissances on pourrait concevoir des outils qu'il serait possible d'inclure dans les logiciels de spatialisation.

Cette étude a été réalisée sur le principe d'une diffusion binaurale.

Mais il reste tout de même possible d'extrapoler les connaissances présentées dans ce mémoire à la production musicale 3D en général, et cela, indépendamment du type de diffusion.

La première partie de ce mémoire définira et associera l'écologie sonore environnementale et mentale à la production musicale 3D. Cela afin de démontrer en quoi il est important de considérer ces deux notions lors de la constitution d'une scène sonore 3D.

Dans la seconde partie, il sera proposé une définition du champ diffus et des outils permettant de le mesurer. Cela dans le but de le caractériser et d'en obtenir une connaissance plus approfondie qui serait nécessaire au contrôle d'une scène sonore 3D.

La troisième et dernière partie, sera consacrée à la perception spatiale. Cela dans le but de présenter les différents éléments composant la perception réalisée par l'Homme d'une scène sonore 3D. Cela amènera à considérer des notions de psycho-acoustique, de psychologie acoustique.

Ce point abordera aussi les impressions spatiales et les effets perceptifs définissant la perception d'une scène sonore 3D.

Cette troisième partie essaiera de caractériser et d'obtenir une connaissance plus approfondie sur ces notions. Une connaissance nécessaire au contrôle et à l'optimisation d'une scène sonore 3D.

Un grand nombre de documents sur le sujet ont pu être trouvés mais très peu ont abordé ces notions en faisant le lien avec la production musicale 3D.

Des auteurs tels que Baskind¹, Cousins², Daniel³, Romblom⁴, Avelar *et al.*⁵, Berthomieu⁶ ou encore Salmon⁷ ont été fondamentaux à la rédaction de ce mémoire.

Tout comme Bradley et Soulodre^{8 9} qui ont théorisé les principales recherches sur les impressions spatiales.

Cependant, ce mémoire s'efforcera d'aborder les travaux les plus récents. La recherche sur ce sujet n'a fait que croître depuis les années 1990 à nos jours.

¹ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003.

² COUSINS Michael Patrick, *The diffuse sound object* [En ligne], Directeur de Thèse : FAZI Filippo, Angleterre : University of Southampton, Thèse de Doctorat, Avril 2018.

³ DANIEL Jérôme, *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 31 Juillet 2001.

⁴ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016.

⁵ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, pp. 1-12.

⁶ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019.

⁷ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021.

⁸ BRADLEY John S., SOULODRE Gilbert A., « Objective measures of listener envelopment » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Novembre 1995, Vol. 98, N°5, pp. 2590-2597.

⁹ BRADLEY John S., SOULODRE Gilbert A., « The influence of late arriving energy on spatial impression » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Avril 1995, Vol. 97, N°4, pp. 2263-2271.

I - L'ÉCOLOGIE SONORE ET SON IMPLICATION DANS LA CONCEPTION D'UNE OEUVRE MUSICALE 3D.

1.1 - Introduction à la notion de l'écologie sonore dans le cadre d'une production musicale 3D.

Comme l'explique Solomos¹⁰, l'écologie sonore correspond à l'étude du paysage sonore et de l'environnement constituant ce dernier. Cet environnement n'est pas obligatoirement naturel. Le terme environnement correspond simplement aux différents éléments constituant un paysage sonore. Ces éléments peuvent être des structures urbaines/naturelles, des animaux/humains, et tout autre chose constituant le paysage sonore observé.

Par conséquent, l'écologie sonore environnementale a pour but d'étudier l'environnement sonore constituant un paysage sonore. Par la suite, les caractéristiques de cet environnement, et donc, du paysage sonore auront une influence sur la perception de l'auditeur sur le plan mental. Par exemple, un environnement présentant une architecture non-parallèle avec des matériaux peu absorbants se caractérisera par une réverbération importante. L'auditeur aura tendance à associer ce paysage sonore à différents lieux (tels que des églises ou des halls) et à différentes sensations. Cette notion fait appel à l'écologie mentale. L'écologie sonore mentale aurait donc pour but d'étudier l'influence de l'environnement et de son écologie sonore sur la perception mentale du paysage sonore par l'auditeur.

Au final, l'écologie sonore environnementale et mentale sont deux notions qui sont étroitement liées et qui pourraient être tout à fait intéressantes à utiliser dans le cadre d'une production musicale 3D.

Il est intéressant de noter que l'écologie sonore peut être utilisée afin de montrer l'évolution dans le temps d'un paysage sonore. Ce qui permet de perpétuer des sons oubliés d'une autre époque. Il serait notamment possible par l'écologie sonore de reconnaître les époques par les sons qui les constituent, et donc, par leur environnement sonore. Et cela en présentant ce dernier non pas par la vue, mais uniquement par l'écoute.

¹⁰ SOLOMOS Makis, « Entre musique et écologie sonore : quelques exemples » [En ligne], *Sonorités*, N°7, 2012, p. 168.

Intrinsèquement, l'écologie sonore permet de mettre en avant l'évolution d'un paysage provoquée par l'urbanisation, la déforestation, ou le réchauffement climatique. Cela est étudié dans des articles tels que « Sonic Fictions: Shaping Collective Urban Imaginaries through Sound »¹¹ ou par le travail de Westerkamp décrit par Solomos *et al* dans leur article « Hildegard Westerkamp et l'écologie du son comme expérience »¹².

Pour continuer, l'écologie sonore est une notion qui s'est imposée difficilement dans la musique. Et cela que ce soit avec l'intégration de paysage sonore, ou d'enregistrement sur le terrain. Or, l'écologie sonore prend de plus en plus d'importance avec la production musicale 3D. Le son 3D se différencie de la stéréophonie et de la monophonie par le fait qu'il y a une tendance à reproduire une scène sonore immersive. Ce format permet alors à la scène sonore de s'exprimer complètement.

De plus, la définition de la scène sonore est assez similaire avec la définition du paysage sonore. Il s'agit d'un lieu qui se caractérise par son environnement. Cet environnement se caractérise par des effets temporels, tels que la réverbération ou le *Delay*. Mais aussi par l'esthétique de l'acoustique du lieu où ont été captés les instruments.

Ainsi, par le son 3D, ces éléments sont beaucoup plus perceptibles. L'environnement est mis en exergue par le son 3D, ce qui implique que l'écologie sonore est une notion s'appliquant totalement à la réalisation d'une production musicale 3D.

Solomos¹³ souligne justement qu'un recentrement sur le son et sur la notion d'espace s'opère dans la musique.

Il y a une réelle importance à constituer une scène sonore en prenant en compte les notions environnementales et mentales que revêt l'écologie sonore.

J'étudierai donc dans un premier temps le rôle de l'écologie environnementale dans la production musicale 3D. Puis dans un deuxième temps, le rôle de l'écologie mentale dans la production musicale 3D.

¹¹ DUPETIT Guillaume, PANOURGIA Eleni-Ira, « Sonic Fictions: Shaping Collective Urban Imaginaries through Sound » [En ligne], *The International Journal of Social, Political and Community Agendas in the Arts*, 29 novembre 2021, Vol. 16, N° 4, pp. 35-48.

¹² DUHAUTPAS Frédérick, SOLOMOS Makis, « Hildegard Westerkamp et l'écologie du son comme expérience » [En ligne], *Musique et écologies du son. Propositions théoriques pour une écoute du monde*, Paris, L'Harmattan, 2016, pp. 75-84.

¹³ SOLOMOS Makis, « Entre musique et écologie sonore : quelques exemples » [En ligne], *Sonorités*, N°7, 2012, p. 169.

Cela dans le but de démontrer que l'écologie sonore environnementale et mentale sont des notions liées et qui sont en phase avec la production musicale 3D.

1.2 - Le son 3D et l'écologie sonore environnementale.

Schafer¹⁴ soutient dans son travail qu'un environnement acoustique s'étudie de la même manière que si on analysait les caractéristiques d'un paysage sonore. En d'autres termes, l'écologie sonore environnementale consiste à étudier les caractéristiques d'un paysage sonore.

De plus, Schafer¹⁵ souligne que l'événement sonore est défini par son environnement. Il est important de préciser que l'événement sonore est à différencier de l'objet sonore défini par Schaeffer¹⁶. L'objet sonore étant défini par sa propre nature. Tandis que l'événement sonore est caractérisé par l'environnement dans lequel il se trouve.

Dans le cadre d'une production musicale 3D, un événement sonore correspondrait à un instrument capté dans un environnement avec des propriétés assez importantes pour avoir un rôle sur la perception de cet instrument.

Vis à vis de ce type de production, la notion d'écologie sonore environnementale prend beaucoup de sens, étant donné que l'environnement est mis en exergue via le son 3D.

L'environnement aura donc un fort impact sur la spatialisation des sources sonores et sur le champ diffus composant la scène sonore d'une production musicale 3D.

De plus, les propriétés de l'environnement considéré permettent de mettre des images sur le paysage sonore afin de connaître son origine.

Pour autant, ce point sera étudié plus profondément dans la Section 1.3.

En d'autres termes, par l'écologie sonore environnementale, les concepts d'événements sonores et d'environnement sont à considérer dans le cadre d'une production musicale 3D.

¹⁴ SCHAFER R. Murray, *The Soundscape. Our Sonic Environment and the Tuning of the World*, Destiny Books, 1 octobre 1993, 9780892814558, p. 131.

¹⁵ *Ibid.*

¹⁶ SCHAEFFER Pierre, *Solfège de l'objet sonore*, Trois Microsilons d'Exemples Sonores, Paris, 1967, 2869380011.

Solomos¹⁷ va dans ce sens et souligne que la musique s'intéresse de plus en plus à l'environnement qui l'entoure, et cela, jusqu'à l'interaction. Par exemple, dans le cadre du projet que j'ai réalisé avec Jérémie Porat pour son mémoire Master 2, le lieu, et donc, l'environnement, ont été choisis afin que le champ diffus présente une forte empreinte acoustique sur les instruments. Cela dans le but qu'il y ait une interaction entre les sources sonores et le champ diffus de l'environnement en question. Il serait alors tout à fait possible de qualifier les instruments d'événements sonores.

Pour continuer, la réverbération est quelque chose de propre à chaque environnement et elle est tout à fait perceptible par l'homme. Elle permet de caractériser avec plus ou moins de certitude un environnement et elle peut avoir un impact très important sur des instruments spatialisés dans une scène sonore 3D. Or, il se trouve que la réverbération est un phénomène impliquant à partir d'un certain temps l'apparition d'un champ diffus. Cela met en évidence le fait qu'un environnement sonore peut être fortement caractérisé par le champ diffus qui le constitue.

L'écologie sonore environnementale prend alors tout son sens vis-à-vis de la réverbération et du champ diffus dans une production musicale 3D.

En effet, une véritable attention devra être portée à la réverbération dans le son 3D puisque celle-ci permettra de caractériser l'environnement d'une scène sonore 3D.

Dans la production musicale, il est aussi important de ne pas sous-estimer l'importance esthétique que peut présenter l'empreinte acoustique d'un environnement.

Les propriétés d'un environnement influent sur la perception du paysage sonore. Par exemple, l'architecture et les matériaux constituant un environnement présentent un rôle important vis-à-vis de la réverbération, et donc, de la formation du champ diffus.

En effet, Solomos¹⁸ considère l'empreinte acoustique et la réverbération d'un environnement comme étant un signe de vie de celui-ci.

¹⁷ SOLOMOS Makis, « Entre musique et écologie sonore : quelques exemples » [En ligne], *Sonorités*, N°7, 2012, p. 170.

¹⁸ *Ibid.*, p. 183.

Karapostoli *et al*¹⁹ rejoignent les propos de Solomos²⁰ et expliquent par les propos de Gaston Bachelard que l'environnement devrait être perçu comme n'étant pas neutre, mais comme étant l'élément majeur d'un paysage sonore, en raison de son empreinte acoustique sur les événements sonores, et donc, de sa réverbération. Par conséquent, l'environnement est considéré comme permettant l'expérience du lieu. Celui-ci permet alors de faire vivre le paysage sonore, de le caractériser, d'en tirer une expérience d'écoute.

Cette idée est très importante dans le cadre d'une production musicale 3D car elle justifierait ou non une captation ambisonique des instrumentistes en *Big Band*. Cet élément prouve qu'il est important de prendre en compte l'environnement dans la captation d'une scène sonore en 3D.

De plus, Karapostoli *et al*²¹ soulignent par les propos de Forsyth²² que l'empreinte acoustique d'un environnement tel qu'une pièce aura un fort impact sur la musique. Mais aussi que l'esthétique de cet impact varie en fonction du type d'acoustique de l'environnement.

Alors, du fait de la réverbération, l'architecture présente un rôle important sur l'environnement d'un paysage sonore, et donc, sur une scène sonore réalisée dans le cadre d'une production musicale 3D.

En effet, les auteurs²³ soutiennent que l'architecture et l'environnement entretiennent une forte relation. De telle sorte que les musiciens et les artistes doivent prendre en compte l'architecture, et donc, l'environnement sur la musique.

Cette idée démontre qu'il est tout à fait important de prendre en compte l'acoustique du studio où se réalise la captation des instruments dans le cadre d'une production musicale. L'architecture et l'acoustique qu'un studio renvoie auront un impact sur la musique.

¹⁹ KARAPOSTOLI Aimilia, TSINIKAS Nikolaos P., « Relations between sonic environment and architectural space regarding architecture and music composition », *Musique et écologies du son. Propositions théoriques pour une écoute du monde*, Paris, L'Harmattan, 2016, 2013, Section 2.1, p. 170.

²⁰ SOLOMOS Makis, « Entre musique et écologie sonore : quelques exemples » [En ligne], *Sonorités*, N°7, 2012, p. 183.

²¹ *Op. cit.*, Section 2.3, p. 172.

²² FORSYTH Michael, *Buildings for music. Architect, the musician and the listener from seventeen century to the present day*, Cambridge, The M.I.T. Press, 1985, 9780262561877.

²³ *Op. cit.*, Section 4, p. 178.

D'après les études de Westerkamp, Solomos *et al*²⁴ présentent aussi le fait que l'environnement peut avoir une grande influence sur la musicalité d'une œuvre. En effet, Westerkamp utilise comme exemple son souffle dans une pièce. Elle remarque alors que la musicalité de son souffle est modifiée par les qualités acoustiques de l'environnement qui l'entourent. Elle soutient alors que l'instrument (ici son souffle) et l'environnement interagissent entre eux de façon à ce qu'il ne soit plus qu'un. Cela montre en tout point que l'environnement impact la réalisation d'une production musicale 3D.

L'environnement caractérise le paysage sonore, par sa réverbération, par son empreinte acoustique sur les événements sonores. Il suffit de comparer l'acoustique d'une chambre anéchoïque avec l'acoustique d'une église pour se rendre compte à quel point certains éléments influent sur l'acoustique que renvoie l'environnement. Il faudra tenir compte de ces considérations lors de la réalisation d'une scène sonore dans le cadre d'une production musicale 3D.

En effet, l'écologie sonore environnementale est un concept omniprésent dans la production musicale 3D. Une attention particulière devra être portée à l'acoustique de l'environnement avant la captation d'une œuvre en 3D. Cela afin de laisser place à des choix esthétiques sur la réverbération. Notamment sur l'empreinte acoustique de l'environnement sur les instruments.

L'écologie sonore environnementale est donc un concept abordant l'environnement sonore et son impact esthétique sur l'espace et sur les événements sonores du paysage sonore. Le lien étroit entre le paysage sonore et la scène sonore permet de faire le rapprochement avec la production musicale 3D.

Cependant, l'écologie sonore environnementale n'est pas la seule notion permettant l'étude d'une scène sonore 3D. En effet, l'écologie sonore mentale est importante à prendre en compte lors de l'analyse d'un paysage sonore, et donc, lors de la constitution d'une scène sonore pour une production musicale 3D.

²⁴ DUHAUTPAS Frédéric, SOLOMOS Makis, « Hildegard Westerkamp et l'écologie du son comme expérience » [En ligne], *Musique et écologies du son. Propositions théoriques pour une écoute du monde*, Paris, L'Harmattan, 2016, Section 2.2, p. 77.

1.3 - Le son 3D et l'écologie sonore mentale.

Le paysage sonore se caractérise par l'étude de l'écologie sonore environnementale, mais aussi par l'écologie sonore mentale.

L'écologie sonore mentale est une notion qui, tout comme l'écologie sonore environnementale, permet d'analyser une scène sonore réalisée dans le cadre d'une production musicale 3D. Cette analyse porte sur les sensations, la perception à laquelle renvoie un paysage sonore.

Germain²⁵ explique alors que le paysage sonore va former un grand espace sonore spatialisé qui provoquera chez l'auditeur la sensation d'être dans un lieu, un panorama ou un paysage.

Ces sensations sont alors causées par la nature de l'environnement et par les événements sonores. Germain²⁶ souligne que par un mécanisme d'association le cerveau crée des images correspondant à ce que l'auditeur écoute. La nature de ces images dépendra alors de ce qui a déjà été vécu, expérimenté par l'auditeur.

Les sensations étant des choses subjectives, elles seront façonnées en fonction de notre expérience de vie. Pour autant, les paysages sonores renvoient généralement à des sensations qui sont communes à tous les auditeurs.

En conséquence, il est compréhensible que l'écologie sonore mentale et environnementale soient deux notions liées.

Ainsi, le but de l'écologie sonore mentale serait de comprendre quels sont les processus qui sont à l'origine de l'association du paysage sonore à certaines sensations. Cette étude pourrait être primordiale dans le contexte de production d'une création musicale. Cela permettrait de choisir un paysage sonore de telle sorte que la captation sonore de celui-ci présente des propriétés qui mèneraient à une sensation recherchée par le producteur. Cela laisse aussi entrevoir qu'un lien subsiste bien entre l'écologie sonore mentale et environnementale.

Présentons rapidement un exemple assez simple soulignant le fait qu'écologies sonores mentale et environnementale sont liées.

Lors de la captation d'un paysage sonore qui se trouve dans la nature, en général une sensation de plénitude, de calme ou encore de bien-être sera observée chez les

²⁵ GERMAIN Emiliano, « La musique : un environnement acoustique et un espace mental », *La musique : art du temps ou art de l'espace*, Université Lumière-Lyon-II, JOUBERT Muriel, 2018, p. 36.

²⁶ *Ibid.*, pp. 36-37.

auditeurs. Ce phénomène indiquerait que l'environnement et les objets sonores constituant ce type de paysage sonore amènent à cette sensation « mentale ». Il serait possible de partir de ces considérations d'apporter cette sensation de plénitude dans la réalisation d'une musique 3D. Cela conforte l'idée qu'il est plus que nécessaire de considérer l'écologie sonore mentale et environnementale pour la production d'une oeuvre musicale 3D.

Hildegard Westerkamp a théorisé sur l'écologie sonore. Elle a démontré l'importance de l'écologie sonore mentale et environnementale dans la musique.

Solomos *et al*²⁷ présentent dans leur article le travail réalisé par Westerkamp. Elle soutient que la musique permet de faire l'expérience d'un lieu grâce aux images renvoyées par les éléments acoustiques de l'environnement qui constituent le paysage sonore. Westerkamp précise alors qu'un environnement est constitué de voix permettant de parler du lieu, et nous renvoie à notre propre expérience personnelle vis-à-vis de ce dernier.

Les voix définissant l'environnement sont à l'origine d'un processus mental qui nous permet d'avoir une représentation du paysage sonore par des émotions, des images ou des symboles. Cette observation illustre le lien important entre l'écologie sonore environnementale et mentale, la convergence entre l'environnement sonore et le point de vue mental de chacun.

Solomos *et al*²⁸ appuient les propos de Westerkamp quand elle affirme que la musique est capable de renvoyer à l'expérience d'un lieu, et cela, par un processus mental qui se réalise lors de l'écoute d'un environnement. La *Soundscape composition* serait l'état d'art musical mettant en exergue l'écologie sonore environnementale et mentale. Or, ce mouvement s'approprie de plus en plus le son 3D puisque ce type de production correspond tout à fait à la logique promue par l'ambition de reproduire un paysage sonore.

Encore une fois, tout laisse à penser que l'écologie sonore et ses variantes sont des concepts s'associant parfaitement à la production musicale 3D.

Pour mieux représenter le lien entre l'écologie sonore environnementale et mentale, Solomos et Duhautpas prennent pour exemple l'œuvre *Beneath the Forest Floor* de

²⁷ DUHAUTPAS Frédéric, SOLOMOS Makis, « Hildegard Westerkamp et l'écologie du son comme expérience » [En ligne], *Musique et écologies du son. Propositions théoriques pour une écoute du monde*, Paris, L'Harmattan, 2016, pp. 75-84.

²⁸ *Ibid.*, Section 1, p. 76.

Westerkamp. Cette oeuvre présente un environnement naturel. Il est possible d'y écouter la forêt, les oiseaux, les insectes ou encore l'eau qui ruisselle. À l'écoute, les auteurs expliquent que l'environnement a un impact mental : « En un sens, ces sons semblent évoquer la lumière et la force vitale de la forêt. Globalement, l'interaction de ces sons contribue à créer une atmosphère à la fois paisible, calme, mystérieuse, éthérée et irréelle. »²⁹.

A travers cette oeuvre, Westerkamp applique les concepts de l'écologie sonore environnementale et mentale afin d'apporter une sensation de paix et de méditation chez l'auditeur. Elle prouve que ces notions peuvent véhiculer des sensations, ou des images. Ces idées sont parfaitement réutilisables dans le cadre d'une production musicale 3D. Notamment, par la considération du champ diffus dans une oeuvre musicale 3D.

Solomos *et al*³⁰ vont en ce sens. L'idée proposée par Westerkamp de prendre en compte l'écologie sonore environnementale et mentale dans la conception d'une scène sonore pour une oeuvre musicale est nécessaire. Germain³¹ soutient aussi cette idée. Il explique qu'avec une attention portée à l'écologie sonore environnementale et mentale sur un paysage sonore, on peut obtenir une forte puissance narrative avec un début et une fin.

L'inclusion de ces concepts dans le cadre d'une production musicale 3D permettrait de transmettre le plus correctement possible les sensations mentales qu'est censé véhiculer l'environnement d'une scène sonore 3D. Cela pourrait aussi servir la musique mais aussi par l'ajout d'une dimension narrative et immersive.

Le travail sur l'architecture de Karapostoli *et al*³², cité en amont, démontre l'influence de l'architecture sur l'écologie sonore environnementale. Karapostoli *et al*³³ justifient leur propos par l'école de la phénoménologie apparue au début des années 1900.

²⁹ DUHAUTPAS Frédérick, SOLOMOS Makis, « Hildegard Westerkamp et l'écologie du son comme expérience » [En ligne], *Musique et écologies du son. Propositions théoriques pour une écoute du monde*, Paris, L'Harmattan, 2016, Section 3.1, p. 80.

³⁰ *Ibid.*, Section 3.3, p. 83.

³¹ GERMAIN Emiliano, « La musique : un environnement acoustique et un espace mental », *La musique : art du temps ou art de l'espace*, Université Lumière-Lyon-II, JOUBERT Muriel, 2018, p. 38.

³² KARAPOSTOLI Aimilia, TSINIKAS Nikolaos P., « Relations between sonic environment and architectural space regarding architecture and music composition », *Musique et écologies du son. Propositions théoriques pour une écoute du monde*, Paris, L'Harmattan, 2016, 2013, pp. 169-179.

³³ *Ibid.*, Section 2.1, p. 170.

L'école de la phénoménologie étudie la structure de la conscience et de l'expérience. À partir des années 1950, le mouvement prend alors en importance chez les architectes contemporains. Ces derniers transposent ces notions à l'architecture. Ils soutiennent que l'architecture définit l'environnement au niveau de ses caractéristiques mais aussi au niveau sensoriel.

Solomos³⁴ partage le même propos et souligne que les sons ont un impact sur la perception du lieu. Ils permettent de qualifier ou de disqualifier un environnement.

Par exemple, la réverbération permettra de distinguer une église d'une chambre anéchoïque. De même, distinguer les sons des oiseaux, du mouvement des feuilles dans une réverbération présentant un champ diffus, permettra de caractériser le paysage sonore comme étant une forêt. L'association de l'environnement à un lieu est un mécanisme mental. Elle est permise par différentes informations sonores qui permettent de caractériser l'environnement sonore. Elle démontre que l'écologie sonore mentale et environnementale sont deux notions qui se complètent.

Il est donc compréhensible que l'écologie sonore est un concept tout à fait applicable au cadre d'une production musicale 3D. Ces idées démontrent notamment que les événements sonores et l'environnement d'une scène 3D auront un impact sur les sensations renvoyées à l'auditeur.

Pour conclure leur article, Karapostoli *et al*³⁵ démontrent par le biais d'une expérience que l'environnement a bien une influence sur les sensations perçues, et donc, sur l'écologie mentale. Cela est alors réalisé en mettant en avant le lien entre l'écologie sonore mentale et environnementale.

Les auteurs démontrent qu'une population sensible aux notions architecturales décrira l'acoustique pour décrire l'architecture du lieu. De plus, la majorité de la population précise que le son renvoyé par un environnement est l'une des principales caractéristiques de l'architecture. Par conséquent, cette expérience prouve que l'acoustique, et donc, les sensations renvoyées par les sons de l'environnement d'un paysage sonore nous permettent de décrire ce dernier. Ce qui démontre que la perception mentale d'un paysage sonore doit être prise en compte.

³⁴ SOLOMOS Makis, « Entre musique et écologie sonore : quelques exemples » [En ligne], *Sonorités*, N°7, 2012, p. 183.

³⁵ KARAPOSTOLI Aimilia, TSINIKAS Nikolaos P., « Relations between sonic environment and architectural space regarding architecture and music composition », *Musique et écologies du son. Propositions théoriques pour une écoute du monde*, Paris, L'Harmattan, 2016, 2013, Section 4, p. 178.

L'écologie sonore mentale est donc fondamentale pour la production musicale 3D. Cette notion permet d'étudier quelles seront à l'écoute les sensations associées au paysage sonore et à son environnement. Ces sensations seront par exemple provoquées par la présence d'une réverbération ou bien par les événements sonores constituant le paysage sonore. Les sensations différeront en fonction des éléments constituant l'environnement sonore.

On met en évidence l'existence d'un lien entre l'écologie sonore environnementale et mentale. Ces sensations renvoyées par un paysage sonore urbain et naturel sont tout à fait différentes. Ce qui démontre l'impact de l'environnement sur les sensations mentales perçues.

En définitive, l'écologie sonore environnementale et mentale sont des concepts pouvant s'intégrer parfaitement à la réalisation d'une scène sonore en vue d'une oeuvre musicale 3D. Le lien qui s'effectue entre ces deux types d'écologies sonores, l'écologie sonore environnementale et mentale sont deux éléments qui ont tout intérêt à être omniprésents dans la production musicale 3D. Comme ce format met en exergue l'acoustique d'un environnement, il serait intéressant de porter un intérêt particulier sur l'environnement et les sensations qu'il renvoie. Cela afin que l'intention artistique soit exprimée de la meilleure manière par l'artiste. L'esthétique de la réverbération et de son champ diffus, et donc, de l'empreinte acoustique de l'environnement sur les instruments sont des éléments non négligeable et perceptibles. Ce qui démontre aussi l'importance du rôle de l'acoustique du studio d'enregistrement dans une production musicale.

1.4 - Conclusion et ouverture.

Dans un premier temps, la notion d'écologie sonore environnementale aura été définie. Cela afin de démontrer en quoi ce concept est important et comment il s'applique à la production musicale 3D. Cela aura permis de démontrer que la production musicale 3D met en avant une scène sonore 3D qui correspondrait à un environnement similaire à celui défini par l'écologie sonore environnementale. Par conséquent, de par sa réverbération et de par son empreinte acoustique sur les événements sonores, l'environnement aura un impact perceptible sur une oeuvre musicale, et encore plus si elle est 3D. En effet, il a été vu dans ce travail que le son

3D se différencie de la stéréophonie et de la monophonie par le fait qu'il reproduit une scène sonore immersive.

Ainsi, l'environnement variera en fonction des éléments le constituant, tels que l'architecture, les matériaux ou tout simplement le positionnement des sources dans l'espace. Ce qui implique qu'une attention particulière soit émise sur le lieu de la captation sonore. Cela se traduit dans la production musicale par une analyse des caractéristiques du studio d'enregistrement et de son acoustique. Tels que son taux de réverbération et le caractère « idéal » ou non du champ diffus. Cela afin d'avoir une attention sur l'esthétique de l'environnement sonore d'une oeuvre musicale 3D. Par conséquent, ces considérations sur l'environnement sonore sont à prendre en compte lors de la réalisation d'une scène sonore dans le cadre d'une production musicale 3D.

Dans un second temps, la notion d'écologie sonore mentale aura été définie. Cela afin de démontrer en quoi ce concept s'applique à la production musicale 3D. L'écologie sonore mentale permet d'étudier quelles seront à l'écoute les sensations associées au paysage sonore et à son environnement. Ces sensations seront par exemple provoquées par la présence d'une réverbération, d'une résonance ou bien par les événements sonores constituant le paysage sonore. Elles dépendront donc des informations décrivant l'environnement sonore. Cette dernière partie aura alors permis de démontrer que l'écologie sonore mentale et environnementale sont deux concepts liés, dépendant l'un de l'autre, à prendre en compte lors de la production musicale 3D.

En conclusion, l'écologie environnementale et mentale permet d'avoir un regard sur l'environnement et les sensations qu'il renvoie. Ces sensations auront alors un impact mental sur l'auditeur. Cet impact doit être perceptible dans une production musicale 3D. Si on décide de porter un intérêt plus particulier sur l'environnement et les sensations réverbérés, alors l'intention artistique exprimée par l'artiste sera rendue de la meilleure manière. L'importance du rôle de l'acoustique du studio d'enregistrement est donc majeure dans une production musicale.

Le champ diffus, la réverbération, l'impact acoustique d'un studio sur les instruments enregistrés sont des éléments nécessaires à la réalisation d'une oeuvre musicale 3D.

Ces observations amènent aussi à réfléchir sur l'optimisation de l'immersion dans

la scène sonore dans une production musicale 3D, afin qu'elle exprime au mieux les intentions artistiques et esthétiques de l'artiste et/ou de l'ingénieur du son.

Ces optimisations se réaliseraient par un contrôle optimal du champ diffus et de la perception de la spatialisation des instruments. Dans ce mémoire de Master 2, il sera proposé des méthodes permettant le contrôle des impressions spatiales ainsi que des éléments physiques composant une scène sonore 3D telle que le champ diffus. Pour une meilleure optimisation de la production musicale 3D, on déterminera si on doit se concentrer sur l'amélioration des propriétés du champ diffus ou sur l'amélioration de nos connaissances perceptives pour spatialiser au mieux les instruments sonores. Ce qui permettrait d'éviter des effets indésirables pouvant détériorer l'immersion sonore.

II - LE CHAMP DIFFUS, SES PRINCIPES THÉORIQUES ET SES DIFFÉRENTES CARACTÉRISTIQUES.

A - Les principes théoriques que revêt le champ diffus.

Le champ diffus est un élément omniprésent dans l'acoustique des salles. Il est très souvent associé à la réverbération ou encore à la réverbérance.

Cette notion fait appel à plusieurs notions scientifiques qui sont souvent résumées vulgairement par le terme « aléatoire », ce qui mène à des incompréhensions.

En effet, Chu³⁶ explique que le terme « aléatoire » a toujours été évité car c'est un terme qui peut porter à confusion. Le terme aléatoire est souvent utilisé, pour résumer le fait que le champ diffus est composé d'une multitude d'ondes planes décorréées. De plus, le terme « phase aléatoire » est généralement utilisé sans être spécifié. Ainsi, Chu³⁷ en utilisant cette locution veut signifier que les relations de phases des ondes planes constituent un ensemble fixe de variables aléatoires corrélées.

Des divergences apparaissent entre les différents documents scientifiques sur cette notion. Comme l'explique Avelar *et al.*³⁸, les concepts que revêt le champ diffus sont encore flous. Cela se justifie par une variation importante entre les différents résultats expérimentaux réalisés pour caractériser le champ diffus et sa « diffusion ». Cette variation s'explique notamment par l'application de différentes méthodes de mesures entre les scientifiques.

La distance critique est aussi une notion accompagnant le champ diffus. Celle-ci correspond à la distance vis-à-vis d'une source sonore à partir de laquelle l'énergie du champ direct est égale à celle du champ diffus. Au-delà de cette distance la perception du champ direct et la localisation de la source sonore ne sont plus possibles. Cette notion ne sera pas développée davantage dans ce mémoire.

Dans cette partie, particulièrement avec la Section 2.A.1, il sera proposé une définition claire et précise du champ diffus afin que cette notion puisse être bien com-

³⁶ CHU Wing T., « Comments on the coherent and incoherent nature of a reverberant sound field » [En ligne], *Journal of the Acoustical Society of America*, Juin 1981, Vol. 69, N°9, Section 4, p.1714.

³⁷ *Ibid.*

³⁸ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 1, p. 2.

prise dans la production musicale. Mais aussi, il sera relevé les notions scientifiques principales caractérisant le champ diffus afin de les étudier plus profondément dans la Section 2.A.2.

2.A.1 - Les différentes définitions du champ diffus et proposition d'une définition englobant toutes les propositions scientifiques.

Afin de proposer une définition du champ diffus cohérente avec les différents travaux scientifiques réalisés sur le sujet, cette partie compilera plusieurs définitions afin d'observer les points sur lesquels les auteurs se rejoignent et divergent.

A la fin de cette partie, il sera proposé une définition du champ diffus découlant du travail de recherche que j'ai pu réaliser. Les principales notions scientifiques caractérisant le champ diffus seront étudiées plus en détail.

Jérôme Daniel³⁹ propose dans sa thèse une explication faisant le lien entre la réverbération et le champ diffus.

Il définit la réverbération tardive comme étant un état où la densité temporelle des réflexions provoquées par une source sonore est telle, qu'elles ne sont plus dissociables. Il souligne alors que dans cet état, les propriétés de la réverbération tardive ne dépendent plus de la position de la source. La réverbération tardive serait donc un état du champ sonore qui ne dépendrait uniquement que des caractéristiques de la salle : son volume, les matériaux la constituant (absorption).

Jérôme Daniel⁴⁰ explique alors que la réverbération tardive peut présenter des propriétés qui lui permettraient d'être caractérisées comme étant un champ diffus.

L'auteur présente les propriétés permettant à la réverbération tardive d'être caractérisée comme telle. Cela implique qu'il y ait un ensemble d'ondes temporellement dense et que les incidences de ces dernières soient équiréparties dans toutes les directions, ce qui implique une qualité de diffusion des ondes. Cette diffusion est caractérisée par l'isotropie. Pour le moment, je resterai sur le terme « diffusion » avant d'explicitier le concept de l'isotropie avec l'homogénéité spatiale.

³⁹ DANIEL Jérôme, *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 31 Juillet 2001, Section 1.2.4, p. 29.

⁴⁰ *Ibid.*

François Salmon⁴¹ suit cette idée de faire lien entre la réverbération tardive et le champ diffus pour définir ce dernier. Pour cela, l'auteur cite Kuttruff⁴² et Bolt *et al*.⁴³. Ainsi, il est expliqué qu'un évènement sonore (modélisé par une réponse impulsionnelle) peut être décomposé en plusieurs régions temporelles, de manière à ce que cet évènement sonore puisse être représenté par un diagramme de réflexion tel que dans la Figure 2.1.

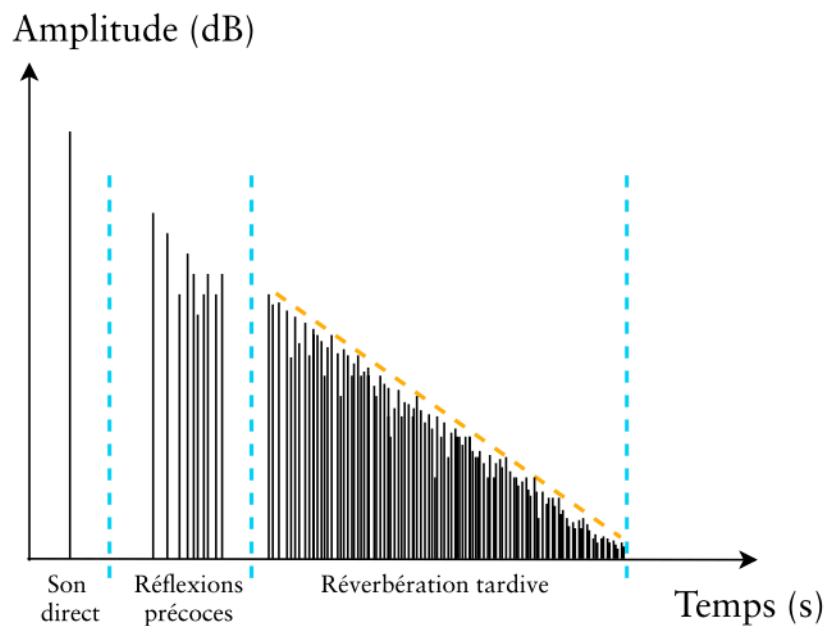


Figure 2.1 - Représentation d'un évènement sonore dans une salle en trois régions temporelles : son direct, réflexions précoces et réverbération tardive.
François Salmon © 2021

Au début de la région temporelle, l'évènement sonore est perçu comme un son direct. C'est à dire, que ce son est dépourvu de réflexions.

Le son direct est ensuite suivi de réflexions précoces. Salmon⁴⁴ mentionne que ces réflexions précoces ont pour particularité d'être sporadiques et de provenir de directions distinctes qui sont déterminées par la géométrie de la pièce. Leurs caractéristiques comme le retard, l'incidence et l'amplitude ont une influence sur notre per-

⁴¹ SALMON François, Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.1.1, p. 20.

⁴² KUTTRUFF Heinrich, *Room Acoustics*, Spon Press, Londres, Angleterre, Quatrième édition, 2000, 0419245804.

⁴³ BOLT Richard H., DOAK Philippe E., WESTERVELT Peter J., « Pulse Statistics Analysis of Room Acoustics » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1950, Vol. 22, pp. 328-340.

⁴⁴ *Op. cit.*, Section 1.1.1, p. 21.

ception de l'espace, et donc, sur la perception spatiale. Pour autant, cette notion sera approfondie dans la Section 3 de ce mémoire.

Romain Deprez⁴⁵ présente une notion assez intéressante sur les réflexions précoces: contrairement à la réverbération tardive, les caractéristiques précises des réflexions précoces ne sont pas modélisables statistiquement et sont extrêmement dépendantes de la forme de la salle. Cela corrobore les propos de Salmon⁴⁶.

Deprez⁴⁷ pointe le fait que pour des salles de dimensions similaires et de coefficient moyen d'absorption proche, la réverbération tardive présentera des valeurs qui ne varieront que très peu, tandis que les premières réflexions seront beaucoup plus sujettes à variation. Il sera remarqué plus loin que les réflexions précoces, de par leur variation, fournissent un grand nombre d'information pour la perception sonore. Par exemple, elles permettent en partie la perception des dimensions du lieu.

La dernière région temporelle est la réverbération tardive, et comme le présente Daniel⁴⁸ dans sa Thèse, Salmon⁴⁹ souligne que cette région peut présenter des propriétés de champ diffus.

En effet, à partir d'un certain temps, le champ sonore se caractérise comme étant diffus. Il se constitue alors d'un grand nombre d'ondes sonores décorréélées au niveau de leur amplitude, de leur fréquence et de leur phase. En citant Schultz⁵⁰, l'auteur explicite que les ondes composant le champ diffus sont des ondes planes qui se superposent avec des directions de propagations équiprobables et des relations de phases qui sont aléatoires en tout point de la pièce. Cette équiprobabilité implique qu'il y ait une distribution aléatoire de l'énergie dans l'espace. Cependant, il est précisé par Salmon⁵¹, que cela n'est pas une science exacte. Cela est décrit par

⁴⁵ DEPREZ Romain, *Optimisation perceptive de la restitution sonore multicanale par une analyse spatio-temporelle des premières réflexions* [En ligne], Directeur de Thèse : FRIOT Emmanuel, NICOL Rozenn, France : Université d'Aix-Marseille, Thèse de Doctorat, 07 Décembre 2012, Section 2.B.1, p. 16.

⁴⁶ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.1.1, p. 20.

⁴⁷ *Op. cit.*

⁴⁸ DANIEL Jérôme, *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 31 Juillet 2001, Section 1.2.4, p. 29.

⁴⁹ *Op. cit.*

⁵⁰ SCHULTZ Theodore J., « Diffusion in reverberation rooms » [En ligne], *Journal of Sound and Vibration*, 08 Mai 1971, Vol. 16, N°1, pp.17-28.

⁵¹ *Op. cit.*, Section 1.1.1, p. 21.

la notion d'isotropie qui caractérise le degré de diffusion dans le champ diffus (lorsque un champ diffus est caractérisé par une distribution aléatoire de l'énergie dans l'espace qui n'est pas uniforme, alors celui-ci est défini d'anisotrope). Ce concept sera étudié plus en profondeur par la suite dans la Section 2.A.2.

Salmon⁵² cite Schroeder⁵³ pour apporter une définition statistique du champ diffus. Il explique alors que du point de vue temporel et spatial le champ diffus se caractérise par un modèle stochastique.

Il est important de souligner que Schroeder est l'un des premiers auteurs à mettre en avant une définition statistique du champ diffus. À tel point que ce parallèle entre statistique et champ diffus est devenu courant. En outre, le champ diffus s'analyse de deux manières différentes, en fonction des basses et des hautes fréquences : dans les basses fréquences, le champ diffus est caractérisé par les modes propres, et donc, par les ondes stationnaires. Dans les hautes fréquences le champ diffus est caractérisé par des comportements statistiques.

Cela sera abordé plus loin dans la Section 2.B.

Enfin, Salmon⁵⁴ apporte une notion très intéressante qui est souvent peu abordée : le temps de mélange. Cette notion correspond au temps de transition des réflexions précoces vers la réverbération tardive, et donc, vers le champ diffus. En d'autres termes, le temps de mélange caractérise le temps de transition d'un champ sonore vers des propriétés de champ diffus.

Ces deux notions seront abordées plus précisément dans la Section 2.B.4.

Avelar *et al.*⁵⁵ citent Finn Jacobsen⁵⁶ dans leur document afin de donner une définition d'un champ sonore diffus. Il faut pour cela que, dans un premier temps, il y ait une probabilité égale du flux d'énergie et cela dans toutes les directions. Puis dans un deuxième temps, il est précisé que le caractère diffus du champ sonore implique

⁵² SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.1.1, p. 22.

⁵³ SCHROEDER Manfred R., « Statistical parameters of the frequency response curves of large rooms » [En ligne], *Journal of The Audio Engineering Society*, 1987, Vol. 35, N°5, pp. 299-306.

⁵⁴ *Op. cit.*

⁵⁵ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 3, p. 3.

⁵⁶ JACOBSEN Finn, *The Diffuse Sound Field: Statistical Considerations Concerning the Reverberant Field in the Steady State*, Technical University of Denmark, Danemark : Copenhagen, 1979.

qu'il contienne une quantité infinie d'ondes planes se propageant avec des phases liées de manière aléatoire provenant de directions uniformément réparties.

Quant à Finn Jacobsen et Thibaut Roisin⁵⁷, ils expliquent que le champ diffus est perçu comment venant de toutes les directions. Ce qui voudrait dire que le champ diffus aurait des propriétés donnant une sensation englobante (Cela sera étudié plus profondément en Section 3.A.6 et 3.B.2). De plus, il est expliqué qu'il n'y a pas de phénomène d'interférence. Ce qui permet au champ diffus de présenter des caractéristiques homogènes et isotropes avec une intensité sonore moyennée dans le temps, nulle, en tout point de la salle. Cela implique que le niveau de la pression sonore soit identique partout dans la salle et que les fonctions de corrélations temporelles dépendent uniquement de la distance entre les deux points de mesures. Les fonctions de corrélations temporelles seront étudiées dans la Section 2.B.2

De leur côté, Néliss et Nicolas⁵⁸ rassemblent les travaux de Kuttruff⁵⁹, Pierce⁶⁰ et Beranek⁶¹ afin de donner une définition du champ diffus. Il est explicité qu'un champ acoustique peut être considéré comme diffus dans un volume V , à partir du moment où la densité d'énergie est identique en tout point de V . Les auteurs soulignent alors qu'un champ diffus suit le principe d'une superposition d'un nombre infini d'ondes planes ayant des directions de propagations également probables avec des relations de phase aléatoires.

La Thèse de Romblom livre une définition du champ diffus d'un point de vue physique et mathématique. L'auteur, citant Pierce⁶², explique que le champ diffus est provoqué par une multitude de réflexions provenant d'une source acoustique dans un espace clos. Ce type de champ sonore peut alors se résumer comme étant un incident énergétique incohérent et provenant de toutes les directions de manière

⁵⁷ JACOBSEN Finn, ROISIN Thibaut, « The coherence of reverberant sound fields » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Juillet 2000, Vol. 108, N° 1, Section 2.A, p. 204.

