

Ecole Nationale Supérieure Louis Lumière

Mémoire de fin d'études

Section Son - Promotion 2019

Guillaume Leplège

**L'énergie précoce de réverbération : quels enjeux pour les  
ingénieurs du son en musique classique ?**

Directeur interne : Alan Blum

Directeur externe : Jean-Christophe Messonnier

Rapporteur : Eric Urbain

# Remerciements

Un grand merci à Alan Blum et à Jean-Christophe Messonnier, qui m'ont infailliblement conseillé et soutenu pendant ce travail.

Merci à Frédéric Changenet, Hervé Déjardin, Alban Moreau, Thomas Vingtrinier et Daniel Zalay qui ont accepté de me donner un peu de leur temps pour de très enrichissants entretiens.

Merci à Olivier Calmel, à Moritz Reich, à David They et à la Maison de l'Ochestre National d'Ile de France pour m'avoir laissé utiliser tous ces enregistrements pour mes extraits sonores.

Merci à Mireille Faure pour ses conseils déterminants sur le choix de mon sujet d'étude.

Merci à mes parents pour leur indéfectible soutien dans la poursuite de mes études.

Merci à tous ceux à qui j'ai tenté d'expliquer mon sujet et qui m'on assuré que *ça avait l'air intéressant*.

Et merci à Mélia Roger pour sa bonne idée.

## Résumé

La prise de son et le mixage de musique classique donnent à la réverbération un rôle essentiel en ce qu'elle est un des vecteurs principaux de la quête d'homogénéité et de détail spatial propre aux codes esthétiques de ce genre musical.

En effet, la réverbération, en tant que phénomène acoustique principal contributeur de la sensation d'espace, est au coeur des pratiques des ingénieurs du son qui, en prises de son ou en mixage, font appel à une compréhension fine des enjeux qui en découlent. Un de ceux-ci est la gestion de l'énergie précoce de réverbération, constitué des premières réflexions sonores, pour laquelle l'ensemble des contributions scientifiques, corroborées par les pratiques des ingénieurs du son, s'accordent à donner une importance toute particulière pour ce qu'elle est pourvoyeuse d'indices sonores essentiels à la création d'une scène spatiale détaillée telle qu'on peut la rechercher en musique classique. Pour ce faire, le travail des ingénieurs du son est assisté d'un large panel d'outils dédiés à la génération de réverbération artificielle, dont la diversité d'approches témoigne de pratiques diverses.

Le travail présenté ici établit un état de l'art des connaissances en matières d'effets perceptifs des premières réflexions et se propose d'en étudier les conséquences à l'aune des problématiques spécifiques d'enregistrement et de mixage de musique classique. Après une étude théorique précisant les enjeux perceptifs, esthétiques et pratiques du contrôle de l'énergie précoce de réverbération, une synthèse des connaissances tirées d'une série d'entretiens avec des ingénieurs du son, spécialisés pour la majorité en musique classique, est présentée. Elle donne suite à l'exposé de l'élaboration d'un site internet dédié à l'écoute d'extraits sonores destinés à la compréhension des enjeux mentionnés.

**Mots-clés** : réverbération, réflexions précoces, musique classique, enregistrement, mixage, réverbération artificielle, microphones d'appoint

# Abstract

Sound recording and mixing for classical music give to the reverberation an essential role as it is one of the main vectors in the quest for homogeneity and spatial detail, two important features of the aesthetic codes of the musical genre.

Indeed the reverberation, being the acoustical phenomenon contributing the most to the sensation of space, is at the heart of the sound engineers process in the sound recording and mixing. They need to understand accurately what is at stake, and one part of the work is to deal with the early reflections, the first part of the reverberation, to which the extensive research materials, being in many ways validated by the sound engineers practices, agrees to give a crucial importance. According to the literature, the early reverberation is the supplier of spatial clues which are compulsory for the crafting of a detailed spatial scene one would be expecting from classical music recordings. In order to achieve a proper management of the early reflections, sound engineers can benefit from a large range of artificial reverberators that can contempt most of standard needs in a diversity of manners.

The work presented here gives a state of the art of the knowledge concerning early reflections's perceptive effects, and provides a study of their consequences in regard to the specific questions resulting from classical music recording and mixing. After a theoretical study specifying the perceptive, aesthetics and practical issues of the early reflexions, a synthesis of a set of interviews of professional sound engineers, mostly classical music specialists, is given. Then, the production of a website dedicated to the subject and designed to enable the listening of audio materials, pointing out the perceptive effets of the early reflexions in context, is finally detailed.

**Keywords** : reverberation, early reflections, classical music, recording, mixing, artificial reverberation, proximity microphones

# Table des matières

<b>Introduction.....</b>	<b>8</b>
<b>I. L'acoustique de la réverbération .....</b>	<b>11</b>
I.A. Les phénomènes physiques mis en jeu .....	11
I.A.1. La propagation du son en champ libre .....	11
I.A.2. La propagation du son dans un espace clos.....	14
I.A.3. La réponse de salle - analyse du signal réverbéré .....	17
I.B. L'acoustique des salles - caractérisation du champ réverbéré.....	21
<b>II. La perception humaine face au champ réverbéré .....</b>	<b>24</b>
II.A. La perception spatiale .....	25
II.A.1. L'effet de précedence et la localisation dans un espace acoustique .....	25
II.A.2. Discrimination du délai.....	27
II.A.3. Localisation de l'azimut et de l'élévation .....	28
II.B. Caractérisation perceptive des espaces acoustiques.....	34
II.C. Cas particulier de la perception des premières réflexions.....	36
II.C.1. Seuil d'audibilité et résultats perceptifs généraux .....	36
II.C.2. Masquage postérieur .....	40
II.D. Influence des réflexions précoces sur la perception du son direct .....	41
II.D.1. Augmentation de la puissance subjective de la source .....	41
II.D.2. Influence sur la distance apparente de la source .....	42
II.D.3. Modification de la largeur apparente de la source .....	43
II.D.4. Influence sur la clarté de la source .....	44
II.D.5. Influence sur le timbre de la source .....	44
II.E. Réflexions précoces et sensation d'espace .....	45
II.E.1. Résultats issus de critères objectifs.....	45
II.E.2. La sensation d'espace et le système auditif humain.....	47
II.E.3. Influence sur la sensation d'enveloppement.....	51
II.F. Perception du champ diffus.....	52
II.G. Conclusion de la partie II .....	53
<b>III. Le mixage en musique classique : problématiques de la réverbération.....</b>	<b>54</b>

III.A. Bref historique de l'écoute de la musique classique .....	54
III.B. Esthétique sonore de la musique classique .....	56
III.B.1. Architecture, acoustique et périodes musicales .....	56
III.B.2. Les préférences des auditeurs .....	62
III.B.3. Problématiques spécifiques des premières réflexions dans les salles de concert .....	63
III.C. Du concert à la prise de son et au mixage - Cadre esthétique général .....	66
III.C.1. La prise de son .....	66
III.C.2. Le mixage de musique classique .....	71
III.C.3. La restitution stéréophonique - un choix technique normalisé .....	72
<b>IV. Mise en espace par ajout de réverbération - La réverbération artificielle .....</b>	<b>76</b>
IV.A. Justification de l'utilisation de réverbération artificielle .....	76
IV.A.1. L'enjeu du réalisme .....	76
IV.A.2. La fusion entre les source - la gestion de l'espace .....	77
IV.B. La réverbération artificielle - historique des technologies .....	78
IV.B.1. L'évolution des enregistrements audio .....	78
IV.B.2. Les outils de réverbération .....	81
IV.C. La réverbération artificielle - étude et exemples .....	91
IV.C.1. Ergonomie classique des moteurs de réverbération artificielle .....	91
IV.C.2. Description de quelques moteurs de réverbération artificielle .....	97
a) Bricasti M7® .....	97
b) AudioEase Altiverb® .....	99
c) Ircam Verb v3® .....	101
d) Fabfilter Pro-R® .....	103
e) Valhalla Room® .....	105
f) Quantec Yardstick 2492® .....	107
IV.C.3. Gestion de l'énergie précoce - étude de quatre plug-ins de réverbération ...	
109	
a) Cas n°1 : Energie précoce par défaut .....	112