⁵⁸ NÉLISSE Hugues, NICOLAS Jean, « Characterization of a diffuse field in a reverberant room » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Juin 1997, Vol. 101, N° 6, Section 1, p. 3517.

⁵⁹ KUTTRUFF Heinrich, *Room Acoustics*, Spon Press, Londres, Angleterre, Quatrième édition, 2000, 0419245804.

⁶⁰ PIERCE Allan, *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*, Acoustical Society of America, États-Unis : New York, Troisième édition, 1989, 0883186128.

⁶¹ ISTVÁN VÉR L., BERANEK Leo L., *Noise and Vibration Control Engineering Principles and Applications*, John Wiley & Sons, Deuxième édition, 28 Octobre 2005, 9780471449423.

⁶² *Op. cit.*

égale. Ce qui vient à rejoindre les propos de Daniel⁶³ sur les propriétés des ondes composant le champ diffus.

Plus loin dans sa Thèse, Romblom⁶⁴ ajoute que le champ diffus est la résultante d'une superposition d'ondes planes q ayant des directions, des amplitudes et des phases complètement aléatoires. Par conséquent, pour un champ diffus de fréquence constante, la pression complexe \hat{p} s'exprime par l'équation 2.1 :

$$\hat{p} = \sum_{q=1}^Q \hat{p}_q e^{\mathbf{n}_q \cdot \mathbf{r}} \quad (2.1)$$

Avec \hat{p}_q représentant l'amplitude complexe de la q onde plane, \mathbf{n}_q le vecteur directionnel de la q onde plane et \mathbf{r} le vecteur pointant vers le point d'observation.

Pour finir, je proposerai une définition précise et actuelle fournie par Alexis Baskind dans sa Thèse en 2003.

Baskind⁶⁵ définit le champ diffus comment étant uniforme et isotrope. Cela implique selon lui que l'énergie soit répartie de manière égale en tout point dans la salle. Il ajoute que les phases sont distribuées de manière aléatoire. Les incidences des ondes sont alors indépendantes en tout point et leur énergie peut être sommée.

Cela amène une notion de décorrélation entre les ondes.

Alexis Baskind⁶⁶ ajoute que la formation du champ diffus dépend de l'acoustique de la salle. Il est alors possible de favoriser la formation d'un champ diffus par l'utilisation d'une acoustique optimisant la diffusion.

Baskind⁶⁷ propose dans sa Thèse une décomposition fréquentielle et temporelle du champ diffus. Ce qui permet de souligner des comportements différents du champ diffus en fonction des ces deux paramètres. Cette proposition est illustrée par la Figure 2.2.

⁶³ DANIEL Jérôme, *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 31 Juillet 2001, Section 1.2.4, p. 29.

⁶⁴ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 4.3.2, p. 66.

⁶⁵ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.1, p. 17.

⁶⁶ *Ibid.*, Section 2.2, pp. 17-18.

⁶⁷ *Ibid.*, Section 3.1, pp. 19-20.

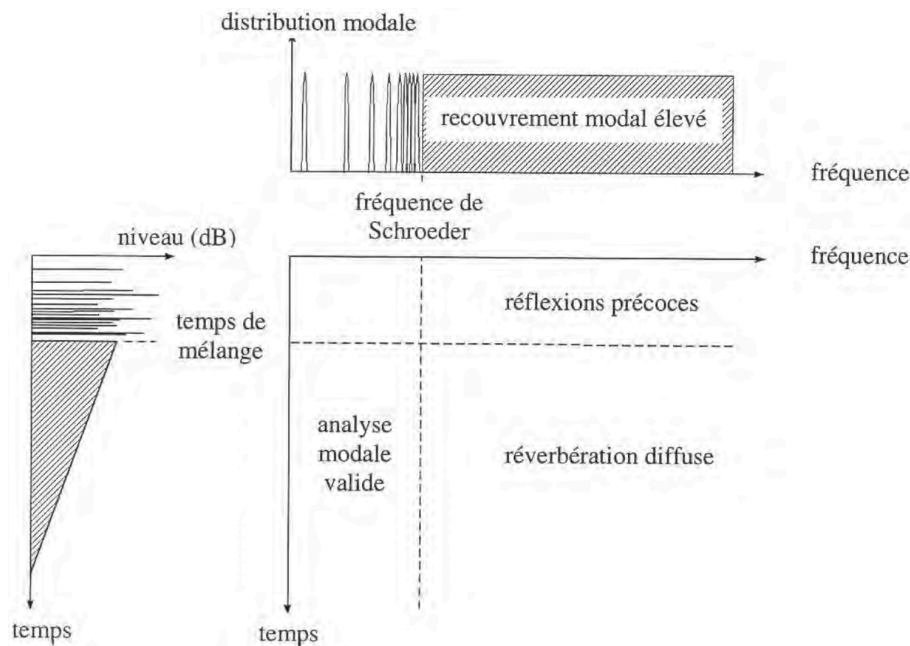


Figure 2.2 - Représentation des différents modèles pouvant caractériser le champ diffus.
Alexis Baskind © 2003

Il est important de préciser que la transition entre ces différents comportements n'est pas brusque et se fait de manière progressive.

Ainsi, dans les basses fréquences (inférieures à la limite fournie par le modèle de la fréquence de Schroeder vue en Section 2.B.1), le champ diffus suit un comportement modal. Ce comportement implique une cohérence des informations du champ diffus à différents points dans la salle. Cela vient rejoindre les propos de François Salmon⁶⁸ sur le comportement modal des ondes stationnaires du champ diffus.

Toutefois, attention aux termes cohérents et incohérents pour caractériser le champ diffus. Par exemple, le comportement modal peut aussi être décrit comme étant incohérent. Chu⁶⁹ explique que lorsque qu'un champ diffus est désigné d'incohérent, cela signifie que de nombreux modes sont excités et résonnent à leur propres fréquences, ce qui provoque une interférence entre ces modes. En d'autres termes, chaque mode contribue à la pression sonore de façon indépendante. Ces deux définitions sont correctes, pour autant, il est important de préciser notre propos lorsque l'on utilise des termes comme la cohérence, l'incohérence ou l'aléatoire.

⁶⁸ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.1.1, p. 22.

⁶⁹ CHU Wing T., « Comments on the coherent and incoherent nature of a reverberant sound field » [En ligne], *Journal of the Acoustical Society of America*, Juin 1981, Vol. 69, N°9, pp.1710-1715.

Pour continuer, Baskind⁷⁰ précise aussi qu'après l'arrivée de l'onde directe, pour une durée inférieure au temps de mélange (lorsque le champ sonore n'a pas encore adopté un comportement complètement diffus), le modèle spéculaire est applicable. Il explique alors que la cohérence des caractéristiques du champ sonore entre plusieurs points de la salle dépendra de plusieurs paramètres tels que : le nombre de réflexions simultanées, leur direction d'incidence et la résolution temporelle considérée. La cohérence serait donc maximale à l'arrivée de l'onde directe. Puis cette dernière décroîtrait avec le temps. Cela à cause de la multiplication et de la diffusion de nouvelles réflexions dans la salle.

Enfin, dans les moyennes et hautes fréquences, pour une durée supérieure au temps de mélange (lorsque le champ sonore est caractérisé comme diffus), le champ diffus peut être comparé à un modèle stochastique. Il est souligné qu'il n'est pas possible d'associer le champ diffus à un comportement modal ou spéculaire dans ce domaine fréquentiel et temporel.

La compilation de toutes ces connaissances permet de dégager l'idée que le champ diffus est un état du champ sonore apparaissant après la formation du champ direct de par une source sonore dans une salle. Le champ diffus se forme à cause de la multiplication et de la diffusion des premières réflexions. Cet état du champ sonore se manifeste lors de l'étape de la réverbération tardive. Ce qui amène parfois à caractériser la réverbération tardive par le terme « champ diffus ». Ce dernier se caractérisant alors par une diffusion suivant des modèles isotropes et d'homogénéité spatiale.

Cela implique une infinité d'ondes planes ayant des incidences équiréparties en tout point d'une salle. Ces ondes sont décorréélées en phase, en amplitude et en fréquence. Ainsi, le terme « aléatoire » regroupe les caractéristiques décorréélées des ondes.

L'isotropie et l'homogénéité spatiale seraient donc les propriétés du champ diffus expliquant que la pression sonore soit identique en tout point et répartie de manière égale dans la salle. De plus, les propriétés du champ diffus dépendent uniquement des caractéristiques acoustiques de la salle et du milieu de propagation (air, fumé, humidité, brouillard, concentration d'ozone, température, ...).

⁷⁰ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 3.1, pp. 19-20.

Enfin, le champ diffus se caractérise différemment en fonction du domaine fréquentiel étudié. Les ondes ont un comportement stationnaire dans les basses fréquences et statistique dans les hautes fréquences. En outre, le champ diffus et le champ direct se différencient respectivement dans les moyennes et hautes fréquences par le fait que le premier suit un comportement stochastique, tandis que le second suivra un comportement spéculaire.

Au niveau de la perception du champ diffus, il est perçu comme étant un événement auditif englobant l'auditeur. Cela s'explique notamment par les incidences et la décorrélation entre les ondes planes dans le champ diffus.

En conclusion, le champ diffus est caractérisé par des ondes suivant des propriétés isotropes et d'homogénéité spatiale. Il a donc été proposé dans cette section une définition complète du champ diffus de par les différents travaux scientifiques réunis.

Néanmoins, certaines notions restent vastes et il est important de les définir plus précisément. Ainsi, dans la Section 2.A.2 il sera défini précisément ce que sont l'isotropie et l'homogénéité spatiale.

2.A.2 - Le caractère isotrope et l'homogénéité spatiale dans le champ diffus.

Il a été observé dans la Section 2.A.1 que le champ diffus présente des propriétés isotropes et d'homogénéité spatiale. Avelar *et al.*⁷¹ citent Blauert et Xiang⁷² pour souligner que le champ diffus est composé d'ondes planes ayant statistiquement la même intensité, du fait d'un rejet des interactions entre-elles, et d'une même distribution spatiale. L'explication tient à l'isotropie et l'homogénéité spatiale. Les auteurs considèrent que l'isotropie est synonyme de diffusion dans un champ sonore.

Il sera donc expliqué dans cette section ce que revêtent ces deux notions.

Pour commencer, je définirai dans un premier de temps l'isotropie dans le champ

⁷¹ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 3, p. 3.

⁷² BLAUERT Jens, XIANG Ning, *Acoustics for Engineers*, Springer, Allemagne : Berlin, Première édition, 2008, 9783540763468.

diffus. Avelar *et al.*⁷³ citent Kuttruff^{74 75}. Ce dernier explique qu'en un point de la salle étudiée, un champ sonore peut être défini d'isotrope si l'intensité sonore différentielle I' ne dépend pas de la direction angulaire de l'onde. Cela implique que la densité d'énergie w (calculée par l'équation 2.2) et la densité d'irradiation B (calculée par l'équation 2.3) sont indépendantes de cette direction angulaire. Cette indépendance angulaire provoque aussi que I' , w et B sont constants.

$$w = \frac{1}{c} \iint_{4\pi} I'(\phi, \theta) d\Omega \quad (2.2)$$

$$B = \iint_{2\pi} I'(\phi, \theta) \cos(\theta) d\Omega \quad (2.3)$$

Dans ces deux équations Ω est l'angle solide qui dépend des angles azimutaux et polaires ϕ et θ . Dans l'équation 2.2, c correspond à la célérité du son dans l'air.

De plus, Avelar *et al.*⁷⁶ soulignent que si nous sommes dans un champ diffus isotrope dit « idéal » (cette condition implique que la densité d'énergie w est indépendante de la direction angulaire et qu'il n'y a pas de perte de gain et d'énergie proportionnelle à la distance parcourue), alors la distribution d'énergie sera identique en tout point dans la salle. Cela permettrait alors l'obtention d'un champ sonore présentant une homogénéité spatiale, illustrant ainsi le lien étroit existant entre l'isotropie et l'homogénéité spatiale. Pour autant, le champ diffus « idéal » n'existe pas. Le caractère « idéal » du champ diffus sera étudié en Section 2.C.1.

Les auteurs proposent alors un cas plus réaliste qui se rapprocherait à ce qu'implique un champ diffus caractérisé d'isotrope. L'isotropie dans un champ diffus se traduirait par « une faible variance de la densité d'énergie et de la propagation de la densité d'énergie dans toute la pièce, à la fois spatialement et temporellement. »⁷⁷.

⁷³ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 3, p. 3.

⁷⁴ KUTTRUFF Heinrich, *Acoustics : An introduction*, Taylor & Francis, États-Unis : New York, Première édition, 2007, 9780415386807.

⁷⁵ KUTTRUFF Heinrich, *Room Acoustics*, Spon Press, Angleterre : Londres, Quatrième édition, 2000, 0419245804.

⁷⁶ *Op. cit.*

⁷⁷ *Op. cit.*, Section 3, p. 4.

Traduit de l'anglais par moi-même, Camille Roch © 2023 : « a low variance of energy density and energy density propagation throughout the room, both spatially and temporally. »

Avelar *et al.*⁷⁸ expliquent que lorsque le champ diffus est décrit comme isotrope, cela signifie donc que le flux d'énergie est à peu près le même dans toutes les directions. Cette propriété est donc permise par l'équirépartie et l'équiprobabilité des incidences des ondes planes, et cela, dans toutes les directions et en tout point de la salle. Plus le caractère isotrope du champ diffus est prononcé, plus la diffusion au sein de ce dernier est importante, et vice versa.

Il est souligné par les auteurs⁷⁹ que dans un champ sonore décroissant, il n'y a pas de variance temporelle, du moins seulement pour des courts intervalles de temps. De plus, la variance de la pression sonore ne dépend que du vecteur de séparation entre deux positions $\| \mathbf{r} - \mathbf{r}_0 \|$. La valeur de la variance est donc indépendante de l'angle solide (ϕ, θ) de ce vecteur.

L'isotropie est donc une condition élémentaire à la diffusion, ce qui permettrait alors à un champ sonore d'être caractérisé de diffus. Intrinsèquement, l'isotropie est un indicateur de la diffusion d'un champ sonore.

Ainsi, après avoir défini l'isotropie dans le champ diffus, je définirai dans la suite de cette section, l'homogénéité spatiale dans le champ diffus.

Avelar *et al.*⁸⁰ citent Jeong⁸¹ et expliquent que lorsque la pression acoustique est uniforme en tout point dans une salle, alors le champ sonore présente des caractéristiques d'homogénéité spatiale. Il peut donc être désigné comme étant un champ diffus.

En d'autres termes, lorsque la pression acoustique a une faible variance et que sa valeur mesurée dans l'ensemble de la salle est petite (au plus proche de zéro) alors on peut dire que le champ sonore présente une homogénéité spatiale. À noter que l'homogénéité spatiale ne peut pas être établie si cette propriété ne persiste pas avec le temps.

Enfin, la variance dans un champ homogène ne doit dépendre que du vecteur de

⁷⁸ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 3.2, p. 4.

⁷⁹ *Ibid.*

⁸⁰ *Ibid.*, Section 3.1, p. 4.

⁸¹ JEONG Cheol-Ho, *Diffuse sound field: challenges and misconceptions* [En ligne], 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, German Acoustical Society, 2016, Allemagne : Hamburg, pp. 1015-1021.

séparation $\| \mathbf{r} - \mathbf{r}_0 \|$ entre deux positions, ce qui est similaire avec la notion d'isotropie. Il en découle que la variance ne dépend pas des positions de mesures où elle est étudiée, mais des relations entre ces différentes positions.⁸²

Avelar *et al.*⁸³ ajoutent que le terme uniformité spatiale est étroitement lié à l'homogénéité. Cela implique que l'énergie ou la densité d'énergie w soit uniforme dans l'espace considéré, et donc qu'il y ait une faible variance entre les points de mesures.

Les équations 1.4 et 1.5 soulignent la relation entre l'intensité, le flux d'énergie et la propagation :

$$\Delta \cdot \mathbf{I}(t) = - \frac{\partial w_{tot}}{\partial t}, \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} \int_S (\mathbf{I}(t) \cdot \mathbf{n}) dS &= - \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_V w_{tot}(t) dV \right) \\ &= - \frac{\partial E_a}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

Avec $\mathbf{I}(t)$ l'intensité sonore, w_{tot} la densité d'énergie, E_a l'énergie sonore totale à l'intérieur de la surface et \mathbf{n} le vecteur normal pointant vers l'extérieur depuis le point de mesure.

En outre, il est donc possible d'arriver à la conclusion qu'un champ sonore présentant des ondes planes isotropes conduira sûrement à un champ sonore présentant une homogénéité spatiale. Or, cela vient rejoindre les propos de Avelar *et al.*⁸⁴ qui mettent en avant le lien étroit qui subsiste entre isotropie et homogénéité spatiale dans le champ diffus. Ils relèvent aussi que beaucoup d'auteurs soutiennent le fait que l'isotropie est une notion plus fondamentale à la construction du champ diffus que l'homogénéité spatiale.

Par exemple, Berzborn *et al.*⁸⁵ induisent que l'isotropie est l'élément fondamental à

⁸² AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 3.2, p. 4.

⁸³ *Ibid.*, Section 3.3, p. 5.

⁸⁴ *Ibid.*

⁸⁵ BERZBORN Marco, FERNANDEZ-GRANDE Efren, NOLAN Mélanie, *et al*, *On the directional properties of energy decay curves* [En ligne], 23rd International Congress on Acoustics, 2019, Allemagne : Aachen, pp. 4043–4050.

la diffusion dans le champ diffus. Jeong⁸⁶ a un propos plus nuancé. Il explique que l'isotropie conduit à l'homogénéité spatiale mais que cette propriété du champ sonore isotrope reste l'élément fondamental à la diffusion. Quant à Kuttruff⁸⁷, il pose comme principe que le caractère isotrope de l'intensité sonore différentielle I' implique qu'il y ait une homogénéité spatiale de la densité d'énergie w (calculé par l'équation 2.2), et cela en tout point de la salle étudiée.

Si l'on s'en tient au propos de ces auteurs, l'isotropie serait la caractéristique permettant au champ diffus de présenter une homogénéité spatiale et une diffusion optimale. Cela laisse entrevoir que l'isotropie est une condition sine qua non à l'homogénéité spatiale. Pour autant, cela ne veut pas dire que l'homogénéité spatiale n'est pas un élément important à la conception du champ diffus.

Il est donc possible de conclure que les caractéristiques d'un champ diffus se retrouvent dans l'isotropie et l'homogénéité spatiale. Les différents auteurs ayant traité la notion du champ diffus soulignent que l'homogénéité spatiale et l'isotropie sont deux notions extrêmement liées. Et cela même s'il est supposé que l'isotropie est une condition plus importante à la conception du champ diffus. En effet, il est soutenu que l'isotropie est une condition sine qua non à l'homogénéité spatiale.

Ces deux propriétés impliquent que l'énergie, comme la pression sonore, soit similaire en tout point de la salle. Cela est permis par l'équirépartie et l'équiprobabilité des incidences des ondes planes, et cela, dans toutes les directions et en tout point de la salle. Ces propriétés sont alors quantifiées par la taux de diffusion dans le champ diffus.

Avelar *et al.*⁸⁸ précisent que le champ sonore peut être caractérisé d'isotrope et d'homogène, seulement si le flux d'énergie ou de propagation du son est uniforme dans toutes les directions, et donc en tout point de la salle étudiée.

Les auteurs soulignent que les propriétés acoustiques de la pièce peuvent rompre

⁸⁶ JEONG Cheol-Ho, *Diffuse sound field: challenges and misconceptions* [En ligne], 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, German Acoustical Society, 2016, Allemagne : Hamburg, pp. 1015-1021.

⁸⁷ KUTTRUFF Heinrich, *Acoustics : An introduction*, Taylor & Francis, États-Unis : New York,, Première édition, 2007, 9780415386807.

⁸⁸ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 3.3, p. 5.

l'homogénéité et/ou l'isotropie. Ce qui vient rejoindre le propos de Daniel⁸⁹ sur la dépendance du champ diffus vis-à-vis de l'acoustique de la salle.

L'homogénéité et l'isotropie sont décrites comme des descripteurs de la diffusion dans le champ sonore. Pour autant, Micheal Patrick Cousins⁹⁰ souligne que l'isotropie et l'homogénéité spatiale ne permettent pas à elles seules la quantification de la diffusion dans le champ diffus. L'auteur ne propose pas d'outils autres pour quantifier le niveau de diffusion dans le champ diffus car il explique alors que les facteurs de diffusion sont multidimensionnels. Il sera donc proposé en Section 2.B plusieurs outils pour caractériser au mieux les propriétés du champ diffus, comme la diffusion.

B - Les approches discrètes et statistiques/stochastiques permettant de caractériser le champ diffus.

La diffusion dans le champ sonore, s'analyse par une approche discrète dans les basses fréquences et une approche stochastique dans les hautes fréquences. De plus, l'utilisation d'une seule méthode d'analyse n'est pas suffisante pour caractériser le champ diffus. Par conséquent, il est important d'utiliser plusieurs outils pour caractériser la diffusion dans le champ sonore sur l'ensemble du spectre fréquentiel. Ce qui permettra de caractériser ou non le champ sonore de champ diffus. Ces outils décrivent l'isotropie et l'homogénéité spatiale dans le champ diffus. Les résultats obtenus par ces méthodes de mesures dépendront de l'acoustique de la pièce. Par conséquent, une utilisation et une compréhension correcte de ces outils sont nécessaires pour façonner le champ diffus dans la production musicale, que ce soit dans la conception de l'acoustique du studio d'enregistrement ou dans la conception de réverbération tardive numérique.

⁸⁹ DANIEL Jérôme, *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 31 Juillet 2001, Section 1.2.4, p. 29.

⁹⁰ COUSINS Michael Patrick, *The diffuse sound object* [En ligne], Directeur de Thèse : FAZI Filippo, Angleterre : University of Southampton, Thèse de Doctorat, Avril 2018, Section 11.1, p. 194.

2.B.1 - L'approche modale.

Avelar *et al.*⁹¹ citent Jacobsen et Juhl⁹² pour souligner le fait qu'il est nécessaire d'utiliser l'acoustique modale des salles pour analyser le comportement du champ sonore dans les basses fréquences. L'approche modale caractérise la pression sonore dans le champ diffus et cela par bande/intervalle de fréquence. Elle consiste à mettre en évidence des ondes stationnaires, et donc, des fréquences présentant des résonances. Ces résonances se traduisent par des pressions sonores qui sont plus importantes à certaines fréquences. Elles ont une localisation fixe et précise dans la pièce étudiée. L'approche modale permet donc d'avoir une description de la répartition des résonances par bande de fréquence dans la salle étudiée.

L'approche modale étant une technique d'analyse dans les basses fréquences, il sera important d'utiliser plusieurs outils pour caractériser à la fois les basses et les hautes fréquences du champ diffus.

Romblom⁹³ explique que l'approche modale est obtenue en trouvant les solutions de l'équation de Helmholtz. Chaque mode étant une description spatiale d'une résonance présentant une pression sonore plus importante que la moyenne.

Romblom⁹⁴ précise que des pièces avec des faibles RT60 présentent des modes qui s'estompent rapidement avec une large bande passante. Inversement, des pièces avec d'importants RT60 auront tendance à présenter des modes qui résonneront plus longtemps et avec une bande plus étroite.

La taille de la bande est une caractéristique importante à prendre en compte lors de l'approche modale. En effet, elle indique à quelles fréquences la pression sonore devient anormalement importante, jusqu'à créer des résonances. Salmon précise que « la largeur de bande d'un mode correspond à l'ensemble des points situés à -3

⁹¹ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 5.1, p. 8.

⁹² JACOBSEN Finn, JUHL Peter M., *Fundamentals of General Linear Acoustics*, Wiley, Angleterre : Londres, Juin 2013, 9781118636176.

⁹³ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 4.3.3, p. 68.

⁹⁴ *Ibid.*

dB de part et d'autres du pic d'énergie situés à la fréquence de résonance »⁹⁵. Romblom⁹⁶ souligne aussi que lorsque la bande fréquentielle d'un mode est étroite (RT60 important), cela implique qu'il y aura un moins grand nombre de modes excités pour une même fréquence. Inversement, si la bande fréquentielle d'un mode est large (faible RT60), il y aura un grand nombre de modes excités pour une même fréquence.

Le travail de Morse et Ingard⁹⁷, Salmon⁹⁸ propose avec l'équation 2.11 de quantifier la densité moyenne des modes par bande/intervalle fréquentielle exprimée par δ_f . Ainsi est exprimé le rapport du nombre de modes par rapport à la largeur de l'intervalle/bande fréquentielle considérée pour une fréquence donnée.

Avelar *et al*⁹⁹ citent Jacobsen et Juhl¹⁰⁰. Ils rejoignent les propos de Salmon dans sa Thèse et proposent la même équation. L'équation 2.11 est aussi similaire à celle proposée par Baskind¹⁰¹ et Daniel¹⁰²:

$$\delta_f = \frac{dN_f}{df} \approx 4\pi \frac{Vf^2}{c^3} \quad (2.11)$$

Avec N_f correspondant au nombre de mode par bande de fréquences, c la célérité du son et V le volume de l'espace considéré.

L'équation 2.11 permet de montrer le lien entre la densité modale, le volume de la

⁹⁵ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.1.2, p. 23.

⁹⁶ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 4.3.3, p. 68.

⁹⁷ MORSE Philippe M., INGARD K. U., *Theoretical Acoustics*, Princeton University Press, États-Unis : New Jersey, 01 juillet 1992, 9780691024011, [Consulté le 29 octobre 2022].

⁹⁸ *Op. cit.*, Section 1.1.2, p. 22.

⁹⁹ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 5.1, p. 9.

¹⁰⁰ JACOBSEN Finn, JUHL Peter M., *Fundamentals of General Linear Acoustics*, Wiley, Angleterre : Londres, Juin 2013, 9781118636176.

¹⁰¹ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 1.2, p. 14.

¹⁰² DANIEL Jérôme, *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 31 Juillet 2001, Section 1.2.4, p. 29.

salle et la fréquence. On observe que la densité modale par bande fréquentielle (exprimé par δ_f) est proportionnelle au volume et à la fréquence au carré. Cela souligne le fait que plus la pièce et/ou fréquence est grande, plus la densité modale par bande sera importante, et plus le champ sonore présentera des propriétés de champ diffus sur ces bandes fréquentielles.

Cette équation met en valeur le fait que le caractère diffus sera plus prononcé dans les basses fréquences pour des salles présentant un important volume V . De même, les propriétés diffuses d'un champ sonore auront tendance à se confirmer avec l'augmentation de la fréquence.

Baskind¹⁰³, précise cette notion. La largeur des modes étant toujours non nulle, avec l'augmentation de la fréquence, les modes auront tendance à s'interférer entre eux, jusqu'à ne plus être distincts les uns des autres et à présenter des propriétés diffuses. Ce phénomène s'appelle le recouvrement modal. Il augmente avec la fréquence.

Baskind¹⁰⁴ et Avelar *et al.*¹⁰⁵ présentent donc l'équation 2.12 permettant de quantifier le recouvrement/chevauchement modal comme caractérisant le nombre de mode résonnant à une fréquence donnée :

$$M(f) = B_m \cdot \frac{dN_{mod}}{df}(f) \quad (2.12)$$

Avec B_m la bande passante à -3 dB du m -ième mode, tel que $B_m = \frac{\delta_m}{\pi}$ (en Hertz). On a donc l'équation 2.13¹⁰⁶, tel que :

$$M(f) = \frac{4 \cdot V \cdot 6.91}{c^3 \cdot T_{60}(f)} \cdot f^2 \quad (2.13)$$

¹⁰³ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 1.2, p. 14.

¹⁰⁴ *Ibid.*

¹⁰⁵ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 5.1, p. 9.

¹⁰⁶ *Op. cit.*

Par conséquent, Baskind¹⁰⁷ explique que l'approche modale n'est plus valide lorsque la densité modale devient importante. Avelar *et al.*¹⁰⁸ et Salmon¹⁰⁹ soulignent que lorsque le recouvrement modal est grand, cela amène à suivre une approche stochastique/statistique. A partir d'une certaine fréquence le recouvrement modal devient tellement important que cette approche n'est plus valide. Cette fréquence s'appelle la fréquence de Schroeder. Avelar *et al.*¹¹⁰ et Baskind¹¹¹ précisent que la fréquence de Schroeder peut s'exprimer par l'équation 2.14 à partir du moment que le recouvrement/chevauchement modal $M(f)$ est égal à 3 :

$$M(f) = 3 \Leftrightarrow f_s^2 = \frac{3 \cdot c^3}{4 \cdot 6.91} \frac{T_{60}}{V} \quad (2.14)$$

$$\Leftrightarrow f_s \simeq 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}}$$

Avec T_{60} le temps de réverbération, c la célérité du son et V le volume de la salle.

Pour continuer, Romblom¹¹² et Salmon¹¹³ définissent la fréquence de Schroeder comme étant une fréquence à partir de laquelle l'espacement entre les modes est inférieur à 1/3 de la largeur de la bande passante de chaque mode. Ainsi, une sommation des modes est observable. À partir de la fréquence de Schroeder, le champ sonore est la résultante d'une superposition de modes excités qui ne sont plus distincts les uns des autres¹¹⁴. En conséquence, les résonances par bande fréquentielle perdent de leur sens à partir de la fréquence de Schroeder.

¹⁰⁷ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 1.2, p. 14.

¹⁰⁸ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 5.1, p. 9.

¹⁰⁹ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.1.2, p. 23.

¹¹⁰ *Op. cit.*

¹¹¹ *Op. cit.*

¹¹² ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 4.3.3, p. 68.

¹¹³ *Op. cit.*

¹¹⁴ *Ibid.*

François Salmon¹¹⁵ va dans ce sens. Il précise que dans les basses fréquences les modes sont isolés et différentiables. Mais pour des fréquences plus importantes il n'est pas possible de les différencier. Les modes présentent donc des propriétés diffuses à partir de la fréquence de Schroeder.

Nélisse et Nicolas¹¹⁶ soulignent alors qu'un champ sonore peut être considéré comme diffus s'il y a au moins 20 à 30 modes contenus dans une bande fréquentielle. Comme il a été expliqué en début de partie, les dimensions de la salle étudiée auront un impact très important sur le nombre de modes par bandes de fréquences¹¹⁷. Cela vient donc rejoindre les propos de François Salmon¹¹⁸, Avelar *et al.*¹¹⁹ et Baskind¹²⁰ par l'équation 2.11.

Nélisse et Nicolas¹²¹ présentent donc dans leur article un modèle appelé MODAP qui permet de mesurer la pression acoustique dans les basses fréquences. Ainsi, les auteurs prennent pour modèle une salle rectangulaire présentant des murs rigides parfaitement réfléchissants (important pour l'existence des modes stationnaires) et de dimensions L_x , L_y et L_z . Cette salle est représentée en Figure 2.3. Cette dernière est excitée acoustiquement par une source S_s situé au plan $z = 0$. Le modèle contient ici une seule source excitant l'acoustique. Les auteurs¹²² soulignent que le modèle peut être adapté à plusieurs sources excitant l'acoustique de la salle.

¹¹⁵ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.1.2, p. 22.

¹¹⁶ NÉLISSE Hugues, NICOLAS Jean, « Characterization of a diffuse field in a reverberant room » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Juin 1997, Vol. 101, N° 6, Section 4, p. 3521.

¹¹⁷ *Ibid.*, Section 4, p. 3522.

¹¹⁸ *Op. cit.*

¹¹⁹ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 5.1, p. 9.

¹²⁰ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 1.2, p. 14.

¹²¹ *Op. cit.*, Section 2, p. 3519.

¹²² *Ibid.*

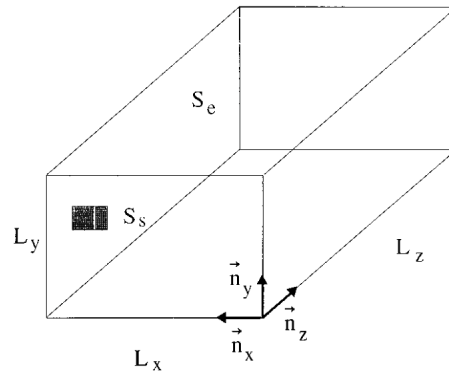


Figure 2.3 - Représentation géométrique d'une salle étudiée de dimension L_x, L_y, L_z et excitée acoustiquement par la source S_s .
Nélisse et Nicolas © 1997

Nélisse et Nicolas¹²³ présentent alors l'équation 2.15 exprimant la pression sonore $P(\mathbf{r}, f)$ pour une fréquence f au point \mathbf{r} dans la salle étudiée :

$$P(\mathbf{r}, f) = \sum_{mn} P_{mn}(z, f) \psi_{mn}(x, y) \quad (2.15)$$

Ils précisent que les pertes dans le fluide peuvent être prises en compte par le facteur d'amortissement η . Ce dernier relie le nombre d'ondes k à la fréquence de vibration d'une paroi.

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \frac{1}{(1 + j\eta)} \quad (2.16)$$

Les auteurs¹²⁴ précisent que le facteur d'amortissement η peut être lié au temps de réverbération de la pièce si une décroissance exponentielle est supposée après la coupure de la source.

Par conséquent, l'approche modale est une technique permettant d'analyser le comportement du champ sonore dans les basses fréquences. En effet, l'approche modale caractérise la pression sonore dans le champ diffus et cela en fonction de bande/intervalle de fréquence. Ces modes sont distincts les uns des autres et ils ont une localisation fixe et précise dans la pièce étudiée.

Pour autant, à partir de la fréquence de Schroeder (exprimée par l'équation 2.14), une superposition des modes est observable. Cela provoque une sommation et les modes se confondent les uns avec les autres. Ainsi, à partir de la fréquence de

¹²³ NÉLISSE Hugues, NICOLAS Jean, « Characterization of a diffuse field in a reverberant room » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Juin 1997, Vol. 101, N° 6, Section 2, p. 3519.

¹²⁴ *Ibid.*

Schroeder les modes sont considérés comme étant des éléments constituant le champ diffus.

Cette approche modale permet d'analyser la pression sonore par largeur de bande fréquentielle. Cette méthode d'analyse établit à partir de quelles fréquences le champ sonore peut être caractérisé de diffus, et donc, qu'il y a un chevauchement/recouvrement modal. Il est noté que les modes mettent un certain temps à se chevaucher. Cela est caractérisé par le temps de croisement/recouvrement qui sera étudié en Section 2.B.4.

Il est nécessaire d'utiliser plusieurs techniques/méthodes pour caractériser le champ sonore de diffus. En effet, l'approche modale se consacre à l'étude des basses fréquences. Même si Nélisse et Nicolas¹²⁵ présentent dans leur travail la fonction de corrélation et l'uniformité spatiale comme étant des techniques permettant d'analyser le champ sonore sur l'ensemble du spectre fréquentiel, ces techniques restent consacrées à l'analyse des hautes fréquences. De plus, les auteurs¹²⁶ soulignent qu'il est nécessaire d'utiliser plusieurs outils pour caractériser et analyser la diffusion dans un champ sonore afin de le qualifier de diffus.

2.B.2 - La fonction de corrélation.

La fonction de corrélation, est une méthode largement utilisée pour caractériser le champ diffus. Il existe la fonction de corrélation croisée et la fonction d'auto-corrélation, mais les deux techniques sont très similaires et ont pour même but de caractériser la diffusion.

La fonction de corrélation croisée prendra en compte deux valeurs qui seront mesurées en deux points différents de la salle étudiée. La distance entre les deux points sera caractérisée par la distance R , on dit alors que les termes sont croisés.

Romblom¹²⁷ précise que la fonction d'auto-corrélation prendra en compte deux valeurs qui seront mesurées en un même point. Pour autant, un décalage fixe $\Delta \mathbf{r}$ sera appliqué entre les deux valeurs. Cela afin que les arguments de chaque onde plane

¹²⁵ NÉLISSE Hugues, NICOLAS Jean, « Characterization of a diffuse field in a reverberant room » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Juin 1997, Vol. 101, N° 6, pp. 3517-3524.

¹²⁶ *Ibid.*, Section 4.B, p. 3522.

¹²⁷ ROMBLON David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 4.3.2, p. 66.

se déroulent différemment. L'objectif est d'être au plus près d'un comportement du champ sonore qualifié de naturel. Dans ce mémoire, je me concentrerai sur l'utilisation de la fonction de corrélation croisée pour caractériser la diffusion dans le champ diffus.

Panizzoli¹²⁸ et Cousins¹²⁹ présentent la fonction de corrélation comme étant un outil permettant de caractériser la cohérence spatiale, et donc la diffusion dans l'espace considéré.

La fonction de corrélation permet de caractériser la diffusion¹³⁰ dans plusieurs domaines, entre autres le fréquentiel et le spatial. Ces deux domaines sont représentés respectivement par deux variables qui sont la fréquence et la pression sonore. Cela provoque certaines ambiguïtés qui fait que cette notion peut être mal comprise. Il est important de comprendre que cette fonction suivra toujours le même principe pour l'analyse de la diffusion dans domaine donné, seulement la variable utilisée sera différente en fonction du domaine étudié.

Par exemple, Romblom¹³¹ explique que la fonction de corrélation utilisée dans le domaine spatial (corrélation spatiale) renseigne sur la variation de la pression sonore P à divers endroits dans l'espace. Une importante corrélation spatiale indiquerait que la pression sonore P change en phase avec une amplitude similaire. Une faible corrélation spatiale indiquerait que la pression sonore P est dans une phase réactive et/ou a des amplitudes différentes. Une corrélation spatiale négative indiquerait que la pression sonore P changerait avec une amplitude similaire et en opposition de phase.

Quant à elle, la fonction de corrélation utilisée dans le domaine fréquentiel (corrélation fréquentielle) renseigne sur la variation fréquentielle à divers endroits dans l'es-

¹²⁸ PANIZZOLI Alexandre, Caractérisation Perceptive de Champ Sonore à Résolution Spatiale Variable [En ligne], Rapport de Stage IRCAM, Directeur de stage : CARPENTIER Thibaut, NOISTERNIG Markus, WARUSFEL Olivier, France : Université Paris 7, Juillet 2013, Section 3.5.2, p. 28.

¹²⁹ COUSINS Michael Patrick, *The diffuse sound object* [En ligne], Directeur de Thèse : FAZI Filippo, Angleterre : University of Southampton, Thèse de Doctorat, Avril 2018, Section 2.4.3, p. 38.

¹³⁰ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 4.1, p. 8.

¹³¹ ROMBLUM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 4.3, p. 64.

pace. Ainsi, Romblom¹³² explique que la corrélation spatiale et la corrélation fréquentielle permettent ensemble de nous donner des informations sur la variance du champ sonore. Notamment, en nous renseignant sur la variance de la pression sonore P par rapport à la fréquence caractérisant le champ sonore.

En d'autres termes, la fonction de corrélation permet de quantifier l'isotropie, et donc, la diffusion dans un champ sonore. Ce qui permet de qualifier ou non ce dernier de diffus.

Cousins¹³³ présente une méthode similaire à la fonction de corrélation croisée qui permettrait de calculer plusieurs fonctions de corrélation en une fois. Cette méthode s'appelle la cohérence spatiale et elle est développée par Jacobsen et Roisin¹³⁴. La cohérence spatiale dépend alors de la fonction de corrélation. Il est aussi précisé que cette technique n'est valable seulement que pour des champs sonores constitués d'ondes planes décorrélées. J'aborderai uniquement dans ce mémoire la fonction de corrélation et non la cohérence spatiale.

Nélliss et Nicolas¹³⁵ présentent la fonction de corrélation croisée pour un cas d'étude 3D. Ils décrivent cet un outil comme permettant de caractériser la diffusion dans le champ diffus par l'analyse la pression sonore. Ainsi, la fonction de corrélation vis-à-vis de la pression sonore est défini par l'équation 2.17¹³⁶ :

$$C(\mathbf{r}, \mathbf{r} + \mathbf{r}') = \frac{\overline{P(\mathbf{r})P(\mathbf{r} + \mathbf{r}')}}{\sqrt{\overline{P^2(\mathbf{r})P^2(\mathbf{r} + \mathbf{r}')}}} \cdot \quad (2.17)$$

Avec $P(\mathbf{r})$ la pression sonore au point de mesure \mathbf{r} et $P(\mathbf{r} + \mathbf{r}')$ la pression sonore au point de mesure \mathbf{r}' . Il est précisé par les auteurs que la barre horizontale implique un moyennage dans le temps. Cette expression de la fonction de corrélation ne suit pas un modèle des ondes planes. Or, il s'est avéré que la plupart des scientifiques

¹³² ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 4.3, p. 64.

¹³³ COUSINS Michael Patrick, *The diffuse sound object* [En ligne], Directeur de Thèse : FAZI Filippo, Angleterre : University of Southampton, Thèse de Doctorat, Avril 2018, Section 2.4.3, p. 38.

¹³⁴ JACOBSEN Finn, ROISIN Thibaut, « The coherence of reverberant sound fields » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Juillet 2000, Vol. 108, N° 1, pp. 204-210.

¹³⁵ NÉLISSE Hugues, NICOLAS Jean, « Characterization of a diffuse field in a reverberant room » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Juin 1997, Vol. 101, N° 6, Section 4, p. 3522.

¹³⁶ *Ibid.*, Section 2, p. 3518.

utilisent cette approximation pour définir le champ diffus. Néliss et Nicolas¹³⁷ proposent une adaptation de la fonction de corrélation aux domaines des ondes planes :

$$C(\mathbf{r}, \mathbf{r} + \mathbf{r}') = \frac{\sin(kR)}{kR}, \quad (2.18)$$

Avec k le nombre d'ondes, et $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ la distance entre les deux points d'observations \mathbf{r} et \mathbf{r}' . Dans certains documents, comme dans la Thèse de Cousins¹³⁸, $C(\mathbf{r}, \mathbf{r} + \mathbf{r}')$ peut s'exprimer par $\rho_{xy}(kR)$, avec x et y correspondant aux deux points de mesure dans la salle.

Le modèle des ondes planes permet donc de s'affranchir de beaucoup de calculs. De plus, il est précisé que la prédiction $\sin(kR)/kR$ n'est valable que si la source excitant l'acoustique de la salle étudiée amène à l'apparition d'un comportement modal. Enfin, Néliss et Nicolas¹³⁹ expliquent que la fonction de corrélation ne dépend que de la distance R et qu'il est important de faire une intégration des ondes planes sur toutes les directions possibles.

Les auteurs¹⁴⁰ présentent aussi plusieurs approximations. Pour autant, elles ne permettent pas d'appliquer les calculs aux basses fréquences, et donc, de prendre en compte les termes croisés pour le comportement modal.

Par conséquent, la fonction de corrélation est un outil permettant de caractériser l'isotropie, et donc, la diffusion dans un champ sonore. Cependant, cet outil ne se suffit pas à lui-même pour caractériser le champ diffus. Dans les prochaines parties, il sera proposé d'autres outils permettant de caractériser le champ diffus.

2.B.3 - L'uniformité spatiale.

L'uniformité spatiale est un outil qui, tout comme la fonction de corrélation, permet d'analyser et de caractériser l'homogénéité dans un champ diffus. Pour autant, celle-ci se différencie sur certains points. En effet, l'uniformité spatiale est un outil permettant de caractériser dans un champ sonore la diffusion de la pression sonore

¹³⁷ NÉLISSÉ Hugues, NICOLAS Jean, « Characterization of a diffuse field in a reverberant room » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Juin 1997, Vol. 101, N° 6, Section 2, p. 3518.

¹³⁸ COUSINS Michael Patrick, *The diffuse sound object* [En ligne], Directeur de Thèse : FAZI Filippo, Angleterre : University of Southampton, Thèse de Doctorat, Avril 2018, Section 2.4.3, p. 40.

¹³⁹ *Op. cit.*, Section 3, p. 3519.

¹⁴⁰ *Ibid.*, Section 2, p. 3518.

en fonction de la fréquence. Notamment, cette méthode permet de connaître à partir de quelle fréquence (fréquence de Schroeder abordé en Section 2.B.1) un recouvrement/chevauchement modal est observable (notion abordé en Section 2.B.4). Ce qui permet de définir à partir de quelle fréquence le champ sonore sera considéré comme diffus.

Néliss et Nicolas¹⁴¹ s'accordent avec Abdou et Guy¹⁴² et expliquent que cette notion utilise l'écart type σ afin de caractériser la variance de la pression acoustique dans le champ sonore, en fonction de la fréquence f . Par conséquent, l'uniformité spatiale se réalise en mesurant la pression sonore $SPL(\mathbf{r}_i, f)$ en N points de l'espace considéré. Néliss et Nicolas¹⁴³ présentent l'uniformité spatiale par l'équation 2.19 :

$$\sigma^2(f) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [SPL(\mathbf{r}_i, f) - \overline{SPL}(f)]^2, \quad (2.19)$$

Avec $SPL(\mathbf{r}_i, f)$, présenté par l'équation 2.20, qui correspond donc à la pression sonore moyenne mesuré en un point \mathbf{r}_i pour une fréquence f .

$$SPL(\mathbf{r}_i, f) = 10 \log(|P(\mathbf{r}_i, f)|^2). \quad (2.20)$$

Dans leur article, Néliss et Nicolas¹⁴⁴ présentent la norme ISO 3741¹⁴⁵ qui soumet un écart-type maximal en fonction de différentes fréquences. Cet écart-type indique à partir de quelle valeur le champ sonore peut être qualifié de diffus.

En d'autres termes, pour qu'un champ sonore puisse être qualifié de diffus, il est important que l'écart-type σ (calculé via l'équation 2.19) caractérisant l'uniformité spatiale soit équivalent aux valeurs présentées dans la Figure 2.4.

De plus, les auteurs¹⁴⁶ soulignent qu'un champ sonore peut être qualifié de diffus si l'écart-type σ est inférieur ou égal à 1,5 dB pour des fréquences allant de 100 à 160

¹⁴¹ NÉLISSE Hugues, NICOLAS Jean, « Characterization of a diffuse field in a reverberant room » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Juin 1997, Vol. 101, N° 6, Section 2, p. 3518.

¹⁴² ABDOU Adel, GUY R. W., « A review of objective descriptors for sound diffuseness » [En ligne], *Centre for Building Studies*, Septembre 1994, Vol. 22, Section 3, p. 44.

¹⁴³ *Op. cit.*

¹⁴⁴ *Ibid.*, Section 2, p. 3519.

¹⁴⁵ ISO, *ISO 3741:1999 Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - Precision methods for reverberation rooms* [En ligne], International Organization for Standardization, Suisse : Genève, Troisième édition, Juillet 1999, p. 32.

¹⁴⁶ *Op. cit.*

Hz. Avec le modèle des ondes planes, on obtiendrait un champ diffus avec un écart-type σ parfait de 0 dB.

Fréquence centrale (bande 1/3 d'octave).	Maximum de déviation standard en dB.
100 - 160	1.5
200 - 630	1.0
800 - 2500	0.5
3510 - 10000	1.0

Figure 2.4 - Écart-type maximal autorisé par bande de tiers d'octave.
ISO © 1999

Cousins¹⁴⁷ précise que l'uniformité spatiale doit se mesurer en au moins six positions qui doivent être distantes au minimum d'un mètre des murs (la mesure de la pression sonore est toujours plus importante au niveau des parois d'une salle).

Enfin, les points de mesures doivent être à une distance d_{min} de la source excitant l'acoustique de la pièce pour la mesure de l'uniformité spatiale.

d_{min} est exprimé selon Cousins¹⁴⁸ par l'équation 2.21 :

$$d_{min} = 0.4 \times 10^{(L_{Wr} - L_{pr})/20} \quad (2.21)$$

Avec L_{Wr} et L_{pr} exprimés en dB, correspondant respectivement au niveau de la puissance sonore de la source et au niveau de la puissance sonore dans la pièce.

Par conséquent, l'uniformité spatiale est un outil qui ressemble à la fonction de corrélation. Ces deux méthodes permettent de caractériser la diffusion dans le champ sonore. Mais l'uniformité spatiale se différencie de la fonction de corrélation sur un point. En effet, l'uniformité spatiale va permettre de mesurer la diffusion de la pression sonore selon l'ensemble du spectre fréquentiel.

Tandis qu'avec la fonction de corrélation, il n'y a pas de rapport fréquentiel avec la pression mesurée en un point. Du moins, le rapport se fait avec la fréquence du signal excitant l'acoustique de la salle considérée lors de la mesure pour la fonction de corrélation croisée. L'uniformité spatiale permet de définir à partir de quelle fré-

¹⁴⁷ COUSINS Michael Patrick, *The diffuse sound object* [En ligne], Directeur de Thèse : FAZI Filippo, Angleterre : University of Southampton, Thèse de Doctorat, Avril 2018, Section 2.4.4, p. 43.

¹⁴⁸ *Ibid.*

quence le champ sonore est diffus¹⁴⁹.

Cousins¹⁵⁰ souligne aussi que l'uniformité spatiale est un outil efficace pour ce qui est de mesurer la pression sonore dans toute la salle étudiée. Pour autant, cet outil est limité puisqu'il ignore la direction d'arrivée des ondes. C'est notamment pour cela qu'il est important d'utiliser plusieurs méthodes de mesures pour caractériser la diffusion dans le champ diffus. Cela comble les limites de chaque outil et permet d'avoir des résultats toujours plus précis.

2.B.4 - Le temps de croisement/recouvrement et le temps de mixage dans un champ diffus.

La diffusion temporelle permet de caractériser temporellement le champ sonore. En effet, l'approche modale, la fonction de corrélation (qu'elle soit fréquentielle ou spatiale) et l'uniformité spatiale sont des méthodes permettant de caractériser la diffusion dans le champ sonore. En d'autres termes, ces outils permettent de définir si un champ sonore est diffus.

Par leur travaux, Avelar *et al.*¹⁵¹ et Salmon¹⁵² mettent en avant différentes caractéristiques définissant le champ diffus qui permettent de définir ce dernier de manière temporelle. Ces notions sont plus simples à comprendre que les autres méthodes présentées dans les sections précédentes et elles permettent de définir efficacement certaines caractéristiques temporelles qui sont importantes à la compréhension du champ diffus. Ces caractéristiques sont le temps de croisement/recouvrement, le temps de mélange et le mélange acoustique.

Avelar *et al.*¹⁵³ expliquent qu'un champ sonore voit son comportement changer en fonction du temps. Précédemment, on a décrit le comportement discret (correspon-

¹⁴⁹ NÉLISSE Hugues, NICOLAS Jean, « Characterization of a diffuse field in a reverberant room » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Juin 1997, Vol. 101, N° 6, Section 4, p. 3522.

¹⁵⁰ COUSINS Michael Patrick, *The diffuse sound object* [En ligne], Directeur de Thèse : FAZI Filippo, Angleterre : University of Southampton, Thèse de Doctorat, Avril 2018, Section 2.4.4, p. 44.

¹⁵¹ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, pp. 1-12.

¹⁵² SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.1.1, p. 22.

¹⁵³ *Op. cit.*, Section 5.2, p. 9.

dant aux basses fréquences) et statistique/stochastique (correspondant aux hautes fréquences) observable dans le champ sonore.

Avelar *et al.*¹⁵⁴ définissent en conséquence le temps de croisement/recouvrement comme étant la durée t de transition du comportement discret vers le comportement statistique dans le champ sonore. Autrement dit, le temps de croisement/recouvrement correspond à la durée t que prend le champ sonore pour devenir un champ diffus.

En outre, le temps de croisement/recouvrement se définit comme étant la durée t à partir de laquelle le recouvrement/chevauchement modal devient tellement important que les modes ne deviennent plus distincts les uns des autres. Ainsi, après le temps de croisement/recouvrement le champ sonore suivra un comportement statistique/stochastique.

De plus, l'approche modale et l'uniformité spatiale fournissent des informations permettant de définir cette notion temporelle. En effet, l'approche modale et l'uniformité spatiale définissent à partir de quelle fréquence il est possible d'observer un recouvrement/chevauchement modal. Ce qui permet de définir à partir de quelle fréquence le champ sonore peut présenter des propriétés diffuses, et intrinsèquement, de définir à partir de quelle fréquence il y a un passage du comportement discret vers le comportement statistique. Ces informations permettent par la suite d'établir la durée t caractérisant le temps de croisement/recouvrement à partir de laquelle le champ sonore devient diffus.

Concernant le temps de mélange, Salmon¹⁵⁵ explique que cette notion correspond à la durée t à partir de laquelle le champ sonore devient diffus. Salmon¹⁵⁶ fait le parallèle avec la réverbération et explique que le temps de mélange correspondrait au temps de transition entre les réflexions précoces et les réflexions tardives. Pour rappel, les réflexions tardives sont considérées comme étant l'état temporel se rapprochant le plus du champ diffus. Du point de vue de la perception, Salmon¹⁵⁷

¹⁵⁴ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 5.2, p. 9.

¹⁵⁵ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.1.1, p. 22.

¹⁵⁶ *Ibid.*

¹⁵⁷ *Ibid.*

précise que le temps de mélange peut être perçu comme étant l'instant à partir duquel l'extinction de la réverbération n'est pas distinguable de celle mesurée en toute autre position/orientation de l'auditeur dans la pièce.

Pour continuer, le mélange acoustique est une notion qui n'est pas vraiment différente du temps de mélange présenté par Salmon. En effet le mélange acoustique est le phénomène qui sera observé après le temps de mélange. Ainsi, le temps de mélange correspond à la durée t à partir de laquelle le mélange acoustique est observable.

Le mélange acoustique permet donc de caractériser les réflexions sur les parois de la pièce. Par conséquent, Avelar *et al.*¹⁵⁸ expliquent qu'un mélange acoustique important signifie que le front d'onde se reflète plus souvent sur un grand nombre de surfaces. Ce qui mène à l'apparition d'un champ diffus.

En effet, la diffusion dans le champ diffus se caractérise par des ondes présentant des incidences équiréparties dans toutes les directions. Cette diffusion caractérisée par l'isotropie est permise par la multitude de réflexion sur les parois. Plus le nombre de réflexions sera grand, plus le mélange acoustique, et donc, la diffusion du champ diffus sera importante. De par ces considérations, il est évident que la géométrie et les dimensions de la salle considérée auront un impact sur le mélange acoustique et le champ diffus. C'est notamment pour cela que dans certaines *control room* pour la production musicale il est possible de trouver des panneaux de diffusions 2D ou 3D pour avoir un contrôle sur les réflexions des fronts d'ondes et ainsi améliorer le mélange acoustique.

Néanmoins, Avelar *et al.*¹⁵⁹, citant Jeong¹⁶⁰, précisent qu'un mélange acoustique optimal n'est pas suffisant pour l'obtention d'un champ diffus. Auparavant, il a été écrit que plusieurs paramètres définissent la diffusion dans un champ sonore. Il est donc évident que tous ces paramètres ne peuvent être rassemblés uniquement par l'observation d'un mélange acoustique. Ce qui démontre que l'obtention d'un champ diffus dépend de plusieurs critères.

¹⁵⁸ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 5.2, p. 9.

¹⁵⁹ *Ibid.*

¹⁶⁰ JEONG Cheol-Ho, *Diffuse sound field: challenges and misconceptions* [En ligne], 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, German Acoustical Society, 2016, Allemagne : Hamburg, pp. 1015-1021.

Enfin, Avelar *et al.*¹⁶¹ expliquent que le mélange acoustique est souvent associé au concept d'ergodicité. Pour rappel, un système ergodique correspond à un système qui permet de définir statistiquement tous les événements aléatoires. Ici, cette notion implique que les états de phase occuperaient l'espace de manière uniformément aléatoire et qu'il serait possible de décrire cet événement statistiquement. Plus concrètement, ce concept d'ergodicité du mélange acoustique implique que l'énergie est distribuée de manière égale. Cette observation permet alors de dire que lorsqu'un mélange acoustique significatif est important, alors le champ sonore peut être décrit en général comme étant diffus.

Pour finir, Avelar *et al.*¹⁶² citent Defrance et Polack¹⁶³ pour différencier le temps de croisement/recouvrement et le temps de mélange afin qu'il n'y ait pas d'ambiguïté entre ces deux notions. Il est expliqué que le temps de croisement/recouvrement est lié à la distance entre la source excitant l'acoustique de la salle considérée et le point de mesure. Le temps de mélange, lui, correspondrait seulement à une observation dans le champ sonore, qui ne dépendrait pas de la distance entre la source et le point d'observation. Autrement dit, le temps de croisement/recouvrement indiquerait à partir de quel moment le champ sonore devient diffus.

Quant à lui, le temps de mélange décrit à partir de quel moment il n'y a plus de variation énergétique. Cette invariance indiquerait que le champ diffus a atteint sa forme « idéale ». Cette forme « idéale » se traduirait donc par un équilibre énergétique.

Finalement, il est possible de conclure que le temps de croisement/recouvrement et le temps de mélange sont deux notions similaires qui permettent de désigner la même chose. En effet, Avelar *et al.*¹⁶⁴ s'appuient sur les propos de Defrance et Polack¹⁶⁵ et expliquent que le temps de mélange dépend étroitement du temps de recouvrement. Notamment, qu'à partir du temps de recouvrement, le champ diffus est censé présenter des propriétés diffuses, et donc, un mélange acoustique.

¹⁶¹ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 5.2, pp. 9-10.

¹⁶² *Ibid.*

¹⁶³ DEFRANCE Guillaume, POLACK Jean-Dominique, *Acoustics, Information and Communications*, Springer, Suisse, Première édition, 2015, 9783319056593.

¹⁶⁴ *Op. cit.*

¹⁶⁵ *Op. cit.*

Je me permettrai alors de préciser que le temps de croisement/recouvrement correspondrait à la durée t à partir de laquelle les modes s'interfèrent entre eux. Le temps de croisement/recouvrement indiquerait donc à partir de quelle durée le champ sonore commence à présenter ses premières propriétés diffuses, notamment en ce qui concerne l'isotropie et l'uniformité spatiale. Tandis que le temps de mixage correspondrait à la durée t à partir de laquelle le champ diffus a atteint sa quantification maximale en terme d'isotropie et d'homogénéité spatiale. Après le temps de mixage, le champ diffus serait à considérer comme étant dans sa forme la plus diffuse et donc la plus parfaite.

Pour conclure, la Figure 2.5 illustre l'évolution de la diffusion dans le champ sonore en fonction du temps pour une salle de dimension 3 m sur 5 m.

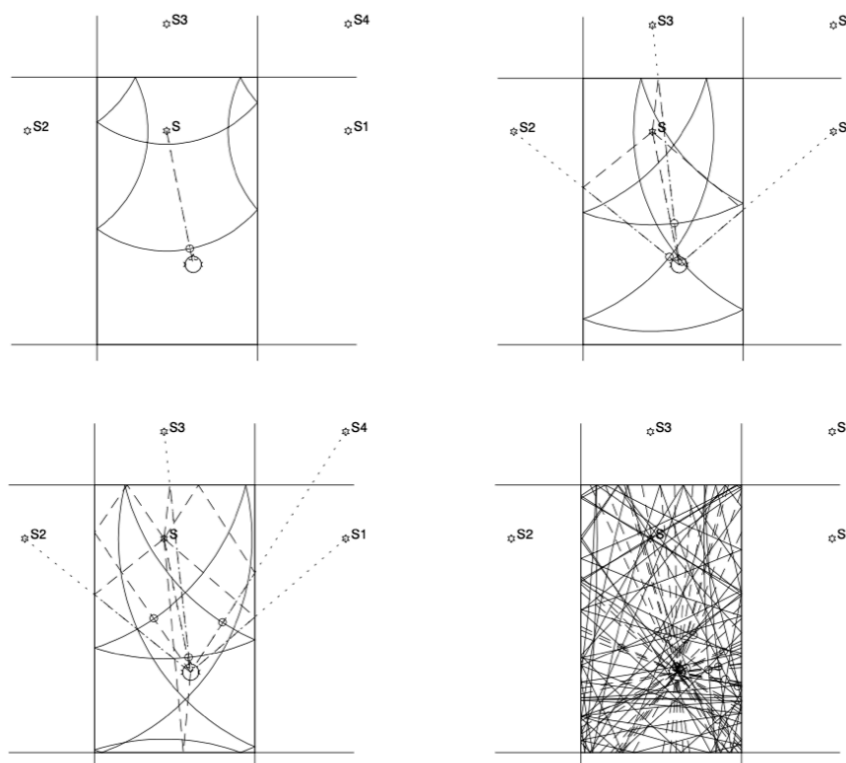


Figure 2.5 : L'évolution de la diffusion dans le champ sonore en fonction du temps dans une salle de dimension 3 m sur 5 m.

Jérôme Daniel précise que la lecture se fait de gauche à droite et de haut en bas. Avec S correspondant à la source excitant la salle étudié. Le rond (en bas de la salle étudié) correspondant à l'auditeur, et donc, au point d'observation. Les trajets en tirets correspondant aux fronts d'ondes (ondes directs). S_i correspondant aux sources-miroirs, et donc, permettant de décrire le trajet des premières réflexions.

La première image correspond à $t = +6 \text{ ms}$, la seconde à $t = +11 \text{ ms}$, la troisième à $t = +100 \text{ ms}$.

Jérôme Daniel©2001

Cela jusqu'à obtention d'un champ diffus présentant une isotropie et une homogénéité spatiale (cet état correspondrait à la toute dernière image de la Figure 2.5). La Figure 2.5 met en évidence ce que caractérise le temps de croisement/recouvrement et le temps de mixage. Daniel¹⁶⁶ explique que pour $t = +6 \text{ ms}$, l'auditeur perçoit les premières ondes directes, à $t = +11 \text{ ms}$ l'auditeur perçoit les premières réflexions mélangées avec les ondes directes. Enfin, à $t = +100 \text{ ms}$ l'auditeur est immergé dans le champ diffus présentant une isotropie et une homogénéité spatiale. Par conséquent, le temps de croisement/recouvrement correspondrait au temps que mettrait le champ sonore à présenter des propriétés diffuses, et donc, environ à la troisième image pour $t = +100 \text{ ms}$. Le temps de mixage correspondrait au temps que mettrait le champ sonore à être complètement diffus, et donc, à la quatrième et dernière image.

C - Les éléments optimisables lors de la captation ou de la modélisation d'un champ diffus.

2.C.1 - Le champ diffus idéal, pourquoi et comment ?

Un champ sonore présentant une diffusion « idéale » est au final la définition commune qui est donnée du champ diffus. Les différents chercheurs ayant travaillé sur la question définissent le champ diffus en partant du principe qu'il est idéal. La définition présentée relève du cas d'étude général.

Proposer une définition du champ diffus « idéal » permet de donner un aperçu de comment nous devrions le façonner. Un mauvais champ diffus se résumant en général par une mauvaise acoustique. Or, il est fortement recommandé d'avoir une bonne acoustique, et donc, un champ diffus « idéal » dans un studio d'enregistrement. Ce registre est similaire pour les cabines de mixage. En ce qui concerne les studios d'enregistrement, la condition « idéale » d'un champ diffus est importante à prendre en compte car ce dernier peut parfois être capté pour apporter une esthé-

¹⁶⁶ DANIEL Jérôme, *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 31 Juillet 2001, Section 1.2.4, p. 30.

tique sonore. Cela peut même aller jusqu'à des aspects artistiques dans la production d'une oeuvre musicale.

Il est important de préciser aussi que ces propos sont purement centrés pour la prise de son acoustique. Or, avec la démocratisation du son spatial via le *Dolby Atmos*, la réalisation numérique du champ diffus prend de l'ampleur. Ce dernier a tout intérêt à être reproduit efficacement et selon des considérations « idéales » dans les logiciels de spatialisation tel que le *Spat Revolution*, *Dolby Renderer* ou le *L-ISA Studio*. Les artistes ou les ingénieurs du son peuvent ainsi spatialiser des objets sonores sans souci acoustique à prendre en compte.

En conséquence, même si la majorité des définitions du champ diffus est idéalisée, il est nécessaire de faire ce travail pour mettre en relief les différentes propriétés que doit suivre au mieux le champ diffus, entre autres, l'isotropie et l'homogénéité spatiale. Il serait donc intéressant de présenter rapidement les propriétés « idéales » que doit suivre un champ diffus dit « parfait » et de comparer cela avec un champ diffus possédant des propriétés « non-idéales ».

Avelar *et al.*¹⁶⁷, Cousins¹⁶⁸, Romblom¹⁶⁹, Abdou et Guy¹⁷⁰ présentent les propriétés qui doivent constituer un champ diffus idéal.

Premièrement, un champ diffus « idéal » doit posséder une densité de pression sonore similaire en tout point de la pièce considérée. Ainsi, la propagation des ondes doit se produire en tout point et dans toutes les directions, cela de manière égale. Cette idée implique qu'une décroissance similaire du son doit s'observer en tout point de la pièce. Si cela n'est pas le cas, cela signifierait que l'homogénéité spatiale n'est pas « idéale ».

Deuxièmement, un champ diffus « idéal » présente une probabilité égale du flux d'énergie dans toutes les directions et des angles d'incidence aléatoire sur les surfaces de la pièce.

¹⁶⁷ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 3, p. 2.

¹⁶⁸ COUSINS Michael Patrick, *The diffuse sound object* [En ligne], Directeur de Thèse : FAZI Filippo, Angleterre : University of Southampton, Thèse de Doctorat, Avril 2018, Section 1.1.1, p. 31.

¹⁶⁹ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 3.1, p. 32.

¹⁷⁰ ABDOU Adel, GUY R. W., « A review of objective descriptors for sound diffuseness » [En ligne], *Centre for Building Studies*, Septembre 1994, Vol. 22, Section 4, p. 44.

Pour finir, le champ diffus « idéal » se produit à partir du chevauchement/recouvrement d'un nombre infini d'ondes planes. Leurs directions de propagations sont équiprobables et les relations de phase entre les ondes sont aléatoires en tout point de la salle considérée.

Comme il a été expliqué dans la Section 2.A, ces propriétés sont caractérisées dans leur ensemble par l'isotropie et l'homogénéité spatiale. Ainsi, un champ diffus « idéal » doit présenter une isotropie et une homogénéité spatiale considérée comme « idéale ».

Dans ce mémoire, il sera pris comme postulat qu'il est préférable qu'un champ sonore soit diffus pour toutes les fréquences. Un champ diffus « idéal » devra donc présenter une fréquence de Schroeder assez basse afin que la superposition des modes soit observable pour les fréquences les plus basses.

Concernant le temps de mélange et le temps de croisement/recouvrement, un état d'art n'a pas été abordé par les chercheurs. En effet, ces notions décrivent simplement la formation temporelle du champ diffus. Pour autant, ces dernières dépendent de l'acoustique de la salle, et donc, de l'isotropie et l'homogénéité spatiale.

En d'autres termes, si l'ingénieur du son et/ou l'artiste veut obtenir un champ diffus rapidement après l'extinction de la source sonore, il faudra que le temps de mixage et le temps de croisement/recouvrement soit court. Inversement si l'on veut que le champ diffus se forme lentement. Ces choix sur le temps de mélange et le temps de croisement/recouvrement devront donc être réalisés par un contrôle sur l'isotropie et l'homogénéité spatiale.

Pour continuer, le champ diffus « non-idéal » est au final une notion qui est très rarement abordée. Or, cet état du champ sonore et celui qui est le plus souvent rencontré en situation réelle. En effet, Avelar *et al*¹⁷¹ précisent qu'un champ diffus réaliste de bonne qualité devrait présenter une faible variance de la densité d'énergie et de la propagation de la densité d'énergie dans toute la pièce. À la fois spatialement et temporellement.

Le champ diffus « non-idéal » présente alors une isotropie et une homogénéité spatiale qui ne sont pas optimales. Cela implique qu'en certains points de la salle

¹⁷¹ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 3, p. 4.

Traduit de l'anglais par moi-même, Camille Roch © 2023 : « a low variance of energy density and energy density propagation throughout the room, both spatially and temporally. »

considérée, un déséquilibre énergétique et une propagation des incidences des ondes ne sont pas équiprobables dans toutes les directions.

Romblom¹⁷² suit ce propos et précise qu'un champ diffus « non-idéal » se caractérise par des variations de l'énergie incidente dans certaines directions. Ces phénomènes s'expliquent par l'acoustique de la pièce. Effectivement, un champ diffus dépend pour beaucoup de l'acoustique de la pièce considérée. Par conséquent, la présence de cavités, de fenêtres ou de parois avec des matériaux différents provoque des champ diffus non-idéaux.

Il est aussi acquis selon plusieurs auteurs, dont Romblom¹⁷³, que le champ diffus « non-idéal » est perceptible. Romblom¹⁷⁴ mentionne même que celui-ci joue au moins un rôle dans la perception d'espace complexe. En effet, dans un champ diffus, l'auteur observe que des différences directionnelles bien au-dessus du seuil de perception sont trouvées pour des conditions latérales et de hauteur. De leur côté, Depalle *et al*¹⁷⁵ démontrent dans leur article qu'une variation d'énergie de moins de 3 dB peut être perçue dans le champ sonore. Cette idée est très importante car elle voudrait dire que les variations de la pression sonore, et donc, de la diffusion dans le champ sonore, sont perceptibles. Cela soutient le fait que le champ diffus est une notion à prendre en compte lors de la réalisation d'une production musicale 3D car ses variations sont tout à fait perceptibles.

Ainsi, Romblom¹⁷⁶ explique que ces observations démontrent que les différences énergétiques directionnelles sont une composante des espaces acoustiques et doivent être modélisées de manière appropriée.

Pour conclure, le champ diffus est une notion qui nécessite d'être idéalisée afin d'être définie de la manière la plus optimale. Un champ diffus qui n'est pas « idéal » est à éviter. Cette définition donnée par la communauté scientifique permet de tendre vers une optimisation de la qualité de diffusion d'un champ diffus. Cela est

¹⁷² ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 4.2.5, p. 64.

¹⁷³ *ibid.*

¹⁷⁴ *ibid.*, Section 3.4, p. 47.

¹⁷⁵ DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, ROMBLOM David, « Perceptual thresholds for non-ideal diffuse field reverberation » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 140, N°5, pp. 3908-3916, 2016.

¹⁷⁶ *Op. cit.*

important puisqu'il a été remarqué par les scientifiques que les variations des propriétés de ce dernier pouvaient être perçues. Ces optimisations ne sont pas négligeables. Elles seraient mêmes désirables lors de la conception d'une acoustique ou lors de la modélisation d'un champ diffus¹⁷⁷. La conception du champ diffus est quelque chose d'important lors d'une production musicale 3D. Celle-ci mettant beaucoup plus en avant que dans la stéréophonie ou la monophonie le champ sonore.

2.C.2 - L'optimisation du champ diffus dans les productions musicales 3D. Entre captations et modélisations numériques.

Peu d'éléments sont proposés pour améliorer la conception numérique ou la captation du champ diffus. Il est important de noter qu'en général on préfère restituer un champ sonore par une captation ambisonique d'ordre élevé. En effet, cette technique de captation se prête plutôt bien à l'exercice¹⁷⁸. Par conséquent, les optimisations pour la captation du champ diffus concernent généralement soit l'ambisonie soit la modélisation numérique. Comme le précise Daniel¹⁷⁹ : « Le formalisme ambisonique offre un moyen très intéressant d'appréhender les effets de salle, et surtout les propriétés du champ diffus. ». De plus, ces deux technologies ont leur propres défauts. Daniel¹⁸⁰ souligne que la partie précoce de la réverbération sera moins bien captée par un microphone ambisonique si on le compare à une reproduction par modélisation numérique d'une réverbération tardive. Il sera donc vu dans cette partie que les méthodes (captation native ou modélisation) pour obtenir un champ diffus optimal sont équivalentes dans le résultat mais pas dans le *Workflow*.

Kearney *et al*¹⁸¹ expliquent qu'une égalisation du champ diffus est possible. Celle-ci s'appelant *Diffuse Field Equalization* (DFE). Cette égalisation permet alors une

¹⁷⁷ La modélisation du champ diffus est une étape importante dans la conception numérique de réverbération tardive.

¹⁷⁸ COUSINS Michael Patrick, *The diffuse sound object* [En ligne], Directeur de Thèse : FAZI Filippo, Angleterre : University of Southampton, Thèse de Doctorat, Avril 2018, Section 10.5, p. 191.

¹⁷⁹ DANIEL Jérôme, *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 31 Juillet 2001, Section 6.2.3, p. 283.

¹⁸⁰ *ibid.*, Section 6.2.3, p. 287.

¹⁸¹ KEARNEY Gavin, MCKENZIE Thomas, MURPHY Damian, « Diffuse-Field Equalisation of Binaural Ambisonic Rendering » [En ligne], *Applied Sciences*, Octobre 2018, Vol. 8, N°8, Section 1, p. 1957.

amélioration du timbre et cela dans les hautes fréquences. Notamment au dessus de la fréquence $f_{aliasing}$ ¹⁸² en ce qui concerne une captation ambisonique vers un rendu binaural. Intrinsèquement, cela permet d'augmenter les restitutions des hautes fréquences sans augmenter l'ordre ambisonique. Pour autant, Kearney et al¹⁸³ soulignent que cette amélioration n'est pas très significative. Ce qui montre que les optimisations actuelles ne sont pas encore assez performantes. Kearney et al¹⁸⁴ précisent tout de même que la DFE est une bonne base de recherche pour étudier la question. Ainsi, même si la DFE ne fournit pas de résultats significatifs, elle reste une technique prometteuse pour le futur de la restitution du champ sonore. En réalité, pour l'instant la meilleur façon d'améliorer la restitution du champ sonore est d'augmenter le plus possible l'ordre ambisonique.

En effet, pour le domaine des hautes fréquences, Daniel¹⁸⁵ mentionne que plus l'ordre ambisonique M est bas, plus on observera une limitation des différences interaurales et de leur fluctuation. Une réduction de la décorrélation interaurale sera aussi observée. Par conséquent, plus l'ordre de troncature ambisonique M est bas, plus la restitution fréquentielle dans les hautes fréquences sera mauvaise. Cela aura alors un impact sur la restitution de la scène sonore, et donc, sur les impressions spatiales (Les impressions spatiales seront abordées plus précisément dans la Section 3.B.1).

En ce qui concerne les basses fréquences, les points de vue divergent.

Daniel¹⁸⁶ explique que la restitution est toujours similaire en fonction de l'ordre M . Dans mon mémoire de Master 1, l'étude du travail de Mckenzie et al¹⁸⁷ démontrait

¹⁸² À partir de la fréquence $f_{aliasing}$ la captation ambisonique n'est plus optimal. Que ce soit sur la restitution spatiale ou fréquentielle. J'invite le lecteur à lire mon mémoire de Master 1 dans lequel j'aborde cette notion.

¹⁸³ KEARNEY Gavin, MCKENZIE Thomas, MURPHY Damian, « Diffuse-Field Equalisation of Binaural Ambisonic Rendering » [En ligne], *Applied Sciences*, Octobre 2018, Vol. 8, N°8, Section 5, p. 1971.

¹⁸⁴ *ibid.*, Section 6, p. 1971.

¹⁸⁵ DANIEL Jérôme, *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 31 Juillet 2001, Section 6.2.3, p. 286.

¹⁸⁶ *ibid.*, Section 6.2.3, p. 287.

¹⁸⁷ MCKENZIE Thomas, MCCORMACK Leo, HOLD Christoph, « Dataset of Spatial Room Impulse Responses in a Variable Acoustics Room for Six Degrees-of-Freedom Rendering and Analysis » [En ligne], ArXiv, 23 novembre 2021, pp 1-3.

que la restitution dans les basses fréquences avait pour particularité de diminuer avec l'augmentation de l'ordre de troncature ambisonique M .

Ainsi, les propos de ces auteurs sont en contradiction.

Pour la captation des basses fréquences par un microphone ambisonique, il est préférable que les capsules soient espacées, ce qui correspond à des bas ordres de troncature ambisonique M . Cela rejoint les propos de McKenzie *et al*¹⁸⁸, car une augmentation de l'ordre de troncature ambisonique M implique un petit espacement entre les capsules. Ce qui ne serait alors pas optimal pour la captation des basses fréquences.

De plus, des optimisations de décodages existent pour l'ambisonie. Il existe le décodage *max r_E* , le décodage *in-phase* et le décodage *basic*, dit aussi *mode-matching*. Ces optimisations sont réalisées dans le but que la scène sonore soit la mieux restituée en fonction d'un dispositif de restitution. Ces optimisations ne concernent que la diffusion pour des salles de concerts. Ces derniers prennent alors en compte le système de restitution (les haut-parleurs), mais aussi la position du public vis-à-vis de ce système. Ces optimisations ne concernent donc pas l'étape de production d'une musique 3D, mais l'étape de diffusion.

Je précise que ce ne sont pas des éléments que j'aborderai dans ce mémoire même s'il est important de prendre en compte ces variantes lors de la diffusion d'une scène 3D par haut-parleurs.

Pour continuer, le champ diffus peut être modélisé au lieu d'être capté nativement par un microphone ambisonique. Romblom¹⁸⁹ présente alors dans sa Thèse un algorithme nommé *Diffuse Field Modeling* (DFM) qui modélise la réverbération tardive. De son côté, Daniel¹⁹⁰ explique que la modélisation d'un champ diffus doit reproduire parfaitement les propriétés de ce dernier, tel que l'isotropie ou l'homogénéité

¹⁸⁸ MCKENZIE Thomas, MCCORMACK Leo, HOLD Christoph, « Dataset of Spatial Room Impulse Responses in a Variable Acoustics Room for Six Degrees-of-Freedom Rendering and Analysis » [En ligne], ArXiv, 23 novembre 2021, pp 1-3.

¹⁸⁹ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 3.5, p. 48.

¹⁹⁰ DANIEL Jérôme, *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 31 Juillet 2001, Section 5.2.4, pp. 253-254.

spatiale. Romblom¹⁹¹ rejoint en quelque sorte les propos de Daniel¹⁹² et précise que la modélisation d'une réverbération tardive s'appuie sur la description statistique du champ diffus. Ainsi, les propriétés spatiales, directionnelles, temporelles, spectrales et modales doivent être reproduites au mieux. Ce qui est le cas aujourd'hui.

Pour autant, tout comme l'ambisonie, la modélisation numérique a ses propres défauts. Daniel¹⁹³ explique que dans les modélisations numériques de champ diffus, des éléments parasitent la partie tardive de la réverbération. Quant à lui, Romblom¹⁹⁴ souligne que la modélisation du champ diffus peut se réaliser de manière totalement synthétique, et donc, numérique. Cette modélisation peut aussi être réalisée grâce à une réponse impulsionnelle de salle captée par un microphone ambisonique. Cette technique est couramment utilisée et est très astucieuse. Pourtant, elle implique un problème : en utilisant un microphone ambisonique, la modélisation incubera les limites du microphone ambisonique qui ont été décrites plus haut.

En conséquence, il est compréhensible par les propos des différents auteurs que les deux techniques (ambisonie et DFM) utilisées pour produire un champ diffus ont toutes deux des limites. Ces deux techniques étant déjà bien pensées, il n'est pas réellement possible de trouver d'optimisation concrète. Ici, les optimisations viendraient surtout par l'amélioration des technologies ou la création de nouveaux outils. Il reste tout de même important de mentionner deux choses. Une captation ambisonique native du champ diffus ne pourra pas être modifiée par la suite. Tandis, qu'avec une modélisation du champ diffus (que ce soit via une incrémentation d'une réponse impulsionnelle captée par un microphone ambisonique ou non), il sera possible de contrôler certains paramètres. En effet, les logiciels de spatialisation comme le *Spat Revolution* permettent d'avoir un contrôle sur la diffusion, sur les premières réflexions ou sur le temps de réverbération.

Le choix entre une modélisation numérique ou une captation native doit se faire intelligemment.

¹⁹¹ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 3.5, p. 48.

¹⁹² DANIEL Jérôme, *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 31 Juillet 2001, Section 5.2.4, pp. 253-254.

¹⁹³ *Ibid.*, Section 6.2.3, p. 287.

¹⁹⁴ *Op. cit.*

Si les objets sonores incrémentés dans le logiciel de spatialisation sont des instruments acoustiques, et donc, captés par des microphones, il sera plus intéressant d'utiliser un microphone ambisonique pour obtenir leur champ diffus. Cela afin que l'acoustique du champ diffus corresponde à l'acoustique de la salle dans laquelle a eu lieu la captation des objets sonores. Pour autant, comme il a été expliqué par Romblom¹⁹⁵, il est possible d'utiliser une réponse impulsionnelle de salle captée par un microphone ambisonique et d'incrémenter cela dans un logiciel de spatialisation. Il serait donc possible de s'affranchir d'une captation ambisonique du champ diffus avec des instruments en *Big band* comme j'ai pu le réaliser dans mon projet recherche/création lors de mon mémoire de Master 1. Toutefois, cela n'est possible que si le logiciel de spatialisation présente cette fonctionnalité.

Si les objets sonores incrémentés dans le logiciel de spatialisation sont des instruments virtuels, il sera plus intéressant d'utiliser une modélisation numérique du champ diffus. En effet, il n'y aura pas de considération acoustique à prendre compte comparé au premier cas.

En d'autres termes, le choix entre ces plusieurs possibilités pour réaliser une production musicale 3D dépendra du matériel à disposition et des choix esthétiques de l'artiste et/ou ingénieur son.

¹⁹⁵ ROMBLUM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 3.5, p. 48.

III - LA PERCEPTION SPATIALE DES SOURCES SONORES CONSTITUANT UNE SCÈNE SONORE 3D.

A - La discrimination de la localisation d'une source sonore et l'identification du champ diffus par l'Homme.

Dans cette partie, on étudiera les mécanismes perceptifs qui nous permettent d'analyser à l'écoute, les différents éléments constituant une scène sonore 3D. Certains concepts de psycho-acoustiques et de psychologies acoustiques seront étudiés. Il sera aussi relevé les limites de la perception sonore chez l'Homme.

Dans ce mémoire, la perception sera divisée en deux catégories : la discrimination et l'identification. Cela afin de mieux comprendre ce qu'englobe la perception dans le cadre d'une production musicale 3D.

Cette partie est réalisée pour poser une définition de ce qu'est la perception, afin de rendre son concept, ses valeurs, ses termes compréhensibles.

Cela dans le but de rendre ces notions accessibles aux artistes/ingénieurs du son voulant produire des œuvres musicales 3D. En effet, il est soutenu dans ce mémoire qu'une bonne compréhension de la perception dans une scène sonore 3D est importante pour réaliser et optimiser l'immersion sonore dans une production musicale 3D.

3.A.1 - Introduction à la perception dans une scène sonore 3D.

La perception est une notion assez vaste qui est la résultante de plusieurs mécanismes psycho-acoustiques et d'un traitement réalisé par le système auditif central. Si l'on projette ce terme dans le cadre d'une production musicale 3D, le terme perception regrouperait la perception des sources sonores (entre autres leur type et leur nature), la perception de leur localisation, la perception de l'espace dans lequel ces instruments se trouvent, la perception du champ diffus, et autres... Il sera proposé plus tard de regrouper ces termes par la notion de perception spatiale (Section 3.B.1).

Par conséquent, il est important de définir la perception au mieux, afin que celle-ci soit comprise parfaitement. Dans le cadre d'une production musicale 3D, la perception est fondamentale à la spatialisation. On cherche à éviter les effets de masquages, mais aussi à optimiser la perception du champ diffus et de la localisation des instruments, dans un but d'amélioration du caractère immersif d'une production musicale 3D.

En réalité, il faudrait utiliser des terminologies plus précises.

Pour la perception de la localisation des instruments dans une scène 3D il serait judicieux de parler de discrimination de la localisation des instruments. En ce qui concerne la perception du champ diffus il serait plus judicieux de parler d'identification.

Cette distinction est nécessaire car elle permet de mieux encadrer la notion de perception qui est essentielle à la production musicale 3D.

L'identification se distingue de la discrimination par le fait qu'on essaye d'établir une identité. Par exemple, les mécanismes anthropologiques permettant la perception sonore contribuent à l'identification d'un lieu, et donc, d'un espace. Dans le cas d'un champ sonore, par ces mêmes mécanismes il est possible de différencier le champ diffus du champ direct, et vice versa. Ces mécanismes de différenciation nous permettent donc d'identifier le champ diffus et le champ direct.

La discrimination se distingue de l'identification. La localisation des sources est un mécanisme impliquant une distinction des positions dans l'espace des différentes sources sonores. Ceci s'explique par le fait qu'on essaye de distinguer la localisation d'une source sonore parmi plusieurs autres.

Même s'il existe un processus d'identification pour juger de la localisation d'une source sonore, c'est surtout une discrimination qui se réalise par la distinction des différentes positions dans l'espace des sources composant la scène sonore 3D.

Lorsqu'on évoque la perception de la spatialisation, on désigne à la fois la perception de localisation d'une source sonore et la perception de l'acoustique de l'espace. En d'autres termes, la perception spatiale regroupe tous les éléments nous permettant de percevoir dans sa globalité une scène sonore 3D.

Les processus nous permettant de discriminer la localisation d'une source sonore et d'identifier l'espace et le champ diffus sont à l'origine de la perception sonore. Il serait donc intéressant d'étudier ces mécanismes. Cela afin de comprendre et d'op-

timiser les processus à l'origine de l'immersion et la perception d'une scène sonore dans une production musicale 3D.

De plus, dans cette partie du mémoire, le terme « correct » sera souvent utilisé. Celui-ci n'a pas pour but de porter un jugement subjectif. Ce terme sera utilisé en général pour signifier que la modélisation de la localisation de la source sonore réalisée par le cerveau correspond à la localisation réelle de cette source sonore.

Il sera intéressant de noter que la discrimination de la localisation d'une source sonore inclut une discrimination de l'élévation et de la distance de la source sonore vis-à-vis de l'auditeur. Ainsi, dans les Sections 3.A.2/3.A.3 de ce mémoire, on étudiera les éléments anthropologiques permettant à un auditeur de discriminer la localisation d'une source sonore. On observera également le rôle du cerveau dans l'interprétation des indices de localisations lui permettant de modéliser la position dans l'espace d'une source sonore.

3.A.2 - Les mécanismes psycho-acoustiques et leur rôle dans la discrimination de la localisation d'une source sonore : la discrimination de la position et de l'élévation de la source sonore vis-à-vis de l'auditeur.

Les indices psycho-acoustiques nous permettant de discriminer la position d'une source sonore sont plusieurs. Ils peuvent être binauraux ou monauraux. Les indices binauraux s'appuient sur le domaine temporel et d'intensité tandis que les indices monauraux s'appuient sur le domaine fréquentiel. Contrairement aux monauraux, les binauraux fonctionnent avec une analyse des différences perçues entre les deux oreilles. Les indices binauraux sont au nombre de trois : les *Interaural Level Difference* (ILD), les *Interaural Time Difference* (ITD) et les *Interaural Phase Difference* (IPD).

Les ILD fournissent des informations concernant l'intensité. La nature de ces informations aide alors la discrimination de la position d'une source sonore vis-à-vis de l'auditeur.

Lord Rayleigh est l'un des premiers à avoir démontré le rôle de l'intensité dans la discrimination de la localisation des sources sonores. Par les propos de Lord Ray-

leigh, Baskind¹⁹⁶ explique que la tête est un obstacle provoquant une différence d'intensité perçue entre les deux oreilles. Ce phénomène n'est observable que pour les hautes fréquences et non les basses fréquences. Baskind¹⁹⁷ souligne alors qu'en dessous de 500 Hz il y a peu de différences interaurales d'intensité. Cela à cause des dimensions de la tête vis-à-vis des longueurs d'onde.

Berthomieu¹⁹⁸ précise que dans les hautes fréquences, la réflexion des ondes par la tête peut provoquer des ILD allant jusqu'à 35 dB de niveau sonore de différence entre les deux oreilles. Ce cas extrême se produit à 10 kHz lorsque la source se trouve à 90° d'azimut vis-à-vis de la tête.

La valeur de l'ILD dépend de la longueur d'onde, et donc, de la fréquence, mais aussi de la position de la source sonore vis-à-vis de la tête.

Pour autant, Berthomieu¹⁹⁹ mentionne qu'à partir d'une certaine distance (en dessous de 1 m), les fronts d'ondes d'une source sonore ne correspondent plus au modèle des ondes planes. Cela se traduit par une augmentation de l'ILD, et cela surtout dans les basses fréquences. Par exemple, pour une source sonore placée à 0,12 m de l'auditeur la différence interaurale peut se mesurer à 20 dB.

En résumé, la discrimination de la position d'une source sonore via l'ILD se réalise surtout dans les hautes fréquences, mais aussi dans les basses fréquences pour des distances très petites entre l'auditeur et la source.

Concernant l'ITD et l'IPD, il s'agit de deux indices interauraux basés sur une même information : le retard temporel perçu entre l'oreille ipsilatérale et controlatérale. Ce phénomène est décrit en Figure 3.1.

Comme le souligne Berthomieu²⁰⁰, un son provenant d'un côté de l'auditeur atteindra dans un premier temps l'oreille ipsilatérale (située du même côté de la source) puis dans un deuxième temps l'oreille controlatérale (située du même côté opposé de la source). Ainsi, un retard temporel subsiste entre les informations perçues entre

¹⁹⁶ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.2, p. 34.

¹⁹⁷ *Ibid.*

¹⁹⁸ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, Section 1.2.1, p. 11.

¹⁹⁹ *Ibid.*, Section 1.2.1, p. 12.

²⁰⁰ *Ibid.*, Section 1.2.1, p. 8.

les deux oreilles.

Ce retard temporel est quantifié par l'ITD et l'IPD.