b) Cas n°2 : Augmentation de la largeur stéréophonique.....	114
c) Cas n°3 : Gestion du panoramique d'entrée.....	116
<b>V. La gestion de l'énergie précoce en pratique - points de vue d'ingénieurs du son .</b>	<b>119</b>
V.A.Le niveau d'importance - les effets perceptifs.....	120
V.B.Les premières réflexions : entre prise de son et réverbération artificielle .....	121
V.B.1.Les objectifs et limites de la prise de son.....	121
V.B.2.Quelle utilisation des réverbérations artificielles ? .....	124
V.C.L'influence du format de diffusion .....	127
V.C.1.Quels enjeux pour le multicanal ? .....	127
V.C.2.Des outils différents.....	128
V.C.3.Conclusion de cette partie .....	128
<b>VI. Constitution d'un site dédié aux effets perceptifs des réflexions précoces.....</b>	<b>130</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>132</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>134</b>
<b>Index des Figures .....</b>	<b>138</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>143</b>
A. Annexe 1 - Attributs subjectifs de la qualité acoustique de Léo Bernanek .....	144
B. Annexe 2 - Principaux critères objectifs de caractérisation de l'acoustique d'une salle.....	145
C. Annexe 3 - Questionnaire destiné aux ingénieurs du son : La problématique des réflexions précoces .....	146
D. Annexe 4 - Retranscription d'entretiens avec des ingénieurs du son.....	148
D.1.Frédéric Changenet - Ingénieur du son à Radio France .....	148
D.2.Hervé Déjardin - Ingénieur du son au département Innovation de Radio France .....	151
D.3.Alban Moreau - Ingénieur du son indépendant et ingénieur acousticien ..	153
D.4.Thomas Vingtrinier - Ingénieur du son indépendant .....	155
D.5.Daniel Zalay - Ingénieur du son et MMO à Radio France.....	158

# Introduction

Parmi les enjeux de la production sonore, la question de la réverbération tient un rôle essentiel en ce qu'il s'agit de la perception de l'espace, et se pose à toutes les étapes du processus : choix du lieu d'enregistrement, configuration de la prise de son, mixage et enfin restitution, autant d'étapes où il convient de maîtriser la compréhension et la gestion de la réverbération. Il s'agit là toutefois d'un phénomène complexe en ce qu'il réunit des enjeux acoustiques, perceptifs et esthétiques, ayant animés ingénieurs du son et chercheurs, en particulier depuis la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle, témoins et acteurs de l'émergence de nouvelles technologies assurant une transparence<sup>1</sup> sans cesse grandissante des outils d'enregistrement, de traitement et de restitution sonore.

Dans la production musicale, la musique classique tient un rôle particulier en ce qu'elle hérite d'une histoire multi-centenaire complexe aux codes esthétiques ayant significativement évolué des prémices des chants liturgiques jusqu'à la musique orchestrale moderne. Il n'en demeure pas moins que du point de vue de la production musicale et de la réverbération, une tendance esthétique semble se dégager unanimement : celle de la recherche de *réalisme*, terme équivoque que l'on pourrait cependant définir dans notre cadre d'étude comme la recherche d'une sensation auditive procurant une impression d'écouter une pièce musicale *comme si* on était dans la même salle. Évidemment, et pour de multiples raisons qui seront détaillées, il serait vain de prétendre à une restitution parfaitement et en tous points fidèle à une sensation auditive supposée, procurée par l'expérience d'un concert. Mais cette recherche a mené les ingénieurs du son à comprendre la réverbération et à maîtriser les outils permettant d'en ajouter en traitement : les moteurs de réverbération artificielle.

Il est une partie de la réverbération qui nous intéresse ici particulièrement : l'énergie précoce de réverbération constituée essentiellement de premières réflexions et qui est un indicateur perceptif essentiel en ce qu'il est le principal contributeur de la sensation de

---

<sup>1</sup> La « transparence » désignant ici la capacité d'un outil à ne pas altérer (ou le moins possible) un signal audio.

placement spatial d'une source. Cette énergie précoce peut être captée à la prise de son ou générée artificiellement en mixage, et est au centre de la pratique des ingénieurs du son, *a fortiori* en musique classique. En effet, les pratiques des preneurs de son en musique classique s'étant fortement développées autour de la multi-microphonie par l'utilisation de microphones d'appoint directifs utilisés pour pointer sur des sources sonores, il convient, pour utiliser à bon escient les sons captés par ces microphones, de maîtriser l'énergie précoce de réverbération qu'ils peuvent fournir à la prise, ou que l'on peut y ajouter en mixage. Ainsi, l'ingénieur du son doit composer avec un ensemble de sons captés par ces microphones, et les assembler pour constituer un mixage « réaliste » représentatif d'une scène sonore homogène, ce qui passe quasiment systématiquement par l'utilisation de réverbérations artificielles, notamment pour la génération des premières réflexions.

Notre étude se propose d'analyser les enjeux propres à la gestion des premières réflexions de réverbération par les ingénieurs du son dans le cadre de la musique classique, de l'enregistrement au mixage. Elle se concentre sur le cas des microphones d'appoint et des conditions de leur usage en prise de son, où l'anticipation du mixage a son importance. N'ayant pas vocation à hiérarchiser des outils ou à juger des pratiques, cette étude a pour vocation principale à donner au lecteur les clefs d'une compréhension globale de ces enjeux, en termes d'effets perceptifs, de démarche esthétique et de pratique des outils de réverbération artificielle.

Ce travail traite en premier lieu des considérations théoriques propres aux lois générales de la physique du son et de la réverbération. La question de l'audition spatiale humaine est ensuite étudiée à l'aune des réflexions précoces et de leurs effets perceptifs multiples. Avant d'aborder les enjeux de la réverbération artificielle, une partie est dédiée à l'analyse des codes esthétiques de la musique classique, de son écoute en concert mais également de son mixage et de sa restitution. Après une description des outils de réverbération artificielle et des enjeux auxquels leur utilisation en mixage de musique classique répond,

nous proposerons une étude des pratiques des ingénieurs du son au travers de témoignages recueillis lors d'entretiens menés sur le sujet des premières réflexions.

Enfin, la partie pratique de ce travail sera détaillée. Elle a consisté en la réalisation d'un site internet proposant des extraits sonores, mettant en avant certains des effets perceptifs des premières réflexions et complétant cette étude.

# I. L'acoustique de la réverbération

Cette partie est consacrée à la description physique du phénomène acoustique de réverbération. Des rappels généraux sur le son sont toutefois donnés en préambule, faisant ensuite place à l'étude des premières réflexions de réverbérations (aussi appelées dans cette étude *réflexions précoces*), puis à quelques critères de caractérisation des espaces acoustiques. Pour certains lecteurs, cette partie constituera un ensemble de rappels de notions déjà connues. Il qui nous a néanmoins semblé important de les donner pour le lecteur néophyte, de manière à assurer sa bonne compréhension des propos développés par la suite.

## I.A. Les phénomènes physiques mis en jeu

### I.A.1. La propagation du son en champ libre

« Son : *Sensation auditive engendrée par une onde acoustique.*<sup>2</sup> »

Lorsqu'un corps entre en vibration, son mouvement est transmis de proche en proche par les molécules de son environnement, liquide, solide ou gazeux. Bien sûr, le cadre d'étude du son le plus étudié car le plus familier est celui d'un environnement composé d'air, d'où les résultats présentés ci-après proviennent. Mais précisons bien que les ondes acoustiques ne se limitent pas à la propagation aérienne, et que tout milieu soumis à la propagations d'ondes acoustique réagira d'une manière qui lui est propre, selon ses caractéristiques physiques spécifiques.

Ainsi excité, l'air soumet à l'onde sonore se propageant dans une ou des directions spécifiques un ensemble de lois physiques imprimant ses caractéristiques à l'onde en question.

En premier lieu intervient l'atténuation géométrique de l'onde acoustique. Propre à sa nature ondulatoire, l'onde peut être sphérique quand elle est encore proche du point

---

<sup>2</sup> Encyclopédie Larousse. Définition du « son », <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/son/92612>

d'émission ou plane à mesure que la distance à la source augmente. Ces types de propagations influent sur le type décroissance énergétique de l'onde, qui invariablement perd en intensité par unité de surface à mesure que l'on s'éloigne de la source.

Pour une source de puissance acoustique  $P$  considérée omnidirectionnelle, l'intensité est répartie sur la sphère virtuelle de rayon  $r$ , distance à la source selon la formule suivante :

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Cette décroissance énergétique étant par ailleurs modulée par les caractéristiques de la source, et notamment par sa directivité et le contenu fréquentiel de l'onde qu'elle émet, certaines fréquences se dissipent plus rapidement que d'autres.

La dissipation énergétique se fait également par conversion en chaleur causée par les frottements entre les molécules d'air. Ainsi, à chaque transmission du mouvement d'une molécule à l'autre, une portion de l'énergie est transmise tandis qu'une autre est dissipée. Cette perte est liée à l'agitation moléculaire et donc à la fréquence : plus la fréquence est élevée, plus l'agitation est importante. Les pertes par dissipation augmentent donc avec la fréquence selon un rapport de proportionnalité avec le carré de la fréquence. Cette perte d'énergie par dissipation est également fonction de l'humidité ambiante. En effet, la dissipation diminue avec l'humidité : le son se propage donc moins loin en milieu sec qu'en milieu humide. La température a également un impact sur la propagation de l'onde acoustique.

Premièrement, la vitesse de propagation d'une onde acoustique dans l'air est donnée par la formule suivante:

$$c_{air} = 20,05\sqrt{T}$$

(le coefficient 20,05 tient compte du coefficient de Laplace de l'air, de la masse molaire et de la constante des gaz parfaits).

Deuxièmement, la température influe également sur la direction de propagation de l'onde acoustique, dont le mouvement se trouve attiré des zones chaudes vers les zones plus froides. Par exemple, dans une salle de concert où le public est assimilable à une source de chaleur, le son « monte » à mesure qu'il se propage dans la salle. Une solution pour pallier cet effet est d'incurver le sol afin de surélever les zones lointaines de l'audience.

Ces deux effets (sur la vitesse et la direction de propagation) proviennent de l'influence de l'impédance acoustique  $Z_{ac}$  de l'air sur la propagation des ondes acoustiques, à savoir sa résistance intrinsèque au passage de ces ondes. On considère en effet reliés les paramètres de température, de célérité, de masse volumique et d'impédance, dont quelques valeurs sont données dans le tableau<sup>3</sup> en Figure 1.

T (°C)	c (m/s)	$\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	$Z_{ac}$ (Pa.s/m)
-10	325,4	1,341	436,5
0	331,5	1,293	428,3
10	337,5	1,247	420,7
20	343,5	1,204	413,5
30	349,2	1,164	406,6

Figure 1: Correspondances entre température, célérité, masse volumique et impédance acoustique pour quelques valeurs indicatives

<sup>3</sup> Tiré de Wikipédia - Impédance acoustique ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Imp%C3%A9dance\\_acoustique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Imp%C3%A9dance_acoustique))

## I.A.2. La propagation du son dans un espace clos

*« Réverbération: Persistance d'un son dans un espace clos ou semi-clos après interruption de la source sonore<sup>4</sup> »*

Les phénomènes physiques évoqués plus haut sont importants et leur prise en compte est cruciale quand les dimensions des espaces considérés sont importantes, lorsque les ondes acoustiques parcourent des trajets suffisamment longs pour que ceux-ci aient une influence notable. Néanmoins, dans des espaces clos, les ondes acoustiques sont soumises à d'autres phénomènes physiques quand elles rencontrent des obstacles ou des parois. Par des jeux de réflexions, d'absorption et de diffusion que nous allons détailler, les trajets des ondes peuvent être considérablement allongés avant d'arriver au point d'écoute, ainsi que de voir leurs propriétés (intensité, timbre, dynamique, ...) modifiées: c'est le phénomène de réverbération.

Lorsqu'une source sonore émet du son dans plusieurs directions, les ondes sonores, que l'on peut dans une certaine approximation représenter par des rayons, se propagent dans l'espace et interagissent avec les obstacles physiques. Si un trajet correspond au chemin le plus court entre la source et le point d'écoute (correspondant au « son direct »), une grande partie de ce qui est reçu au point d'écoute provient en réalité de sources virtuelles issues des parois, et correspond aux ondes sonores réfléchies une ou plusieurs fois. L'analogie optique permet de parler d'ondes « spéculaires » en ce qu'elles sont semblables à des ondes optiques se réfléchissant sur un miroir. Soumis aux lois de l'optique géométrique, la propagation des rayons sonores ainsi modélisés peut être calculée grâce aux lois de Descartes, assurant que l'angle d'incidence d'un rayon est égal à son angle de réflexion. On parle alors de modèle de la source « image miroir », en ce que le rayon réfléchi peut être considéré comme provenant d'une source virtuelle, symétrique à la source réelle par rapport au point de réflexion (voir Figure 2).

---

<sup>4</sup> Dictionnaire Larousse. Définition de « réverbération », <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/r%c3%a9verb%c3%a9ration/69098?q=r%c3%a9verb%c3%a9ration#68342>

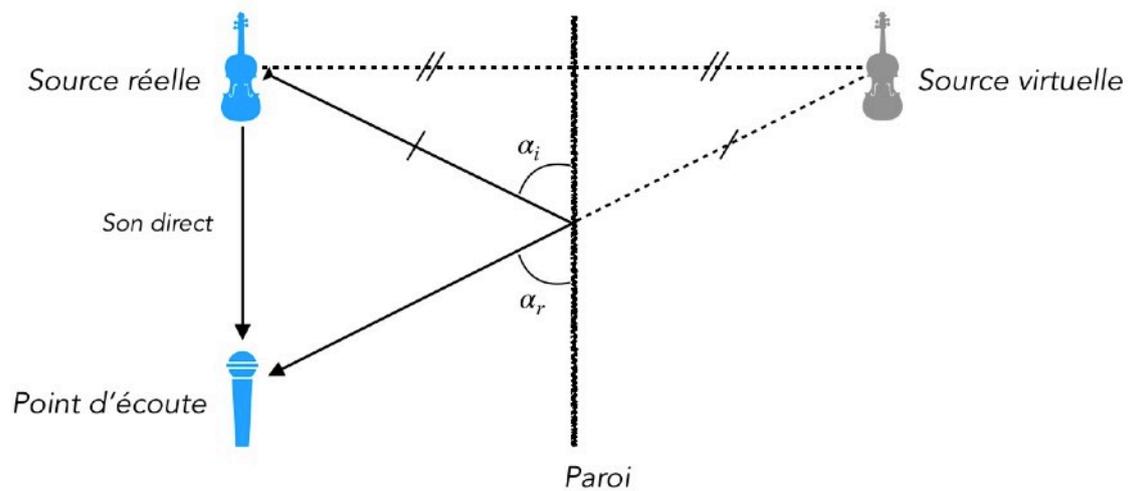


Figure 2 : Représentation d'une réflexion par image-source

Cette représentation simpliste du phénomène de réflexion acoustique basé sur les lois de l'optique géométrique doit cependant être précisée. En effet, le comportement de l'onde acoustique se heurtant à un obstacle dépend de son contenu fréquentiel ainsi que des dimensions de l'obstacle et de ses caractéristiques surfaciques :

- Les réflexions spéculaires auront lieu dans le cas où les dimensions de l'obstacle sont supérieures à la longueur d'onde par un facteur d'au moins dix. On comprend donc que de manière générale, les fréquences aiguës sont plus sujettes aux réflexions spéculaires, les obstacles de grandes dimensions étant plus rares (une fréquence de 1000 Hz correspond à une longueur d'onde de 34 cm: il faudra un obstacle de dimension de l'ordre de plusieurs mètres pour générer une réflexion spéculaire à cette fréquence) ;
- Dans le cas où les dimensions de l'obstacle sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, l'onde acoustique est réfléchiée dans de multiples directions. On parle alors de réflexions diffuses ;
- Quand un obstacle bloque le trajet de propagation, il crée un effet d'ombrage dépendant également de la longueur d'onde. Si la longueur d'onde est grande devant l'obstacle, le son est en quelque sorte dévié momentanément de sa trajectoire et contourne l'obstacle. On parle alors de diffraction. On en trouve l'exemple lorsque l'on se trouve derrière une personne à un concert, on entend moins bien les fréquences aiguës qui sont réfléchiées,

tandis que les graves contournent la personne et parviennent correctement à nos oreilles. La diffraction peut par ailleurs s'accompagner de diffusion, comme illustré dans la Figure 3.