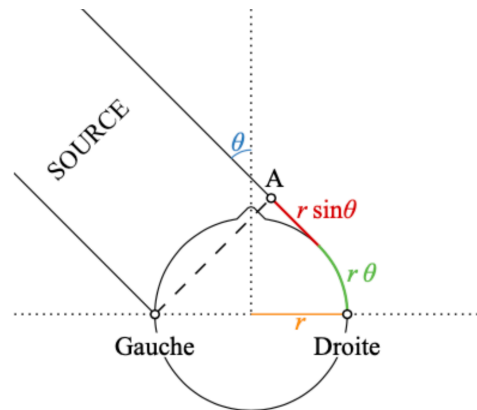


Figure 3.1 : Représentation du retard d'arrivée des informations entre les deux oreilles à l'origine de l'ITD et de l'IPD pour une tête de rayon r et une source située à un azimut $\theta \neq 0^\circ$.
Gautier Berthomieu©2019

Il est important de considérer que le terme IPD est utilisé dans le cas où la source sonore serait une sinusoïde. Avec le temps, il est devenu courant de parler de l'ITD comme étant le mécanisme associé aux hautes fréquences et l'IPD comme étant le mécanisme associé aux basses fréquences.

L'ITD s'observe dans les hautes fréquences. Ces informations aident à la discrimination de la position d'une source sonore. De plus, par les propos de Lord Rayleigh, Baskind²⁰¹ explique que l'ITD est un phénomène observable au dessus de 1,6 kHz. Cependant, le rôle de l'ITD dans les hautes fréquences est assez faible comparé à l'ILD. La différence de retard dans les hautes fréquences n'est pas un indice très performant dans les hautes fréquences puisque ce sera surtout les ILD qui permettront la localisation sonore dans ce registre fréquentiel.

Par les propos de Lord Rayleigh, Baskind²⁰² explique que l'IPD est un phénomène s'effectuant en dessous de 1,6 kHz.

²⁰¹ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.2, p. 34.

²⁰² *Ibid.*

Berthomieu²⁰³ ajoute que le retard interaural temporel est un indice de localisation efficace dans les basses fréquences. Cela s'explique par le fait que le retard temporel restera inférieur comparé aux périodes fréquentielles des basses fréquences. Il ne peut pas y avoir de problème d'ambiguïté lors de l'interprétation de ce retard vis-à-vis de la période fréquentielle de la source sonore.

Par conséquent, en basses fréquences, lorsque $k \cdot r \ll 1$, (avec $k = \frac{\omega}{c_0}$ le nombre

d'onde et c_0 la célérité du son dans l'air et ω la pulsation du signal), Berthomieu²⁰⁴ exprime l'ITD tel que :

$$\text{ITD}_{\text{BF}} = \frac{3 \cdot r}{c_0} \sin(\theta) \quad (3.1)$$

En régime sinusoïdal l'équation 3.2 s'exprime de tel sorte que :

$$\text{IPD}_{\text{BF}} = \text{ITD}_{\text{BF}} \cdot \omega = 3 \cdot k \cdot r \sin(\theta) \quad (3.2)$$

Comme il a été expliqué, les valeurs de l'ITD resteront inférieures aux périodes fréquentielles dans les basses fréquences. Ce qui explique pourquoi l'IPD est un indice aussi efficace dans les basses fréquences. Intrinsèquement, la logique voudrait qu'il y ait une ambiguïté dans les hautes fréquences puisque les valeurs de l'ITD pourront être supérieures ou égales aux périodes fréquentielles dans les hautes fréquences. Pourtant, Berthomieu²⁰⁵ et Baskind²⁰⁶ précisent que pour des sons non-stationnaires, l'ITD sera perceptible sur l'enveloppe du signal tel que :

$$\text{ITD}_{\text{HF}} = \frac{a}{c_0} (\theta + \sin(\theta)) \quad (3.3)$$

Enfin, Berthomieu²⁰⁷ souligne que l'ITD est dépendante et variera en fonction de la fréquence entre 500 Hz et 3 kHz.

Il est donc compliqué dans cet intervalle de prouver réellement qu'une relation di-

²⁰³ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, Section 1.2.1, p. 9.

²⁰⁴ *Ibid.*

²⁰⁵ *Ibid.*, Section 1.2.1, p. 10.

²⁰⁶ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.2, p. 34.

²⁰⁷ *Op. cit.*

recte s'opère entre l'incidence de la source et l'ITD. Cette observation montre aussi que les indices nous permettant la discrimination de la position d'une source sonore dépendent de la fréquence.

Il serait alors intéressant de quantifier le rôle que peuvent avoir les fréquences sur l'ITD et ainsi observer les conséquences de cette dépendance fréquentielle des ILD sur la discrimination d'une localisation sonore. Cette étude pourrait alors démontrer que certains registres fréquentiels (notamment entre 500 Hz et 3 kHz) peuvent porter à des ambiguïtés dans l'interprétation des ITD par notre cerveau.

Ainsi, Pierre Guillon²⁰⁸ soutiendra dans sa Thèse qu'à partir de 600 Hz les ITD sont trop instables.

En ce qui concerne les indices monauraux, il s'agit d'un indice de localisation s'observant par la modification spectrale réalisée par le pavillon, le torse ou encore la tête. Les indices monauraux renseignent aussi sur l'élévation d'une source sonore. Mon mémoire de Bachelor²⁰⁹ à la SAE Institute Paris comporte une partie consacrée entièrement aux indices monauraux. J'invite donc le lecteur à lire ce travail s'il veut comprendre avec précision le rôle des indices monauraux dans la localisation d'une source sonore. Pour autant, je vais rapidement expliquer quels sont leurs principes fondamentaux dans ce mémoire de master 2.

Comme le mentionnent Baskind²¹⁰, Berthomieu²¹¹ et Pierre Guillon²¹², les indices monauraux s'observent dans les hautes fréquences. Ils sont la résultante de plusieurs réflexions sur le pavillon de l'oreille humaine, le torse ou encore la tête.

²⁰⁸ GUILLON Pierre, *Individualisation des indices spectraux pour la synthèse binaurale : recherche et exploitation des similarités inter-individuelles pour l'adaptation ou la reconstruction de HRTF* [en ligne], Directeur de Thèse Laurent SIMON, France : Université du Maine, Thèse de Doctorat, 11 juin 2009.

²⁰⁹ ROCH Camille, *Enregistrement du champ sonore d'une Jam session en ambisonie/binaural natif avec une caméra 360°. Le comparatif de deux techniques de captation de champ sonore et l'apport de la vidéo pour localiser les sons dans l'espace*, Directeur de mémoire : DELHAYE Marion, LABROUE Philippe, France : SAE Institute Paris, mémoire de Bachelor, 6 août 2021.

²¹⁰ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.3, p. 35.

²¹¹ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, Section 1.2.2, p.14.

²¹² *Op. cit.*

Berthomieu²¹³ souligne également que la géométrie du pavillon joue un rôle important dans la perception de l'élévation. La pavillon permet aussi de lever certaines ambiguïtés avant/arrière, ou même la localisation en azimuth. Ces ambiguïtés seront étudiées plus profondément en Section 3.A.4.

Baskind²¹⁴ précise que dans le plan médian, les indices monauraux permettent de combler un manque d'information fournit par les indices binauraux.

Plus généralement, des différences interaurales quasi-nulles et constantes s'observent lorsque la source sonore se trouve dans un cône de confusion. Autrement dit, les indices interauraux ne fournissent pas d'informations pour la discrimination de la localisation d'une source sonore. Les pavillons permettent de lever l'ambiguïté de la localisation au sein de ces cônes de confusion.

Les cônes de confusion correspondent à des zones qui se trouvent sur les côtés. Le schéma de la Figure 3.2 met en image le principe du cône de confusion.

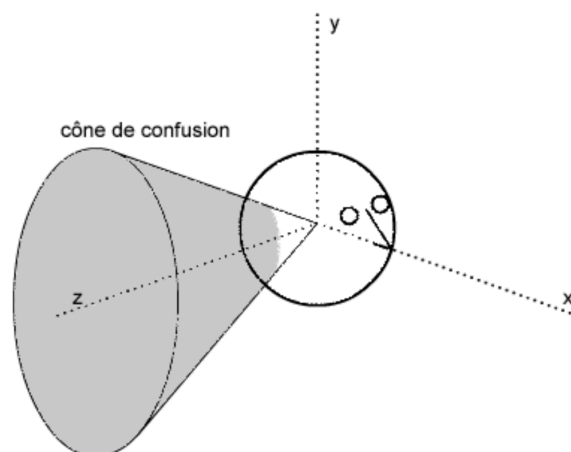


Figure 3.2 : Représentation d'un cône de confusion.
Raphaël Greff ©2008

Pour que les réflexions à l'origine des indices monauraux permettent la localisation et la perception de l'élévation, il est important que le signal contiennent des hautes fréquences.

²¹³ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, Section 1.2.2, p.15.

²¹⁴ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.4, p. 36.

Pour autant, cela n'est pas suffisant. Baskind²¹⁵ ajoute que la source doit être familière à l'auditeur afin que ce dernier puisse évaluer les modifications spectrales provoquées par les indices monauraux.

Cette idée amène alors à des notions de psychologie acoustique. En effet, si le cerveau arrive à évaluer les modifications fréquentielles d'une source qui lui est familière, cela indique que ce dernier arrive à identifier les modifications spectrales par différence avec le contenu fréquentiel original de cette source sans l'incidence acoustique des réflexions.

Cela amène à des notions de mémoire vis-à-vis de l'identification d'une source et de son spectre fréquentiel. La psychologie acoustique est donc un élément qui se distingue tout à fait de la psycho-acoustique par le fait que c'est un mécanisme qui ne se base pas sur les réflexions sonores. Mais plutôt sur la familiarité et l'éducation de la mémoire vis-à-vis des sons qui entourent l'Homme.

Il sera aussi ajouté qu'une source sonore en déplacement sera plus facilement localisable qu'une source sonore immobile. Le mouvement d'une source sonore fournit une multitude d'informations monaurales et interaurales permettant de lever certaines ambiguïtés (notamment celles qui sont avants-arrière et au niveau des cônes de confusions). Ce qui permet de localiser rapidement la source sonore comparée à si cette dernière était statique. D'ailleurs, lorsqu'une source est difficile à localiser, le réflexe de bouger ou d'incliner la tête s'opère. C'est un mécanisme important dans la localisation sonore puisqu'il permet, par les mouvements de tête vis-à-vis de la source sonore, de fournir des indices de localisations en plus des informations à disposition. Ce réflexe a donc lieu dans le but d'améliorer la localisation d'une source sonore et ainsi d'éviter les flous de localisations.

Les mouvements de tête sont aussi révélateurs du rôle de la psychologie acoustique dans la localisation sonore. En effet, la psychologie acoustique est à l'origine de certains réflexes comme les mouvements de tête lorsque la localisation d'une source sonore est compliquée.

Enfin, il est important que la bande passante de la source sonore soit large pour que les réflexions à l'origine des indices monauraux permettent la localisation sonore de

²¹⁵ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.3, p. 35.

cette dernière. Sans cela, l'auditeur ne distinguera pas les filtrages. Berthomieu²¹⁶ explique que les sources sonores présentant une bande étroite ne permettent pas aux indices monauraux d'être des informations concrètes pour la localisation sonore. Les modifications spectrales n'étant pas assez larges pour que le cerveau puisse identifier la localisation d'une source sonore seulement à partir des indices monauraux.

Berthomieu²¹⁷ souligne alors quelque chose de très importants sur les limites des mécanismes psycho-acoustiques.

Pour des bandes étroites, la perception de l'élévation d'une source sonore se base-
ra uniquement sur la partie du spectre contenant l'énergie donnant les indices d'élé-
vation. Cela, indépendamment de l'incidence des ondes générées par une source
sonore dans le plan médian.

Ce fait implique alors que le cerveau pourra être amené à percevoir faussement la
localisation d'une source sonore comparée à sa localisation réelle.

En d'autres termes, une source sonore doit présenter une largeur de bande suffi-
sante pour qu'un auditeur puisse discriminer l'élévation et la position d'une source
sonore.

Ici aussi, ces notions font appel à l'identification des modifications spectrales par
différence avec un contenu fréquentiel original. Ce qui démontre que par la familiari-
té et l'éducation de la mémoire vis-à-vis des sons qui entourent l'Homme, la psy-
chologie acoustique est un élément important qui se complète à la psycho-acous-
tique pour permettre la localisation sonore.

Ainsi, au regard des différents éléments étudiés auparavant, le système auditif pré-
sente certaines limites, entraînant des flous de localisation, des ambiguïtés. Un au-
diteur n'arrivera pas à discriminer correctement la localisation d'une source sonore.

Ces notions seront étudiées plus loin en Section 3.A.5.

Il reste tout de même important de relativiser, puisque la perception sonore chez
l'Homme permet une faculté d'adaptation exceptionnelle afin de fournir des informa-
tions permettant la localisation sonore en toute circonstance.

De plus, comme il a été introduit auparavant, les mouvements, voir micromouve-

²¹⁶ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Direc-
teur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 dé-
cembre 2019, Section 1.2.2, p.15.

²¹⁷ *Ibid.*

ments d'une source sonore, sont des informations extrêmement utiles afin d'obtenir la localisation correcte d'une source sonore.

Dans un cas d'écoute naturelle, les sources sonores sont toujours en mouvements, voir en micromouvements. Cela s'expliquant par leur propre trajet dans l'espace. Mais aussi par les différents mouvements que réalise notre tête ou notre corps vis-à-vis d'une source sonore. Cela dans le but d'éliminer les ambiguïtés ou les flous de localisations, et donc, d'accroître la localisation sonore.

Ainsi, la réalisation d'une production musicale 3D avec des sources sonores totalement fixes n'est pas forcément une bonne approche. Cela est encore plus d'actualité pour une diffusion binaural puisque les mouvements de tête ne sont pas pris en compte dans une restitution binaural.

L'auditeur n'aura donc pas assez d'informations monaurales et interaurales afin de passer outre les ambiguïtés ou les flous de localisations pour réaliser une perception correcte de la localisation d'une source sonore.

Il serait donc judicieux de réaliser des micromouvements sur une source sonore qui est censé être fixe afin que les informations renseignant la localisation de cette dernière soient suffisantes pour éviter une ambiguïté ou une confusion dans la perception de la localisation de cette dernière.

Les indices binauraux et monauraux sont donc des informations nécessaires à la discrimination de la position d'une source sonore. Ces indices obéissent à des conditions afin qu'il n'y ait pas d'ambiguïtés, de mauvaises interprétations des indices de localisation fournis par les indices binauraux et monauraux. Ces ambiguïtés ou ces problèmes d'interprétation d'informations peuvent fausser la perception de la localisation sonore, ce qui pourrait entacher l'immersion de l'auditeur dans une production musicale 3D. En outre, cela démontre qu'une bonne compréhension des mécanismes nous permettant de discriminer la localisation d'une source sonore est nécessaire pour assurer l'immersion dans une production musicale 3D. Il serait alors possible d'optimiser le choix du placement des sources sonores en fonction de leur registre fréquentiel dans une scène sonore 3D. Cela éviterait des ambiguïtés ou accroîtrait la perception d'une source sonore chez l'auditeur.

3.A.3 - Les mécanismes psycho-acoustiques et leur rôle dans la discrimination de la localisation d'une source sonore : la discrimination de la distance d'une source sonore vis-à-vis de l'auditeur.

Les indices binauraux et monauraux ne sont pas les seules informations permettant la discrimination d'une localisation sonore par l'être humain. Des mécanismes sont aussi à l'origine de la discrimination de la distance ou de l'élévation d'une source.

Plusieurs processus permettent à l'auditeur de discriminer la distance d'une source sonore. Baskind²¹⁸ et Berthomieu²¹⁹ expliquent que notre cerveau arrive à interpréter des concepts physiques se produisant lors d'une augmentation de la distance de la source sonore vis-à-vis de l'auditeur.

Par exemple, en champ lointain l'intensité physique varie avec la distance de telle sorte que pour chaque doublement de la distance entre la source sonore et l'auditeur, l'intensité baisse de 6 dB. Berthomieu²²⁰ souligne qu'une décroissance du niveau sonore d'un son est un indicateur pour l'Homme d'une augmentation de la distance de la source sonore.

Baskind²²¹ et Berthomieu²²² ajoutent aussi que cet indice sur la distance n'est efficace que si la source sonore est familière à l'auditeur.

Cette familiarité avec la source sonore est importante puisque la perception de la distance est liée à une modification du timbre de la source en fonction de la distance. Baskind²²³ présente le fait qu'une source sonore verra ses basses fréquences amplifiées si celles-ci se trouvent à proximité de l'auditeur.

Pour des distances supérieures à 15 m, le timbre de la source sonore sera encore

²¹⁸ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.5.

²¹⁹ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, Section 1.2.3.

²²⁰ *Ibid.*, Section 1.2.3, p. 15.

²²¹ *Op. cit.*, Section 2.5, p. 37.

²²² *Op. cit.*, Section 1.2.3, p. 17.

²²³ *Op. cit.*

plus altéré. En effet, plus la distance sera grande, moins l'auditeur percevra les hautes fréquences. Cela variant aussi en fonction des conditions météorologiques. En d'autres termes, Baskind²²⁴ et Berthomieu²²⁵ démontrent que la modification du timbre et de l'intensité de la source sonore en fonction de l'éloignement sont des informations permettant alors à l'auditeur de discriminer efficacement la distance.

Néanmoins, la modification du timbre et de l'intensité ne sont pas les seuls éléments contribuant à la discrimination de la distance d'une source sonore.

Baskind²²⁶ et Berthomieu²²⁷ expliquent que le rapport d'énergie du champ direct vis-à-vis de l'énergie du champ réverbéré permet à l'Homme de distinguer la distance d'une source sonore. Cependant, ce propos sera nuancé puisque ce rapport est significatif dans la perception seulement lorsque la distance critique est franchie. En dessous de la distance critique, se seront surtout les premières réflexions qui permettront de percevoir la distance d'une source sonore.

Pour chaque doublement de la distance, si l'intensité de la source sonore perçue baisse de 6 dB, celle de l'intensité sonore de la réverbération reste constante. C'est le principe de la distance critique à partir de laquelle la densité d'énergie direct de la source sonore est égale à la densité d'énergie du champ réverbéré²²⁸.

Baskind²²⁹ précise qu'avec le rapport champ direct sur champ réverbéré il n'est pas nécessaire que l'auditeur soit familier avec la source pour interpréter les indices fournis sur la distance. Le rapport d'énergie est donc un indice absolu pour l'auditeur afin d'évaluer la distance d'une source sonore, comparé aux modifications timbrales et d'intensités.

De plus, Berthomieu²³⁰ présente dans sa Thèse le *Direct-to-Reverberant energy Ra-*

²²⁴ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.5, p. 37.

²²⁵ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, Section 1.2.3, p. 17.

²²⁶ *Op. cit.*, Section 3.3, p. 44.

²²⁷ *Op. cit.*

²²⁸ AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, Section 5, p. 7.

²²⁹ *Op. cit.*, Section 3.3, p. 45.

²³⁰ *Op. cit.*

tio (DRR) qui est un indice décrivant le rapport champ direct sur champ réverbéré. Utiliser ce rapport dans des logiciels de spatialisation, pour permettre aux ingénieurs du son/artistes de gérer au mieux la perception de la source sonore en fonction de la distance, serait des plus pertinents.

Pour finir, les indices binauraux et monauraux sont aussi des indices pouvant renseigner sur la distance d'une source sonore.

En Section 3.A.2, il était indiqué que les informations fournies par les ILD, les ITD et les IPD seraient modifiés en fonction de la distance de la source sonore. Cela est similaire pour les indices monauraux. Cette dépendance des indices binauraux et monauraux par rapport à la distance permettent de donner des informations sur la l'éloignement de la source sonore.

Berthomieu²³¹ mentionne qu'une source sonore en champ proche provoque des modifications spectrales via la diffraction réalisée par la tête. Ces modifications sont observables dans les basses fréquences pour des sources très proches. Cela concorderait avec les propos de Berthomieu présentés en Section 3.A.2 expliquant qu'à partir d'une certaine distance (en dessous de 1 m), une augmentation de l'ILD est observable dans les basses fréquences.

Cependant, Berthomieu²³² nuance son propos et explique que la variation de l'ILD n'est pas significatif pour des sources à plus de 1 m de l'auditeur.

Autrement dit, les indices binauraux et monauraux permettent d'estimer la distance d'une source sonore pour des faibles distances et des sources contenant des basses fréquences.

En fonction de la distance, un parallaxe acoustique permettra de discriminer la distance pour des sources proches.

Berthomieu²³³ souligne que si la source n'est pas localisée dans le plan médian, l'angle entre la source et le plan sagittal passant par l'oreille gauche (α_R) est différent de l'angle entre la source et le plan sagittal passant par l'oreille droite (α_L). Cette différence augmente si la distance de la source diminue. Ce principe est présenté via la Figure 3.3.

²³¹ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, Section 1.2.3, p. 18.

²³² *Ibid.*, Section 1.2.3, p. 19.

²³³ *Ibid.*

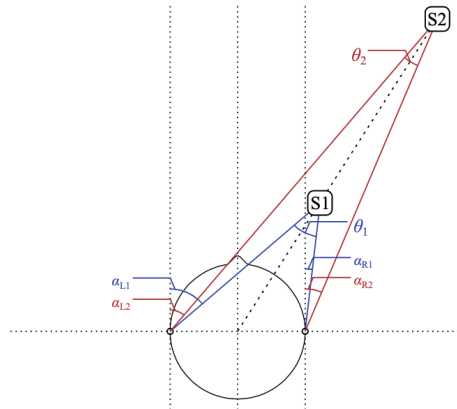


Figure 3.3 : Représentation du parallaxe acoustique entre les deux oreilles pour deux sources sonores S1 et S2. S1 et S2 sont situés à un même azimut, avec S1 plus proche de l'auditeur que S2. La comparaison des angles $\alpha_{R1,2}$ et $\alpha_{L1,2}$ amène à déduire l'angle de parallaxe $\theta_{1,2}$ permettant discriminer la distance pour des sources proches. On notera que l'angle de parallaxe θ est plus grand pour des faibles distances que pour des grandes distances. Dans cette Figure, on observe en effet que $\theta_1 > \theta_2$.

Gautier Berthomieu©2019

La variation de cette différence d'angle en fonction de la distance aide l'auditeur à discriminer la distance d'une source sonore.

Pour autant, cette différence d'angle n'est plus conséquente pour de grande distance : α_R et α_L ne varient plus significativement pour des distances importantes.

Ainsi, ce parallaxe acoustique aide à la discrimination de la distance uniquement pour des distances assez proches de l'auditeur (environ 1 m).

En conséquence, les indices binauraux et monauraux, le rapport d'énergie champ direct sur champ réverbéré et les modifications timbrales et d'intensités sont des informations contribuant à la discrimination de la distance d'une source sonore. Mais chaque mécanisme a ses propres limites.

Les indices binauraux et monauraux sont des indices renseignant sur des distances assez proches, alors que les modifications timbrales, d'intensités ou encore le DRR renseignent sur des distances lointaines.

L'association de ces mécanismes est donc un cercle vertueux permettant à la fois de déterminer la distance d'une source sonore qui est proche et lointaine.

3.A.4 - Les mécanismes psycho-acoustiques et leur rôle dans la discrimination de la localisation d'une source sonore : le rôle du cerveau et l'interprétation des informations que celui-ci réalise pour la perception d'une scène sonore 3D.

Mis ensemble, les indices permettant de discriminer l'élévation, la position et la distance d'une source sonore permettent à l'Homme la localisation sonore. Cependant, ces indices ne sont pas les seuls éléments à nous permettre la perception sonore. Le cerveau, plus précisément, le système auditif central, incluant le nerf auditif jusqu'au cortex auditif, réalise une interprétation des indices vues dans les Sections 3.A.2 et 3.A.3.

Cette interprétation est très importante puisqu'elle permet au cerveau de modéliser la scène sonore 3D à laquelle l'auditeur fait face. Malgré l'avancé des connaissances dans le domaine perceptif, le rôle du cerveau reste toujours incompris dans la perception sonore.

Afin d'analyser les indices binauraux, monauraux ou autres, Baskind²³⁴ explique que pour des stimuli à large bande, le cerveau réalise une décomposition du stimuli en plusieurs signaux à bande étroite qui sont traités séparément. Cette hypothèse est confirmée par les résultats obtenus à travers plusieurs études psycho-acoustiques effectuées via une écoute dichotique.

Dans une étude sur la latéralisation de sons purs dichotiques, Baskind²³⁵ démontre que deux signaux de fréquences différentes à gauche et à droite ne fusionnent pas ensemble. Notre cerveau ne considère pas les deux signaux comme étant un seul événement auditif. Cela prouve par une analyse en bande étroite, que le cerveau reconnaît les fréquences différenciant ces deux signaux. Cette expérience justifie donc l'hypothèse que le cerveau analyse un stimuli en bande étroite et non en une seule bande.

Une hypothèse souligne que le système auditif central ne se base pas sur tous les indices de localisation qu'il lui est possible de relever dans un stimuli. Cela indiquerait que le système auditif central fait un choix parmi tous les indices qu'il pourra

²³⁴ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.2, p. 35.

²³⁵ *Ibid.*

analyser. Le cerveau aurait alors tendance à traiter les indices les plus flagrants, les plus simples à relever.

Berthomieu²³⁶ explique alors :

« lorsqu'un son complexe est perçu par le système auditif, ce dernier n'évalue pas chaque fine variation interaurale de phase pour chaque fréquence du spectre. Plutôt, il détermine une ITD globale sur les composantes basses fréquences du spectre sur laquelle il base la sensation de latéralisation du son. »

Ce propos rejoindrait l'idée qu'en fonction du contexte, certains éléments pousseraient le cerveau à avoir une préférence pour certains indices de localisations. Il serait judicieux de connaître les facteurs déterminant le choix du cerveau sur ces indices de localisation.

Baskind²³⁷ précise que la fréquence serait l'un des éléments déterminant le cerveau à choisir l'indice de localisations sur lequel il va se reposer pour opérer la perception sonore.

Par exemple, les ILD seront prises en compte pour toutes les fréquences, mais leur importance diminuera drastiquement pour les basses fréquences (vers 2 kHz environ). Concernent les IPD, ils ne sont perceptibles que dans les basses fréquences à partir d'environ 1,6 kHz.

ILD et IPD se complètent et permettent ensemble, sur la globalité du spectre audible, de fournir des indices sur la localisation sonore.

Comme le souligne Berthomieu²³⁸, ce principe suit la théorie « duplex » que Lord Rayleigh avait soutenu : l'utilisation par le cerveau des ILD dans les hautes fréquences et des IPD dans les basses fréquences.

Comme il est énoncé dans la Section 3.A.2, la plage fréquentielle sur laquelle les ILD et les ITD fonctionnent est similaire (au-dessus de 2 kHz pour les ILD et 1,6kHz pour les ITD). Or, les informations des ILD sont considérées par le cerveau comme

²³⁶ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, Section 1.2.1, p. 11.

²³⁷ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.2, p. 35.

²³⁸ *Op. cit.*, Section 1.2.1, p. 12.

plus importantes que celles fournies par les ITD. Les ITD n'apparaissent donc pas comme des indices primordiaux pour le cerveau. Ils délivrent des informations complémentaires pouvant s'avérer utiles. Cela démontre que le cerveau sait différencier les indices interauraux entre eux et qu'il fait une sélection des informations dont il a besoin pour réaliser une modélisation plus ou moins précise d'une localisation sonore.

Ces différentes remarques démontrent que le cerveau analyse un stimulus en plusieurs bande étroite. En effet, les ITD, IPD et ILD transportent des informations fréquentielles sur différentes plages du spectre. De plus, le cerveau réalise des choix parmi tous ces indices permettant la perception sonore. Ces choix seront motivés en fonction de la simplicité du traitement que doit réaliser le cerveau et des indices concrets apportés dans la perception sonore.

3.A.5 - Les limites anthropologiques pour la discrimination correcte de la localisation d'une source sonore.

Il a été vu dans les sections précédentes que des flous de localisation, des ambiguïtés, s'immiscent lors de la perception d'une scène sonore 3D. Ce sont des limites anthropologiques impactant la perception sonore. Il serait judicieux de se poser la question si nous ne sommes pas trop exigeants avec nos attendus perceptifs lors de la localisation des sources sonore, et donc, lors de la constitution d'une scène sonore 3D dans le cadre d'une production musicale.

Baskind²³⁹ va dans ce sens et souligne que la perception d'une source sonore ne correspond pas forcément à la localisation réelle de cette dernière. Il souligne qu'il est important de prendre en compte le fait que la perception est un mécanisme sonore ayant des défauts.

Il serait donc intéressant d'étudier quelles sont les limites/défauts du système auditif pour la perception correcte d'une scène sonore 3D en quantifiant les performances de localisation de l'Homme.

De plus, dans le titre de cette section, « discrimination correcte » signifie que la modélisation de la localisation de la source sonore réalisée par le cerveau est similaire à

²³⁹ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 1.1, p. 28.

la localisation réelle de cette même source.

Pour commencer, Baskind²⁴⁰ et Berthomieu²⁴¹ présentent la notion du flou de localisation ou de l'angle minimum audible (*Minimum Audible Angle*, MAA). Cette notion décrit le seuil différentiel de perception angulaire d'une source sonore. Ce flou de localisation représente plus précisément la déviation angulaire pour laquelle 50% des sujets perçoivent un mouvement de la source sonore.

Ce terme permet alors de quantifier les performances de localisation sonore chez un auditeur lambda.

L'autre terminologie, le biais de localisation, représente la déviation angulaire entre la localisation « réelle » de la source sonore et la perception de cette localisation par un auditeur.

Baskind et Berthomieu présente dans leur Thèse, les performances de localisation de l'Homme dans le plan horizontal et médian via ces deux termes : le flou et le biais de localisation.

Les performances dans le plan horizontal sont assez particulières. Elles sont maximales à l'avant et minimales sur les côtés. Cela du fait de la présence des cônes de confusion sur les côtés. On observe ce phénomène premièrement pour des séquences de bruit blanc, puis deuxièmement pour des séquences de sons purs et de bruits à bande étroite.

Baskind²⁴² souligne que pour des séquences de bruit blanc de 100 ms, le biais de localisation est nul en face, et d'environ de 10° sur les côtés. Cela veut donc dire qu'une source sonore telle qu'un bruit blanc sera plutôt bien localisé à l'avant. Tandis que sur les côtés, une source sonore à 80° sera perçue à 90° . La localisation sur les côtés est donc approximative.

Sur les côtés, le flou de localisation est de $\pm 10^\circ$, tandis qu'en face il est de $\pm 3,5^\circ$.

Berthomieu²⁴³ va dans le même sens et mentionne que l'erreur de localisation est

²⁴⁰ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.1, p. 32.

²⁴¹ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, Section 1.2.3, p. 19.

²⁴² *Op. cit.*

²⁴³ *Op. cit.*, Section 1.2.4, p. 20.

quasi nulle pour des sources situées à l'avant ou à l'arrière comparée à des sources sonores situés sur les côtés.

Dans le cas de sons purs ou des bruits à bande étroite, Baskind²⁴⁴ indique qu'il est possible d'observer les mêmes flous et biais de localisation sur les côtés et à l'avant. Pour autant, une forte dépendance s'installe au niveau de la fréquence centrale de la source sonore.

Par exemple, le flou de localisation à l'avant aura tendance à augmenter avec la fréquence. Il reste tout de même assez faible. Il ne dépasse pas les $\pm 3^\circ$ entre 6000 et 10000 Hz.

Baskind²⁴⁵ explique alors que le flou de localisation sur les côtés sera de l'ordre de $\pm 10^\circ$ minimum. Ce flou augmente alors avec les fréquences. Entre 5000 et 10000 Hz la localisation sonore ne sera plus possible sur les côtés.

A ces observations, Berthomieu²⁴⁶ ajoute que le système auditif est en général moins précis pour des sources sonores présentant des fréquences entre 1,5 et 3 kHz. Cela s'expliquerait par le fait que cette zone fréquentielle correspond à la zone de transition entre les ITD, les IPD et les ILD. Précédemment, dans la Section 3.A.2, était posée le fait que les différentes fréquences de coupures des indices binauraux se trouvent entre 1,6 kHz et 3 kHz. Dans cet intervalle fréquentiel, aucun des indices binauraux ne permettra une localisation accrue. D'où l'observation d'un important flou de localisation, que ce soit à l'avant, à l'arrière, ou sur les côtés pour des sources sonores avec des fréquences centrales entre 1,5 et 3 kHz.

En d'autres termes, les problèmes de localisation ont une forte dépendance fréquentielle. Cette dépendance serait un élément important à prendre en compte dans le cadre d'une production musicale 3D. Cela afin d'opérer des choix de spatialisation sur des objets sonores tout en prenant en compte les dépendances fréquentielles des biais et des flous de localisation.

Concernant des sources sonores avec des basses fréquences, Baskind²⁴⁷ sou-

²⁴⁴ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.1, p. 32.

²⁴⁵ *Ibid.*

²⁴⁶ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, Section 1.2.4, p. 20.

²⁴⁷ *Op. cit.*

ligne que le système auditif est limité par sa résolution dans les très basses fréquences (en dessous de 100-250 Hz).

L'IPD maximal (de l'ordre de 0,7 ms) diminue proportionnellement avec la fréquence jusqu'à devenir nul. Or, l'IPD est le seul indice interaural qui permet à l'auditeur de localiser dans les basses fréquences. Les flous et biais de localisation dans le plan horizontal sont présentés dans la Figure 3.4.

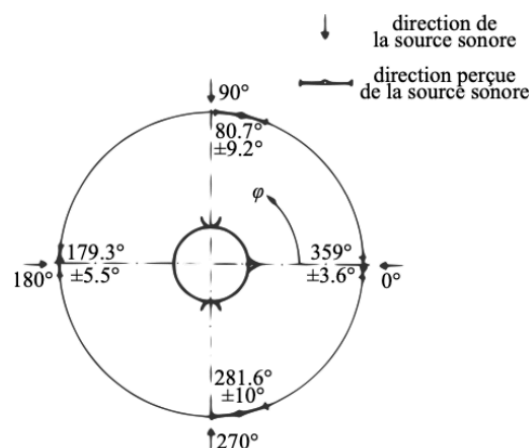


Figure 3.4 : Représentation du flou de localisation dans le plan horizontal pour des bruits blancs de durée 100 ms.

Gautier Berthomieu©2019

En ce qui concerne le plan médian, Baskind²⁴⁸ et Berthomieu²⁴⁹ soulignent que la localisation sonore est faible comparée aux performances de l'Homme dans le plan horizontal.

En effet, la perception dans le plan médian est réalisée uniquement par les indices monauraux. Comme il a été expliqué en Section 3.A.2, les indices interauraux sont obsolètes dans le plan médian. Or, plus les indices sont nombreux, plus le système auditif central dispose d'informations pour permettre la discrimination correcte d'une localisation sonore. De ce fait, comparé au plan horizontal, le cerveau ne peut utiliser que les indices monauraux dans le plan médian.

La localisation moins précise dans le plan médian se justifie donc par un manque d'indice de localisation comparé au plan horizontal.

²⁴⁸ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.1, p. 32.

²⁴⁹ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, Section 1.2.4, p. 21.

C'est d'ailleurs pour cette raison qu'il y a un réflexe de vouloir bouger ou incliner la tête lorsqu'un son est compliqué à localiser dans le plan médian. En effet, comme il a été expliqué Section 3.A.2, les mouvements de tête s'opèrent dans le but de fournir un plus grand nombre d'informations pour permettre la localisation correcte d'une source sonore. Ce qui contribue à éliminer les ambiguïtés et les flous de localisations.

Les mouvements de tête par réflexe dans le plan médian sont dus à la psychologie acoustique. Par familiarité avec les situations où la localisation est mauvaise, ce réflexe se met en place afin d'accroître la localisation sonore de manière quasi automatique avec les mouvements de tête. Il sera souligné encore une fois que dans le cas d'une diffusion binaurale les mouvements de tête ne sont pas pris en compte. Ainsi, il est difficile de pouvoir localiser une source sonore dans le plan médian via une restitution binaurale. Ce qui implique dans une production musicale 3D, comme introduit en Section 3.A.2, l'application de micromouvements sur les sources sonores sans pour autant que cela soit significativement perçu par l'auditeur comme un déplacement de ces dernières. Ces micromouvements permettraient d'accroître le nombre d'indices sur la localisation des sources sonores afin d'éviter les flous et les ambiguïtés de localisations.

De plus, comme il a été expliqué en Section 3.A.2, pour que les indices monauraux fonctionnent il faut que l'auditeur soit familier avec la source sonore pour que son système auditif central puisse interpréter les modifications spectrales. Dans le cas d'une source non-familière, comme la voix d'une personne inconnue de l'auditeur, Baskind²⁵⁰ et Berthomieu²⁵¹ expliquent que le biais de localisation et le flou de localisation est maximal avec l'élévation de la source. Le biais de localisation est de 15° et le flou de localisation est de $\pm 17^\circ$. Dans le cas d'une d'une voix d'une personne connue, et donc, familière à l'auditeur, le flou de localisation ne sera que de 9° .

La localisation de la voix est aussi en général plus floue à l'arrière qu'à l'avant de l'auditeur. Les flous et biais de localisation dans le plan médian pour une voix fami-

²⁵⁰ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.1, p. 32.

²⁵¹ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, Section 1.2.4, p. 21.

lière à l'auditeur sont présentés dans la Figure 3.5.

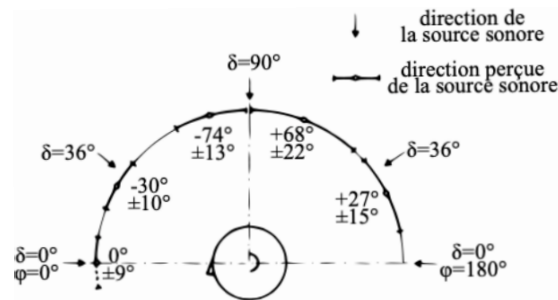


Figure 3.5 : Représentation du flou de localisation dans le plan médian pour une voix parlée familière à l'auditeur.
Gautier Berthomieu©2019

Pour une expérience avec un bruit blanc, Berthomieu²⁵² souligne que le flou de localisation en élévation est relativement faible comparé à une voix. Si les hautes fréquences sont enlevées, alors le flou de localisation devient très important en élévation.

Cette expérience démontre deux choses. Premièrement, une source sonore présentant une bande passante importante sera plus facilement localisable par un auditeur. Deuxièmement, il est important qu'une source sonore présente des fréquences assez hautes pour que sa localisation en élévation soit perceptible. Les résultats de ces expériences sont aussi en accords avec les propos soutenus en Section 3.A.2 et 3.A.4.

L'étude des performances de localisation de l'Homme dans le plan horizontal et médian permet d'observer que la perception sonore n'est pas optimale.

Celle-ci est correcte à l'avant et à l'arrière. Mais sur les côtés et en élévation les performances de localisation de l'Homme sont moins élevées. Les flous et les biais de localisation y sont plus importants. Cela illustre le fait que les principaux cônes de confusion se situent bien sur les côtés et au-dessus de l'Homme.

On remarquera aussi que la localisation sonore est plus floue à l'arrière de l'auditeur qu'à l'avant. Ces flous et ces biais de localisation ne sont pas assez importants pour parler de cône de confusion.

Aussi, la localisation sonore est extrêmement dépendante de la fréquence et de la familiarité du stimuli avec l'auditeur.

²⁵² BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, Section 1.2.4, p. 21.

Pour des sources sonores familières et présentant une bande fréquentielle assez large, la perception de la localisation sonore par le système auditif central sera moins sujette à des flous perceptifs.

Pour continuer, les indices binauraux présentent des problèmes qui expliquent aussi les mauvaises performances localisatrices de l'Homme.

Baskind²⁵³ indique que des ambiguïtés avant-arrière sont responsables de confusions sur la perception d'une localisation sonore.

Ces ambiguïtés sont motivées par l'existence de plusieurs positions dans l'espace qui seront renseignées par les mêmes indices binauraux. Ce principe est représenté en Figure 3.6.

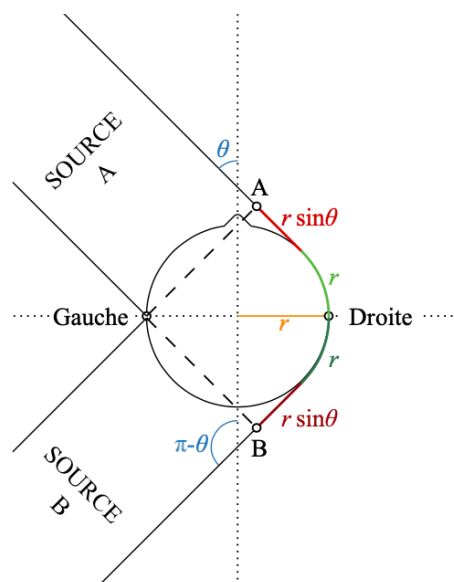


Figure 3.6 : Représentation de la confusion avant-arrière dans le plan horizontal pour deux sources sonore A et B engendrant les mêmes indices binauraux à des positions de l'espace différente.
Gautier Berthomieu©2019

Dans le plan horizontal, Berthomieu²⁵⁴ explique que les indices binauraux d'une source sonore positionnée à un azimut θ seront identiques à ceux engendrés par une source sonore positionnée à un azimut $\pi - \theta$.

Cela se traduit dans le cerveau par une interprétation des mêmes indices binauraux pour une position à l'avant ou à l'arrière. Ce qui provoque des ambiguïtés dans la

²⁵³ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 2.1, p. 32.

²⁵⁴ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, Section 1.2.1, p. 12.

perception sonore. Il est important de préciser que ces positions dans l'espace engendrant les mêmes indices binauraux sont multiples.

Dès lors, l'utilisation des micromouvements sur une source sonore dans le cas d'une production musicale 3D prend tout son sens. En effet, les micromouvements pour des positions avant-arrière fournissent des valeurs inverses sur les indices de localisations. Ce qui renseigne très vite le cerveau afin que celui-ci réalise une localisation sonore correcte.

Comme il a été vu auparavant les micromouvements pourraient être une alternative intéressante dans la production musicale 3D afin d'améliorer la discrimination de la localisation d'une source sonore. Ils apportent une plus-value sur les indices de localisations ce qui permet que la localisation sonore réalisée par le cerveau soit bonifiée.

Dans la vie de tous les jours, les indices visuels et le mouvement de la tête permettent à l'Homme de résoudre ces ambiguïtés et de s'assurer de la localisation réelle d'une source sonore. Pour autant, dans le cadre d'une diffusion binaurale pour une production musicale 3D, l'auditeur n'a pas accès à ces indices visuels ou au mouvement de tête. De plus, dans le cas où l'auditeur peut bouger sa tête, le pavillon peut aussi être un élément permettant de résoudre ces confusions. Mais pour que le pavillon soit considéré comme un élément permettant de lever ces confusions il faut que les conditions citées plus haut soient respectées.

En d'autres termes, dans le cadre d'une diffusion binaurale pour une production musicale 3D, il serait presque impossible de lever ces ambiguïtés. Le seul élément qui permettrait de lever ces confusions serait le pavillon pour des sources sonores familières à l'auditeur et présentant un spectre fréquentiel étendu. Mais, à lui tout seul et sans le mouvement de tête, le pavillon n'est pas suffisant.

Dans le cadre d'une production musicale 3D, afin d'améliorer l'immersion sonore, il faudrait éviter ces localisations sonores engendrant des indices binauraux similaires. Il serait donc judicieux d'inclure dans des logiciels de spatialisation des interfaces permettant de montrer à l'ingénieur du son et/ou artiste les sources sonores pouvant être sujettes à des confusions sur leur localisation. Et dans la continuité de ce qui a été vu avant, de montrer les déviations angulaires (causées par les flous et les biais de localisations) entre la position d'une source sonore réelle et la perception de sa localisation par un auditeur.

Encore une fois, les micromouvements sur une source sonore peuvent aussi être une alternative intéressante à la bonne localisation dans le cas d'une production sonore 3D. En effet, cette méthode permettrait de compenser la grande quantité d'indices de localisations fournies par les mouvements de tête, qui pour rappel ne peuvent avoir lieu dans le cas d'une diffusion binaurale. Néanmoins, il reste à étudier et à vérifier à quel point cette idée est conséquente dans la localisation au sein d'une production sonore 3D.

Il sera noté que l'application des micromouvements prend aussi tout son intérêt dans une diffusion transaural.

Pour finir, on notera que le cerveau est confronté à des ambiguïtés lorsque celui essaye de modéliser la distance d'une source sonore.