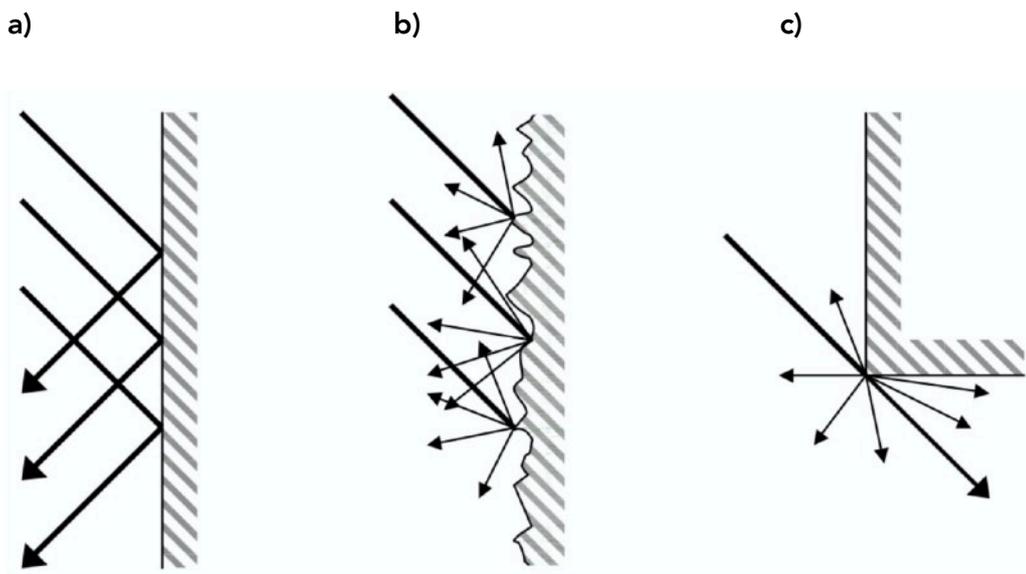


Figure 3 : Illustrations de réflexions spéculaires (a), diffuses (b) et de diffraction sur le coin d'un obstacle (c)

De plus, toute onde se heurtant à un obstacle rigide lui transmet une partie de son énergie par le phénomène d'absorption, qui est alors convertie sous forme de chaleur. On distingue trois types d'absorptions qui dépendent des caractéristiques physique de l'obstacle :

- Au contact de matériaux poreux, les ondes acoustiques sont soumises à de multiples réflexions spéculaires et diffuses au sein du matériau, la multiplication des points d'incidence multipliant ainsi les occurrences de conversion énergétique ;
- L'absorption par résonateur : lorsque l'onde pénètre dans une cavité créée par l'espacement de panneaux acoustiques, certaines fréquences autour de la fréquence propre du résonateur, définie en fonction de ses dimensions et autres caractéristiques

physiques, sont absorbées et donc atténuées. Le résonateur le plus utilisé pour ce type d'absorption est le résonateur dit de Helmholtz ;

- En présence d'un panneau séparé d'une paroi à une distance précise, on parle d'absorption par panneau absorbant. Le système, constitué du panneau et de la masse d'air le séparant de la paroi, entre en oscillation lorsque des ondes acoustiques de longueur d'onde de l'ordre de grandeur des dimensions du résonateur, typiquement les fréquences basses, ce qui permet de les absorber.

L'ensemble des interactions entre les ondes acoustiques et les surfaces des parois d'une pièce et de son mobilier sont donc multiples et complexes, car variant grandement en fonction de la longueur d'onde et selon les caractéristiques physiques des matériaux. Néanmoins, il est possible d'analyser les caractéristiques d'un champ réverbéré selon une pluralité de paramètres temporels fréquentiels afin de mieux comprendre les caractéristiques pouvant varier selon les espaces acoustiques.

### **I.A.3. La réponse de salle - analyse du signal réverbéré**

#### **a) Le phénomène réverbérant**

Lorsqu'une source sonore émet dans une pièce, les ondes acoustiques se propagent selon la directivité de celle-ci. Une source omnidirectionnelle émet de manière isotopique tandis qu'une source directionnelle privilégie une direction donnée, plus ou moins large dans l'espace. Le son direct, issu du trajet en ligne droite depuis la source, ne subit en principe (sauf obstacle situé entre la source et le point d'écoute) aucune altération autre que l'atténuation géométrique et l'absorption de l'air est toujours le premier son perçu au point d'écoute. Ensuite, les parois de la salle réagissent aux vibrations acoustiques incidentes selon les mécanismes de réflexion, diffusion ou diffraction, et changent leur trajectoire, leur intensité ou encore leur contenu spectral. S'ajoutent donc au point d'écoute l'onde directe et l'ensemble des ondes issues des multiples réflexions, arrivant pour chacune avec un certain retard, relatif à la longueur du trajet parcouru, comme illustré en Figure 4.

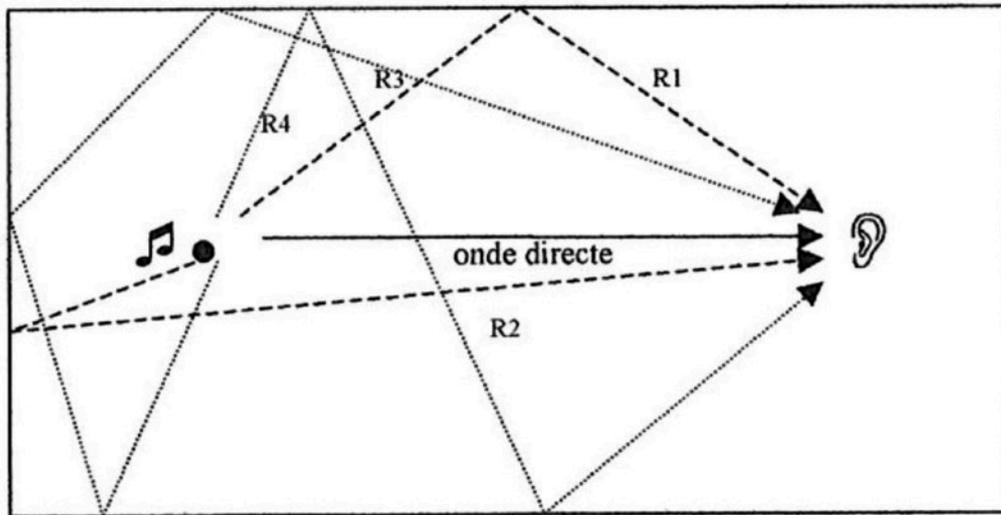


Figure 4 : Premières réflexions acoustiques dans une salle

Selon la définition standard pour les salles de concert [1], le son arrivant sous les 80 ms après le son direct est considéré comme de l'énergie précoce tandis que les sons arrivant après les 80 ms est sont considérés comme participants de la réverbération tardive (ou champ diffus). Cette définition montre bien la séparation entre les deux phénomènes acoustiques mais demeure simplificatrice. Si elle a un sens du point de vue de l'étude perceptive du son (bien que cette frontière temporelle dépende de nombreux facteurs et notamment de la taille de la salle), du point de vue physique il n'y a pas d'instant de séparation: les réflexions se multipliant, leur densité croit progressivement à mesure que le son se propage dans la salle. Par absorption de l'air et des parois, le champ acoustique est progressivement converti en chaleur et son intensité suit une décroissance exponentielle, jusqu'à son extinction. Le développement de l'énergie acoustique dans un espace clos peut être étudié au travers de sa réponse impulsionnelle.

## b) Caractérisation par la réponse impulsionnelle

Les phénomènes d'acoustique des salles, en excluant les résonances (souvent indésirables) des structures mécaniques sont approximativement linéaires, ce qui permet de considérer la réponse d'une salle comme une fonction de transfert pour décrire la propagation du son en son sein. On considère la salle comme un canal acoustique caractérisé par sa réponse impulsionnelle, c'est à dire sa réponse à une impulsion de Dirac (un signal théoriquement d'intensité infinie et de durée infinitésimale, dont le spectre contient toutes les fréquences). La réponse impulsionnelle d'un espace ou d'un dispositif (n'importe quel filtre considéré linéaire peut être également caractérisé de cette manière) est une fonction du temps dont le calcul peut se faire en reliant le signal d'excitation et le signal reçu. Si on note  $s(t)$  le signal émis,  $r(t)$  le signal reçu et  $h(t)$  la réponse impulsionnelle, on a l'égalité suivante :

$$r(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) \cdot s(t - \tau) dt$$

La réponse impulsionnelle mesurée dans une salle est souvent représentée sur un graphique donnant le temps en abscisse et l'amplitude en ordonnée (voir Figure 5). Cette représentation permet d'observer l'évolution temporelle du champ réverbéré. Si, comme nous l'avons vu, on divise généralement celui-ci en deux phases, il est également communément admis d'ajouter une phase intermédiaire, permettant une description de la réponse impulsionnelle en trois phases distinctes :

1. Les premières réflexions (ou réflexions précoces), souvent dénombrables (entre 2 et 5 classiquement). Leur distribution temporelle, leur amplitude ainsi que leur contenu fréquentiel est caractéristique de la salle mais aussi de la position et de la nature de la source, ainsi que de la position du récepteur. Ainsi, et comme nous le verrons, elles jouent un rôle important pour la perception spatiale des sources ;
2. La grappe de réflexions diffuses, stade intermédiaire correspondant à la plage temporelle de mélange des réflexions mais où l'on ne peut pas encore exactement décrire le signal de manière statistique ;

3. Le champ diffus ou queue de réverbération, champ homogène dont l'amplitude décroît jusqu'à l'extinction. Cette réverbération tardive est caractéristique de la salle et est homogène (si on exclut les phénomènes de modes acoustiques). Elle est généralement décrite de manière statistique dans ses caractéristiques fréquentielles (on parle souvent de *couleur* de réverbération) et temporelles.

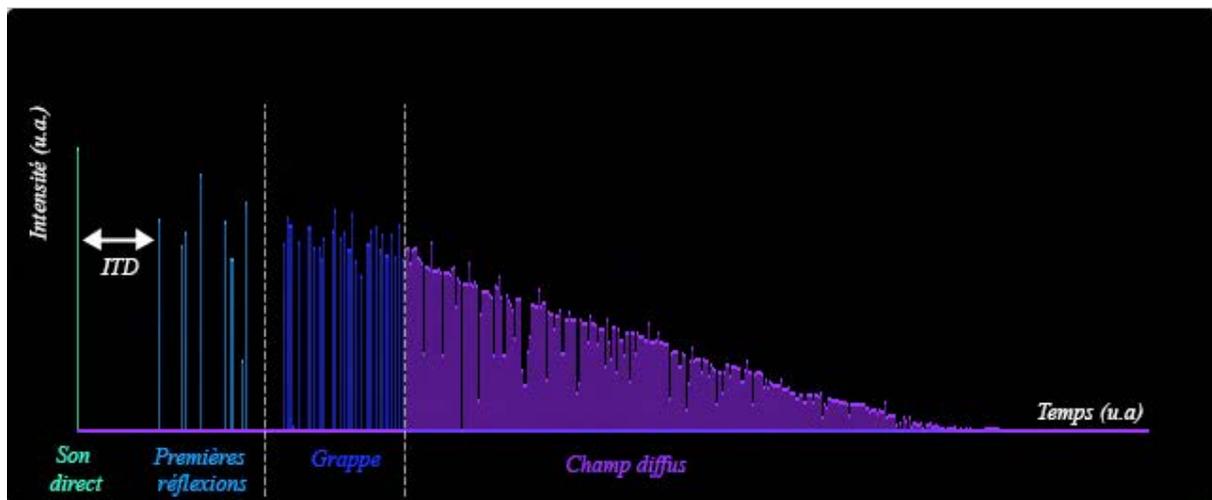


Figure 5 : Réponse impulsionnelle (mise au carré, afin de n'avoir que des pics positifs)

La réponse impulsionnelle d'une salle peut être mesurée de différentes manières et nécessite un équipement relativement restreint: un ordinateur, une interface audio, au moins un microphone et un haut-parleur large bande. Obtenir une réponse impulsionnelle par une méthode fiable et robuste au bruit de fond assure de pouvoir reconstituer fidèlement le champ acoustique perçu dans la configuration de l'acquisition (placements du micro et du haut-parleur). En général, la réponse impulsionnelle de salle de concert est mesurée avec le haut-parleur émettant depuis la scène vers le centre de la salle, et le microphone placé au centre. Les réponses impulsionnelles peuvent être mesurées avec plusieurs microphones et haut-parleurs et être utilisées (comme nous le verrons dans la section numéro de section) dans des moteurs de réverbération multicanale.

## I.B. L'acoustique des salles - caractérisation du champ réverbéré

Un certain nombre de manières de caractériser les espaces acoustiques ont été mis au point depuis le développement des bases de l'acoustique au début du XXe siècle, en particulier par Wallace Clement Sabine (1868 - 1919), physicien américain à l'origine de l'acoustique architecturale, notamment acousticien du Boston Symphony Hall, une salle de concert reconnue pour la qualité de son acoustique. Sabine a été le premier à déterminer une équation liant temps de réverbération et caractéristiques physiques d'une salle. Cette première formule de caractérisation du champ réverbéré exprimant le temps en secondes mis par une onde acoustique pour voir son énergie décroître de 60 dB fut établie en 1900 [2] et s'exprime comme suit:

$$TR_{60} = 0.163 \frac{V}{A}$$

Où  $V$  est le volume de la salle en  $m^3$  et  $A = \alpha S$  est la surface équivalente d'absorption avec  $\alpha$  le coefficient moyen d'absorption et  $S$  la surface totale des parois de la salle en  $m^2$ . Cette équation, qui néglige l'absorption de l'air, permet donc le calcul du  $TR_{60}$  à condition de connaître certaines propriétés physiques de la salle. Elle n'est strictement valide que pour des surfaces uniformément absorbantes, ce qui est rarement le cas. Elle représente cependant une bonne approximation du temps de réverbération dans la plupart des cas.

Sabine était conscient des limites de sa formule de caractérisation acoustique des salles, et il proposa trois facteurs d'appréciation [2], sans cependant en donner des méthodes de calcul objectives : le *Loudness*, la *Distorsion des sons complexes* (provoquée par interférences et résonances) et la *Confusion* (échos, sons parasites). Ce fut la première tentative de description acoustique en termes de facteurs perceptifs, domaine qui sera par la suite amplement approfondi, comme nous le verrons en partie II.

Après des tentatives infructueuses de Sabine dans une recherche d'une formule plus précise du  $TR_{60}$ , c'est en 1930 que Carl F. Eyring, un ingénieur acousticien mexicain, proposa sa formule, mieux adaptée aux cas limites de salles très peu ou très absorbantes :

$$TR_{60} = -0.163 \frac{V}{S \cdot \ln(1 - \alpha)}$$

Où  $V$  est le volume de la salle en  $m^3$ ,  $S$  la surface totale de ses parois en  $m^2$  et  $\alpha$  le coefficient moyen d'absorption. Pour donner un ordre de grandeur, le  $TR_{60}$  de la salle principale de l'Opéra Bastille est de 1.7 s vide et de 1.5 s occupée (les personnes augmentant l'absorption des ondes acoustiques). Dans un studio d'enregistrement, de faibles  $TR_{60}$  (autour de 0.3 secondes) sont généralement favorisés, et les cathédrales peuvent présenter des  $TR_{60}$  de l'ordre de la dizaine de secondes.

Un deuxième critère fut rapidement adopté pour caractériser les espaces acoustiques: le *Early Decay Time* (ou EDT) permet d'informer sur l'allure de la décroissance du son, en étudiant spécifiquement la perte des 10 premiers décibels, donnant une indication de la régularité de la décroissance de l'énergie réverbérée. Il n'existe cependant pas de formule permettant de calculer sa valeur sans mesure.

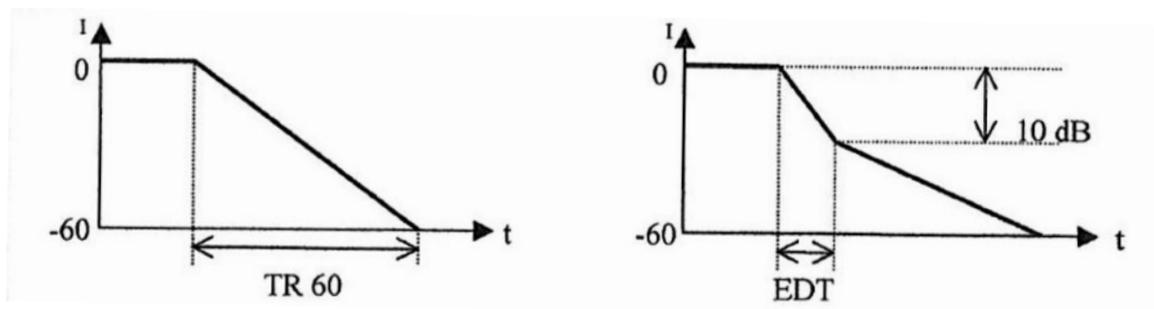


Figure 6 :  $TR_{60}$  et  $EDT$

Le  $C_{80}$ , troisième critère de caractérisation objective de l'acoustique des salles est également souvent utilisé, car il donne une information sur la répartition de l'énergie réverbérée avant et après les 80 premières millisecondes. On le définit comme suit:

$$C_{80} = 10 \log_{10} \left( \frac{\int_0^{0.8} p^2(t) dt}{\int_{0.8}^{\infty} p^2(t) dt} \right)$$

Où  $\int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt$  représente la puissance acoustique totale mesurée entre les instants  $t_1$  et  $t_2$ .