Berthomieu²⁵⁵ signale que le système auditif central a tendance à surestimer la distance pour des sources proches, et à sous-estimer la distance pour des sources lointaines. Cette erreur est systématique et elle peut être exprimée de telle sorte à déterminer quelle sera la distance modélisée par le cerveau pour une distance donnée :

$$r' = k \cdot r^a \quad (3.4)$$

Avec r' la distance modélisée par le cerveau, r la distance réelle de la source sonore et k et a des constantes ajustables où $a < 1$.

Pour conclure, les performances de localisation ne sont pas optimales. Cela s'explique par la nature du système auditif. Celui-ci présente des dépendances et des limites trop importantes pour que la localisation sonore réalisée par l'Homme soit précise.

On notera que certaines de ces limites peuvent être résolues par la vue et des mouvements de tête. Mais, dans la cadre d'une production musicale 3D, l'auditeur ne dispose pas de ces indices.

Ainsi, les performances de localisation de l'Homme sont bonnes à l'avant et à l'arrière de l'auditeur. Tandis qu'elles sont moins élevées sur les côtés et en élévation.

En conséquence, il serait judicieux dans la cadre d'une production musicale 3D de prendre de la distance sur nos attendus lors de la restitution d'une scène sonore 3D.

²⁵⁵ BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, Section 1.2.4, p. 23.

Une mauvaise perception de la spatialisation d'une source sonore a de grande chances d'être due aux limites de la perception sonore chez l'Homme. Il est donc possible d'envisager qu'une mauvaise restitution d'une scène sonore 3D n'est pas forcément due aux techniques de diffusions, ou à des *Head-Related Transfer Function* (HRTF) non individualisés. Cela peut-être le fait des choix de spatialisations faits par un ingénieur du son et/ou artiste qui ne sont pas en accord avec les performances de localisation chez l'Homme.

Cette idée implique que l'ingénieur du son et/ou l'artiste a besoin de certaines connaissances sur les performances de la perception sonore de l'Homme.

Mais aussi, de certains outils afin que l'utilisateur puisse visualiser quelles sont les localisations que le système auditif central aura du mal à modéliser ou qui peuvent engendrer des confusions. Il faudrait que les logiciels de spatialisation incluent ce type d'outil afin de faciliter l'obtention d'une bonne immersion sonore par un ingénieur du son et/ou artiste dans le cadre d'une production musicale 3D.

Enfin, même si la diffusion binaurale est limitée par le choix des HRTF non individualisés et par l'impossibilité de mouvoir la tête, elle reste néanmoins le moyen de diffusion le plus accessible pour les productions sonores 3D. Il sera aussi vu dans la Section 3.A.6 que l'immersion dans une scène sonore 3D est principalement lié à la l'enveloppement de l'auditeur réalisé par la champ diffus qu'à la localisation précise des sources sonores. C'est d'ailleurs le champ diffus qui est mis en avant par l'esthétique spatiale d'une production sonore 3D.

3.A.6 - L'identification du champ diffus et l'aptitude de l'homme à le différencier du champ direct.

Cette section peut paraître anecdotique comparée à la localisation sonore. Pour autant, dans cette Section 3.B, on verra que le champ diffus peut expliquer la sensation d'enveloppement de l'auditeur. Cette enveloppement de l'auditeur permet alors l'immersion de celui-ci dans une scène sonore 3D. Ce champ diffus est un élément qui est présent dans tout lieu non-anéchoïque.

Dés lors qu'une source excite l'acoustique d'une pièce, à partir d'un certain temps (temps de mixage et temps de recouvrement vue en Section 2.B.4) une réverbération a lieu et elle peut présenter des propriétés qui amèneraient à la qualifier de champ diffus.

De plus, l'immersion d'un auditeur dans une scène sonore 3D est plus liée à l'enveloppement réalisé par le champ diffus que de par la localisation précise des sources sonores. Le champ diffus a donc un rôle primordial dans les productions sonores 3D.

Il existe très peu de sources scientifiques abordant l'identification anthropologique du champ diffus. Le champ diffus est en général quelque chose d'identifié par l'Homme comme se produisant partout, tout autour de lui de manière englobante, enveloppante.

Ce dernier prend une part importante dans la perception puisqu'il permet de caractériser des lieux tel que les cathédrales, les grottes, les halls ou encore les bois.

Une source sonore dans le champ direct, et donc, en proximité de l'auditeur, sera localisable par celui-ci. Pourtant, lorsque la source sonore s'éloigne de l'auditeur de telle sorte que la distance critique soit dépassée (implique que l'énergie du champ réverbéré et plus importante que l'énergie du champ direct), celui-ci n'arrivera pas du tout à localiser la source sonore. L'auditeur a alors l'impression que la source sonore est tout autour de lui. Ce ne sont plus les ondes directes émises par la source sonore qui sont perçues, mais la majorité des réflexions.

Cette partie aura pour but de déterminer quels sont les mécanismes du système auditif permettant à l'homme de distinguer le champ diffus vis-à-vis du champ direct.

Enfin, dans ce mémoire, nous partirons du principe que le champ diffus est perceptible. Il s'agit dans cette section de connaître les éléments à l'origine de cette perception, et non de prouver que le champ diffus est perceptible. J'invite le lecteur à lire la Thèse de Romblom²⁵⁶ par laquelle il démontre que le champ diffus et ses variations d'énergies (fait appel à la notion du champ diffus « non-idéal » abordé en Section 2.C.1) sont totalement perceptibles.

Pour commencer, Romblom²⁵⁷ indique que le champ diffus est identifié par l'auditeur comme étant enveloppant et se produisant partout à cause de la multitude de réflexions qui le composent. Ces réflexions, qui interagissent aussi avec la tête, le torse et le pavillon, arrivent aux oreilles. On observe une incohérence quant aux in-

²⁵⁶ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016.

²⁵⁷ *Ibid.*, Section 3.1, p. 33.

formations reçues entre les deux oreilles. Les signaux captés par l'oreille gauche et droite sont incohérents. C'est cette incohérence des informations, reçues entre les deux oreilles, qui permettrait alors à l'Homme d'identifier qu'il est dans le champ diffus. L'utilisation de l'*InterAural Cross-correlation Coefficient* (IACC), outil pour mesurer la cohérence des informations entre les deux oreilles dans un champ diffus serait des plus pertinents. Dans un champ diffus, l'IACC aurait tendance à être proche de 0, ce qui correspondrait à une incohérence des deux signaux reçus entre les deux oreilles. De plus, l'IACC prend en compte les réflexions sur le torse, la tête et le pavillon.

Cousins²⁵⁸ et Salmon²⁵⁹ présentent la fonction normalisée du coefficient de corrélation croisée Interaural (*Aural Cross-correlation Coefficient Function*, IACCF) tel que :

$$\text{IACCF}_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) \cdot p_R(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t) dt}} \quad (3.5)$$

Avec $p_L(t)$ et $p_R(t)$ la réponse impulsionnelle de l'oreille gauche et droite. t_1 et t_2 correspondant à une partie de la réponse impulsionnelle.

Cousins²⁶⁰ et Salmon²⁶¹ expliquent alors que l'IACC est obtenu via la valeur absolue maximal de l'IACCF sur la plage des ITD possibles. La plage de valeur des ITD est importante à prendre en compte pour que l'IACC soit en rapport avec la corrélation interaurale.

$$\text{IACC}_{t_1, t_2} = \max \left| \text{IACCF}_{t_1, t_2} \right|, -1\text{ms} \leq \tau \leq 1\text{ms} \quad (3.6)$$

Dans l'équation 3.6, t_1 vaut 0 ms et t_2 vaut 80 ms. La valeur 0 ms de t_1 permet de réaliser un cas d'étude de l'IACC pour les premières réflexions, et la valeur 80 ms de t_2 permet de réaliser un cas d'étude de l'IACC pour les réflexions tardives. Enfin, l'IACC est en général calculé pour des bandes d'octaves.

²⁵⁸ COUSINS Michael Patrick, *The diffuse sound object* [En ligne], Directeur de Thèse : FAZI Filippo, Angleterre : University of Southampton, Thèse de Doctorat, Avril 2018, Section 2.4.6, p. 48.

²⁵⁹ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.3.4, p. 41.

²⁶⁰ *Op. cit.*

²⁶¹ *Op. cit.*

Comme le souligne Romblom²⁶², la valeur maximal de l'IACC est l'unité et elle peut être atteinte pour de simples différences de phase ou d'amplitude entre deux signaux. L'IACC est annulée à partir du moment où les deux signaux sont en opposition de phase (180°). Si l'IACC de deux signaux présente des valeurs proches de 1, cela indique que les signaux sont cohérents. Si l'IACC de deux signaux présente des valeurs proches de 0, cela indique que les signaux sont incohérents. Vis à vis de la théorie sur la perception du champ diffus, des signaux incohérents (IACC≈0) supposerait que l'auditeur se trouve dans le champ diffus. Tandis que des signaux cohérents (IACC≈1) indiqueraient que l'auditeur se trouve dans le champ direct.

Cousins²⁶³ détaille alors différentes observations sur l'IACC.

D'une part il explique que l'IACC sera toujours élevé dans les basses fréquences. L'explication tient au fait que les longueurs d'ondes sont plus grandes que la distance interaurale. Il n'est pas possible d'avoir des mesures objectives pour les basses fréquences sur l'identification du champ diffus par un auditeur. Cela indique aussi que les basses fréquences sont plus sujettes à provoquer l'enveloppement chez l'auditeur (cela sera étudié plus profondément en Section 3.C.3).

Deuxièmement, il souligne qu'une mesure de l'IACC sur de faibles bandes d'octave n'est pas optimale car il y a le risque d'ignorer des fréquences pertinentes qui peuvent aussi permettre au système auditif central d'identifier le champ diffus.

Enfin, l'auteur précise qu'un faible IACC peut être mesurée pour des champs sonores qui ne sont pas physiquement diffus mais qui le sont au niveau de la perception. Pour autant, cela n'est pas très grave, voir même intéressant car cela démontre la connotation perceptive de l'IACC. Celle-ci est indépendante des principes physiques. Cette observation démontre que l'IACC est une bonne mesure pour évaluer l'identification du champ diffus chez un auditeur. Elle demeure donc une mesure perceptive.

Cela indique aussi que l'IACC est à distinguer d'un outil de mesure voué à mesurer

²⁶² ROMBLON David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 3.1, p. 33.

²⁶³ COUSINS Michael Patrick, *The diffuse sound object* [En ligne], Directeur de Thèse : FAZI Filippo, Angleterre : University of Southampton, Thèse de Doctorat, Avril 2018, Section 2.4.6, p. 49.

un champ diffus et sa physique. Par conséquent, via l'IACC, Cousins²⁶⁴ soutient que l'isotropie dans un champ diffus est un élément important pour que l'Homme l'identifie comme tel.

Salmon²⁶⁵ ajoute, de manière anecdotique, que le système auditif central est sensible aux petites variations de l'IACC pour des valeurs importantes ($IACC \approx 1$). Il est alors remarqué que cette sensibilité n'est pas observable lorsque l'IACC prend des valeurs plutôt faibles ($IACC \approx 0$).

De son côté, Baskind²⁶⁶ mentionne le fait qu'une incohérence des signaux entre les deux oreilles ($IACC \approx 0$) amène souvent à une sensation d'enveloppement. Or, le champ diffus est souvent identifié par une impression d'enveloppement chez l'auditeur. Celui-ci traduit cette sensation comme se sentant immergé par le son, sans possibilité de localiser une source sonore. L'enveloppement sera défini plus précisément dans la Section 3.B.2.

Un faible IACC se traduit donc en général par la présence d'un champ diffus, ce qui intrinsèquement se traduit par une sensation d'enveloppement chez l'auditeur.

De plus, Cousins²⁶⁷ réalise une expérience en appliquant sur des stimulus diffusés par des haut-parleurs un *InterChannel Cross-correlation Coefficient* (ICCC) élevé.

Il observe que les stimulus ne sont pas considérés comme diffus par l'auditeur et que l'identification d'un champ diffus ne dépend pas du nombre de haut-parleurs. Il explique alors qu'une décorrélation des signaux perçus par l'oreille gauche et droite amènera l'Homme à identifier le champ sonore comme diffus. Mais aussi que l'augmentation du nombre de haut-parleurs ne garantira pas pour autant l'obtention d'un meilleur champ diffus. En revanche, il observe qu'une disposition de haut-parleurs en 3D aura tendance à favoriser la perception subjective d'un champ diffus comparé à une disposition de haut-parleurs en 2D.

La hauteur est donc un élément que le système auditif central prend en compte

²⁶⁴ COUSINS Michael Patrick, *The diffuse sound object* [En ligne], Directeur de Thèse : FAZI Filippo, Angleterre : University of Southampton, Thèse de Doctorat, Avril 2018, Section 11.1, p. 194.

²⁶⁵ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.3.4, p. 42.

²⁶⁶ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 4.2, p. 46.

²⁶⁷ *Op. cit.*

dans l'identification du champ diffus.

Cousins²⁶⁸ observe que l'impact de l'ICCC sur l'identification du champ diffus ne varie pas avec la fréquence. Il souligne qu'il peut être envisagé que la fréquence puisse avoir un rôle sur la perception du champ diffus. Certaines longueurs d'ondes sont infiniment plus grandes ou plus petites que la distance séparant l'oreille gauche et droite. Cette remarque pourrait témoigner d'un mécanisme de compensation qui se réalise entre les outils anthropologiques permettant la perception sonore. Cependant, aucune recherche pertinente ne m'a permis dans ce mémoire de développer ce point.

Cousins²⁶⁹ propose un autre outil permettant la mesure de l'aspect cohérent/incohérent des stimulus captés par les deux oreilles : *L'InterAural Difference* (IAD). Cet outil de mesure est similaire à l'IACC mais celui-ci intègre une égalisation pour tenir compte de la forte corrélation dans les basses fréquences dues aux grandes longueurs d'onde. On obtient un IAD de 0 pour toutes les fréquences. Ceci est réaliste puisque la décorrélation entre les deux oreilles dans le champ diffus est indépendante de la fréquence. Pour autant, cela ne sera pas développé dans ce mémoire.

Enfin, une hypothèse sera soutenue dans ce mémoire sur l'identification du champ diffus : l'Homme identifie le champ diffus dès lors que des informations incohérentes entre les deux oreilles sont présentées au système auditif.

A partir d'une certaine distance (au-delà de la distance critique), l'Homme ne distingue pas les localisations des sources sonores dans le champ diffus. Cette non-acuité pourrait alors indiquer au système auditif central qu'il se trouve dans le champ diffus. L'explication tiendrait à l'incohérence des informations perçues entre les deux oreilles. Cela voudrait dire que dès lors que des informations incohérentes sont présentées à un auditeur, celui-ci aura tendance à caractériser le champ sonore comme étant diffus.

Il sera ajouté que le cerveau peut distinguer et extraire des informations cohérentes parmi celles qui sont incohérentes. Ce qui permettrait à l'auditeur de percevoir le champ diffus ainsi que certaines localisations sonores. Il serait donc intéressant d'étudier ce mécanisme d'extraction des informations cohérentes réalisé par le cerveau.

²⁶⁸ COUSINS Michael Patrick, *The diffuse sound object* [En ligne], Directeur de Thèse : FAZI Filippo, Angleterre : University of Southampton, Thèse de Doctorat, Avril 2018, Section 11.1, p. 195.

²⁶⁹ *Ibid.*, Section 2.4.6, pp. 49-50.

Une seconde hypothèse sera présentée dans ce mémoire : la non discrimination de la distance d'une source sonore dans un milieu réverbérant, et donc, de sa localisation, est un indice pour le système auditif central.

Il permettrait à l'auditeur d'identifier qu'il se trouve au-delà de la distance critique, et donc, uniquement dans le champ diffus.

Comme il a été expliqué en Section 3.A.3, pour des distances importantes, il n'est plus possible de discriminer la distance d'une source sonore. Par conséquent, à partir d'une certaine distance, la distance perçue d'une source sonore sera toujours la même. Si la distance d'une source sonore n'est pas discriminée, l'auditeur aura sûrement la sensation d'être enveloppée par la source sonore. Ce qui viendrait à rejoindre la sensation d'être uniquement dans le champ diffus.

En conclusion, cette section pointe le peu de sources scientifiques abordant l'identification anthropologique du champ diffus. La principale information à retenir, quant à son identification est la suivante : dès lors que des informations sont perçues comme incohérentes ($IACC \approx 0$) par le système auditif central, celui-ci considèrera le champ sonore comme diffus.

Certaines hypothèses dans ce mémoire ont été proposées. Cependant, pour qu'elles soient validées il faudrait faire des expériences perceptives sur des auditeurs. Ces idées laissent tout de même des ouvertures afin d'améliorer la compréhension des mécanismes anthropologiques permettant à l'Homme d'identifier le champ diffus.

Il est aussi intéressant de noter que la perception de la hauteur est un élément important pour l'identification du champ diffus et la sensation d'enveloppement. Ce qui démontre que le champ diffus est une notion qui prend beaucoup d'importance dans le cadre d'une production musicale 3D. Mais aussi qu'il est possible d'améliorer la perception de celui-ci avec une prise en compte de la hauteur.

Ces considérations sur le champ diffus sont importantes à prendre en compte dans le cadre d'une production musicale 3D. Cela afin d'optimiser ou diminuer la perception de celui-ci (notamment en contrôlant l'IACC ou l'IAD) en fonction des intentions artistiques ou esthétiques de l'oeuvre.

Pour finir, cette Section 3.A aura démontré que plusieurs mécanismes sont à l'origine de la perception. L'étude de ces mécanisme a révélé le nombre important de limites dans la perception Humaine, la forte dépendance du système auditif envers

certaines éléments tels que le fréquentiel ou le caractère familier ou non d'une source sonore par rapport à l'auditeur.

La connaissance de ces limites et de ces dépendances permettraient à l'ingénieur du son et/ou artiste de mieux spatialiser les sources sonores. Ces différentes analyses démontrent aussi qu'il est important de mettre de la distance vis-à-vis de nos attentes de la restitution des spatialisations des sources sonores réalisées dans les logiciels.

Après avoir abordé dans cette section la perception des localisations sonores et du champ diffus, il sera abordé la perception spatiale et les impressions spatiales.

B - La perception spatiale et les impressions spatiales : leur rôle dans l'immersion d'une production musicale 3D

La perception spatiale regroupe tous les éléments qu'il est possible de percevoir dans une scène sonore 3D. Il est important de ne pas confondre cette notion avec la perception de l'espace.

Elle a un rôle sur l'immersion d'une scène sonore 3D, mais aussi sur l'aspect esthétique et/ou artistique que renverra une production musicale 3D. Cette notion renvoie aussi à des notions d'écologies sonores environnementales et mentales abordées dans la Section 1 de ce mémoire.

En ce qui concerne l'impression spatiale, il s'agit d'une notion assez floue qui est importante à prendre en considération dans le cadre d'une production musicale 3D. Les impressions spatiales permettent de définir et caractériser la perception spatiale d'une scène sonore 3D.

L'impression spatiale et la perception spatiale sont donc deux concepts très proches.

Ces notions seront définies. Leur bonne compréhension est importante pour réaliser au mieux une production musicale 3D. Cela permettra d'avoir un contrôle sur les différents éléments composants les impressions spatiales, et donc, d'avoir un contrôle sur la perception de la scène sonore 3D renvoyé à l'auditeur.

3.B.1 - Définition de la perception spatiale et de l'impression spatiale.

La perception et les impressions spatiales regroupent les différents éléments permettant à un auditeur de caractériser la scène sonore dans lequel il se trouve. Elles constituent l'ensemble des événements acoustiques perceptibles. Un contrôle des impressions spatiales, entraînera un contrôle sur la perception de cette scène sonore chez l'auditeur.

Une connaissance approfondie de ces termes et de ce qu'ils revêtent, permettrait d'avoir une meilleure gestion de la scène sonore dans le cadre d'une production musicale 3D. Elle permettrait de mettre en place une syntaxe précise, qui deviendrait une référence dans la production 3D. Ce qui fluidifierait le langage entre l'ingénieur du son et/ou l'artiste pour décrire certaines notions observables dans le son 3D tel que la largeur apparente ou l'enveloppement d'une source sonore.

La perception spatiale regroupe tous les éléments qu'il est possible de percevoir dans une scène sonore 3D : la perception des sources sonores, la perception des localisations, la perception de l'espace, la perception du champ diffus, et bien d'autres éléments ... Il est important de ne pas confondre ce terme avec la perception de l'espace. En effet, la perception spatiale englobe bien plus d'éléments perceptifs et concerne la perception de l'ensemble des éléments constituant une scène sonore 3D.

Ensuite, il serait intéressant de voir comment cette notion d'« impression spatiale » a évolué avec le temps et quels sont les critères que cette terminologie englobe pour caractériser un espace.

L'impression spatiale est souvent définie comme décrivant à la fois l'élargissement apparent de la source (*Apparant Source Width*, ASW) et l'enveloppement de l'auditeur (*Listener Envelopment*, LEV).

Baskind²⁷⁰ et Romblom²⁷¹ expliquent alors qu'avec le temps, l'expression *Spaciousness* a été préféré pour décrire le LEV et l'ASW. Mais le LEV et l'ASW ne sont pas les seuls éléments impactant la perception spatiale. Avec cette évolution, l'impression

²⁷⁰ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 1.2, p. 29.

²⁷¹ ROMBLON David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 2.1.1, p. 13.

spatiale a été redéfinie comme étant une notion regroupant plusieurs éléments constituant l'espace sonore. Baskind²⁷² présente alors via la Figure 3.7 les différents éléments regroupés sous le terme impression spatiale.

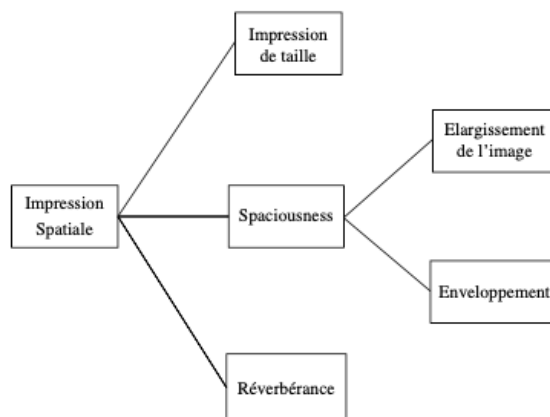


Figure 3.7 : Diagramme représentant les différents éléments que représente le concept de l'impression spatiale.
Alexis Baskind©2003

Comme le souligne ce dernier, il est possible de remarquer que l'impression spatiale regroupe des notions extrêmement liées à l'espace et non à des notions liées à la localisation de la source sonore, comme la distance, l'élévation ou la position de celle-ci vis-à-vis de l'auditeur. Aussi, ce diagramme n'inclut pas les biais ou les flous de localisations pouvant impacter la perception de la localisation d'une source sonore.

L'ASW, inclus dans la rubrique *Spaciousness*, serait le seul élément se rapprochant le plus de la description des biais/flous de localisations. Cela sera étudié plus profondément en Section 3.C.3.

Baskind²⁷³ propose alors un autre diagramme où l'impression spatiale regroupe des termes abordant à la fois l'espace et la source sonore. Celui-ci est présenté en Figure 3.8.

Dans ce mémoire il sera considéré que ce diagramme représente au mieux le concept d'impression spatiale puisqu'il est extrêmement complet.

²⁷² BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 1.2, p. 29.

²⁷³ *Ibid.*, Section 1.2, p. 30.

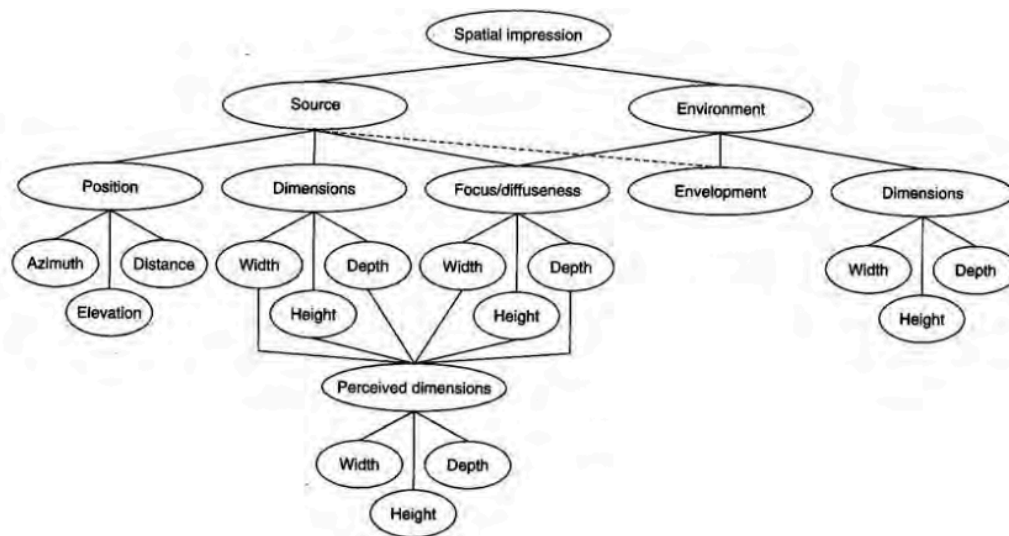


Figure 3.8 : Diagramme représentant les différents éléments que représente le concept de l'impression spatiale.
Alexis Baskind©2003

Le terme *Spaciousness* n'est plus utilisé et les différentes notions qu'il recouvrait se retrouve étalé dans ce diagramme entre les caractéristiques définissant la source et l'environnement.

Ainsi, la terminologie utilisée dans ce diagramme regroupe plusieurs concepts se ressemblant. Pour autant, ils désignent soit l'environnement, soit la source sonore. Baskind²⁷⁴ précise aussi que les attributs de largeur, de distance/profondeur et d'immersion peuvent caractériser différents éléments : une source sonore, un ensemble de sources sonores, un environnement ou une scène sonore. Il est possible de parler de l'enveloppement par une source sonore ou de l'enveloppement par la salle. Il faut donc être précis dans le choix des termes utilisés. Baskind²⁷⁵ souligne que les biais/flous de localisation et la stabilité d'une scène sonore ou de la localisation d'une source sonore sont des éléments caractérisés dans ce diagramme par les attributs divers.

²⁷⁴ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 1.2, p. 30.

²⁷⁵ *Ibid.*

Pour finir, Cousins²⁷⁶ présente dans sa Thèse un lexique reprenant certains termes de la Figure 3.8 en les définissant précisément. Ces termes définis dans la Figure 3.9 sont les principaux éléments constituant les impressions spatiales.

Attribute	Description
Naturalness	How similar to a natural (i.e. not reproduced through e.g. loudspeakers) listening experience the sound as a whole sounds.
Presence	The experience of being in the same acoustical environment as the sound source, e.g. to be in the same room.
Preference	If the sound as a whole pleases you. If you think the sound as a whole sounds good. Try to disregard the content of the programme, i.e. do not assess genre of music or content of speech.
Low Frequency Content	The level of low frequencies (the bass register).
Ensemble Width	The perceived width/broadness of the ensemble, from its left flank to its right flank. The angle occupied by the ensemble. The meaning of "the ensemble" is all of the individual sound sources considered together. Does not necessarily indicate the known size of the source, e.g. one knows the size of a string quartet in reality, but the task to assess is how wide the sound from the string quartet is perceived. Disregard sounds coming from the sound source's environment, e.g. reverberation - only assess the width of the sound source.
Individual Source Width	The perceived width of an individual sound source (an instrument or a voice). The angle occupied by this source. Does not necessarily indicate the known size of such a source, e.g. one knows the size of a piano in reality, but the task is to assess how wide the sound from the piano is perceived. Disregard sounds coming from the sound source's environment, e.g. reverberation - only assess the width of the sound source.
Localisation	How easy it is to perceive a distinct location of the source - how easy it is to pinpoint the direction of the sound source. Its opposite is when the source's position is hard to determine - a blurred position.
Source Distance	The perceived distance from the listener to the sound source.
Source Envelopment	The extent to which the sound source envelops/surrounds/exists around you. The feeling of being surrounded by the sound source. If several sound sources occur in the sound except: assess the sound source perceived to be the most enveloping. Disregard sounds coming from the sound source's environment, e.g. reverberation - only assess the sound source.
Room Width	The width/angle occupied by the sounds coming from the sound source's reflections in the room (the reverberation). Disregard the direct sound from the sound source.
Room Size	In cases where you perceive a room/hall, this denotes the relative size of that room.
Room Sound Level	The level of sounds generated in the room as a result of the sound source's action, e.g. reverberation - i.e. not extraneous disturbing sounds. Disregard the direct sound from the sound source.
Room Envelopment	The extent to which the sound coming from the sound source's reflections in the room (the reverberation) envelops/surrounds/exists around you - i.e. not the sound source itself. The feeling of being surrounded by the reflected sound.

Figure 3.9 : Définitions des principaux éléments que représente le concept de l'impression spatiale. Michael Patrick Cousins©2018

Par conséquent, il est possible de remarquer que la perception spatiale est définie par les impressions spatiales. Lors de la réalisation d'une scène sonore dans le cadre d'une production musicale 3D, il est important de prendre en compte la perception spatiale, les impressions spatiales, ainsi que tous les éléments que celles-ci englobent, afin d'avoir le contrôle sur l'immersion sonore et les attributs d'une scène

²⁷⁶ COUSINS Michael Patrick, *The diffuse sound object* [En ligne], Directeur de Thèse : FAZI Filippo, Angleterre : University of Southampton, Thèse de Doctorat, Avril 2018, Section 2.5.1, p. 53.

sonore 3D.

Les impressions spatiales regroupent au final les différentes notions permettant d'assurer l'immersion sonore d'un auditeur dans une production musicale 3D. Il serait intéressant de mesurer l'influence d'éléments physiques comme les réflexions latérales précoces et tardives sur les impressions spatiales. Notamment sur l'ASW ou le LEV. Cela dans le but d'avoir un contrôle sur l'enveloppement d'une source sonore ou d'une pièce par exemple.

En outre, dans la prochaine section, on étudiera des outils permettant de quantifier l'ASW et le LEV, afin de les intégrer dans des logiciels de spatialisation afin d'aider l'ingénieur son et/ou artiste dans le contrôle des impressions spatiales, et de la scène sonore 3D. De plus, la compréhension correcte de ces impressions spatiales, permettrait de connaître les éléments permettant d'accroître ou de diminuer leur impact dans le cadre d'une production musicale 3D.

3.B.2 - l'impression spatiale : entre l'enveloppement spatial et la largeur apparente de source.

Il est possible de remarquer via la Figure 3.8 que les impressions spatiales regroupent beaucoup d'éléments qui dépendent les uns des autres. De plus, il n'est pas simple de trouver des outils permettant de quantifier chacun des éléments qu'englobe l'impression spatiale.

Les principaux concepts permettant de quantifier certaines impressions spatiales telles que l'enveloppement ou la largeur (qu'il s'agisse d'une source ou d'une pièce) sont l'ASW et le LEV. Romblom²⁷⁷ précise que ces deux mesures donnent des indications importantes sur les qualités spatiales qui sont perceptibles par un auditeur. Ainsi, l'ASW et le LEV sont les seuls éléments que les scientifiques ont vraiment réussi à quantifier. Cette section étudiera donc principalement la quantification de l'ASW et du LEV. Il sera aussi évoqué des recherches ouvrant la voix vers des paramètres permettant d'avoir un contrôle sur d'autres impressions spatiales.

Dans ce mémoire, la présentation d'équations mesurant l'ASW et le LEV présente un grand intérêt pour la production musicale 3D. Ces équations donneraient la pos-

²⁷⁷ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 2.1.1, p. 13.

sibilité de quantifier en temps réel les impressions spatiales dans une scène sonore 3D. Celles-ci amèneraient à la création d'outils incrémentés dans des logiciels de spatialisation afin d'aider l'ingénieur son et/ou artiste dans le contrôle de ces impressions spatiales. La compréhension correcte de ces impressions spatiales, rendrait possible la connaissance des éléments permettant d'accroître ou de diminuer leur impact dans une production musicale 3D.

Bradley et Soulodre²⁷⁸ ²⁷⁹ ont théorisé les principales recherches sur les questions de l'ASW et du LEV et de leur quantification.

Ce mémoire cite davantage les auteurs Baskind, Romblom, Cousins, Daniel et Salmon à Bradley et Soulodre du fait de la postériorité de leurs travaux.

La recherche sur les impressions spatiales, et donc, l'ASW et du LEV, ont beaucoup évolué entre 1995 et 2023.

Comme l'expliquent Baskind²⁸⁰, Romblom²⁸¹ et Salmon²⁸², le LEV correspondrait à la sensation d'un auditeur d'être immergé dans un champ réverbérant. L'enveloppement de l'auditeur est mesuré par le LEV. Il a un fort impact sur l'immersion sonore.

Il est possible de comparer cette impression d'enveloppement à la sensation que ressent un auditeur lorsque celui-ci se trouve dans le champ diffus. Il sera expliqué dans cette section via l'IACC que le champ diffus est un élément permettant la sensation d'enveloppement.

Il est également possible de réfléchir au fait que le LEV puisse dépendre des réflexions renvoyées par l'acoustique de la pièce.

²⁷⁸ BRADLEY John S., SOULODRE Gilbert A., « Objective measures of listener envelopment » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Novembre 1995, Vol. 98, N°5, pp. 2590-2597.

²⁷⁹ BRADLEY John S., SOULODRE Gilbert A., « The influence of late arriving energy on spatial impression » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Avril 1995, Vol. 97, N°4, pp. 2263-2271.

²⁸⁰ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 4.2, p. 45.

²⁸¹ ROMBLUM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 2.1.1, p. 13.

²⁸² SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.3.4, p. 40.

En outre, Baskind²⁸³ et Salmon²⁸⁴ soutiennent que la distribution temporelle des réflexions est importante dans l'enveloppement. Cela se traduit par le fait que les réflexions tardives et précoces ont un rôle majeur dans le LEV.

Salmon²⁸⁵ ajoute à cela qu'il est important de considérer la distribution dans l'espace et le niveau de la réverbération tardive comme étant des éléments influençant l'enveloppement chez l'auditeur. Daniel²⁸⁶ mentionne aussi que cet enveloppement dépend de la nature de la source (dynamique, fréquentielle, etc...).

Baskind²⁸⁷ et Salmon²⁸⁸ continuent dans leur explication et indiquent que le rapport entre l'énergie précoce et tardive est l'élément permettant de quantifier la sensation d'enveloppement chez un auditeur. En effets, les auteurs indiquent que ce rapport est ce qui apportera le plus la sensation d'enveloppement chez un auditeur. La plupart des outils permettant de quantifier l'enveloppement se basent alors sur la mesure des réflexions sur ces deux régions temporelles.

Intrinsèquement, cela démontre que les réflexions latérales précoces et tardives ont un rôle important dans la sensation d'enveloppement.

Néanmoins, Salmon²⁸⁹ présente le fait que la réverbération tardive semble le plus participer à cette sensation d'enveloppement comparé aux réflexions précoces. Cela s'ajoute aussi au fait que le temps de réverbération joue aussi un rôle dans cette même sensation.

Cependant, ce propos est à nuancer puisqu'il sera vue plus tard que même si les réflexions précoces ont lieu sur une période beaucoup plus courte, elles ont un rôle tout aussi important que la réverbération tardive dans l'enveloppement.

²⁸³ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 4.2, p. 46.

²⁸⁴ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.3.4, p. 43.

²⁸⁵ *Ibid.*

²⁸⁶ DANIEL Jérôme, *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 31 Juillet 2001, Section 6.2.3, p. 286.

²⁸⁷ *Op. cit.*

²⁸⁸ *Op. cit.*

²⁸⁹ *Ibid.*

De surcroît, Salmon²⁹⁰ indique que la quantité d'énergie tardive, la quantité de réflexions latérales tardives et la décorrélation interaurale sont les principaux éléments provoquant une sensation d'enveloppement chez l'auditeur.

En conséquence, Salmon²⁹¹ et Baskind²⁹² indiquent que les réflexions latérales tardives ont une influence sur le LEV. Cela est similaire pour différentes distributions dans l'espace des réflexions tardives (avant, arrière, au-dessus de l'auditeur).

Il serait juste de trouver des éléments permettant de quantifier le LEV, afin d'intégrer ces outils de mesures dans des logiciels de spatialisations qui pourront aider l'ingénieur son et/ou artiste dans le contrôle de cette sensation.

L'un des outils principaux permettant de mesurer le LEV, serait la quantification de l'énergie latérale tardive.

Salmon²⁹³ présente l'équation 3.7 exprimant cette distribution d'énergie sur les côtés :

$$L_J = 10 \log_{10} \frac{\int_{80ms}^{\infty} p_L^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \quad (3.7)$$

p_L^2 correspond à la pression sonore instantanée via une réponse impulsionnelle de la salle et p_{10}^2 la réponse impulsionnelle de la source mesurée à 10 m de la source en champ libre.

Salmon²⁹⁴ précise que p_L^2 est mesurée avec un microphone bidirectionnel positionné perpendiculairement à la source. La valeur de 0 ms permet de réaliser un cas d'étude pour les premières réflexions, et la valeur 80 ms permet de réaliser un cas d'étude pour les réflexions tardives.

Il sera aussi noté que l'énergie latérale tardive est noté LG_{80}^{∞} dans les travaux de

²⁹⁰ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 7.6, p. 190.

²⁹¹ *Ibid.*

²⁹² BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 4.2, p. 46.

²⁹³ *Op. cit.*

²⁹⁴ *Ibid.*

Baskind²⁹⁵, de Bradley et Soulodre^{296 297}. Les notations tel que GLL, LG peuvent aussi être trouvé dans certains travaux. Par souci de cohérence, la notation L_J sera retenu dans ce mémoire afin de concorder avec les propos de Salmon.

Salmon²⁹⁸ indique que l'énergie latérale tardive est calculée par bandes de fréquence.

Il explique aussi que la valeur moyennée du LG_{80}^{∞} correspond aux quantités d'énergies contenues dans la partie tardive de chaque bande fréquentielle, de tel sorte que :

$$L_{J,\text{moy}} = 10 \log_{10} \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 10^{L_{J,i}/10} \quad (3.8)$$

Cependant, Baskind²⁹⁹ précise que la quantification de l'énergie latérale tardive ne suffit pas à la mesure de l'enveloppement de l'auditeur. Celui-ci souligne qu'il ne prend pas en compte le niveau sonore, le rôle des réflexions latérales précoces et que les valeurs temporelles utilisées ne sont pas assez précises. La valeur de 80 ms quelque peu arbitraire, est la référence pour la mesure des réflexions tardives.

Baskind³⁰⁰ et Salmon³⁰¹ présentent d'autres outils permettant la mesure du LEV : la fraction latérale d'énergie tardive (*Late Lateral Fraction*, LLF), la force sonore tardive (G_{late}), le Coefficient InterAurale de la Réverbération Tardive ($IACC_L$).

En outre, selon les propos de Salmon³⁰², LLF permet de calculer la fraction latérale d'énergie pour la réverbération tardive :

²⁹⁵ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003.

²⁹⁶ BRADLEY John S., SOULODRE Gilbert A., « Objective measures of listener envelopment » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Novembre 1995, Vol. 98, N°5, pp. 2590-2597.

²⁹⁷ BRADLEY John S., SOULODRE Gilbert A., « The influence of late arriving energy on spatial impression » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Avril 1995, Vol. 97, N°4, pp. 2263-2271.

²⁹⁸ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.3.4, p. 43.

²⁹⁹ *Op. cit.*, Section 4.2, p. 46.

³⁰⁰ *Ibid.*

³⁰¹ *Op. cit.*

³⁰² *Ibid.*, Section 1.3.4, p. 44.

Comme pour l'équation, 3.7, p_L^2 correspond à l'énergie de la réponse impulsionnelle d'une salle mesurée avec un microphone bidirectionnel et p^2 la pression sonore instantanée via la réponse impulsionnelle d'une salle mesurée avec un microphone omnidirectionnel.

Salmon³⁰³ explique aussi que G_{late} permet de calculer la force sonore pour la réverbération tardive :

$$G_{\text{late}} = 10 \log_{10} \frac{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{I0}^2(t) dt} \quad (3.10)$$

Salmon³⁰⁴ souligne alors que l'association de LLF et G_{late} permet par la suite d'avoir une nouvelle expression de L_J , telle que :

$$L_J = G_{\text{late}} + 10 \log_{10}(\text{LLF}) \quad (3.11)$$

Enfin, concernant l'IACC_L, celui-ci présente le même rôle et s'exprime de la même manière que l'IACC en équation 3.6. L'IACC_L a pour but de mesurer la cohérence interaurale dans le domaine de la réverbération tardive. Baskind³⁰⁵ mentionne alors le fait que la sensation d'enveloppement se traduit par une incohérence des signaux captés entre les oreilles gauche et droite (Ce fait a été introduit dans la Section 3.A.6). Cela démontre que le champ diffus est un état du champ sonore produisant la sensation d'enveloppement. Autrement dit, le champ diffus est un élément ayant un rôle sur les impressions spatiales.

Salmon³⁰⁶ précise que comme l'IACC_L se calcule sur la partie tardive de la réponse impulsionnelle, les valeurs t_1 et t_2 correspondent respectivement à 80 ms et 1 s.

Celui-ci correspondra à la moyenne des valeurs obtenues pour des bandes du spectre présentant pour fréquence centrale 500 Hz, 1 kHz et 2 kHz.

Il est important de rappeler que l'énergie tardive n'est pas la seule partie temporelle de la réverbération qui permet l'enveloppement. L'énergie précoce joue un rôle simi-

³⁰³ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.3.4, p. 44.

³⁰⁴ *Ibid.*

³⁰⁵ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 4.2, p. 46.

³⁰⁶ *Op. cit.*

laire. Salmon³⁰⁷ indique qu'à partir de 120 ms, l'énergie tardive ne présente plus un rôle significatif dans l'enveloppement. Les informations au-delà de 120 ms n'ont que très peu d'influence sur la sensation d'enveloppement. La plupart des informations étant déjà comprises par le cerveau bien avant 120 ms.

Salmon³⁰⁸ propose également des outils permettant de mesurer la distribution de l'énergie dans l'espace afin d'en étudier le rôle dans l'enveloppement. Salmon³⁰⁹ et Baskind³¹⁰ mentionnent que la sensation d'enveloppement augmente s'il y a une distribution de l'énergie à l'arrière de l'auditeur.

Dans la suite de son raisonnement, Salmon³¹¹ exprime le rapport avant/arrière exprimé par le FBR afin de quantifier l'enveloppement de l'auditeur par une distribution de l'énergie à l'arrière :

$$\text{FBR} = 10 \log\left(\frac{E_f}{E_b}\right) \quad (3.12)$$

E_f et E_b correspondent respectivement à l'énergie frontale et arrière dans le plan horizontal.

Salmon³¹² mentionne aussi que la contribution des réflexions à l'enveloppement dépend du niveau et de la direction d'arrivée des autres réflexions. Cela démontre que les seules réflexions sonores ne sont pas suffisantes pour que l'auditeur éprouve une sensation d'enveloppement. Une large distribution angulaire des directions d'incidence et une distribution d'énergie équilibrée sont des éléments favorisant fortement une sensation d'enveloppement chez un auditeur. Par ailleurs, ce sont des propriétés que présente le champ diffus. Ce qui démontre encore une fois que le champ diffus est un élément majeur responsable de l'enveloppement chez un auditeur.

Concrètement, vis-à-vis des différentes associations faites entre le champ diffus et

³⁰⁷ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.3.4, p. 44.

³⁰⁸ *Ibid.*, Section 1.3.4, p. 45.

³⁰⁹ *Ibid.*

³¹⁰ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 4.2, p. 46.

³¹¹ *Op. cit.*

³¹² *Ibid.*

l'enveloppement, le champ diffus amène à la formation de la sensation d'enveloppement.

Si l'auditeur est entouré de réflexions avec des incidences équiprobables dans toutes les directions, et cela, avec un niveau uniforme, alors la sensation d'enveloppement chez un auditeur sera quasi certaine.

Salmon³¹³ propose alors le STB_s correspondant au temps central spatialement équilibré. Avec T_{si} , le temps central calculé pour une direction i :

$$T_{si} = \frac{\int_0^{\infty} t p_i^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (3.13)$$

p_i^2 correspond à la pression sonore mesurée en i et p^2 la pression mesurée via un microphone omnidirectionnel.

Salmon³¹⁴ précise que plusieurs temps centraux sont calculés dans des directions uniformément réparties dans le plan horizontal de sorte à ce que chaque temps central soit pondéré (les directions avant/arrière et latérales sont pondérées respectivement par 0,5 et 1).

Le résultat a_i de cette pondération est présentée en équation 3.14 :

$$a_i = \frac{T_{si}(1 + |\sin \theta_i|)}{2} \quad (3.14)$$

θ_i correspond à l'angle entre le plan médian et l'axe de direction considéré dans le calcul du T_{si} . Par conséquent, l'auteur explique que le STB_s est obtenu en pondérant les coefficients a_i par ceux correspondants aux autres directions d'incidence, avec une importance plus ou moins grande selon l'angle qui sépare les directions d'incidence. Cela permet alors de prendre en compte le rôle de l'interaction entre les différentes réflexions dans la sensation d'enveloppement chez un auditeur.