Pour des valeurs positives, la salle pourra être considérée comme analytique à cause d'une réverbération concentrée sur les 80 premières millisecondes tandis que pour des valeurs négatives, la salle sera considérée comme confuse, avec une réverbération étalée dans le temps.

D'autres critères objectifs peuvent être utilisés, comme le Temps Central, barycentre énergétique de la réponse impulsionnelle, exprimé en secondes:

$$T_S = 10 \log_{10} \left( \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right). \text{ Ou encore coefficient d'efficacité latérale, donnant une}$$

indication du ratio d'énergie provenant d'une direction donnée, ayant un azimut  $\theta$ , exprimé

comme suit:  $LF = 100 \frac{\int_{5ms}^{80ms} p^2(t) \cos^2(\theta) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt} .$

## II. La perception humaine face au champ réverbéré

*« La localisation est la loi par laquelle l'emplacement d'un évènement auditif (sa direction ou sa distance) est relié à un ou plusieurs attributs spécifiques d'un évènement acoustique »<sup>5</sup>*

L'ensemble des critères objectifs utilisés pour permettre une analyse des champs réverbérés fournissent une base commune pour leur comparaison. Cependant, ils ne donnent pas d'indication directe sur la perception de ces espaces et leur réception sensible pour l'oreille humaine. À partir de la seconde moitié du XXe siècle, des chercheurs ont travaillé à comprendre les liens entre les caractéristiques physiques objectives des espaces acoustiques et leur influence perceptive, aboutissant à la mise au point de critères perceptifs mis au point à l'aide de techniques d'évaluation psychoacoustique et de tests perceptifs.

Proposant un état de l'art des connaissances scientifiques en matière de perception sonore, les sections suivantes (II.A II.F) sont ordonnées de la manière suivante : En premier lieu seront évoquées les connaissances propres à la perception spatiale du son direct. Ensuite sera traité le cas de la perception des réflexions précoces puis leurs effets perceptifs lorsqu'elles viennent s'ajouter au son direct. Enfin sera traitée la perception de l'espace dans sa globalité, ainsi que celle du champ diffus de réverbération.

---

<sup>5</sup> Traduction de la définition de la localisation du son donnée par Jens Blauert dans son ouvrage *Spatial Hearing*, 1997: « *The law or rule by which the location of an auditory event is related to a specific attribute or attributes of a sound event* »

## **II.A. La perception spatiale**

La perception humaine est au centre de l'évaluation qualitative des espaces acoustiques, et la compréhension des mécanismes de l'audition spatiale aide à comprendre les choix des ingénieurs du son, aussi bien en termes de prise de son que de mixage, mais aussi de ceux des ingénieurs acousticiens et du public dans leurs choix de fréquentation des salles de concert.

Nous ne ferons pas ici un état des lieux complet des connaissances en matière de perception spatiale, mais nous reviendrons sur quelques points clefs, notamment en ce qui concerne la perception des réflexions précoces.

### **II.A.1. L'effet de précedence et la localisation dans un espace acoustique**

L'étude de la perception spatiale porte entre autres sur l'influence de la réverbération sur les capacités à distinguer la provenance d'un son. Lorsqu'un son se propage dans un espace réverbérant, de multiples réflexions arrivent à l'auditeur, dans des conditions (distribution temporelle, intensité, contenu fréquentiel) variables selon la nature du signal et des propriétés acoustiques de l'espace. Malgré cette quantité d'informations, une seule onde acoustique provient directement de la source, ayant emprunté la ligne droite la séparant de l'auditeur. L'oreille humaine est capable, sous certaines conditions, d'extraire la direction de la source à partir du son direct, selon l'effet de précedence. Étudié pour la première fois par Wallach et al en 1949 [3], il est couramment nommé effet Haas [4] ou loi du premier front d'onde.

L'effet de précedence porte sur la perception d'un son et d'une copie retardée de ce son, et des effets perceptifs induits par la variation de ce délai. La majorité des études sur ce sujet divise l'effet de précedence en trois phénomènes : la fusion (avec l'apparition d'une source fantôme), la localisation dominante (lorsque la localisation du premier son l'emporte) et l'effet d'écho (lorsque le délai entre les deux sons est trop grand et que l'auditeur perçoit deux sons distincts).

On a vu que lorsque deux sons identiques sont diffusés au même instant et donc arrivent simultanément à l'auditeur. Ces deux sons contribuent de manière égale à la localisation perçue d'une source fantôme située entre les deux sources. Cet effet de contribution égale persiste malgré l'introduction d'un délai en dessous de 1 ms sur un des canaux. Par ailleurs, s'ils sont séparés d'un délai inférieur à 1 ms, l'emplacement de la source fantôme peut être modulé par différence d'intensité entre les deux canaux (principe du panoramique en  $\Delta I$ , présent dans toutes les stations audionumériques).

Pour un délai généralement compris entre 1 et 5 ms (ou plus, selon la nature du son), l'effet de localisation dominante prend le dessus et la localisation de la source perçue par l'auditeur est confondue avec celle du son arrivant en premier à ses oreilles. Cet effet reste valide malgré une baisse du volume du son direct, jusqu'à 10 dB en dessous du volume du son retardé.

Le délai seuil au delà duquel arrive une sensation d'écho peut varier entre 5 ms et 50 ms [5] selon la nature du son.

A ces effets s'ajoute l'effet de suppression de la discrimination du signal retardé qui, pour des délais courts, induit des changements dans la capacité de l'auditeur à déterminer les informations de localisation des sons direct et retardé. Pour des délais courts, la présence du signal retardé peut dégrader la capacité de localisation du son direct [6], mais peut dans certains cas persister pour des délais au delà du seuil d'écho [7].

Des études ont également suggéré que l'effet de suppression de la discrimination du signal retardé pourrait dépendre du plan d'écoute (horizontal ou médian) [8] et que la présence d'un bruit de fond pourrait diminuer le seuil d'écho ainsi que celui de la localisation dominante [9].

On voit que l'effet de précedence est complexe en ce que ses conséquences perceptives dépendent de la nature des sons considérés, des plans géométriques dans lesquels ils sont émis, ainsi que de la présence de bruit de fond ou de bruits parasites. En outre, la majorité des études sur le sujet se sont concentrées sur l'effet d'une unique réflexion, bien que

certaines ont également considéré l'effet de réverbération naturelle des salles, présentant alors des caractéristiques complexes et une pluralité de réflexions précoces [10], indiquant une dégradation par la réverbération des capacités de localisation, mais également une capacité d'amélioration des performances avec l'habitude [11]. On peut cependant en conclure que si, sous certains seuils de délai, la localisation d'un son est généralement pilotée par celle du son arrivant en premier (le son direct pour une source réelle dans un espace naturel), l'effet des réflexions peut avoir un impact sur la perception de ce son direct, comme nous le verrons en section II.D.

### II.A.2.Discrimination du délai

La capacité humaine de discrimination du délai entre deux sons est liée au fonctionnement de notre système auditif : des sons d'un fort niveau induisent un masquage sur une courte plage temporelle succédant à l'arrêt de celui-ci et empêchant la détection de sons reçus dans cet intervalle s'ils ne sont pas suffisamment forts. La discrimination du délai dépend donc de la nature des sons arrivant aux tympans et donc des sources sonores : des sons courts aux transitoires marqués (comme des sons percussifs par exemple) seront plus facilement discernables que des sons ayant des composantes stationnaires (une voix par exemple) qui induiront des recouvrements temporels sur les sons suivants. Dans sa thèse de doctorat [12], H. W. Helleman a déterminé des seuils de perception de délais entre un son et sa réplique retardée, en fonction de l'angle d'incidence (le même pour les deux) dont quelques valeurs sont données dans le tableau en Figure 7.

Angle d'incidence (°)	Délai de perception seuil (ms)
25.5	5.2
44.0	5.1
70.3	3.5

Figure 7 : Valeurs minimums pour la perception de délais minimum pour différentes valeurs d'angle d'incidence

Ces données montrent que la capacité de discrimination est meilleure pour des sons latéraux, ce qui peut s'expliquer notamment par l'accentuation de la différence de temps interaurale (ITD) pour chaque son.

### II.A.3. Localisation de l'azimut et de l'élévation

#### II.A.3.a) Cas général en champ libre

La localisation du son en élévation et en azimut par le système auditif est permise par des informations issues de la différence de trajet entre les deux oreilles, à la diffraction au niveau de la tête et des épaules et aux filtrages induits par les pavillons.

La localisation d'un son est en grande partie liée à la différence entre les ondes acoustiques arrivant aux deux oreilles. La tête a un effet significatif sur les signaux arrivant aux oreilles, selon notamment les mécanismes de diffraction et de masquage vus dans la section I.A.2. Si on prend l'exemple d'une source sonore située sur la gauche (de 90° d'azimut), la tête provoque une augmentation de la pression acoustique au niveau de l'oreille ipsilatérale (du côté de la source sonore), tandis que le son doit se diffracter autour de la tête pour atteindre l'oreille contralatérale. L'altération du signal acoustique provoqué par la tête dépend du contenu fréquentiel de celui-ci et est d'autant plus grande qu'il est concentré dans les hautes fréquences (on parle d'*effet de masque* ou d'*effet d'ombre acoustique*). Ainsi, la présence de la tête induit une différence de niveau interaural (ou **ILD** pour *Interaural Level Difference*, que l'on notera  $\Delta I$ ) dépendante de la fréquence. On parle couramment de différence en *delta-I*, signifiant une différence relative d'intensité entre les deux sons perçus. De plus, le temps de propagation nécessaire pour contourner la tête et atteindre l'oreille contralatérale induit une différence de temps interaural (ou **ITD** pour *Interaural Time Difference*, que l'on notera  $\Delta t$ ) pour la perception de l'évènement auditif entre les deux oreilles.

En prenant un modèle sphérique pour la tête, le  $\Delta t$   $\tau$  peut être approximé par la formule suivante [13]:

$$\tau = \frac{D}{2c}[\theta + \sin(\theta)]$$

avec  $D$  la distance interaurale,  $c$  la célérité du son (généralement approximée à  $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) et  $\theta$  l'azimut de la source.

Dans le plan médian (c'est à dire à équidistance des deux oreilles et donc pour un azimut de  $0^\circ$ ), la perception de l'élévation est liée aux différences spectrales entre les deux canaux auditifs.

Ces différences spectrales sont principalement dépendantes de la forme des oreilles et peuvent être modélisées par des fonctions de transfert dépendantes de la position de la source. Si ces fonctions de transfert (**HRTF** pour *Head-Related Transfer Function*) sont propres à chaque individu et que leur influence sur la perception spatiale est importante, on peut toutefois généraliser la dépendance de la perception de la source à ces critères :

- Pour les fréquences inférieures à 1 kHz, le  $\Delta t$  est prédominant pour la détermination. Cela peut se comprendre par le fait que pour la partie basse du spectre, la tête ne représente pas un obstacle significatif pour susciter une diffraction et un masquage important. Le cerveau doit donc se baser sur les différences de phase liées au retard de propagation entre les deux canaux ;
- Pour des fréquences supérieures à 1 kHz, le  $\Delta I$  est prédominant. En effet, dans les hautes fréquences, la différence de phase est plus difficile à déterminer à mesure que la fréquence augmente, la distance interaurale pouvant représenter un multiple de la longueur d'onde (par exemple une fréquence de 10 kHz a pour longueur d'onde 3,4 cm). A contrario, l'obstacle constitué par la tête a une influence significative et l'atténuation à l'oreille contralatérale est importante ;
- La nature du son a aussi de l'importance. Un son contenant des transitoires accentue la faculté de localisation.

Pour mesurer la capacité du système auditif à localiser les sources sonores dans l'espace, deux grandeurs sont à prendre en compte :

- Le *biais de localisation*, qui est la différence entre la direction de la source sonore et la direction perçue ;
- Le flou de localisation ou angle minimum audible qui est le seuil différentiel de perception d'une variation angulaire.

Les résultats sur les capacités de localisation présentés ci-dessous sont issus de tests perceptifs effectués notamment par Blauert [13] et utilisant des sons synthétiques comme des bruits de largeurs de bande variables ou de sons purs. La généralisation à une écoute en environnement naturel est donc à faire avec prudence.

### (1) Localisation dans le plan horizontal

Blauert donne la mesure des biais et flou de localisation dans le plan horizontal pour différents angles d'incidence. Ces résultats, présentés dans le tableau en Figure 8, indiquent une difficulté croissante à localiser les sources dans le plan horizontal à mesure que celles-ci se déplacent vers les côtés. Si les résultats présentés ont été obtenus en utilisant comme signaux tests des impulsions de bruit blanc de durée 100 ms, Blauert précise que la tendance observée est généralisable pour les signaux sinusoïdaux, bien que les valeurs mesurées soient sensiblement différentes.

Mesure	Incidence	Angle
Biais de localisation	Frontale (azimut de 0°)	1°
Flou de localisation		±3,6°
Biais de localisation	Latérale (azimut de ±90°)	9,3°
Flou de localisation		±9,2°
Biais de localisation	Arrière (azimut de 180°)	0,7°
Flou de localisation		±5,5°

Figure 8 : Biais et flous de localisation dans le plan horizontal pour différentes valeurs d'angle d'incidence

## **(2) Localisation dans le plan vertical (plan médian)**

La localisation dans le plan médian est beaucoup plus sensible à la nature de la source et généralement moins précise que dans le plan horizontal. Un son provenant du plan médian parvient aux deux oreilles au même instant, et la capacité de discrimination par  $\Delta t$  n'est donc pas mise à contribution.

Un résultat notable est qu'en testant avec une voix parlée, Blauert remarque que le biais de localisation est nul pour une source frontale mais importante ( $\pm 15^\circ$ ) pour une source placée à la verticale. Le flou de localisation augmente également avec l'élévation. Enfin, pour un bruit blanc à bande étroite, la localisation ne dépend pas de la position de la source mais uniquement de la fréquence centrale. L'élévation d'une source est donc principalement déterminée à l'aide d'indices spectraux, comparés avec des fonctions de transfert directionnelles mémorisées pour de multiples valeurs d'élévation. Sa détermination correspond à la meilleure correspondance entre le son reçu et les informations mémorisées. De manière générale, la capacité de localisation dans le plan médian dépend significativement de la nature des sources et particulièrement de leur contenu fréquentiel, mais elle est meilleure en face et décroît à mesure que la source vient des côtés ou du dessus.

### **II.A.3.b) Cas particulier de la perception de l'azimut en restitution stéréophonique**

Il existe de nombreux systèmes de diffusion sonore, de l'enceinte mono à des systèmes multicanaux, 5.1, 7.1 ou Dolby Atmos®, généralement conçus pour le home-cinéma. Cependant, le dispositif le plus répandu demeure la stéréophonie : deux enceintes sont placées de part et d'autre de l'auditeur avec un angle normalisé à  $60^\circ$ , de manière à former un triangle équilatéral entre les trois points [auditeur, enceinte gauche, enceinte droite]. La distance entre l'auditeur et les enceintes peut varier. Cette disposition a été déterminée suite à des études psychophysiologiques de l'audition [14] ayant montré que la zone frontale située entre les azimuts  $-30^\circ$  et  $+30^\circ$  est la zone de localisation la plus précise.

Dans le cas de la restitution stéréophonique avec haut-parleurs, chaque oreille reçoit les signaux issus des deux enceintes (dans le cas d'une restitution avec un casque, chaque oreille reçoit exclusivement le signal du haut-parleur qui y est accolé, il n'y a pas de chemins croisés). Ces signaux issus des trajets croisés parviennent à chaque oreille avec un retard issu de la différence de marche entre les deux oreilles. Ils doivent être pris en compte pour l'étude de certains phénomènes, analysés par Blauert [13] et nous n'analyserons pas ici leur influence spécifique.