Salmon³¹⁵ exprime le temps central spatialement équilibré (STB_s) par l'équation 3.15 :

$$STB_s = \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_i a_j \sin(\theta_{ij}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.15)$$

³¹³ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.3.4, p. 45.

³¹⁴ *Ibid.*

³¹⁵ *Ibid.*, Section 1.3.4, p. 46.

avec θ_{ij} l'angle entre les directions i et j .

Pour finir, Salmon³¹⁶ propose un dernier outil pour la mesure de l'enveloppement : le RAP_{LEV} . Cet outil, désigné plus communément RAP, permet aussi de mesurer l'ASW si certaines modifications sont réalisées. Le RAP_{ASW} est exprimé en équation 3.22.

Comme l'explique Salmon³¹⁷, le RAP_{LEV} est une méthode qui emploie une modélisation psycho-acoustique des limites de la perception spatiale. Le RAP s'applique alors à des signaux binauraux et non à des réponses impulsionnelles. Contrairement aux autres outils, le RAP et l' $IACC_L$ sont donc des outils prenant en compte la perception chez l'auditeur, et donc, la psycho-acoustique.

Le RAP_{LEV} utilise un IACC pondéré par une estimation P .

P correspond à la probabilité que la fenêtre temporelle courante contienne de l'énergie du champ direct.

On obtient l'équation 3.16 :

$$RAP_{LEV} = 1 - \frac{\sum_{n,c} IACC^4(n,c)(1 - P(n,c))}{\sum_{n,c} P(n,c)} \quad (3.16)$$

On remarque grâce à ces différents outils que les réflexions latérales précoces et tardives sont les principaux éléments jouant un rôle sur la sensation d'enveloppement d'un auditeur. Pour autant, Salmon³¹⁸ explique qu'à l'étude de ces outils, le rôle de l'énergie précoce reste flou comparé à l'énergie tardive. Il souligne alors qu'il serait nécessaire de mettre plus en évidence le rôle de l'énergie précoce dans l'enveloppement.

De même, on constate qu'un faible IACC se traduit en général chez l'auditeur par une sensation d'enveloppement. Or, un faible IACC et une sensation d'enveloppement sont observables chez un auditeur dans le champ diffus. Cela prouve que l'IACC est une mesure cohérente pour la mesure de l'enveloppement. Le champ dif-

³¹⁶ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.3.4, p. 46.

³¹⁷ *Ibid.*, Section 1.3.4, p. 42.

³¹⁸ *Ibid.*, Section 7.6, p. 190.

fus provoque chez l'auditeur une sensation d'enveloppement. Par ailleurs, cette sensation permet en partie à un auditeur d'identifier le champ diffus.

Romblom³¹⁹ soutient même que l'IACC est le meilleur outil de mesure pour l'enveloppement. Cela n'est pas forcément étonnant car les impressions spatiales correspondent aux attributs spatiaux d'une scène sonore 3D perçue par un auditeur. Or, comme il est expliqué en Section 3.B.6, l'IACC est un outil de mesure qui se préoccupe beaucoup de la perception. Les autres outils permettant la mesure de l'enveloppement ne se basent que sur des concepts physiques et mettent de côté la perception. Ce qui explique pourquoi l'IACC est un aussi bon outil pour quantifier l'enveloppement chez un auditeur.

Il serait intéressant de vérifier que cela est similaire pour le RAP_{LEV} puisque celui-ci est aussi une mesure se basant sur les principes psycho-acoustiques.

Pour continuer, Salmon³²⁰ précise que l'ASW est un phénomène qui fusionne avec le son direct. Cette sensation provoque un élargissement de la source sonore perçue par l'auditeur. De ce fait, l'ASW correspond à l'étendue spatiale d'une source perçue par un auditeur. Comme pour le LEV, l'ASW dépend des réflexions acoustiques. Pour autant, contrairement au LEV, les réflexions tardives ne présentent pas d'impacts significatifs sur l'ASW. Comme pour le LEV, la sensibilité vis-à-vis de l'ASW dépend de la nature de la source (dynamique, fréquentiel, etc...). Salmon³²¹ précise que la présence de l'ASW n'est perceptible que pour les médiums et basses fréquences.

En Section 3.C.3, on développera la dépendance fréquentielle de l'ASW et ce en quoi les basses fréquences augmentent le LEV et l'ASW.

L'auteur souligne aussi que pour qu'un auditeur juge de la largeur apparente d'une source sonore, il est important que celui-ci soit familier avec celle-ci. Cela lui permettra de connaître les dimensions originelles de la source sonore sans l'impact de l'ASW.

³¹⁹ ROMBLON David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 5.2.2, p. 93.

³²⁰ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.3.4, p. 40.

³²¹ *Ibid.*, Section 8.5.5, p. 216.

Baskind³²² et Romblom³²³ soulignent alors que ce sont surtout les réflexions latérales précoces qui ont un impact sur la perception de la largeur apparente d'une source sonore.

En effet, à l'étude de la Figure 3.10 il est possible de remarquer que l'ASW est observable lorsque les premières réflexions se manifestent.

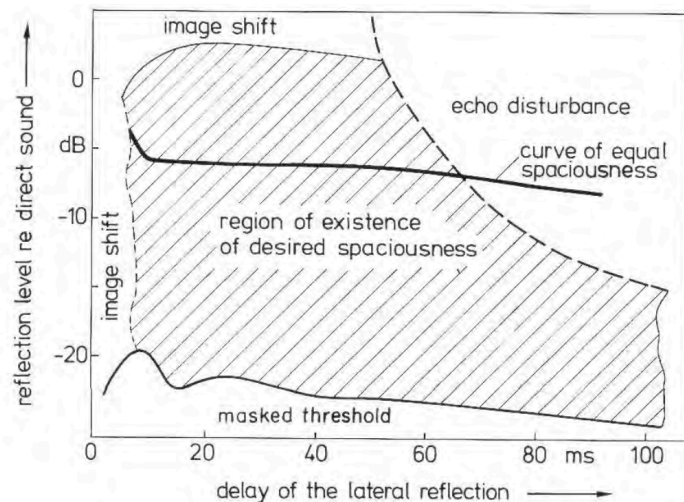


Figure 3.10 : Étude de l'effet d'une réflexions latérale (azimut de 40°) en fonction de son *delay* et de son niveau relatif sur la perception spatiale de la scène sonore 3D. « *Region of existence of desired spaciousness* » correspond alors à la zone où l'ASW est percevable.

Alexis Baskind©2003

On observe ces manifestations que ce soit pour de faibles valeurs de *delay* ou pour des réflexions présentant une énergie assez faible.

En d'autres termes, l'ASW est un phénomène se produisant dès lors qu'il y a une présence de réflexion précoce latérale.

De plus, Baskind³²⁴ indique qu'il est important que ces premières réflexions se trouvent dans l'axe interaural. Il souligne que des réflexions latérales précoces provenant du plan médian ou entre 90° et 180° ne provoqueront pas une sensation d'élargissement d'une source sonore. Pour ces positions, on n'observera que des changements de sonie, de coloration ou de sensation d'enveloppement.

Tout comme pour le LEV, il faudrait trouver des éléments permettant de quantifier

³²² BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 3.2, p. 40.

³²³ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 5.2.2, p. 93.

³²⁴ *Op. cit.*

l'ASW, pour que cela soit intégré à des outils de mesures de logiciels de spatialisation. Avec toujours la même finalité : aider ingénieur du son et/ou artiste dans le contrôle de cette impression.

Salmon³²⁵ présente alors des outils permettant la quantification de l'ASW : la fraction d'énergie latérale (J_{LF}), le coefficient de fraction latérale (J_{LFC}) et l'IACC.

L'auteur présente en équation 3.17 le J_{LF} . On notera que cet outil ressemble au LLF présenté en équation 3.9 mais celui-ci est différent puisqu'il s'exprime sur la partie précoce de la réverbération et non sur la partie tardive comme le LLF.

$$J_{LF} = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt} \quad (3.17)$$

J_{LF} , noté LF_{80}^{∞} dans les travaux de Bradley et Soulodre, est mesuré sur les 80 premières millisecondes après le son direct de la réponse impulsionnelle avec un microphone omnidirectionnel (p_L^2) et un microphone bidirectionnel (p^2) pointant dans les directions latérales.

Salmon³²⁶ présente une autre mesure nommée J_{LFC} qui permet de quantifier l'ASW en prenant en compte la contribution de la réflexion selon le cosinus de l'angle d'incidence et non le cosinus au carré de ce même angle. En effet, l'auteur souligne qu'un microphone bidirectionnel (type de microphone captant l'énergie de la réponse impulsionnelle qu'exprime p^2) suit un motif en cosinus et que la pression est élevée au carré. En conséquence, la contribution d'une réflexion latérale varie selon le carré du cosinus de l'angle d'incidence.

Ainsi, Salmon³²⁷ propose l'équation 3.18 exprimant J_{LFC} :

$$J_{LFC} = \frac{\int_{5ms}^{80ms} |p_L(t) \cdot p(t)| dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt} \quad (3.18)$$

³²⁵ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.3.4, p. 40.

³²⁶ *Ibid.*

³²⁷ *Ibid.*

Salmon³²⁸ explique également, que tout comme le LEV, l'IACC permet de mesurer l'ASW (IACC exprimé en équation 3.6). Par conséquent, Romblom³²⁹ mentionne qu'un faible IACC indiquerait que la largeur apparente de source est importante. Effectivement, un IACC présentant des valeurs s'approchant de 1 indiquerait que la discrimination de l'image d'une localisation sonore serait très étroite. Ce qui est contraire au principe qui caractérise l'ASW. Mais comme il a déjà été souligné en Section 3.A.6, un IACC présentant des valeurs s'approchant de 0 indiquerait la présence d'un champ diffus. Le champ diffus peut donc provoquer l'ASW. Cela souligne aussi qu'une incohérence des signaux présentés aux oreilles gauche et droite a un impact sur la largeur apparente d'une source sonore, et donc, sur la précision de localisation de celle-ci. Ainsi, la cohérence des informations contenues dans les signaux captés entre les deux oreilles peut permettre de décrire la largeur apparente d'une source.

Dans la continuité de l'IACC, Salmon³³⁰ présente le *Binaural Quality Index* (BQI) :

$$\text{BQI} = 1 - \text{IACC}_{\text{E3}} \quad (3.19)$$

L'IACC_{E3} correspond à un IACC se calculant sur la partie précoce d'une réponse impulsionnelle. Il sera moyenné sur des bandes du spectre présentant pour fréquence centrale 500 Hz, 1 kHz et 2 kHz.

Ces équations permettent alors de quantifier l'ASW. Pour autant, Salmon³³¹ souligne que ces outils (sauf L'IACC_{E3} et l'IACC) varient grandement en fonction du point de mesure, alors qu'aucun changement perceptif de l'ASW n'est relevé. Cela vient rejoindre les propos de Romblom³³² qui soulignent l'importance d'utiliser des outils se basant sur la perception et non uniquement sur l'acoustique physique. Les autres outils permettant la mesure de l'enveloppement ne se basent que sur des concepts physiques et mettent de côté la perception, et donc, le rôle du cerveau.

³²⁸ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.3.4, p. 41.

³²⁹ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 5.2.2, p. 93.

³³⁰ *Op. cit.*

³³¹ *Ibid.*

³³² *Op. cit.*

Cela démontre une nouvelle fois, que les impression spatiales sont avant tout des éléments qui dépendent de la perception.

Par conséquent, Salmon³³³ présentent d'autres outils : la force sonore latérale précoce (G_{EL}), les fractions latérales précoces filtrées par secteur angulaire (B_{LF} et B_{LFC}), le modèle auditif pour la perception acoustique de salle RAP_{ASW} .

Salmon³³⁴ explique que le B_{LF} et B_{LFC} correspondent au calcul de J_{LF} et J_{LFC} pour des secteurs angulaires plus précis. Le microphone bidirectionnel utilisé par J_{LF} et J_{LFC} capte (de par la propriété de ce dipôle) des ondes sonores pouvant se mélanger, ce qui provoque des interférences destructives et constructives. Avec un réseau de microphones tel qu'une antenne ambisonique, il serait possible de réaliser un filtrage spatial permettant de diminuer l'impact de ces interférences. Ce qui permettrait d'obtenir des secteurs angulaire plus précis, donnant alors B_{LF} et B_{LFC} :

$$B_{LF} = \frac{\int_{5ms}^{80ms} \sum_{n=0}^N (p_i(t) \cos \phi)^2 dt}{\int_0^{80ms} \sum_{n=0}^N p_i(t)^2 dt} \quad (3.20)$$

$$B_{LFC} = \frac{\int_{5ms}^{80ms} \sum_{n=0}^N |p_i(t)| |p_i(t) \cos \phi|^2 dt}{\int_0^{80ms} \sum_{n=0}^N p_i(t)^2 dt} \quad (3.21)$$

Où ϕ qui désigne l'azimut et N le nombre de secteur angulaire.

Pour finir, Salmon³³⁵ propose un dernier outil pour la mesure de la largeur apparente de source : le RAP_{ASW} . Cet outil, désigné plus communément RAP , a déjà été exprimé auparavant en équation 3.16 avec le RAP_{LEV} . J'invite le lecteur à voir l'équation 3.16 et les explications qui vont avec afin de ne pas faire de redondance.

Ainsi, le RAP_{ASW} utilise un IACC pondéré par une estimation P de la probabilité que la fenêtre temporelle courante contienne de l'énergie du champ direct, tel que :

$$RAP_{ASW} = 1 - \frac{\sum_{n,c} IACC^4(n,c)P(n,c)}{\sum_{n,c} P(n,c)} \quad (3.22)$$

³³³ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.3.4, p. 41.

³³⁴ *Ibid.*, Section 1.3.4, p. 42.

³³⁵ *Ibid.*

L'étude de ces différents outils permet de conclure que les réflexions latérales précoces jouent un rôle sur l'ASW.

La faiblesse d'un IACC se traduit en général chez l'auditeur par une largeur apparente de source, ce qui montre l'impact que le champ diffus peut avoir sur cette impression.

A nouveau, l'IACC et le RAP_{ASW} font la preuve de leur justesse en tant qu'outils pour quantifier cette sensation.

La prise en compte des concepts psycho-acoustiques est nécessaire pour réussir à quantifier correctement l'ASW, mais il faut souligner que les concepts physiques restent nécessaires et utiles à la quantification. Dans l'idéal, il faudrait lier tous ces outils entre eux afin d'obtenir une quantification prenant en compte à la fois l'aspect physique et psycho-acoustique de l'ASW.

On remarquera que ces observations sur l'ASW sont identiques à celles réalisées sur le LEV. Un faible IACC se traduit aussi par un enveloppement important de l'auditeur. Les propriétés du champ diffus peuvent donc avoir un impact à la fois sur le LEV et l'ASW. La remarque sur la nécessité de prendre en compte des concepts psycho-acoustiques est valable également pour l'ASW et le LEV. Il est important de comprendre que les impressions spatiales sont surtout des sensations perceptives qui sont observables chez un auditeur faisant face à une scène sonore 3D.

Ces différentes observations démontrent donc que certains liens subsistent entre l'ASW et le LEV.

Si on compile les propos de Romblom³³⁶ et la présentation des différents outils permettant de quantifier l'ASW et le LEV dans cette section, on remarquera que l'IACC, la fraction latérale d'énergie, et le RAP sont des outils qui diffèrent de l'ASW et le LEV mais qui respectent les mêmes principes. L'ASW et le LEV sont deux éléments liés, que l'on mesure avec des outils utilisés pour des domaines temporels différents.

Cela corrobore la Figure 3.8 qui démontre que l'impression spatiale regroupe plusieurs concepts proches, se chevauchant même sur certains points.

³³⁶ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 3.1, p. 35.

Baskind³³⁷ mentionne que l'ASW et le LEV dépendent de la distribution spatiale et temporelle de l'énergie. Les réflexions latérales précoces ont un plus fort pouvoir de décorrélation interaurale que les réflexions latérales précoces frontales. L'ASW sera favorisé par les réflexions latérales précoces. Cela est similaire pour le LEV mais pour des réflexions tardives et précoces (comme il été souligné dans cette section, le rôle des réflexions latérales précoces dans l'enveloppement reste flou). Une augmentation de l'énergie tardive entraînera à la fois une augmentation de l'enveloppement et une diminution de la largeur apparente d'une source. Il est possible même d'aller plus loin avec le LEV, puisqu'avec le FBR présent en équation 3.12, on constate que la distribution des réflexions tardives à l'arrière de l'auditeur ont tendance à augmenter la sensation d'enveloppement.

Salmon³³⁸ vient même appuyer ce propos et précise que dans des cas réalistes, il est parfois difficile de distinguer l'ASW et le LEV.

Néanmoins, comme le présente Romblom³³⁹ et Baskind³⁴⁰, même si l'ASW et le LEV sont liés, par des tests perceptifs, il est prouvé que les auditeurs réussissent à différencier perceptiblement ces deux concepts.

Bradley et Soulodre³⁴¹ affirment qu'il est possible de comprendre quels sont les éléments perceptifs permettant de distinguer l'ASW du LEV. L'ASW correspond à une fusion temporelle et spatiale du son direct avec les réflexions latérales précoces. Cela provoque des ambiguïtés dans la localisation d'une source par un auditeur. Cette fusion entre le son direct et les réflexions latérales précoces provoquent un élargissement des dimensions perçues de la source sonore. Ce qui explique en partie le nom de l'ASW : largeur apparente de source.

Pour ce qui est du LEV, il s'agit d'un phénomène se traduisant par le fait qu'il n'y a

³³⁷ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 4.2, p. 45.

³³⁸ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.3.4, p. 46.

³³⁹ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 3.1, p. 35.

³⁴⁰ *Op. cit.*

³⁴¹ BRADLEY John S., SOULODRE Gilbert A., « The influence of late arriving energy on spatial impression » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Avril 1995, Vol. 97, N°4, Section 9, p. 2270.

pas de fusion temporelle et spatiale entre le son direct et les réflexions tardives. Cela provoque une distribution spatiale de l'énergie donnant une sensation à l'auditeur d'être enveloppé, immergé dans cette énergie sonore.

Salmon³⁴² poursuit en précisant que les réflexions tardives provoquent la diminution de l'ASW et l'augmentation du LEV. Tandis que, les réflexions latérales précoces tendent à augmenter l'ASW mais à diminuer le LEV. L'ASW et le LEV ne dépendent donc pas des mêmes distributions temporelles de l'énergie. Enfin, la modification du rapport d'énergie précoce et tardive aura un impact beaucoup plus important sur l'enveloppement que sur la largeur apparente de source. Il suffit donc de confronter leurs définitions afin d'observer que l'ASW et le LEV ne sont pas similaires en tout point.

Pour conclure, on a observé à travers la Section 3.B.1, que les éléments qui regroupent les impressions spatiales sont bien définis. En étudiant cette section, on remarque qu'il reste encore beaucoup de zones d'ombre sur la mesure de toutes les impressions spatiales. Etant donné, que les seuls éléments des impressions spatiales qui ont réussi à être quantifié sont l'ASW et le LEV, des études doivent encore être menées sur les impressions spatiales afin de pouvoir toutes les quantifier.

Cela permettrait alors de connaître les différentes notions de physiques, de psycho-acoustique, de psychologie acoustique ayant un rôle sur la perception des impressions spatiales. Ces nouvelles recherches induiraient de nouvelles perspectives en terme de modification des impressions spatiales.

Concernant l'ASW et le LEV, ces différentes notions ont été exprimées par des équations. L'intégration de ces équations dans des logiciels de spatialisation donnerait la possibilité aux ingénieurs du son et/ou artistes d'avoir un contrôle sur ces impressions spatiales dans le cadre d'une production musicale 3D.

Salmon³⁴³ souligne que grâce à l'évolution de la technologie et de la recherche, il sera bientôt possible de maîtriser l'ensemble des impressions spatiales, en contrôlant la distribution spatiale, temporelle et l'énergie.

Ce qui ouvre donc de toutes nouvelles perspectives dans la production musicale 3D.

³⁴² SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 1.3.4, p. 46.

³⁴³ *Ibid.*, Section 1.3.4, p. 47.

Le champ diffus est donc un concept physique amenant au LEV et à l'ASW. En effet, tout comme le champ diffus, une incohérence des signaux entre les deux oreilles provoque l'apparition de ces impressions spatiales.

Ce phénomène revête des notions de psychologie acoustique. Le cerveau comprend les informations cohérentes comme décrivant par exemple l'intelligibilité ou la localisation d'une source sonore. Les informations incohérentes quant à elles amèneraient principalement à la sensation d'enveloppement mais aussi à d'autres impressions spatiales.

La prochaine section étudiera les possibilités offertes par la recherche pour disposer d'un contrôle sur l'immersion d'une scène sonore 3D.

3.B.3- les optimisations possibles pour un contrôle de l'immersion dans une scène sonore 3D.

Dans cette section, nous étudierons les éléments optimisables susceptibles de fournir un contrôle complet des impressions spatiales, et de l'immersion dans une scène sonore 3D.

L'étude de ces optimisations se fera à la fois sur la spatialisation des sources sonores, sur les logiciels de spatialisation ou sur les méthodes de captation 3D comme l'ambisonie.

L'observation des différents outils permettant d'avoir un contrôle sur les impressions spatiales n'a qu'une finalité, les intégrer dans les logiciels de spatialisation afin d'optimiser les méthodes de productions dans la musique 3D. Cette démarche aboutirait à simplifier et démocratiser la conception des productions musicales 3D.

Les optimisations ou les contrôles sur les impressions spatiales concernent majoritairement l'ASW. En effet, l'ASW est une sensation ne permettant pas à un auditeur la localisation précise d'une source sonore (étudié dans la Section 3.C.2). Le contrôle de l'ASW est donc quelque chose de recherché dans la production musicale 3D.

Néanmoins, certains outils pour le contrôle de l'enveloppement ont été trouvés.

En Section 3.B.2, il a été noté que les réflexions latérales précoces latérales étaient les principaux éléments ayant un impact sur l'ASW. Cela laisse supposer qu'un contrôle sur les réflexions permet le contrôle de l'ASW.

Pour une augmentation de l'ASW, Salmon³⁴⁴ propose une méthode expérimentale qui consisterait à décomposer le signal à élargir en plusieurs sources décorréliées avec des spatialisations différentes. Ces sources sonores seraient donc perçues comme des événements sonores différents. Ce qui permettrait d'élargir la dimension et de flouter la localisation de la source sonore, et donc, d'augmenter l'ASW.

Salmon³⁴⁵ propose d'autres méthodes s'appliquant dans le cadre de l'ambisonie afin d'accroître l'ASW.

Il présente une méthode permettant la dispersion des directions d'arrivée des composantes fréquentielles des sources sonores constituant la scène sonore 3D.

Une composante fréquentielle provenant de la direction ϕ_0 sera encodée selon une direction $\phi_0 + \phi(\omega)$, où ϕ est l'angle de modulation dépendant de la fréquence angulaire ω . Il précise que via une spatialisation des différentes composantes fréquentielles du signal, cela permet d'augmenter l'incohérence interaurale. Ce qui se traduit par une perception moins précise et plus large de la source. On obtient ce phénomène par la dispersion de l'énergie de la source dans une région angulaire.

Il faudrait étudier si dans le cas d'une plus grande dispersion des composantes fréquentielles, on obtient un champ diffus. Cette idée permettrait peut-être d'établir de nouveaux outils pour le contrôle du champ diffus.

Salmon³⁴⁶ propose une autre méthode, toujours dans le cadre de l'ambisonie, afin d'accroître ou diminuer l'ASW. Celle-ci se nomme le *warping* ou déformation angulaire. Elle consiste à modifier la direction d'incidence des sources sonores selon un coefficient de pondération en fonction de leur azimuth et/ou élévation. Cette méthode permet alors de concentrer les réflexions latérales précoces soit vers le plan médian, soit vers le plan interaural. Ce qui se traduit par un contrôle de la latéralisation des réflexions latérales précoces, et donc, à un contrôle de la largeur apparente d'une source.

Salmon³⁴⁷ propose une méthode s'incluant dans le domaine ambisonique : l'amplification directionnelle. Celle-ci permet la modification de l'énergie sonore dans

³⁴⁴ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 8.1, p. 194.

³⁴⁵ *Ibid.*, Section 8.2.3, p. 198.

³⁴⁶ *Ibid.*, Section 8.2.2, p. 197.

³⁴⁷ *Ibid.*, Section 8.2.1, p. 195.

des directions spécifiques entre l'étape d'encodage et de décodage. Autrement dit, l'amplification directionnelle permet de contrôler la distribution spatiale des réflexions latérales précoces. En fonction de l'amplification directionnelle choisie sur les premières réflexions, il sera possible d'avoir un contrôle sur l'accroissement ou la diminution de l'ASW. En effet, comme il a été vu tout au long de ce mémoire, les réflexions précoces ont un rôle important dans la perception spatiale et dans la plupart des impressions spatiales.

L'étude de ces différentes méthodes permet d'envisager un possible contrôle sur l'ASW afin de l'accroître ou de le diminuer. Il serait judicieux d'inclure ces outils dans des logiciels de spatialisation afin de contrôler la largeur apparente d'une source lors de la constitution d'une scène sonore 3D.

Pour autant, Salmon³⁴⁸ précise que ces outils ne sont pas forcément efficaces en tout point. En effet, les traitements visant à réduire à l'ASW ont tendance à mieux fonctionner que les traitements visant à augmenter l'ASW.

De plus, l'efficacité du traitement dépend de la source sonore. Comme il a été expliqué en Section 3.B.2, Salmon³⁴⁹ mentionne que l'ASW n'a que très peu d'impact dans les hautes fréquences puisque celui-ci n'est perceptible que dans les basses et moyennes fréquences. Il est important également que l'auditeur soit familier avec la source sonore subissant l'ASW. Ces conditions doivent être réunies pour que les outils permettant d'avoir un contrôle sur l'ASW fonctionnent. Salmon³⁵⁰ souligne aussi qu'il est important que les réflexions latérales précoces soient en quantité importante pour que les outils de traitement aient un impact sur l'ASW. La largeur apparente de la source dépend des réflexions latérales précoces.

En d'autres termes, plusieurs outils permettent de contrôler l'ASW. L'intégration de ces outils dans des logiciels de spatialisation est indéniablement avantageux pour la production musicale 3D. Si on y ajoute les outils observés en Section 3.B.2, il serait possible d'obtenir des bases solides pour le contrôle des impressions spatiales dans une production musicale 3D.

Pour autant, que ce soit pour accroître ou diminuer l'ASW, il est important que cer-

³⁴⁸ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 8.5.2, p. 213.

³⁴⁹ *Ibid.*, Section 8.5.5, p. 216.

³⁵⁰ *Ibid.*, Section 8.6, p. 219.

taines conditions subsistent. Premièrement, il faut que les réflexions latérales précoces soient en quantité importante. Deuxièmement, il faut que la source sonore concernée par l'ASW présente un registre fréquentiel dans les médiums et basses fréquences mais aussi qu'elle soit familière à l'auditeur.

Pour continuer, le champ diffus est une notion qu'il est important de bien restituer. En Section 2.C.2, on constatait la perception des variations d'énergie et d'isotropie du champ diffus. Romblom³⁵¹ ³⁵² insiste sur le fait que les différences directionnelles sont une composante des espaces acoustiques, et donc, des impressions spatiales qui caractérisent le champ diffus. Il serait nécessaire d'avoir dans des logiciels de spatialisation des possibilités de contrôle sur l'isotropie, et donc, la diffusion d'un champ diffus.

De surcroît, comme le mentionne Daniel³⁵³, il est aussi extrêmement important que les logiciels de spatialisation ou les systèmes de captation 3D, comme l'ambisonie, puissent reproduire des valeurs de décorrélation interaurale proche de 0. Cela afin de reproduire au mieux l'incohérence des informations perçues par les deux oreilles lorsqu'un auditeur se trouve dans le champ diffus.

Daniel³⁵⁴ souligne que plus l'ordre ambisonique M est bas, plus il faut s'attendre à une limitation des différences interaurales et de leur fluctuation dans les hautes-fréquences. Autrement dit, plus l'ordre ambisonique M est bas, plus il sera difficile d'obtenir de grande valeurs de décorrélation interaurale. Ce qui aura tendance sur le plan perceptif à dégrader la perception du champ diffus. Daniel³⁵⁵ précise alors que la troncature du champ ambisonique par l'ordre M se traduit comme un effet « passe-bas » sur le champ diffus dans les hautes-fréquences. Néanmoins, la troncature du champ ambisonique par l'ordre M n'a pas d'effet dans les basses fréquences sur le champ diffus.

De ce fait, le choix de l'ordre ambisonique M aura un impact dans les hautes-fré-

³⁵¹ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Section 3.4, p. 47.

³⁵² *Ibid.*, Section 3.5, p. 49.

³⁵³ DANIEL Jérôme, *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 31 Juillet 2001, Section 1.3.4, p. 48.

³⁵⁴ *Ibid.*, Section 6.2.3, p. 286.

³⁵⁵ *Ibid.*, Section 6.2.3, p. 287.

quences sur les impressions spatiales comme l'enveloppement provoqué par la présence d'un champ diffus.

A travers la Section 3.B.2, on a observé que la sensation d'enveloppement pouvait être due à la présence d'un champ diffus. Inversement, il a été relevé que l'enveloppement donne la sensation d'être dans un champ diffus. Or, cette impression d'enveloppement peut être contrôlée par le taux de réflexions latérales précoces et tardives.

Salmon³⁵⁶ propose un outil permettant de contrôler les réflexions latérales précoces dans le domaine ambisonique. Ce qui permet d'avoir un contrôle sur la sensation d'enveloppement. Cette méthode se base sur le principe de la décorrélation des composantes sectorielles. Cela consiste à modifier les corrélations entre les signaux ambisoniques correspondant aux harmoniques sphériques. Ce qui permet de réduire la directivité du champ sonore dans le plan. Cette méthode contribue au contrôle sur la distribution spatiale des premières réflexions. Intrinsèquement, cela permet d'accroître ou de diminuer le LEV. Ce qui se traduit par un contrôle de la sensation de l'auditeur d'être dans un champ diffus.

Par conséquent, il est possible via ces considérations d'avoir à la fois un contrôle sur les éléments physiques du champ diffus et les éléments permettant la sensation d'enveloppement.

Concernant la spatialisation des instruments, la Section 3.A montrait que le système auditif rencontrait des difficultés pour localiser certaines spatialisations.

L'existence de cônes de confusions provoquent des flous et des biais dans la localisation de source sonore, générateurs de difficultés. Il serait donc judicieux de spatialiser les sources sonores en fonction des différentes observations réalisés en Section 3.A (Notamment les Sections 3.A.1/3.A.2/3.A.3/3.A.5).

Cela implique une connaissance particulière quant aux mécanismes du système auditif périphérique (oreille externe, moyenne et interne) et central permettant la localisation sonore.

Dans ce mémoire, il sera soutenu qu'il est important dans une production musicale 3D qu'un ingénieur du son et/ou artiste présente des connaissances et une bonne compréhension des mécanismes anthropologique réalisant la perception sonore 3D.

³⁵⁶ SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, Section 8.2.4, p. 199.

Pour conclure, il apparait donc nécessaire d'inclure dans les logiciels de spatialisations tous les outils de mesures étudiés dans cette section et en Section 3.B.2.

Le contrôle sur l'ASW et le LEV, qui sont des impressions spatiales ayant un fort impact sur une scène sonore 3D, n'en sera que plus juste

L'amélioration ou l'invention d'autres outils permettrait un contrôle optimal des paramètres des impressions spatiales. Ces paramètres portent avant tout sur un contrôle des réflexions latérales, qui définissent le LEV et l'ASW. Daniel³⁵⁷ appuie ce propos et précise qu'il est important de bien définir les réflexions latérales précoces puisqu'elles sont principalement responsables de ces impressions spatiales.

L'inclusion de ces outils permettrait aussi, dans le cadre d'une production musicale 3D, d'avoir une modification en temps réel des impressions spatiales et du champ diffus en fonction de la spatialisation des sources sonores.

L'ingénieur du son et/ou artiste disposeraient d'un contrôle de la spatialisation de la source sonore tout en prenant en compte l'évolution des impressions spatiales en temps réel.

De plus, il est observé que la troncature du champ ambisonique par l'ordre M se traduit comme un effet « passe-bas » sur le champ diffus dans les hautes-fréquences. Cela confirme l'importance d'utiliser un microphone ambisonique avec un ordre M le plus élevé possible pour obtenir une captation 3D optimale.

Dans mon mémoire de Master 1, on observait l'apparition de problèmes dans les basses fréquences pour l'augmentation de l'ordre M . Une captation 3D utilisant un microphone ambisonique s'accompagne de compromis sur la restitution fréquentielle du spectre, entraînant un impact sur les impressions spatiales et sur le champ diffus.

Notons qu'il est important de présenter une analyse claire des mécanismes anthropologiques permettant la perception sonore 3D, afin d'aider l'ingénieur du son et/ou artiste à spatialiser au mieux les sources sonores, tout en tenant compte des limites du système auditif pour la perception d'une scène sonore 3D.

Salmon ajoute aussi que l'effet de précedence peut aussi avoir un rôle sur l'ASW. Ce dernier fusionnerait avec le son direct, puis viendrait élargir la dimension perçue de la source sonore. Mais il faudrait en préambule, disposer d'une compréhension

³⁵⁷ DANIEL Jérôme, *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 31 Juillet 2001, Section 1.3.4, p. 47.

précise de l'effet de précédence. Ce type d'effet ayant un impact sur la perception d'une scène sonore 3D sera abordé en Section 3.C.4.

C - Les éléments pouvant altérer la perception d'une scène sonore 3D.

Cette section 3 a souligné que les mécanismes anthropologiques permettant la perception sonore présentent un certain nombre de limites. A cela s'ajoute des effets perceptifs pouvant altérer la perception d'une scène sonore. L'effet de précédence, les effets de masques, les sources fantômes, font partie de ces phénomènes. Autrement dit, ces effets perceptifs doivent être pris en compte lors de la constitution d'une scène sonore 3D afin d'éviter toute altération perceptive de cette dernière.

L'apparition et l'importance de ces effets perceptifs dépendra de la spatialisation et des caractéristiques (timbrales, temporelles, enveloppe, ...) des sources sonores.

Ainsi, lors de la constitution d'une scène sonore 3D il est courant que l'ingénieur du son ou l'artiste soit confronté à ces altérations.

Ces phénomènes perceptifs seront définis et il sera démontré en quoi une compréhension de celles-ci est importante pour réaliser au mieux une production musicale 3D.

On déterminera quels sont éléments physiques et perceptifs pouvant expliquer ces différents phénomènes. L'idée est de mieux comprendre leurs origines, de rassembler les différentes notions afin d'éviter tout problème au moment de la réalisation d'un production musicale 3D. On donnera plusieurs outils permettant de prévenir l'ingénieur du son et/ou artiste de ces risques lors de la constitution d'une scène sonore 3D.

3.C.1 - Le masquage spatial.

Simon³⁵⁸ précise que le démasquage spatial serait l'apport de la séparation spatiale des sources sonores sur la perception d'une source cible. Dans ce mémoire,

³⁵⁸ SIMON Laurent, Dispositif d'Aide à la Spatialisation basé sur des critères perceptifs [En ligne], Rapport de Stage IRCAM, Directeur de stage : DELERUE Olivier, WARUSFEL Olivier, France : Université Paris 7, Juin 2006, Section 4.1.2, p. 21.

en m'appuyant sur ma pratique personnelle des logiciels de spatialisation et à travers les différentes lectures que j'ai eues, il sera défendu l'idée que la production musicale 3D favorise le démasquage spatial.

Pour autant, le masquage spatial est un phénomène qui reste d'actualité dans une scène sonore 3D. Cet effet perceptif peut s'appliquer à divers domaines tel que le fréquentiel, le temporel ou l'énergétique.

Le masquage spatial s'apparente à l'altération d'une source au niveau de sa perceptibilité, sa détectabilité et/ou sa localisation. Cet effet est le produit de l'interaction de cette source sonore avec d'autres éléments constituant la scène sonore 3D (l'acoustique de la pièce, et donc la réverbération, et/ou d'autres sources sonores). Par exemple, l'effet de masquage peut se traduire par une non séparation spatiale des localisations des sources sonores. Il provoque des flous et des biais dans la localisation des sources sonores ce qui perturbe la perception d'une scène sonore.

Simon³⁵⁹ explique alors que le masquage spatial est la résultante du masquage temporel et fréquentiel s'appliquant au domaine spatiale.

La notion de masquage spatial renvoie parfois à certains phénomènes compris dans l'effet de précedence présenté en Section 3.C.3.

Simon³⁶⁰ ajoute que le masquage spatial peut être due à un masquage informationnel. Pour cela l'auteur prend pour exemple l'effet *cocktail party* qui désigne la capacité du cerveau à distinguer des informations importantes parmi des bruits parasites n'en contenant pas. Pourtant, dès que ces bruits parasites contiennent des informations capitale pour le cerveau, celui-ci rencontre des difficultés pour démasquer ces informations.

Ce phénomène s'inscrit dans la psychologie acoustique et démontre que la capacité du cerveau d'extraire les informations cohérentes parmi les informations incohérentes est limitée.

Cette idée pourrait aussi expliquer la perception floue des sources sonores dans le champ diffus. Cet état du champ sonore amène à une incohérence des informations au niveau du cerveau. Ainsi, plus le champ diffus est important, plus la localisation d'une source sonore pourra être compliquée. Les informations cohérentes décrivant

³⁵⁹ SIMON Laurent, Dispositif d'Aide à la Spatialisation basé sur des critères perceptifs [En ligne], Rapport de Stage IRCAM, Directeur de stage : DELERUE Olivier, WARUSFEL Olivier, France : Université Paris 7, Juin 2006, Section 4.1.2, p. 21.

³⁶⁰ *Ibid.*, Section 4.1.2, p. 22.

la localisation de la source sonore étant inhibées dans les informations incohérentes.

Autrement dit, le champ diffus, considéré comme parasite par le cerveau, contiendrait les informations permettant la localisation d'une source sonore. De ce fait, l'Homme pourrait avoir du mal à localiser une source sonore dans le champ diffus.

Deprez³⁶¹ quantifie le masquage qui est réalisé par la réverbération, et donc, par le champ diffus sur une source sonore. Cette idée est présentée en Figure 3.11.

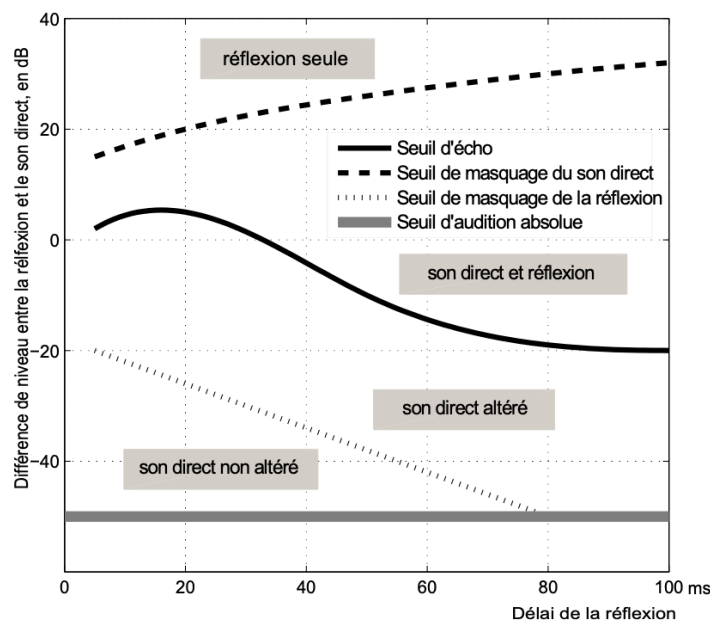


Figure 3.11 : Présentation des différents types de masquage réalisé par une réflexion en fonction de son délai et de son niveau relatif à celui d'une source sonore d'un niveau de 50 dB. Romain Deprez©2012.

La réflexion est dite masquée si elle présente un niveau de 40 dB inférieur au son direct. La réverbération n'est pas perçue et le son direct est perçu comme s'il était le seul évènement sonore.

La réflexion est dite altérante si elle présente un niveau de 20 dB. La réverbération ne masque pas la source sonore mais elle fusionne avec : il y a une altération de la source sonore et de sa localisation par la réverbération.

Lorsque la réflexion présente un niveau similaire à la source sonore, alors la réverbération et la source sonore sont deux éléments distinguables.

Le terme « seuil d'écho » caractérise ce seuil à partir duquel les réflexions sont

³⁶¹ DEPREZ Romain, *Optimisation perceptive de la restitution sonore multicanale par une analyse spatio-temporelle des premières réflexions* [En ligne], Directeur de Thèse : FRIOT Emmanuel, NICOL Rozenn, France : Université d'Aix-Marseille, Thèse de Doctorat, 07 Décembre 2012, Section 2.C.1, pp.19-21.

différentiables et ne sont plus en fusion avec une source sonore (notion de fusion abordée en Section 3.C.4).

Baskind³⁶² et Romblom³⁶³ précisent que le seuil d'écho dépend des caractéristiques du signal (temporel, fréquentiel, amplitude), de l'angle et du niveau des réflexions vis-à-vis de la source sonore. Cette notion sera réutilisée et précisée dans les Sections 3.C.2 et Section 3.C.3.

La réflexion est dite masquante si elle présente un niveau supérieur à la source sonore de 30 dB. La réverbération masque la source sonore. Néanmoins, Deprez³⁶⁴ souligne que cette dernière situation n'est physiquement pas possible.

Lorsque la réverbération est altérante ou qu'elle présente le même niveau que la source sonore, elle aura tendance à masquer la spatialisation de la source sonore. Cela vient justifier les propos supportant que le champ diffus contribue aux flous de localisation d'une source sonore par sa qualité masquante.

Par conséquent, le masquage spatial est un phénomène qui viendra perturber la perception de la localisation d'une source sonore. Cet effet de masque s'explique de par la présence d'une autre source sonore masquante.

Le champ diffus est un élément pouvant masquer la localisation et la perception d'une source. Ce phénomène contribue forcément à une sensation d'enveloppement chez l'auditeur.

Le masquage pourrait être voulu dans le cas d'une intention artistique/esthétique. Mais dans un contexte de production musicale 3D ce phénomène est en général indésirable. Un outil permettant de connaître en temps réel le masquage d'une source sonore en fonction de sa spatialisation serait judicieux pour aider l'ingénieur du son et/ou artiste à éviter ce genre d'effet néfaste. Cela apporterait une meilleure cohérence dans les choix de spatialisation, ce qui aurait un impact positif sur la constitution d'une scène sonore dans la cadre d'une production musicale 3D.

Pour autant, le phénomène de masquage ainsi que les phénomènes perceptifs et les

³⁶² BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 3.1, p. 39.

³⁶³ ROMBLUM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Annexe B.2.1, p. 151.

³⁶⁴ DEPREZ Romain, *Optimisation perceptive de la restitution sonore multicanale par une analyse spatio-temporelle des premières réflexions* [En ligne], Directeur de Thèse : FRIOT Emmanuel, NICOL Rozenn, France : Université d'Aix-Marseille, Thèse de Doctorat, 07 Décembre 2012, Section 2.C.1, p. 21.

impressions spatiales sont des éléments qui sont étudiés dans le domaine d'une écoute réelle. Il serait donc nécessaire de vérifier si la transposition de ces règles à la production sonore 3D est efficace.

3.C.2 - Les différents éléments influent la perception de la réflexion d'une source sonore.

Deprez³⁶⁵ présente le *Reflexion Masked Threshold* (RMT) qui étudierait le seuil de perceptibilité d'une réflexion isolée dans la réverbération. Cela correspondrait au calcul du seuil d'écho (étudié en Section 3.C.1) et de l'impact de la réverbération sur la perception d'une réflexion. Voici l'équation 3.23 :

$$\text{RMT} = L_R - L_D \quad (3.23)$$

Avec L_R niveau minimum d'une réflexion perceptible et L_D le niveau du son direct.

Le RMT est toujours négatif puisque lorsque celui-ci tend vers 0, cela indique que la réflexion nécessite un niveau important pour altérer la perception du son direct. Autrement dit, la réflexion nécessite un niveau important pour dépasser le seuil d'écho. Inversement pour d'importantes valeurs négatives.

Comme il est expliqué plus haut (Section 3.C.1), le dépassement du seuil d'écho dépend de plusieurs paramètres physiques et des caractéristiques de la source. Deprez³⁶⁶ propose l'équation 3.24 afin de prendre en compte ces paramètres dans le calcul du RMT, tel que :

$$\text{RMT} = \Phi(s, L_D, \tau_R, \Theta_D, \Theta_R, \eta) \quad (3.24)$$

où Φ désigne la nature du signal source, τ_R le délai de la réflexion vis-à-vis de l'onde direct, Θ_D et Θ_R les directions d'incidence respective de l'onde direct et de la réflexion par rapport à l'auditeur. η évalue l'effet des réflexions ou de la réverbération additionnelle. L'auteur décrit alors les différentes influences de ces paramètres sur la perception d'une source sonore.

³⁶⁵ DEPRez Romain, *Optimisation perceptive de la restitution sonore multicanale par une analyse spatio-temporelle des premières réflexions* [En ligne], Directeur de Thèse : FRIOT Emmanuel, NICOL Rozenn, France : Université d'Aix-Marseille, Thèse de Doctorat, 07 Décembre 2012, Section 2.C.3, p. 22.

³⁶⁶ *Ibid.*

Deprez³⁶⁷ commence par décrire l'influence d'une réflexion sur la perception d'une source sonore. Il souligne que l'ajout d'une réflexion dans le plan horizontal sur une source sonore aura tendance à altérer la précision de la localisation sonore. Cette altération se traduira par une modification de l'ASW de la source sonore. Quant à l'ajout d'une réflexion dans le plan médian, cela aura un impact sur le timbre de la source sonore. Cela vient rejoindre les différents propos sur l'ASW.

Deprez³⁶⁸ souligne que le RMT augmente lorsque le contenu fréquentiel du son direct et de la réflexion sont différents. Lorsque la réflexion présente un contenu spectral différent du son direct, celle-ci nécessite un niveau important pour dépasser le seuil d'écho.

Cependant, l'auteur mentionne que l'atténuation des hautes fréquences caractérisant la réverbération n'est pas concernée par cette observation. De fait, la modification dans les hautes fréquences de la réflexion vis-à-vis du son direct n'a que très peu d'impact sur le RMT.

Deprez³⁶⁹ propose une description du lien entre le niveau de la source sonore et le RMT en Figure 3.12.

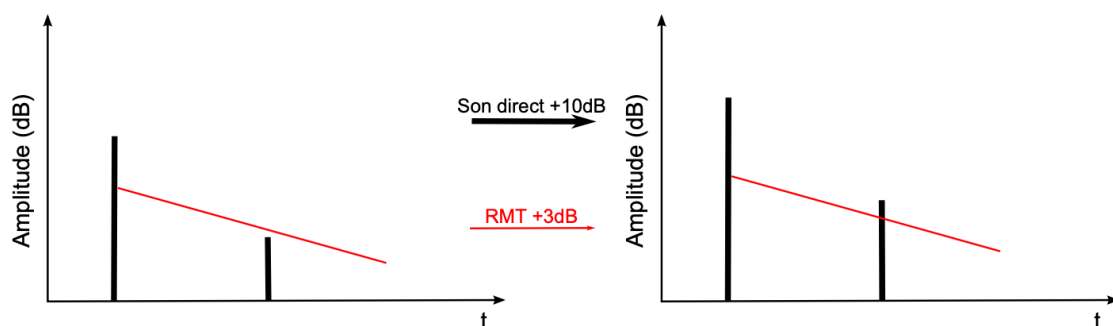


Figure 3.12 : Évolution du RMT en fonction du niveau du son direct. La première barre noire correspond au son direct et la deuxième à la réflexion. Une augmentation du son direct de 10 dB implique une variation linéaire de la pente du RMT de 3 dB, mais surtout d'une baisse du RMT de 7 dB vis-à-vis du son direct. Romain Deprez©2012.

Il explique que le RMT est une valeur usuelle qui varie en fonction du niveau du son direct. Via une augmentation de 10 dB du son direct, l'auteur démontre que le RMT

³⁶⁷ DEPREZ Romain, *Optimisation perceptive de la restitution sonore multicanale par une analyse spatio-temporelle des premières réflexions* [En ligne], Directeur de Thèse : FRIOT Emmanuel, NICOL Rozenn, France : Université d'Aix-Marseille, Thèse de Doctorat, 07 Décembre 2012, Section 2.C.3.b, p. 23.

³⁶⁸ *Ibid.*, Section 2.C.3.c, p. 24.

³⁶⁹ *Ibid.*, Section 2.C.3.d, p. 24.

baisse de 7 dB vis-à-vis du son direct et varie linéairement avec une pente de 3 dB. De ce fait, lorsque le son direct est faible, la réflexion n'est pas perçue. Le RMT n'est pas franchit. Or, avec une augmentation du son direct, la réflexion est plus susceptible d'être perçue. Cela implique que le seuil d'écho est plus facilement atteignable lorsque le son direct est fort. Ainsi, une réflexion aura tendance à être plus perceptible lorsque le son direct est fort.

Concernant le délai de la réflexion vis-à-vis de l'onde directe exprimée par τ_R en équation 3.24, Deprez³⁷⁰ indique que des sons directs discontinus, et donc avec des attaques prononcées, implique un RMT assez faible. Ici, les sons directs discontinus sont représentés par les « Clics » en Figure 3.13.

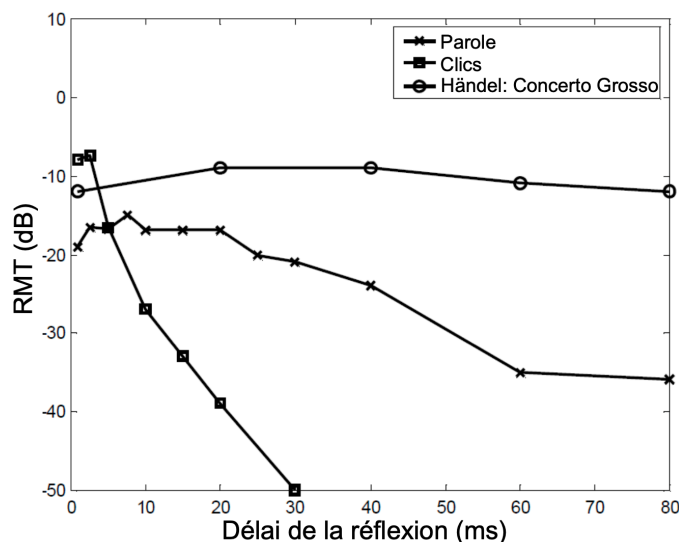


Figure 3.13 : Dépendance du RMT par rapport au délai τ_R présenté en équation 3.24. Romain Deprez©2012.

On observe une diminution du RMT logarithmiquement proportionnelle à une augmentation du délai de la réflexion vis-à-vis du son direct. Aucune influence entre le RMT et les autres types de son est observable.

Cette observation démontre que l'attaque d'une source sonore, et plus précisément son régime transitoire, est un élément lié au RMT et facilitant la perception des réflexions.

L'hypothèse que les attaques et/ou un régime transitoire permettent d'éviter la fusion, et donc, l'altération entre le son direct et ses réflexions, est proposée. Par une

³⁷⁰ DEPREZ Romain, *Optimisation perceptive de la restitution sonore multicanale par une analyse spatio-temporelle des premières réflexions* [En ligne], Directeur de Thèse : FRIOT Emmanuel, NICOL Rozenn, France : Université d'Aix-Marseille, Thèse de Doctorat, 07 Décembre 2012, Section 2.C.3.e, p. 25.

meilleure distinction entre les réflexions et le son direct, il serait logique qu'il soit plus simple de localiser ce dernier. Cette observation, pourrait constituer un élément de réponse quant à l'idée générale qu'il est plus simple de localiser une source sonore présentant des attaques courtes plutôt que longues dans le champ diffus, et donc dans la réverbération.

L'influence de la direction d'incidence de la réflexion et du son direct dépend de leur positionnement dans l'espace vis-à-vis de l'auditeur.

Deprez³⁷¹ indique que la position peut faire varier le RMT jusqu'à 10 dB. Cette influence de la position dépend de la direction d'incidence, et donc, de la position dans l'espace du son direct et de la réflexion. On notera que le RMT restera maximal pour des positions coïncidentes entre la réflexion et le son direct.

De plus, selon les études de Deprez³⁷², l'influence sur le RMT de la direction d'incidence n'a pas l'air de varier si l'angle est vertical ou horizontal. Néanmoins, une influence est observable sur la perception de la réflexion. Une réflexion dans le plan horizontal aura tendance à accroître l'ASW de la source sonore, tandis qu'une réflexion dans le plan médian aura tendance à avoir un impact sur le timbre de la source sonore. Ce qui vient rejoindre le propos de Deprez³⁷³ décrit plus tôt quand celui-ci introduisait la notion de RMT par l'équation 3.24.

Enfin, Deprez³⁷⁴ mentionne que l'effet d'une réverbération additionnelle η (voir équation 3.24) se traduit par une augmentation du RMT de la réflexion originelle. Ce qui augmente le seuil d'écho.

Cela ne fluctue pas en fonction du caractère spatial ou temporel de la réverbération additionnelle. Mais l'augmentation du RMT est plus importante si les localisations de la réflexion originelle et la réverbération additionnelle sont proches.

Deprez³⁷⁵ ajoute que l'ajout d'une réverbération aura un impact sur le lissage du son direct. Dans le cas d'un son direct discontinu, celui-ci sera perçu comme un son

³⁷¹ DEPREZ Romain, *Optimisation perceptive de la restitution sonore multicanale par une analyse spatio-temporelle des premières réflexions* [En ligne], Directeur de Thèse : FRIOT Emmanuel, NICOL Rozenn, France : Université d'Aix-Marseille, Thèse de Doctorat, 07 Décembre 2012, Section 2.C.3.f, p. 26.

³⁷² *Ibid.*

³⁷³ *Ibid.*, Section 2.C.3.b, p. 23.

³⁷⁴ *Ibid.*

³⁷⁵ *Ibid.*

continu. Autrement dit, une inhibition des attaques du son direct s'effectue lorsqu'il y a un ajout de réverbération.

Pour conclure, il est important de prendre en compte ces paramètres physiques puisqu'ils permettent d'avoir un contrôle sur la perception de la réverbération d'une source sonore.

Cette section démontre aussi qu'un grand nombre de variables ont une influence sur la perception des éléments composant une scène sonore 3D.

L'inclusion d'un outil se basant sur l'étude de ces différents paramètres, permettrait à l'ingénieur du son et/ou artiste de s'assurer de la perceptibilité et de la détectabilité d'une source sonore ainsi que de sa réverbération dans une scène sonore 3D.

3.C.3 - L'élargissement et le rôle des basses fréquences dans l'enveloppement et le phénomène d'accroissement de la largeur.

Dans ce mémoire, il a été écrit que l'ASW décrit la largeur perçue d'une source sonore. Celui-ci peut provoquer une sensation de flou dans la localisation sonore. Ce phénomène peut être voulu dans le cas d'une intention artistique/esthétique. Mais il peut aussi avoir un effet néfaste sur la précision de localisation d'une source sonore. Il peut alors contribuer à la mauvaise restitution de l'intention d'une spatialisation réalisée par l'ingénieur du son et/ou artiste. Il faudrait étudier en quoi cet élargissement peut provoquer une incertitude dans la discrimination d'une localisation sonore et quelle est la dépendance fréquentielle de ce phénomène.

Il a été expliqué en Section 3.B.2 que l'ASW est un phénomène dépendant du taux de réflexions latérales précoces et que la largeur apparente d'une source sonore est amoindrie par la présence de réflexions frontales. Les réflexions latérales précoces étant à l'origine de l'ASW provoquent une faible cohérence entre les signaux perçus par les deux oreilles. Cette incohérence rend la localisation d'une source sonore compliquée.

Baskind³⁷⁶ souligne donc que la discrimination précise d'une localisation sonore ne peut être réalisée s'il y a un phénomène d'ASW.

³⁷⁶ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 3.2, p. 43.

Nous allons étudier par la suite l'interaction des réflexions latérales précoces avec les indices de localisations interauraux.

Sur le domaine temporel, Baskind³⁷⁷ mentionne que les réflexions précoces font varier les indices interauraux. Si le système auditif était capable d'analyser précisément ces variations, cela se traduirait par une localisation sonore qui bouge dans tous les sens. Mais le système auditif n'est pas capable d'être aussi rapide dans son analyse. Celui-ci réalise alors un moyennage des informations qu'il reçoit. Ce qui se traduit par un flou, et donc, un élargissement de la perception de la localisation sonore.

Sur le domaine spectral, Baskind³⁷⁸ explique que les réflexions latérales précoces, de par des filtrages en peigne, font varier les indices interauraux de temps et d'intensité en fonction de la fréquence. Ces filtrages viennent donc altérer les indices interauraux à tel point qu'il est compliqué pour le cerveau de tirer de ces indices des informations lui permettant de modéliser précisément la localisation d'une source sonore.

Ainsi, une fluctuation des ITD/IPD et des ILD altère la précision de localisation d'une source sonore. Baskind³⁷⁹ ajoute qu'une variation des ITD provoque une délocalisation complète de la source à tel point que l'auditeur ne perçoit qu'un champ sonore enveloppant ou bien des informations fausses qui ne permettraient pas la localisation sonore correcte. Quant à une variation des ILD, elle se traduira chez l'auditeur par une perception de la source dans un champ sonore enveloppant.

De plus, comme il a été souligné en Section 3.B.2 la nature de la source sonore aura un impact sur l'ASW. Cela sera étudié pour une source sonore présentant une attaque continue et discontinue.

Baskind³⁸⁰ souligne que les réflexions latérales précoces associées à une source continue modulée en amplitude et/ou en fréquence provoquera une altération importante à la fois sur le domaine spectral et temporel. Cette altération se traduit alors par une délocalisation partielle ou complète.

³⁷⁷ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 3.2, p. 43.

³⁷⁸ *Ibid.*

³⁷⁹ *Ibid.*

³⁸⁰ *Ibid.*

Concernant une source sonore discontinue, les réflexions latérales précoces auront un impact sur les indices interauraux fournis par les attaques.

Baskind³⁸¹ soutient que les attaques n'apportent pas d'indices de localisations significatifs dans le champ libre. Pour autant celles-ci sont primordiales pour la localisation d'une source sonore dans le champ diffus, et donc, dans une scène sonore réverbérante. Lors de la comparaison de la localisation de source sonore avec des attaques différentes dans un champ diffus, celles avec des attaques courtes sont localisées plus précisément. Pour autant, ce phénomène n'a jamais réussi à vraiment être quantifié. En effet, plusieurs éléments sont à prendre en compte pour étudier ce phénomène tel que la position de la source sonore vis-à-vis de l'auditeur et des murs ainsi que la taille de la pièce.

De plus, dans ce cas précis, l'attaque d'une source sonore est considérée comme courte lorsqu'elle se produit sur un laps de temps très bref plus petit que le temps de réverbération de la salle considérée. Cela implique ici que le caractère court de l'attaque d'une source sonore dépend des propriétés acoustiques (architecture, matériaux, dimensions, ...) de l'environnement étudié.

Il s'avère qu'il était souhaité lors de l'écriture de ce mémoire de parler de l'influence des attaques sur la localisation d'une source sonore. Malheureusement, peu de travaux existent encore de nos jours sur ce thème. Dans un cas général, il est compliqué d'étudier l'influence des caractéristiques d'une source sonore. Ces caractéristiques concernent l'attaque, le timbre, l'amplitude, l'enveloppe, ou encore l'harmonicité paire/impair ou l'inharmonicité que présente un instrument. Cette multitude d'attribut distinguant une source sonore d'une autre rend la tâche compliquée et très fastidieuse pour l'étude de leur influence sur la localisation. Pour autant, l'influence à proprement parler des basses et hautes fréquences est étudiée. Que ce soit sur les impressions spatiales ou sur la localisation sonore. Il sera précisé aussi que les résultats des expériences analysant une quelconque influence fréquentielle dépendent fortement du mode opératoire réalisé par les chercheurs.

³⁸¹ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 3.2, p. 43.

Pour continuer, Baskind³⁸² met en avant la dépendance fréquentielle des impressions spatiales. Cette dépendance concerne les basses fréquences.

Ce domaine fréquentiel provoque une délocalisation totale d'une source sonore à tel point qu'une sensation d'enveloppement (plus que d'élargissement) est remarqué chez l'auditeur.

Il est même souligné par Baskind³⁸³ que les hautes fréquences sont plus susceptibles d'apporter avec les réflexions latérales précoces, un ASW important. Tandis que les basses fréquences provoquent une sensation plus importante d'enveloppement.

Il reste à préciser que ce propos est à nuancer et que ce ne sont pas forcément les basses fréquences qui ont une influence direct sur l'ASW et le LEV. Mais plutôt que cette influence est la résultante de la mauvaise localisation sonore réalisée par l'Homme dans les basses fréquences. Baskind³⁸⁴ mentionne aussi que les basses fréquences présentes dans une large bande, n'accroissent pas le LEV ou l'ASW. Lorsque les basses fréquences sont présentées seules, un accroissement de ces impressions spatiales est observable. Cela démontre que l'accroissement de l'ASW et du LEV par les basses fréquences résulte de la mauvaise localisation sonore réalisée par l'Homme dans ce registre fréquentiel.

Pour autant, il demeure important de poursuivre les recherches en ce domaine puisque comme il a été expliqué plus tôt, la dépendance fréquentielle des impressions spatiales ou de la localisation sonore est quelque chose de très compliquée à étudier et qui dépend de nombreux facteurs.

L'ASW est un phénomène qui viendra perturber la perception de la localisation d'une source sonore. Il a été remarqué que l'ASW joue un grand rôle dans le flou de localisation d'une source sonore. Cela s'explique par l'impact des réflexions latérales précoces sur la fluctuation des indices interauraux.

L'ASW et le LEV peuvent aussi être impactés de par la présence de basses fréquences. Cependant, ce propos est à nuancer.

Ce phénomène de flou de localisation pourrait être voulu dans le cas d'une intention

³⁸² BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 3.2, p. 41.

³⁸³ *Ibid.*, Section 3.2, p. 42.

³⁸⁴ *Ibid.*

artistique/esthétique. Mais dans un contexte de production musicale 3D ce phénomène est en général indésirable. Il peut provoquer chez l'auditeur la sensation désagréable d'être dans un flou spatial.

Un outil permettant de connaître en temps réel l'ASW d'une source sonore en fonction de sa spatialisation serait plus que nécessaire pour aider l'ingénieur du son et/ou artiste dans la constitution d'une scène sonore 3D.

3.C.4 - L'effet de précédence.

Deprez³⁸⁵ explique que l'étude de l'effet de précédence indique à partir de quel seuil la présence d'une réflexion ou d'une source peut altérer la perception d'une autre source sonore. La source ou réflexion altérante est appelée source secondaire, la source altérée se nomme source primaire.

Autrement dit, cela revient à étudier le traitement réalisé par le cerveau sur l'altération d'une source sur une autre source sonore. Il est important de préciser qu'il ne s'agit pas de l'étude du seuil perceptif des réflexions mais bien de leur impact sur une source sonore.

Plus généralement, l'effet de précédence aborde des phénomènes perceptifs qui se produisent dès lors que deux sources sonores sont identiques. On notera que les réflexions présentant une forte énergie peuvent avoir un impact et être considérées à leur tour comme étant une source sonore (perception de l'écho, étudiée dans cette section).

En outre, cette altération de la source secondaire sur la source primaire aura un impact sur la perception finale de la source sonore. Cette altération variera en fonction des propriétés acoustiques de la pièce considérée ainsi que des caractéristiques des deux sources sonores.

Si la localisation de la source sonore ne s'effectue à aucun endroit où se trouve la source secondaire et la source primaire, on dit que la source localisée est une source « fantôme ».

Le cas de la source « fantôme » sera étudié plus précisément en Section 3.C.5. Cette source mérite d'être défini de la manière la plus précise possible car elle peut

³⁸⁵ DEPREZ Romain, *Optimisation perceptive de la restitution sonore multicanale par une analyse spatio-temporelle des premières réflexions* [En ligne], Directeur de Thèse : FRIOT Emmanuel, NICOL Rozenn, France : Université d'Aix-Marseille, Thèse de Doctorat, 07 Décembre 2012, Section 2.C.2, p. 22.

avoir un impact important sur une scène sonore.

En d'autres termes, l'effet de précédence étudie la perception d'une source sonore résultante de la perception de l'altération de la source secondaire sur la source primaire.

Certains phénomènes compris dans l'effet de précédence renvoient à la notion de masquage spatial, étudiée en Section 3.C.1. Cela démontre que le masquage spatial et l'effet de précédence sont deux phénomènes très liés. De manière plus générale, un lien subsiste entre les différentes notions altérant la perception d'une scène sonore 3D.

Il sera mentionné rapidement l'origine de l'effet de précédence par la psycho-acoustique et la psychologie acoustique.

Celui-ci est un phénomène réalisé par le fonctionnement de la perception sonore de l'Homme. En effet, Baskind³⁸⁶ souligne que ce phénomène est permis par une focalisation perceptive des réflexions via un mécanisme de fusion temporelle et spatiale. Baskind³⁸⁷ précise aussi que les résultantes de cet effet dépendent des caractéristiques de la source sonore (enveloppe temps-fréquence) et des paramètres physiques (réflexions, délai, ...) accompagnant cette dernière.

En outre, Baskind³⁸⁸ et Romblom³⁸⁹ indiquent que les mécanismes monauraux et interauraux réalisent cet effet de précédence dans le but de faciliter la perception d'une source sonore et de sa localisation dans un milieu réverbérant.

Baskind³⁹⁰ présente le fait que les mécanismes monauraux et interauraux sont sensibles à ce phénomène et fournissent chacun des indices en prenant en compte ce dernier.

Le rôle du système auditif central n'est toujours pas déterminé même si celui-ci à l'air de présenter un rôle important dans l'effet de précédence.

³⁸⁶ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 3.1, p. 38.

³⁸⁷ *Ibid.*

³⁸⁸ *Ibid.*

³⁸⁹ ROMBLUM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Annexe B.2.1, p. 151.

³⁹⁰ *Op. cit.*, Section 3.1, p. 39.

Baskind³⁹¹ ajoute alors que lors de l'apparition d'une source « fantôme » par effet de sommation, le timbre de cette dernière n'est pas altéré par une modification du délai de la source secondaire vis-à-vis de la source primaire. Une coloration est audible en écoute monaurale. Cela indique qu'un mécanisme interaural permet la compensation de l'altération du timbre. Le système auditif est donc capable de corriger par les mécanismes interauraux la perception d'une scène sonore 3D. De telle sorte que cela lui permet d'améliorer la localisation et la perception d'une source sonore.

De manière anecdotique, cela démontre que le cerveau effectue un choix entre les indices interauraux et monauraux pour modéliser la scène 3D de façon cohérente. Cela vient rejoindre les propos soutenus en Section 3.A.4

Baskind³⁹² mentionne que l'effet de précedence englobe des événements perceptifs se distinguant par leur nature. En effet, ces événements diffèreront entre eux en fonction du retard et du niveau relatif de la source secondaire vis-à-vis de la source primaire.

Il sera donc étudié dans cette section les différents éléments perceptifs que l'effet de précedence regroupe.

L'effet de sommation ou effet de « Haas » : Comme le présente Baskind³⁹³ et Deprez³⁹⁴, ce phénomène n'a lieu que pour des valeurs très courtes de délai (inférieur à 1 ou 2 ms) entre la source primaire et secondaire. Ce court délai provoque une sommation entre la source primaire et secondaire, de telle sorte que la localisation sonore qui en résulte n'a lieu à aucun des endroits où se trouvent les deux sources. Ainsi, Baskind³⁹⁵ explique que via cette sommation, une source dite « fantôme » apparaît. Sa localisation perçue dépendra alors de la position dans l'espace de la source primaire et secondaire. À noter, que comme en Section 3.C.4, les sources primaires et secondaires sont dites « réelles » afin que la distinction soit claire avec

³⁹¹ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 3.1, p. 38.

³⁹² *Ibid.*

³⁹³ *Ibid.*

³⁹⁴ DEPREZ Romain, *Optimisation perceptive de la restitution sonore multicanale par une analyse spatio-temporelle des premières réflexions* [En ligne], Directeur de Thèse : FRIOT Emmanuel, NICOL Rozenn, France : Université d'Aix-Marseille, Thèse de Doctorat, 07 Décembre 2012, Section 2.C.2, p. 21.

³⁹⁵ *Op. cit.*

la source sonore fantôme. Deprez³⁹⁶ souligne que la localisation de la source sonore « fantôme » dépendra aussi du délai entre les deux sources sonores et de l'arrivée des ondes à l'auditeur renvoyé par chacune des deux sources sonores « réelles ». En effet, la localisation de la source sonore « fantôme » se rapprochera de plus en plus de la source sonore « réelle » présentant des ondes arrivant en premier à l'auditeur. Cet effet augmentera aussi avec l'augmentation du délai entre la source primaire et secondaire. Baskind³⁹⁷ ajoute que la source sonore « fantôme » se déplacera aussi vers la source sonore « réelle » la plus forte.

La notion de source fantôme sera étudiée plus en détail en Section 3.C.5.

Deprez³⁹⁸ et Romblom³⁹⁹ précisent que l'effet de « Hass » est le phénomène sur lequel se base la stéréophonie par la différence temporelle.

La dominance de localisation : Deprez⁴⁰⁰ présente cet effet comme étant un phénomène masquant la localisation d'une source sonore.

Pour des délais supérieurs à ceux correspondant à l'effet de sommation (1 ou 2 ms), la localisation de la source sonore s'effectue à la position de la source sonore primaire. La position spatiale de la source secondaire n'est plus distinguable. Cependant, celle-ci présente toujours un impact sur le timbre de la source sonore primaire. Autrement dit, la dominance de localisation se traduit comme étant un phénomène de masquage spatiale de la localisation de la source sonore secondaire.

Loi du premier front d'onde (*law of the first wavefront*)/Localization dominance : Baskind⁴⁰¹ explique que ce phénomène a lieu à partir du moment où le retard de la source secondaire vis-à-vis de la source primaire est au-dessus de 1 ms. Cela se traduit par le fait que la modélisation de la localisation de la source sonore réalisée par le cerveau s'effectuera à l'endroit où se trouve la source primaire.

³⁹⁶ DEPREZ Romain, *Optimisation perceptive de la restitution sonore multicanale par une analyse spatio-temporelle des premières réflexions* [En ligne], Directeur de Thèse : FRIOT Emmanuel, NICOL Rozenn, France : Université d'Aix-Marseille, Thèse de Doctorat, 07 Décembre 2012, Section 2.C.2, p. 21.

³⁹⁷ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 3.1, p. 38.

³⁹⁸ *Op. cit.*

³⁹⁹ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Annexe B.2.1, p. 150.

⁴⁰⁰ *Op. cit.*

⁴⁰¹ *Op. cit.*, Section 3.1, p. 39.

Concernant la source secondaire elle ne sera pas perçue dans son intégrité. Baskind⁴⁰² mentionne que dans le cas où le niveau de la source sonore secondaire est suffisant pour être perçu (ce seuil est désigné par le terme de « seuil masqué » qui correspond au seuil de détectabilité à partir duquel la perception d'une source sonore est réalisable), sa sonie, son timbre et son ASW seront impactés.

Cependant, il est précisé par l'auteur que seul un accroissement de l'ASW de la source sonore secondaire pourrait être perceptible. Ce qui provoquerait un flou de la localisation sonore émanant de l'interaction entre la source primaire et secondaire. Mais aussi, cela pourrait se traduire par une augmentation de la taille perçue de la source sonore secondaire par l'accroissement de l'ASW.

Cette étude démontre que l'effet de précedence, notamment par la loi du premier front d'onde peut augmenter l'ASW, et donc, le flou de localisation d'une source sonore.

Ainsi, dans la cadre d'une production musicale 3D, il serait possible d'éviter cet effet en ajoutant un *delay* de sorte à ce que le retard entre la source primaire et la source secondaire soit significativement plus important que 1 ms (de l'ordre de 5 ms à 20 ms). Ce qui permettrait d'éviter l'accroissement de l'ASW et l'apparition des flous de localisations.

L'inhibition du premier son (*inhibition of the primary sound*) : Baskind⁴⁰³ présente un effet inverse à la loi du premier front d'onde. Il s'agit d'un masquage rétro-actif qui a lieu dès lors que le niveau de la source secondaire est suffisamment forte vis-à-vis de la source sonore primaire (niveau supérieur de 20 dB à 40 dB).

Ce phénomène provoque un masquage de la source primaire : elle n'est plus audible. De plus, la localisation de la source sonore est réalisé à l'endroit où se trouve la source secondaire. Ce qui est logique puisque la source sonore primaire n'est plus audible.

D'une manière générale, cela indique qu'un masquage spatial et de niveau, est observable dès lors qu'une source sonore est plus forte qu'une autre, selon les valeurs en dB présentées auparavant. Baskind propose un exemple concret : « l'inhibition

⁴⁰² BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 3.1, p. 39.

⁴⁰³ *Ibid.*

du son direct dans le cadre d'un champ fortement réverbérant »⁴⁰⁴.

L'inhibition du premier son vient au final rejoindre la définition proposée par Deprez⁴⁰⁵ sur le masquage spatial des réflexions sur une source sonore. Cette notion est présentée en Section 3.C.1, notamment par la Figure 3.11

Perception de l'écho : La perception de l'écho s'apparente à la localisation et perception d'une réflexion sonore qui est observable à partir du seuil d'écho introduit en Section 3.C.1 et présenté en Figure 3.11. Pour rappel, ce dernier caractérise le seuil à partir duquel les réflexions sont distinguables d'une source sonore.

Vis à vis de la terminologie utilisée, il serait possible de dire que l'écho, représenté par la source sonore secondaire, est distinguable de la source sonore primaire. Dans des cas extrêmes, cette perception de l'écho contribuerait à la localisation et perception d'une source « fantôme ».

Baskind⁴⁰⁶ précise que la précision de localisation de l'écho augmente proportionnellement avec le temps de retard vis-à-vis de la source primaire : pour des retards longs, la précision de localisation de l'écho sera meilleure. La localisation de l'écho est réalisée par les mêmes principes permettant la perception sonore. La perception de l'écho n'échappe pas aux limites des mécanismes anthropologiques permettant la localisation sonore. Dès lors, la localisation de ce dernier sera plus précise dans le plan horizontal, plus précisément à l'avant et l'arrière et non sur les côtés. Enfin, comme il est en mentionné en Section 3.C.1, Romblom⁴⁰⁷ et Baskind⁴⁰⁸ soulignent que le seuil d'écho dépend des caractéristiques de la source primaire ainsi que des réflexions en elle-même. Intrinsèquement, la perception de l'écho dépend de ces critères.

La fusion : De manière similaire, ce phénomène est lié au seuil et à la perception de l'écho.

⁴⁰⁴ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 3.1, p. 39.

⁴⁰⁵ DEPREZ Romain, *Optimisation perceptive de la restitution sonore multicanale par une analyse spatio-temporelle des premières réflexions* [En ligne], Directeur de Thèse : FRIOT Emmanuel, NICOL Rozenn, France : Université d'Aix-Marseille, Thèse de Doctorat, 07 Décembre 2012, Section 2.C.1, p. 21.

⁴⁰⁶ *Op. cit.*

⁴⁰⁷ ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, Annexe B.2.1, p. 151.

⁴⁰⁸ *Op. cit.*

Deprez⁴⁰⁹ indique que ce phénomène aborde la fusion des réflexions avec la source sonore primaire. De telle sorte qu'une seule source sonore sera perçue et les réflexions ne seront pas distinguées de celle-ci. Au regard de la Figure 3.11 en Section 3.C.1, le phénomène de fusion aurait lieu entre le seuil de masquage de la réflexion et le seuil d'écho.

Comme expliqué en Section 3.C.1, Deprez⁴¹⁰ insiste sur le fait qu'une fusion de la source primaire avec les réflexions provoquent une altération de la localisation et de la perception de cette source sonore.

Dans une production musicale 3D, ce phénomène peut être voulu dans le but d'obtenir des nappes sonores. Mais il peut aussi être indésirable lorsque l'objectif de l'ingénieur du son et/ou artiste est que la perception de la location de la source sonore soit correcte.

L'effet de précedence dans le cas de plus de deux sources : Une précision sera apportée concernant l'effet de précedence pour plusieurs sources sonores. Ce cas d'étude correspond davantage aux différents cas auxquels peuvent être confrontés les ingénieurs du son et/ou artistes lors de la constitution d'une scène sonore pour une production musicale.

Ainsi, Baskind⁴¹¹ mentionne que pour des retards faibles entre plusieurs sources sonores, une seule sera perçue par l'auditeur. La localisation dépendra alors de l'ensemble des positions des sources. Cela pourrait s'apparenter à un effet de pupitre qui pourrait totalement être voulu dans le cadre d'une production musicale 3D.

L'auteur ajoute qu'un déplacement de la localisation dépendra du caractère tardif ou précoce de l'arrivée à l'auditeur des ondes émises par les sources. La localisation s'effectuera là où se trouve les sources les plus précoces. En effet, une source tardive aura que très peu d'influence sur la localisation de la source sonore. Elles ont tout de même un impact sur le timbre perçue de la source sonore.

Pour conclure sur le sujet de l'effet de précedence, on a remarqué que celui-ci regroupe une multitude de phénomène. Ils peuvent provoquer une absence totale de

⁴⁰⁹ DEPRESZ Romain, *Optimisation perceptive de la restitution sonore multicanale par une analyse spatio-temporelle des premières réflexions* [En ligne], Directeur de Thèse : FRIOT Emmanuel, NICOL Rozenn, France : Université d'Aix-Marseille, Thèse de Doctorat, 07 Décembre 2012, Section 2.C.2, p. 21.

⁴¹⁰ *Ibid.*

⁴¹¹ BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, Section 3.1, p. 39.

localisation sonore ou des altérations du timbre. L'apparition de sources fantômes, de flous de localisation et de masquages spatiaux sont aussi des éléments à prendre en compte.

L'effet de précedence a surtout un fort impact sur la localisation d'une source sonore.

Ce phénomène est assimilable à l'effet de masquage et aux sources fantômes abordés respectivement en Section 3.C.1 et 3.C.5. Si tous ces effets n'ont pas été abordés dans cette section, c'est notamment parce qu'il est considéré que le masquage et les sources fantômes sont des concepts importants qui méritent d'être définis ou abordés avec précision pour chacun.

Comme il est expliqué en fin de Section 3.C.5, dans la vie de tous les jours, la vue et les mouvements de tête sont des indices cruciaux pour éviter les ambiguïtés sur les localisations sonores provoquées par l'effet de précedence.

Or, ces indices sont obsolètes et ne peuvent pas être utilisés dans le contexte d'une production musicale 3D en diffusion binaurale.

Il serait nécessaire d'intégrer des outils dans les logiciels de spatialisation afin d'aider l'ingénieur du son et/ou artiste à éviter ces effets néfastes. Ces outils permettraient d'avoir une étude ou un contrôle en temps réel (en fonction la spatialisation d'une source dans une scène sonore 3D) des différents phénomènes que regroupent l'effet de précedence. Cela consisterait par exemple à la modélisation de la source sonore « fantôme » afin que l'ingénieur du son et/ou artiste sache où sera localisé le son altéré par cet effet.

3.C.5 - Les sources fantômes.

Les sources fantômes sont souvent considérées comme étant l'une des résultantes de l'effet de précedence. Si cette notion n'a été abordée que partiellement dans la section 3.C.3, c'est par ce qu'il était considéré dans ce mémoire qu'il était important d'aborder cet effet à part. En effet, celui-ci mérite d'être défini de manière plus précise car il peut avoir un impact important sur une scène sonore.

De manière similaire à l'effet de masque et l'ASW, les sources fantômes contribuent aux flous et biais de localisation dans une scène sonore 3D. Dans une production musicale 3D, une source fantôme se traduirait par l'apparition d'une locali-

sation sonore qui ne correspond pas aux spatialisations des sources sonores réalisés par l'ingénieur du son ou l'artiste.

Cette source sonore est dite fantôme afin de la distinguer d'une source sonore « réelle » (« réelle » dans le sens où elle découle du choix de l'ingénieur du son et/ou artiste et « fantôme » dans le sens où elle ne découle pas du choix de ce dernier).

Simon⁴¹² précise que ce phénomène dépendra des caractéristiques de deux sources. Que ce soit sur le plan fréquentiel, sur leur évolution dans le temps ou sur leur intensité. Mais aussi de leur caractère cohérent ou incohérent. Dans la continuité de la Section 3.C.3, ces deux sources « réelles » seront désignées par la terminologie source primaire et source secondaire.

Simon⁴¹³ mentionne plusieurs observations en fonction des caractéristiques des deux sources sonores « réelles ».

Pour deux sources sonores cohérentes, l'auditeur entendra une seule source « fantôme ». Celle-ci sera localisable entre les deux sources sonores « réelles ». Cela implique qu'aucun effet de masque ne soit distinguable entre ces deux dernières.

Si l'une des deux sources sonores (primaire ou secondaire) masque l'autre, l'auditeur localisera la source sonore « fantôme » à l'endroit où se trouve la source masquante.

Pour deux sources sonores incohérentes, l'auditeur localisera ces deux dernières de manière distincte à leur endroit originel.

Ainsi, dans les deux derniers cas (source masquant une autre et sources incohérentes) il n'y a pas de source « fantôme ».

De par ces études, il est remarquable qu'une source « fantôme » n'apparaît que si les deux sources sonores sont cohérentes.

Alors, Simon⁴¹⁴ va vérifier le rôle de la cohérence dans l'apparition d'une source « fantôme » via le coefficient d'intercorrélation (suit le même principe que l'IACC).

En outre, lorsque le coefficient d'intercorrélation est égal à 1 (cohérence maximale), l'auditeur entendra seulement une source sonore « fantôme ». Celle-ci sera localisable entre les deux sources sonores « réelles ».

⁴¹² SIMON Laurent, Dispositif d'Aide à la Spatialisation basé sur des critères perceptifs [En ligne], Rapport de Stage IRCAM, Directeur de stage : DELERUE Olivier, WARUSFEL Olivier, France : Université Paris 7, Juin 2006, Section 4.2, p. 30.

⁴¹³ *Ibid.*, Section 4.2.1, p. 30.

⁴¹⁴ *Ibid.*, Section 4.2.2, p. 31.

Lorsque le coefficient d'intercorrélacion prend des valeurs entre 0,4 et 1, l'auditeur entendra toujours une seule source sonore virtuelle. Mais en dessous de 0,4 (début vers l'incohérence), la source sonore virtuelle se divise en deux. De telle sorte que l'auditeur perçoit deux sources distinctes.

Par conséquent, plus le coefficient d'intercorrélacion diminue, plus la source « fantôme » est perçue avec de la largeur. Cela indique que la cohérence a un rôle sur le flou de la localisation.

Ainsi, la cohérence entre deux signaux sera susceptible d'être à l'origine de l'apparition d'une source « fantôme », tandis que l'incohérence entre deux signaux permet d'éliminer ce phénomène de source fantôme. L'auditeur distinguera correctement les deux sources réelles et non leur sommation via une source fantôme.

De par ces différents propos il est possible de penser qu'une source « fantôme » n'apparaît que s'il y a une interaction entre deux sources sonores. Cela est faux.

Dans le cas où une source sonore se trouve à proximité d'une paroi et que ses ondes directes ne sont pas perceptibles par l'auditeur, celui-ci discriminera la localisation de la source sonore à l'endroit où se trouvent les réflexions : au niveau de la paroi. En d'autres termes, l'auditeur percevra une source « fantôme » sur la paroi où se concentre les réflexions. Cela fausse la localisation de la source sonore par l'auditeur. Il reste tout de même à souligner que ces cas sont très peu courants dans la production musicale. Ils ne sont observables que lorsque les *delay* sont très courts (en dessous de 2 ms).

En conséquence, une source « fantôme » est un phénomène qui viendra perturber la perception de la localisation d'une source sonore. Cet effet s'explique par la cohérence entre deux ou plusieurs sources sonores. Une source « fantôme » apparaît aussi lorsque la concentration d'énergie renvoyée par une source sonore est plus importante à un endroit ne correspondant pas à sa localisation réelle. La présence d'une paroi rigide peut expliquer ce cas d'étude si elle présente des propriétés non absorbantes.

Il est donc possible de parler de source « fantôme » dès lors que la modélisation d'une localisation sonore réalisée par le cerveau ne correspond pas à la localisation réelle de cette même source sonore.

La vue est un indice nous permettant de s'assurer de la localisation, et donc, d'éviter le phénomène étudié dans cette section. Pour autant, dans le contexte

d'une production musicale 3D en diffusion binaurale, la vue ne peut pas être utilisée, tout comme les mouvements de tête qui permettraient d'enlever les ambiguïtés présentes pour certaines localisations sonores. Ce phénomène contribue forcément à la mauvaise restitution de l'intention d'une spatialisation réalisée par l'ingénieur du son et/ou artiste.

Comme pour les autres effets perceptifs, un outil permettant de connaître en temps réel les sources fantômes pouvant apparaître dans une scène sonore 3D, serait nécessaire pour aider l'ingénieur du son et/ou artiste à éviter cet effet néfaste.

Au final, ce phénomène de source « fantôme » est l'une des résultantes de l'effet de précedence. Si cette notion n'a pas été abordée dans la section 3.C.3, c'est par ce qu'il était considéré dans ce mémoire qu'il était important d'aborder cet effet comme à part. En effet, celui-ci peut avoir un véritable impact sur une scène sonore. Ce qui se traduirait par dénaturation totale des localisations des sources sonores.

3.C.6 - Les optimisations possibles pour corriger les éléments altérants la restitution de la scène sonore 3D.

L'étude de ces différents phénomènes indique clairement que ces derniers peuvent altérer la perception d'une scène sonore 3D. Dans la continuité de cette Section 3.C, il serait intéressant de proposer des outils, des méthodes afin d'éviter ces altérations de la perception d'une scène sonore 3D. Il serait judicieux d'associer la Section 3.B.3 à cette section. Effectivement, l'association des outils proposés dans ces deux sections, permettrait d'avoir un contrôle complet sur une scène sonore 3D. Que ce soit sur les impressions spatiales et ou sur les effets indésirables pouvant impacter une production musicale 3D. On notera aussi que l'ASW qui, même s'il est décrit comme une impression spatiale en Section 3.B, reste un phénomène altérant la précision de la localisation sonore (voir Section 3.C.4).

Simon⁴¹⁵ présente plusieurs outils permettent d'avoir un contrôle sur les effets perceptifs dans une scène sonore 3D.

Le *Spat_oper* est intégré au logiciel de spatialisation *Spat Revolution*. Celui-ci est un programme développé sur *Max/msp* par *Ircam*. Il est présenté en Figure 3.14. Cet outil est pertinent pour aider les ingénieurs du son et/ou artistes lors d'une pro-

⁴¹⁵ SIMON Laurent, Dispositif d'Aide à la Spatialisation basé sur des critères perceptifs [En ligne], Rapport de Stage IRCAM, Directeur de stage : DELERUE Olivier, WARUSFEL Olivier, France : Université Paris 7, Juin 2006.

duction musicale 3D.

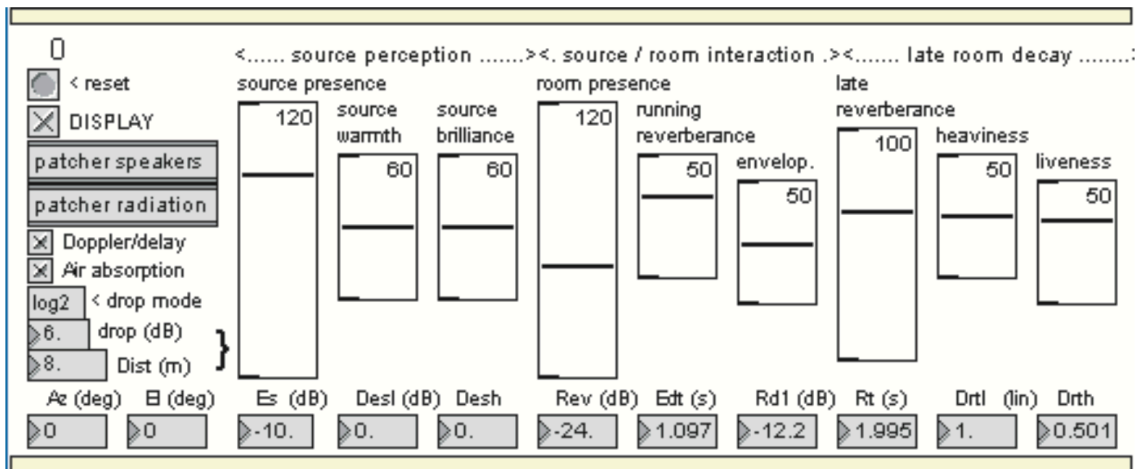


Figure 3.14 : Interface *Spat_oper* sous le logiciel *Max/msp* avec les différents paramètres physiques qu'il est possible de contrôler sur une source sonore.
Laurent Simon©2006.

Simon⁴¹⁶ souligne que cet outil se base sur l'utilisation d'outils de calcul de réverbération et des études psycho-perceptives.

De plus, l'auteur indique que la dizaine de paramètres intégrés dans le *Spat_oper* résulte d'une étude sur 100 paramètres physiques. Seuls les paramètres les plus compréhensibles ont été intégrés pour les utilisateurs.

Mais à travers ce mémoire, il est démontré qu'il n'est pas suffisant de se reposer sur une vulgarisation ou une limitation du nombre de paramètres physiques dans les logiciels de spatialisation pour optimiser la production musicale 3D.

Il est aussi important de présenter des connaissances sur la psycho-acoustique, la psychologie acoustique et la physique acoustique, afin que la compréhension sur ces paramètres et leur rôle dans la perception des éléments constituant une scène sonore 3D soit la plus complète possible. L'ingénieur du son et/ou l'artiste pourront disposer d'une malléabilité absolue sur la perception d'une scène sonore dans le cadre d'une production musicale 3D. C'est notamment pour cela que ces notions sont abordées dans les principaux axes d'étude de ce mémoire.

⁴¹⁶ SIMON Laurent, Dispositif d'Aide à la Spatialisation basé sur des critères perceptifs [En ligne], Rapport de Stage IRCAM, Directeur de stage : DELERUE Olivier, WARUSFEL Olivier, France : Université Paris 7, Juin 2006, Section 2.2.1, p. 9.

Simon⁴¹⁷ précise que *Spat_oper* permet d'avoir un contrôle sur une source sonore et non sur la scène sonore. En effet, celui-ci ne renseigne pas sur l'interaction de celle-ci avec les autres sources sonores. Cet outil ne permet qu'un contrôle et ne renseigne en aucun cas sur la perception ou la précision de la localisation de la source sonore, de la présence d'un effet de masque ou de précédence.

Simon⁴¹⁸ présente donc un logiciel nommé *MusicSpace*. À l'inverse du *Spat_oper*, *MusicSpace* se consacre à l'optimisation de la perception d'une scène sonore en prenant en compte les phénomènes vus en Section 3.C pouvant altérer la perception. Pour réaliser cela, le logiciel intègre des contraintes sur la spatialisation des sources sonores. Comme le mentionne Simon⁴¹⁹, du fait du manque de connaissance et/ou d'outils permettant de réaliser une scène sonore 3D, l'ingénieur du son et/ou l'artiste aura tendance à réaliser des spatialisations qui ne sont pas cohérentes entre-elles. La perception de la scène sonore 3D qui en résultera, sera désagréable et non optimale.

Ces contraintes permettent d'éviter l'obtention d'une scène sonore 3D qui ne fait plus sens par la présence d'un grand nombre d'effets perceptifs altérant la production musicale 3D.

Simon⁴²⁰ précise également que c'est à l'ingénieur du son d'intégrer ces contraintes dans *MusicSpace*. Il serait judicieux que le logiciel intègre des *presets* de base. Cela permettrait à l'ingénieur du son et/ou l'artiste de choisir des contraintes lui permettant d'éviter les effets les plus courants étudiés dans cette Section 3.C. Cela lui assurerait l'obtention de certaines caractéristiques des sources sonores, telles que la précision de leur localisation (se traduit par un faible ASW) ou la non modification de leur timbre.

Simon⁴²¹ indique également que l'utilisation de ces contraintes simplifierait et optimiserait le *Workflow* dans le cas où un ingénieur du son et un artiste doivent travailler ensemble pour la réalisation d'une production musicale 3D.

⁴¹⁷ SIMON Laurent, Dispositif d'Aide à la Spatialisation basé sur des critères perceptifs [En ligne], Rapport de Stage IRCAM, Directeur de stage : DELERUE Olivier, WARUSFEL Olivier, France : Université Paris 7, Juin 2006, Section 2.2.1, p. 10.

⁴¹⁸ *Ibid.*

⁴¹⁹ *Ibid.*

⁴²⁰ *Ibid.*, Section 2.2.2, p. 11.

⁴²¹ *Ibid.*

En intégrant certaines contraintes, l'ingénieur du son pourrait permettre à l'artiste une liberté partielle sur la spatialisation. L'artiste pourrait par exemple réaliser de la composition spatiale sans pour autant que cela provoque des effets perceptifs indésirables.

Ce propos reste à nuancer dans le sens où il n'est pas possible d'obtenir une scène sonore 3D sans aucun effet indésirable : une scène sonore 3D avec très peu d'effets indésirables découlerait uniquement d'une multitude de contraintes. Mais ceci n'est pas viable pour la création artistique. L'ingénieur du son et l'artiste devront toujours faire des concessions l'un envers l'autre afin de mener à bien une production musicale 3D.

Simon⁴²² propose également l'interface *ListenSpace*. Cet outil permet la spatialisation d'une source sonore et la représentation en image de certains paramètres. Ces paramètres doivent être choisis et ils permettraient par exemple à l'ingénieur du son et/ou l'artiste de visualiser les différents effets perceptifs altérant une scène sonore 3D. En conséquence, Simon⁴²³ propose différents paramètres plus qu'utile pour éviter la constitution d'une scène sonore 3D incohérente lors de la production musicale 3D.

Dans un premier temps, Simon⁴²⁴ propose un paramètre d'évaluation qui consiste à fournir un critère de qualité sur la perception de la source sonore en fonction de sa spatialisation. Ce paramètre renseigne donc sur les effets perceptifs pouvant altérer la perception d'une source.

Un autre paramètre permet de modéliser la dépendance spatiale entre toutes les sources sonores. Autrement dit, ce paramètre présente les différents effets perceptifs provoqués par toute source sonore, et donc, les effets perceptifs caractérisants la scène sonore 3D.

En combinant ces deux paramètres il est alors possible d'ajuster la spatialisation des sources sonores afin d'optimiser leur perception et la localisation de ces derniers. Il est possible de voir en Figure 3.15 et 3.16 l'utilisation de ces deux paramètres.

⁴²² SIMON Laurent, Dispositif d'Aide à la Spatialisation basé sur des critères perceptifs [En ligne], Rapport de Stage IRCAM, Directeur de stage : DELERUE Olivier, WARUSFEL Olivier, France : Université Paris 7, Juin 2006, Section 2.3, p. 11.

⁴²³ *Ibid.*, Section 3, p. 14.

⁴²⁴ *Ibid.*, Section 3, p. 16.

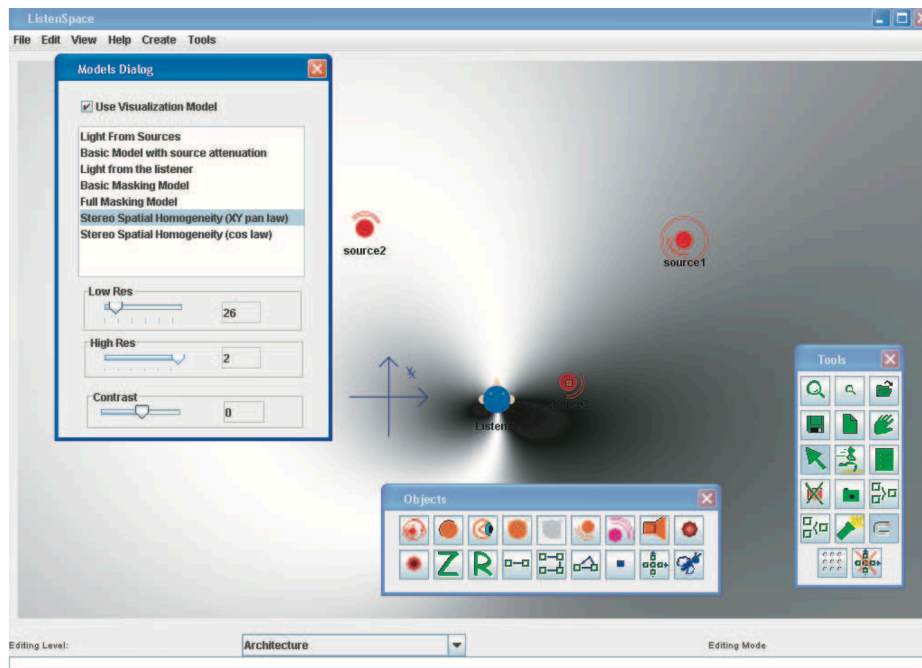


Figure 3.15 : Représentation de la distribution spatiale de l'énergie sur l'interface *ListenSpace*. Les zones d'ombres représentent les positions où la spatialisation d'une source sonore amènerait un déséquilibre de la répartition de l'énergie dans l'espace. Inversement pour les zones blanches.
Laurent Simon©2006.



Figure 3.16 : Représentation du masquage spatial sur l'interface *ListenSpace*. Les zones d'ombres représentent les positions où la spatialisation d'une source sonore serait masqué. Inversement pour les zones blanches.
Laurent Simon©2006.

En Figure 3.15 l'équilibre de la distribution spatiale de l'énergie dans la scène sonore, est modélisé et en Figure 3.16 l'effet de masquage est présenté.

Un autre paramètre est aussi proposé : la dépendance temporelle. Celle-ci prédirait l'évolution des effets perceptifs et des indices psycho-acoustiques permettant à l'auditeur de percevoir et de localiser une source sonore. Cela fournirait la possibilité à l'ingénieur du son et/ou l'artiste de visualiser l'évolution de la scène sonore en temps réel en fonction des différentes modifications que celui-ci réalise.

D'autres paramètres sont proposés par Simon⁴²⁵. Cependant il relève du *Workflow* plus qu'autre chose. Par exemple il est possible de choisir le contexte d'écoute qui correspondrait aux choix du système de restitution/diffusion. Il est possible de déterminer le choix des métadonnées dans le but d'optimiser le calcul des effets perceptifs et des indices psycho-acoustiques. Le *mapping* des critères de qualité est aussi réalisable. Cela donnerait le choix sur les nuances de couleurs par exemple. Ce sont des paramètres annexes à la spatialisation mais qui reste tout de même important.

Il apparaît une fois de plus nécessaire, d'inclure dans les logiciels de spatialisations tous les outils proposés dans cette section.

Le *Spat_oper* favoriserait le contrôle des caractéristiques d'une source sonore. Associés à *ListenSpace* et *MusicSpace*, ces derniers favoriseraient la constitution d'une scène sonore cohérente dans la production musicale 3D. Cela se réaliserait par une modélisation en temps réel des effets perceptifs pouvant altérer la perception d'une source ou de l'entièreté de la scène sonore 3D. Cela implique la prise en compte de notion de physique acoustique, de psycho-acoustique et de psychologie acoustique.

Cela souligne aussi la nécessité d'associer à ces outils des connaissances complètes sur les effets perceptifs et les notions abordées en Section 2 et dans les Sections 3.A et 3.B.

⁴²⁵ SIMON Laurent, Dispositif d'Aide à la Spatialisation basé sur des critères perceptifs [En ligne], Rapport de Stage IRCAM, Directeur de stage : DELERUE Olivier, WARUSFEL Olivier, France : Université Paris 7, Juin 2006, Section 3, pp. 16-17.

CONCLUSION

Dans ce mémoire, il a été présenté les principales notions dont on doit tenir compte lors de la réalisation d'une production musicale 3D.

Comme le souligne le titre de ce mémoire, la production d'une scène sonore 3D nécessite la mobilisation de plusieurs connaissances : la physique acoustique, la psycho et psychologie acoustique et les effets perceptifs.

Ces domaines sont mis en avant dès lors qu'une attention est portée sur l'écologie sonore environnementale et mentale dans une production musicale 3D.

L'écologie sonore environnementale et mentale, le champ diffus et la perception spatiale ont été considérés comme étant nécessaires au son 3D.

Ce travail soutient que la compréhension de ces notions est importante dans la production musicale 3D.

Les observations faites dans ce mémoire relèvent un grand nombre de limites, propre à la perception humaine.

Ces analyses démontrent qu'il est important de mettre de la distance vis-à-vis de nos attentes de la restitution des spatialisations réalisées dans les logiciels.

Une meilleure compréhension des limites et des dépendances du système auditif pour la perception sonore permettraient à l'ingénieur du son et/ou artiste de mieux spatialiser les sources sonores.

Ce mémoire propose aussi des idées qu'il serait pertinent d'intégrer dans les logiciels de spatialisation afin d'offrir une plus grande malléabilité sur une production musicale 3D.

L'enjeu de ce mémoire a été donc de proposer des connaissances et des outils dans le but d'améliorer la production musicale 3D, et de démontrer la pertinence et l'utilisation de ces notions pour la constitution d'une scène sonore 3D. Leur application permettrait à l'ingénieur du son et/ou l'artiste un contrôle bien plus complet d'une scène sonore 3D. Autrement dit, Ce mémoire cherche à optimiser la production musicale 3D.

Les notions considérées fondamentales à la conception d'une scène sonore 3D sont variées. Voici celles qui sont considérées comme majeures.

L'écologie sonore environnementale et mentale sont les deux premières notions abordées dans ce mémoire. Elles démontrent qu'une attention particulière doit être

portée sur les différents éléments pouvant constituer une scène sonore. Dans une production musicale 3D cela amène à considérer certaines notions telles que la perception sonore et le champ diffus.

Cette idée s'associe alors parfaitement avec la scène sonore 3D qu'un ingénieur du son et/ou artiste réalisera dans le cadre d'une production musicale.

Le champ diffus est défini dans le but d'associer cette notion au son 3D.

Par l'étude de celui-ci, plusieurs concepts ressortent : l'isotropie, l'homogénéité spatiale, les approches discrètes et statistiques pour la mesure du champ diffus et son caractère « idéal » ou « non-idéal ».

Les principes théoriques et les outils permettant de mesurer le champ diffus ainsi que ses possibles optimisations de captations/modélisations ont été présentés dans ce mémoire. L'objectif étant qu'une réutilisation de ces concepts s'opère lors d'une production musicale 3D par un ingénieur du son et/ou artiste.

Cependant, il a été remarqué que celui-ci n'était pas vraiment optimisable. Les techniques de captation ou de modélisation du champ diffus sont déjà plutôt bien pensés.

Il a été tout de même relevé qu'une connaissance approfondie du champ diffus est nécessaire afin que son contrôle soit le plus complet dans une scène sonore 3D. L'incrémentation de paramètres contrôlant les caractéristiques du champ diffus dans un logiciel de spatialisation contribuerait à fournir une plus grande maîtrise à l'ingénieur du son et/ou l'artiste dans une production musicale 3D.

Néanmoins, le champ diffus n'est pas le seul concept à prendre en compte lors de la constitution d'une scène sonore immersive. C'est pourquoi, la perception spatiale est abordée.

À l'étude de cette notion, plusieurs éléments ont été définis. Ce terme vaste regroupe plusieurs concepts très importants. Les mécanismes anthropologiques permettant la discrimination de la localisation d'une source sonore et l'identification du champ diffus ont été étudiés. On a mis en lumière les différentes caractéristiques et limites de la perception sonore chez l'Homme.

Par la suite, la perception spatiale et les impressions spatiales ont été analysées, ce qui a permis de démontrer que plusieurs concepts définissaient une scène sonore 3D. Il est dès lors important de proposer des outils pour un contrôle des impressions spatiales dans les logiciels de spatialisation.

Les effets perceptifs ont été ensuite abordés pour indiquer que certains phénomènes pouvaient altérer la perception d'une scène sonore 3D. Cette partie indique ici aussi qu'une connaissance de ces effets perceptifs est importante pour la production musicale 3D.

Des outils permettant le contrôle/visualisation de ces effets sont proposés. Leur intégration dans les logiciels de spatialisation contribuerait à l'optimisation de la spatialisation des sources sonores. On obtiendrait une meilleure perception de la scène sonore. Cette optimisation peut s'étendre au champ diffus et aux différents éléments pouvant caractériser la scène sonore immersive.

Ces études ont démontrées qu'une connaissance de ces différents concepts est nécessaire et qu'il est judicieux d'associer une définition de ces derniers à la production musicale 3D.

Ces connaissances ont besoin d'être appliquées lors de la réalisation d'une production musicale 3D. Que ce soit pour la compréhension des différents paramètres disponibles aux utilisateurs dans les logiciels de spatialisation ou des effets perceptifs pouvant altérer la perception d'une scène sonore 3D. Mais aussi pour connaître les différentes limites de la perception sonore chez l'Homme.

De ce fait, l'utilisation de ce savoir permettraient l'optimisation de la perception d'une scène sonore 3D.

Cependant, ces connaissances ne peuvent pas se suffire à elle même. Il serait judicieux de reprendre ces fondements et de les adapter entièrement à la production musicale 3D, comme l'inclusion d'outils dans les logiciels de spatialisation. Le but étant de visualiser ou de contrôler une scène sonore 3D. Ces outils doivent donc prendre en compte les éléments définissant la perception sonore chez l'Homme (psycho-acoustique, psychologie acoustique). Il reste tout de même à préciser que l'inclusion de ces outils n'est pas une finalité et qu'il est important d'y associer des connaissances pour une meilleure compréhension de ces derniers.

Par conséquent, ces connaissances et les outils qu'elles engendrent vont dans l'idée d'améliorer la production musicale 3D. Leur application permettra à l'ingénieur du son et/ou l'artiste un contrôle bien plus complet d'une scène sonore 3D.

Mais à travers ce mémoire, des limites ont été observées. Les fondements abordés dans ce mémoire nécessitent encore d'être approfondis et d'être associés au domaine musical.

La perception d'une scène sonore dépend de nombreux éléments. La perception d'une source sonore dépend de son timbre, de son enveloppe, mais aussi des éléments qui l'entourent (autres sources sonores, réverbération, ...). Il est donc difficile d'établir des observations s'appliquant à tous les cas d'études.

C'est pour cela que la conception et l'utilisation d'outils est important pour accroître la recherche de techniques de productions qu'il serait possible d'associer au son 3D.

On notera aussi que même avec des optimisations, la production musicale 3D présentera des limites.

La perception sonore chez l'Homme étant assez mauvaise, l'obtention d'une précision de localisation sonore parfaite est très compliquée. De plus, les mouvements de têtes et les indices visuels ne sont pas des indices utilisables dans le cadre d'une production musicale 3D. Ces contraintes liées aux principes de la production musicale 3D ne favorisent pas une bonne perception sonore d'une scène 3D.

De plus, pour l'obtention d'une scène sonore 3D cohérentes, il faudrait respecter un grand nombre de contraintes.

Par exemple, il ne serait pas possible de spatialiser telle ou telle source sonore au même endroit sinon cela provoquerait un effet de masque, une source « fantôme ». L'ingénieur du son et/ou artiste doit donc faire face à un certain nombre de compromis afin d'allier composition spatiale et perception correcte de la scène sonore 3D. Et cela même avec les meilleurs outils d'optimisations qu'il serait possible de concevoir. On notera d'ailleurs que la perception correcte implique une perception fidèle de ce qui a été réalisée en composition spatiale (mouvements des sources sonores, etc...).

Il aurait été aussi intéressant dans ce mémoire de réaliser une expérience sur un public averti et non-averti sur le son 3D. On aurait pu vérifier l'impact des outils et de l'application des connaissances soutenus dans ce mémoire. Cela permettrait de connaître l'importance de ces considérations sur l'optimisation d'une production musicale 3D.

Néanmoins, le travail aurait été trop conséquent et cela pourrait être l'objet d'une autre recherche.

Au final, les observations et réponses fournies par ce mémoire sur l'optimisation de la production musicale 3D démontrent qu'il est nécessaire de prendre du recul sur les attendus immersifs et perceptifs d'une scène sonore 3D.

Il sera compliqué d'obtenir une perception précise des sources sonores dans une scène sonore complexe (contenant beaucoup d'instruments ou une composition spatiale complexe). Et cela même si une connaissance parfaite et des outils performants sont utilisés dans une production musicale 3D. En d'autres termes, il est difficile d'obtenir une scène sonore 3D aussi immersive et précise que souhaitée.

Cependant, il est important de rappeler que le son 3D ne doit pas forcément viser à l'immersion totale ou à l'expérience spatiale. En d'autres termes, le son 3D n'a pas pour finalité ultime de retranscrire des spatialisations complexes qui devraient être perçues parfaitement. Le son 3D n'apporte pas seulement une composition spatiale, mais aussi une esthétique spatiale qui rentre dans le son 3D. Dans le cadre d'une diffusion binaurale, on parlerait alors de l'esthétique binaurale.

Cette esthétique apporte un renouveau dans les modes de diffusion les plus courants (stéréophonie, monophonie) car le son 3D permet un démasquage et une impression d'espace avec l'externalisation. Celle-ci peut être caractérisée comme étant une esthétique phonographique⁴²⁶.

⁴²⁶ Mon collègue Jérémie Porat a réalisé son mémoire de Master 2 sur cette notion.

BIBLIOGRAPHIE

ABDOU Adel, GUY R. W., « A review of objective descriptors for sound diffuseness » [En ligne], *Centre for Building Studies*, Septembre 1994, Vol. 22, pp. 43-44, [Consulté le 20 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <http://publications.rwth-aachen.de/record/229274/files/4735.pdf>

ATALLA Nouredine, CHAZOT Jean-Daniel, GUYADER Jean-Louis *et al*, « Diffuse Acoustic Field Produced in Reverberant Rooms: A Boundary Diffuse Field Index » [En ligne], *Acta Acustica united with Acustica*, Avril 2016, Vol. 102, N°3, pp. 503-516, [Consulté le 15 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://www.researchgate.net/publication/301649009>

AVELAR Márcio, CARVALHO Augusto, SANT'ANA Luis Henrique, *The diffuse sound field according to literature: similarities and differences* [En ligne], 12th Ibero-American Acoustics Congress, 28 Août 2022, Brésil : Florianópolis, pp. 1-12, [Consulté le 12 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/363181512_The_diffuse_sound_field_according_to_literature_similarities_and_differences

BAI Hequn, *Modèles hybrides pour la réverbération sonore* [En ligne], Directeur de Thèse : RICHARD Gaël, DAUDET Laurent, France : École de l'Institut Mines - Télécom, Thèse de Doctorat, 08 Février 2016, [Consulté le 11 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02519432>

BALACHANDRAN C. G., « Random Sound Field in Reverberation Chambers » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, October 1959, Vol. 31, N° 10, pp. 1319-1321, [Consulté le 14 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=d5b-fe38e-a2fd-44b3-bf2f-b81ba7fe52e4>

BASKIND Alexis, *Modèles et méthodes de description spatiale de scènes sonores : applications aux enregistrements binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 2003, [Consulté le 15 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01066312>

BERTHOMIEU Gautier, *Influence de la localisation d'une source sur le niveau sonore perçu* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 12 décembre 2019, [Consulté le 05 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02469434v2/document>

BERZBORN Marco, FERNANDEZ-GRANDE Efrén, NOLAN Mélanie, *et al*, *On the directional properties of energy decay curves* [En ligne], 23rd International Congress on Acoustics, 2019, Allemagne : Aachen, pp. 4043–4050, [Consulté le 20 janvier 2023].

Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/339045143_On_the_directional_properties_of_energy_decay_curves

BESLIN Olivier, NELISSE Hugues, NICOLAS Jean, « Panel Dynamic Response to a Reverberant Acoustic Field » [En ligne], *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Septembre 1995, Vol. 33, N°9, pp. 1590-1596, [Consulté le 14 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.2514/3.12697>

BLAUERT Jens, *Spatial Hearing - Revised Edition: The Psychophysics of Human Sound Localization*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts et Londres, Angleterre, 1996, 9780262268684. [Consulté le 24 janvier 2023].

BLAUERT Jens, XIANG Ning, *Acoustics for Engineers*, Springer, Allemagne : Berlin, Première édition, 2008, 9783540763468, [Consulté le 26 janvier 2023].

BODLUND Kaj, « Statistical characteristics of some standard reverberant sound field measurements » [En ligne], *Journal of Sound and Vibration*, 1976, Vol. 45, N°4, pp. 539-557, [Consulté le 22 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(76\)90734-3](https://doi.org/10.1016/0022-460X(76)90734-3)

BOLT Richard H., DOAK Philippe E., WESTERVELT Peter J., « Pulse Statistics Analysis of Room Acoustics » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1950, Vol. 22, N°3, pp. 328-340, [Consulté le 28 mars 2023].

Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1121/1.1906608>

BRADLEY John S., SOULODRE Gilbert A., « Objective measures of listener envelopment » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Novembre 1995, Vol. 98, N°5, pp. 2590-2597, [Consulté le 10 mars 2023].

Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1121/1.413225>

BRADLEY John S., SOULODRE Gilbert A., « The influence of late arriving energy on spatial impression » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Avril 1995, Vol. 97, N°4, pp. 2263-2271, [Consulté le 10 mars 2023].

Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1121/1.411951>

BRUNSKOG Jonas, FERNANDEZ-GRANDE Efen, NOLAN Melanie, « Experimental characterization of the sound field in a reverberation room » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Avril 2019, Vol. 145, N°4, pp. 2237-2246, [Consulté le 17 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1121/1.5096847>

BUSSON Sylvain, *Individualisation d'indices acoustiques pour la synthèse binaurale* [En ligne], Directeur de Thèse : MATTEI Pierre-Olivier, France : Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, Thèse de Doctorat, 2006, [Consulté le 29 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00012023v2/document>

CHAIGNE Antoine, JOT Jean-Marc, « Digital delay networks for designing artificial reverberators » [En ligne], *Journal Of The Audio Engineering Society*, Janvier 1991, pp. 1-16, [Consulté le 20 janvier 2023].

Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/243779004_Digital_delay_networks_for_designing_artificial_reverberators

CHAZOT Jean-Daniel, GUYADER Jean-Louis, « Diffuseness and sound field distribution at room boundaries » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, Vol. 123, N°5, pp. 4021-4026, [Consulté le 15 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1121/1.2934391>

CHIEN C. F., SOROKA Walter W., « Spatial cross-correlation of acoustic pressures in steady and decaying reverberant sound fields » [En ligne], *Journal of Sound and Vibration*, 1976, Vol. 48, N°2, pp. 235-242, [Consulté le 14 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(76\)90462-4](https://doi.org/10.1016/0022-460X(76)90462-4)

CHU Wing T., « Spatial cross-correlation of reverberant sound fields » [En ligne], *Journal of Sound and Vibration*, 1979, Vol. 62, N°2 pp. 309-311, [Consulté le 14 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=8a7592e2-b2f4-44c0-990b-4686f710277e>

CHU Wing T., « Eigenmode analysis of the interference patterns in reverberant sound fields » [En ligne], *Journal of the Acoustical Society of America*, Juin 1980, Vol. 68, N°1, pp.184-190, [Consulté le 16 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1121/1.384619>

CHU Wing T., « Comments on the coherent and incoherent nature of a reverberant sound field » [En ligne], *Journal of the Acoustical Society of America*, Juin 1981, Vol. 69, N°9, pp.1710-1715, [Consulté le 16 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=f0d40adf-8ee2-486c-bc29-0561038fe515>

COMESAÑA Daniel F., HOLLAND Keith R., FERNANDEZ-GRANDE Efren, « Spatial resolution limits for the localization of noise sources using direct sound mapping » [En ligne], *Journal of Sound and Vibration*, 04 Août 2016, Vol. 375, pp. 53-62, [Consulté le 14 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2016.04.010>

COUSINS Michael Patrick, *The diffuse sound object* [En ligne], Directeur de Thèse : FAZI Filippo, Angleterre : University of Southampton, Thèse de Doctorat, Avril 2018, [Consulté le 12 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : https://eprints.soton.ac.uk/442615/1/Thesis_Final_Submitted_19_06_2019.pdf

DANIEL Jérôme, *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia* [En ligne], Directeur de Thèse : POLACK Jean-Dominique, France : Université Paris 6, Thèse de Doctorat, 31 Juillet 2001, [Consulté le 06 septembre 2021].

Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/242669363_Representation_de_champs_acoustiques_application_a_la_transmission_et_a_la_reproduction_de_scenes_sonores_complexes_dans_un_contexte_multimedia

DEFRANCE Guillaume, POLACK Jean-Dominique, *Acoustics, Information and Communications*, Springer, Suisse, Première édition, 2015, 9783319056593, [Consulté le 27 décembre 2022].

DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, ROMBLOM David, « Perceptual thresholds for non-ideal diffuse field reverberation » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 140, N°5, pp. 3908-3916, 2016, [Consulté le 03 janvier 2023].

Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1121/1.4967523>

DEPREZ Romain, *Optimisation perceptive de la restitution sonore multicanale par une analyse spatio-temporelle des premières réflexions* [En ligne], Directeur de Thèse : FRIOT Emmanuel, NICOL Rozenn, France : Université d'Aix-Marseille, Thèse de Doctorat, 07 Décembre 2012, [Consulté le 11 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://www.theses.fr/2012AIXM4746>

DUHAUTPAS Frédérick, SOLOMOS Makis, « Hildegard Westerkamp et l'écologie du son comme expérience », *Musique et écologies du son. Propositions théoriques pour une écoute du monde*, Paris, L'Harmattan, 2016, pp. 75-84, [Consulté le 11 avril 2023].

Dumas J., « CHAMPS SONORES. PLUS DE DESCRIPTIONS. POURQUOI ? COMMENT ? », *Journal de Physique Colloques*, 1990, Vol. 51, N° C2, pp. C2-899-C2-902, [Consulté le 10 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <10.1051/jphyscol:19902209>

DUPETIT Guillaume, PANOURGIA Eleni-Ira, « Sonic Fictions: Shaping Collective Urban Imaginaries through Sound » [En ligne], *The International Journal of Social. Political and Community Agendas in the Arts*, 29 novembre 2021, Vol. 16, N° 4, pp. 35-48, [Consulté le 06 avril 2023].

Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.18848/2326-9960/CGP/v16i04/35-48>

FORSYTH Michael, *Buildings for music. Architect, the musician and the listener from seventeen century to the present day*, The M.I.T. Press, Cambridge, 1985, 9780262561877, [Consulté le 10 avril 2023].

GADE Anders C., JACOBSEN Finn, OHLRICH Mogens *et al*, *Fundamentals of Acoustics and Noise Control* [En ligne], Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark, Septembre 2011, [Consulté le 15 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/profile/Jens-Rindel/publication/292150038_Fundamentals_of_Acoustics_and_Noise_Control/links/54e4547d0cf2b2314f600dab/Fundamentals-of-Acoustics-and-Noise-Control.pdf

GERMAIN Emiliano, « La musique : un environnement acoustique et un espace mental », *La musique : art du temps ou art de l'espace*, Université Lumière-Lyon-II, JOUBERT Muriel, 2018, pp. 35-38, [Consulté le 03 avril 2023].

Disponible à l'adresse : <https://www.scribd.com/document/541497985/Dossier-Musique-Art-Temps-Espace-Cfmi-Lyon2>

GUILLON Pierre, *Individualisation des indices spectraux pour la synthèse binaurale : recherche et exploitation des similarités inter-individuelles pour l'adaptation ou la reconstruction de HRTF* [en ligne], Directeur de Thèse Laurent SIMON, France : Université du Maine, Thèse de Doctorat, 11 juin 2009, [Consulté le 6 mai 2021].

Disponible à l'adresse : https://www.lesonbinaural.fr/EDIT/DOCS/Pierre_GUILLON_HRTF_2009LEMA1027.PDF

GUILLOT Pierre, *La représentation intermédiaire et abstraite de l'espace comme outil de spatialisation du son : Enjeux et conséquences de l'appropriation musicale de l'ambisonie et des expérimentations dans le domaine des harmoniques sphériques* [En ligne], Directeur de Thèse : BONARDI Alain, SÈDES Anne, France : Université Paris 8, Thèse de Doctorat, 20 Décembre 2017, [Consulté le 11 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01903017/>

GREFF Raphaël, *Holophonie binaurale - Spatialisation sonore sur réseaux de haut-parleurs circumauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : ALESSANDRO Christophe, KATZ Brian, France : Université Paris 7, Thèse de Doctorat, 25 Novembre 2008, [Consulté le 01 mai 2023].

Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/281658762_Binaural_holophony_-_Sound_spatialization_over_circumaural_transducer_arrays

HODGSON Murray, « When is diffuse-field theory accurate ? » [En ligne], *Applied Acoustics*, Novembre 1996, Vol. 49, N°3, pp. 197-207, [Consulté le 11 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X96000102?via%3DiHub>

HODGSON Murray, « On measures to increase sound-field diffuseness and the applicability of diffuse-field theory » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Juin 1994, Vol. 95, N° 6, pp. 3651-3653, [Consulté le 14 octobre 2022].
Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1121/1.409933>

HOPKINS Carl, *Sound Insulation*, Routledge, Angleterre : Londres, Première édition, 23 Août 2007, 9780080550473, [Consulté le 14 octobre 2022].
Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.4324/9780080550473>

ISO, *ISO 3741:1999 Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - Precision methods for reverberation rooms* [En ligne], International Organization for Standardization, Suisse : Genève, Troisième édition, Juillet 1999, p. 32, [Consulté le 17 mars 2023].
Disponible en ligne : <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/02/28/22818.html>

ISTVÁN Vér L., BERANEK Leo L., *Noise and Vibration Control Engineering Principles and Applications*, John Wiley & Sons, États-Unis : New Jersey, Deuxième édition, 28 Octobre 2005, 9780471449423, [Consulté le 15 octobre 2022].

JACOBSEN Finn, *The Diffuse Sound Field: Statistical Considerations Concerning the Reverberant Field in the Steady State*, Technical University of Denmark, Danemark : Copenhague, 1979, [Consulté le 10 mars 2023].

JACOBSEN Finn, JUHL Peter M., *Fundamentals of General Linear Acoustics*, Wiley, Angleterre : Londres, Juin 2013, 9781118636176, [Consulté le 12 mars 2023].

JACOBSEN Finn, ROISIN Thibaut, « The coherence of reverberant sound fields » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Juillet 2000, Vol. 108, N° 1, pp. 204-210, [Consulté le 12 octobre 2022].
Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/252241463_Characterization_of_a_diffuse_field_in_a_reverberant_room

JEONG Cheol-Ho, *Diffuse sound field: challenges and misconceptions* [En ligne], 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, German Acoustical Society, 2016, Allemagne : Hambourg, pp. 1015-1021, [Consulté le 12 février 2023].

Disponible à l'adresse : <http://www.internoise2016.org/>

KARAPOSTOLI Aimilia, TSINIKAS Nikolaos P., « Relations between sonic environment and architectural space regarding architecture and music composition », *Musique et écologies du son. Propositions théoriques pour une écoute du monde*, Paris, L'Harmattan, 2016, 2013, pp. 169-179, [Consulté le 10 avril 2023].

KEARNEY Gavin, MCKENZIE Thomas, MURPHY Damian, « Diffuse-Field Equalisation of Binaural Ambisonic Rendering » [En ligne], *Applied Sciences*, Octobre 2018, Vol. 8, N°8, pp. 1956-1973, [Consulté le 17 mai 2022].

Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.3390/app8101956>

KOYASU Masaru, YAMASHITA Mitsuyasu, « Evaluation of the degree of diffuseness in reverberation chambers by spatial correlation techniques » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of Japan*, Juin 1971, Vol. 26, No° 3, pp. 132-143, [Consulté le 15 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.20697/jasj.27.3_132

KUBOTA Yuji, DOWELL Earl H., « Asymptotic modal analysis for sound fields of a reverberant chamber » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Août 1992, Vol. 92, N°2, pp. 1106-1112, [Consulté le 17 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1121/1.404038>

KUTTRUFF Heinrich, *Acoustics : An introduction*, Taylor & Francis, États-Unis : New York, Première édition, 2007, 9780415386807, [Consulté le 14 octobre 2022].

KUTTRUFF Heinrich, *Room Acoustics*, Spon Press, Angleterre : Londres, Quatrième édition, 2000, 0419245804, [Consulté le 14 octobre 2022].

LORENZI Antoine, *Audition et démasquage binaural chez l'homme* [En ligne], Directeur de Thèse : VÉNAÏL Frédéric, France : Université de Montpellier, Thèse de Doctorat, 14 Décembre 2016, [Consulté le 17 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01508857/document>

MCCORMACK Leo, MCKENZIE Thomas, HOLD Christoph, « Dataset of Spatial Room Impulse Responses in a Variable Acoustics Room for Six Degrees-of-Freedom Rendering and Analysis » [En ligne], ArXiv, 23 novembre 2021, [Consulté le 05 mai 2022].

Disponible à l'adresse : <http://arxiv.org/abs/2111.11882>.

MORSE Philippe M., *Vibration and Sound*, McGraw-Hill Book Company, États-Unis : New York, 01 janvier 1948, 9780883188767, [Consulté le 12 octobre 2022].

MORSE Philippe M., INGARD K. U., *Theoretical Acoustics*, Princeton University Press, États-Unis : New Jersey, 01 juillet 1992, 9780691024011, [Consulté le 29 octobre 2022].

NÉLISSE Hugues, NICOLAS Jean, « Characterization of a diffuse field in a reverberant room » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Juin 1997, Vol. 101, N° 6, pp. 3517-3524, [Consulté le 11 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/252241463_Characterization_of_a_diffuse_field_in_a_reverberant_room

NICOL Rozenn, *Représentation et perception des espaces auditifs virtuels* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPOLLIÉ Claude, France : Université du Maine, Thèse de Doctorat, 30 Juin 2010, [Consulté le 14 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01066312>

NILLES Amélie, *La spatialisation des musiques électroniques du point de vue de l'auditeur : perception, immersion, concert spatialisé* [En ligne], Directeur de mémoire : SÈDES Anne, France : Université Paris 8, mémoire de Master, 2018, [Consulté le 03 novembre 2022].

Disponible à l'adresse : https://www.academia.edu/37590268/La_spatialisation_des_musiques_%C3%A9lectroniques_du_point_de_vue_de_lauditeur_perception_immersion_concert_spatialis%C3%A9

PANIZZOLI Alexandre, *Caractérisation Perceptive de Champ Sonore à Résolution Spatiale Variable* [En ligne], Rapport de Stage IRCAM, Directeur de stage : CARPENTIER Thibaut, NOISTERNIG Markus, WARUSFEL Olivier, France : Université Paris 7, Juillet 2013, [Consulté le 05 novembre 2022].

Disponible à l'adresse : http://www.atiam.ircam.fr/Archives/Stages1213/PANIZZOLI_Alexandre.pdf

PÉPIN H. « Caractérisation du champ diffus dans les locaux par intensimétrie » [En ligne], *Journal de Physique Colloques*, Février 1990, Vol. 51, N°C2, pp. 1085-1088 [Consulté le 11 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00230584>

PICAUT Judicaël, « Application numérique du concept de particules sonores à la modélisation des champs sonores en acoustique architecturale » [En ligne], *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, Mai 2005, pp. 59-88, [Consulté le 11 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : https://www.ifsttar.fr/collections/BLPCpdfs/blpc__258-259_59-88.pdf

PICAUT Judicaël, *Modélisation des champs "diffus" en acoustique architecturale et urbaine par un processus de diffusion de l'énergie sonore* [En ligne], Directeur de Thèse : BÉRENGIER Michel, HABAULT Dominique, France : Université du Maine, Thèse de Doctorat, 17 Novembre 2006, [Consulté le 11 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02519432>

PIERCE Allan, *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*, Acoustical Society of America, États-Unis : New York, Troisième édition, 1989, 0883186128, [Consulté le 05 octobre 2022]

SALMON François, *Contrôle des impressions spatiales dans un environnement acoustique virtuel* [En ligne], Directeur de Thèse : PAQUIER Mathieu, France : Université de Bretagne Occidentale, Thèse de Doctorat, 26 Mars 2021, [Consulté le 05 novembre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03610338v2/document>

SANALATII Maryna, *Synthèse d'un champ acoustique avec contraste spatial élevé* [En ligne], Directeur de Thèse : HERZOG Philippe, MELON Manuel, France : Le Mans Université, Thèse de Doctorat, 16 Mai 2018, [Consulté le 12 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01815464>

SCHAEFFER Pierre, *Solfège de l'objet sonore*, Trois Microsilons d'Exemples Sonores, Paris, 1967, 2869380011, [Consulté le 05 avril 2023].

SCHAFER R. Murray, *The Soundscape. Our Sonic Environment and the Tuning of the World*, Destiny Books, 1 octobre 1993, 9780892814558, [Consulté le 05 avril 2023].

SCHARRER Roman, *Acoustic Field Analysis in Small Microphone Arrays* [En ligne], Directeur de Thèse : VORLÄNDER Michael, Allemagne : Institute for Hearing Technology and Acoustics, Thèse de Doctorat, Juillet 2013, [Consulté le 20 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <http://publications.rwth-aachen.de/record/229274/files/4735.pdf>

SCHMITT Thierry, *Modélisation des transferts acoustiques en moyennes et hautes fréquences par méthode énergétique : Application à l'encapsulation des compartiments moteurs* [En ligne], Directeur de Thèse : JEZEQUEL Louis, France : Ecole Centrale de Lyon, Thèse de Doctorat, 29 Mars 2004, [Consulté le 11 octobre 2022].
Disponible à l'adresse : <https://bibli.ec-lyon.fr/exl-doc/tschmitt.pdf>

SCHROEDER Manfred R., « Measurement of Sound Diffusion in Reverberation Chambers » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, Novembre 1959, Vol. 31, N° 11, pp. 1407-1414, [Consulté le 15 octobre 2022].
Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/252241463_Characterization_of_a_diffuse_field_in_a_reverberant_room

SCHROEDER Manfred R., « Statistical parameters of the frequency response curves of large rooms » [En ligne], *Journal of The Audio Engineering Society*, 1987, Vol. 35, N°5, pp. 299-306, [Consulté le 20 octobre 2022].
Disponible à l'adresse : <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=5208>

SCHULTZ Theodore J., « Diffusion in reverberation rooms » [En ligne], *Journal of Sound and Vibration*, 08 Mai 1971, Vol. 16, N°1, pp.17-28, [Consulté le 15 octobre 2022].
Disponible à l'adresse : [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(71\)90392-0](https://doi.org/10.1016/0022-460X(71)90392-0)

SIMON Laurent, *Dispositif d'Aide à la Spatialisation basé sur des critères perceptifs* [En ligne], Rapport de Stage IRCAM, Directeur de stage : DELERUE Olivier, WARUSFEL Olivier, France : Université Paris 7, Juin 2006, [Consulté le 05 novembre 2022].
Disponible à l'adresse : <http://www.atiam.ircam.fr/Archives/Stages0506/LaurentSimon.pdf>

SOLOMOS Makis, « Entre musique et écologie sonore : quelques exemples » [En ligne], *Sonorités*, N°7, 2012, pp. 167-186, [Consulté le 13 avril 2023].
Disponible à l'adresse : <hal-00769908>

PUCKETTE Miller, STAUTNER John, « Designing Multi-Channel Reverberators » [En ligne], *Computer Music Journal*, 1982, Vol. 6, No° 1, pp. 52-65, [Consulté le 10 janvier 2023].

Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.2307/3680358>

ROCH Camille, *Enregistrement du champ sonore d'une Jam session en ambisonie/ binaural natif avec une caméra 360°. Le comparatif de deux techniques de captation de champ sonore et l'apport de la vidéo pour localiser les sons dans l'espace*, Directeur de mémoire : DELHAYE Marion, LABROUE Philippe, France : SAE Institute Paris, mémoire de Bachelor, 6 août 2021.

ROMBLOM David, *Diffuse Field Modeling : The Physical and Perceptual Properties of Spatialized Reverberation* [En ligne], Directeur de Thèse : DEPALLE Philippe, GUASTAVINO Catherine, Canada : McGill University, Thèse de Doctorat, Août 2016, [Consulté le 12 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/315667612_Diffuse_Field_Modeling_The_Physical_and_Perceptual_Properties_of_Spatialized_Reverberation

V. ALGAZI Ralph, O. DUDA Richard, DURAI SWAMI Ramani et al, « Approximating the head-related transfer function using simple geometric models of the head and torso » [en ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, octobre 2002, Vol. 5, N° 112, pp. 2053–2064, [Consulté le 7 mai 2021].

Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1121/1.1508780>

VANNIER Michaël, *Sonie de champs acoustiques stationnaires en situation d'écoute dichotique* [En ligne], Directeur de Thèse : PARIZET Etienne, France : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Thèse de Doctorat, 11 Mai 2015, [Consulté le 14 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01277638v2>

VANWYNSBERGHE Charles, *Réseaux à grand nombre de microphones: applicabilité et mise en œuvre* [En ligne], Directeur de Thèse : CHALLANDE Pascal, France : Université Paris 7, Thèse de Doctorat, 12 Décembre 2016, [Consulté le 14 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01508547>

VIDAL Adrien, *Diffusion de son 3D par synthèse de champs acoustiques binauraux* [En ligne], Directeur de Thèse : HERZOG Philippe, LAMBOURG Christophe, France : Université d'Aix-Marseille, Thèse de Doctorat, 03 Février 2017, [Consulté le 11 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01501975>

WATERHOUSE Richard V., « Statistical Properties of Reverberant Sound Fields » [En ligne], *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1968, Vol. 43, N° 6, pp. 1436–1444, [Consulté le 12 octobre 2022].

Disponible à l'adresse : <https://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1911004>