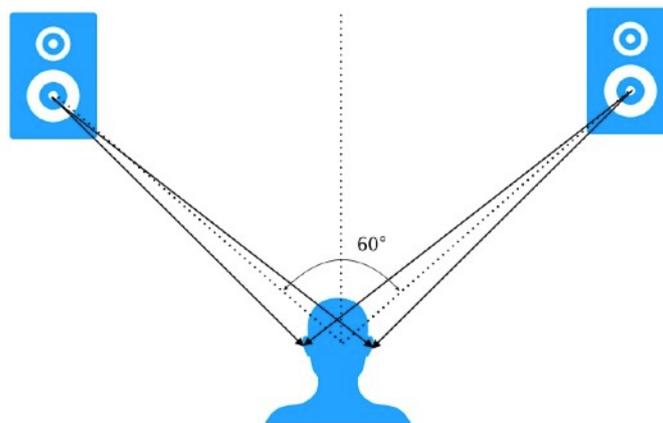


Figure 9 : Système de restitution stéréophonique

Lorsqu'on alimente les deux haut-parleurs avec un même signal, l'auditeur le perçoit comme une source unique située à l'azimut  $0^\circ$  (en face de lui). On parle alors de source fantôme : source sonore présumée, en ce qu'un événement sonore est perçu en un lieu où ne se trouve aucune source. En faisant varier les différences de temps et d'intensité entre les deux canaux, il est possible de faire varier la perception de l'azimut de la source fantôme. Si le volume du canal de gauche augmente, la source fantôme se déplace vers le haut-parleur gauche. Mais si celui-ci est envoyé avec un petit retard par rapport à celui de droite, la source fantôme se déplace alors vers la droite. Si on va trop loin dans les différences de temps ou d'intensité, la source fantôme se trouve « collée » à l'une des

enceintes, son signal prédominant complètement pour la détermination de l'azimut. Cependant, en 1963, Franssen [15] a montré que dans certains cas, les ITD et ILD pouvaient se compenser (Figure 10).

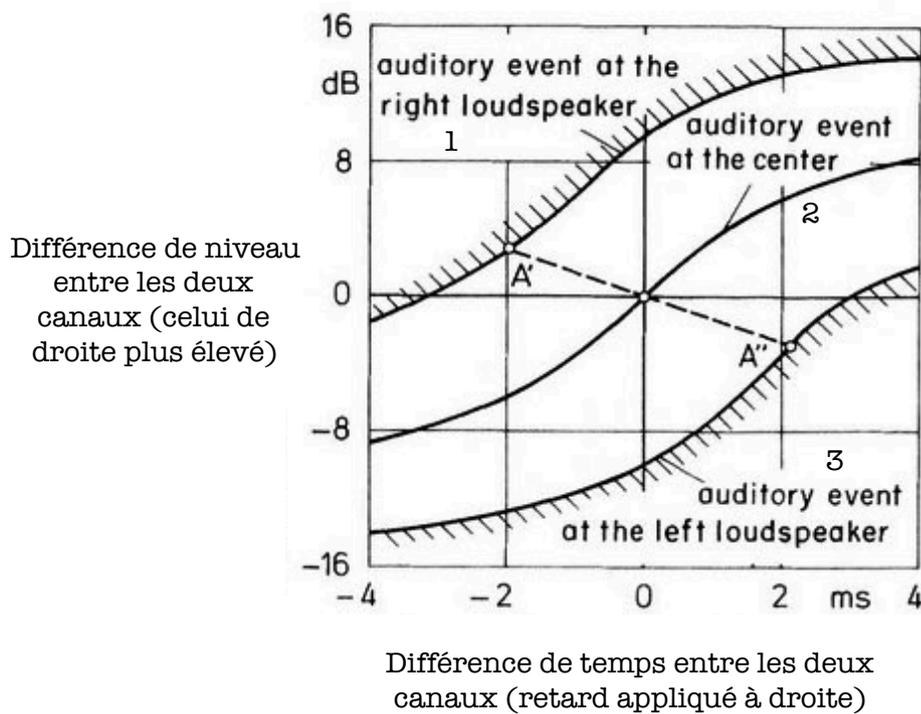


Figure 10 : Localisation de la source fantôme en fonction des différences de temps et d'intensité en restitution stéréophonique.

Traductions : 1: Localisation sur l'enceinte de droite; 2: Localisation au centre; 3: Localisation sur l'enceinte de gauche

## II.B. Caractérisation perceptive des espaces acoustiques

La première approche pour l'évaluation perceptive de la réverbération fut conduite à partir de 1962 par l'acousticien américain Léo Leroy Bernanek. Cherchant à comprendre comment différencier les acoustiques des salles de concert, il s'appuya sur de nombreuses interviews de professionnels de la musique, en particulier des chefs d'orchestres, seuls à avoir une expérience étendue de nombreuses salles de concert. En plus de comprendre les critères d'appréciation des espaces acoustiques et typiquement des salles de concert, cette démarche avait également comme objectif de prédire la qualité acoustique d'une salle en fonction de paramètres physiques mesurables et objectifs. À l'issue de ses recherches, Bernanek fut en mesure de hiérarchiser ces paramètres selon leur influence sur la préférence globale. D'après ses résultats, le critère le plus important est le temps d'arrivée de la première réflexion (ou ITD pour *Initial Time delay Gap*, à ne pas confondre avec l'ITD d'*Interaural Time Difference*), mesurable à partir des plans des salles en fonction des positions considérées. Ce paramètre est notamment associé à la sensation d'intimité : une faible valeur la favorise. Cette observation fut notamment un critère important dans la conception par Bernanek du Philharmonic Hall de New York: il fit poser de nombreux réflecteurs afin d'augmenter le nombre et l'intensité des réflexions précoces depuis le plafond. Cependant, les études subjectives sur cette réalisation furent décevantes et permirent de comprendre l'importance de la différenciation entre les réflexions latérales et verticales, et la non-viabilité d'une pratique cherchant à cloisonner les influences de paramètres physiques objectifs sur la préférence globale des auditeurs.

Cette étude pratique lui permit en outre d'établir une liste de 18 critères perceptifs d'évaluation de la qualité acoustiques des salles, tels que la clarté, l'intimité, la chaleur, la lourdeur, la vivacité, la présence ou l'enveloppement. Ces critères sont présentés en Annexe 1.

Avec son travail, Bernanek initia un mouvement de recherche sur la caractérisation perceptive des espaces acoustiques tenant compte des difficultés liées au besoin de réduire au maximum les critères tout en restant valide dans la pratique. Actuellement, neuf critères perceptifs reliés à leurs paramètres physiques sont couramment utilisés par les professionnels, ici présentés sous la forme d'un tableau en Figure 11 :

<b>Critère perceptif</b>	<b>Critère objectif</b>	<b>Description physique</b>
Taille de la salle	Temps de réverbération (TR)	Temps mis par la réverbération pour décroître de 60 dB
Sensation d'espace	ETD (Early Time Decay - Temps de décroissance précoce)	Temps mis par la réverbération pour décroître de 10 dB
Clarté	C80 - Rapport entre énergie précoce et énergie tardive	Energie relative de la réverbération contenue dans les 80 premières ms
Intimité	ITD (Initial Time Delay Gap)	Temps d'arrivée de la première réflexion à la suite du son direct
Distance apparente	Niveau relatif entre le son direct et le son réverbéré	Mesuré en rapport d'énergie
Volume apparent	Densité des premières réflexions	Combinaison de la réparation temporelle et énergétique des premières réflexions.
Impression spatiale	Energie latérale précoce	Energie relative de la réverbération latérale sous les 80 ms
Enveloppement	Energie latérale et arrière	Rapport d'énergie entre la réverbération latérale et arrière sur la réverbération totale
Brillance	Prévalence des fréquences aiguës	Rapport énergétique positif entre les aiguës et le reste de spectre dans la réponse impulsionnelle
Chaleur	Prévalence des fréquences graves	Rapport énergétique positif entre les graves et le reste de spectre dans la réponse impulsionnelle

Figure 11 : Principaux critères perceptifs d'évaluation spatiale et les critères objectifs correspondants.

## **II.C. Cas particulier de la perception des premières réflexions**

Les travaux portés sur l'évaluation perceptive des espaces acoustiques menés à la suite de ceux de Sabine ont, par la découverte de l'effet de précedence et de l'importance des réflexions précoces notamment, permis l'établissement de nombreux critères perceptifs. Si Sabine considérait la décroissance de la réverbération comme systématiquement exponentielle, l'analyse des réponses impulsionnelles (permise notamment par l'affinage des méthodes de mesure [16]) a montré que la décroissance est souvent de forme plus complexe, suivant l'énergie des premières réflexions et de leur répartition temporelle. Ainsi, les chercheurs ont tenté d'explicitier les effets perceptifs propres aux premières réflexions.

### **II.C.1. Seuil d'audibilité et résultats perceptifs généraux**

En 1975, Ulrich Lehmann, doctorant à l'université de Dresde, travaille pour sa thèse sur l'influence des variations de paramètres d'un champ acoustique synthétique sur la perception de l'effet de salle [17]. Ses tests demandent aux sujets d'interpréter l'effet de salle comme le rapport entre l'énergie provenant de la salle (de l'extérieur de la scène) et l'énergie provenant de la scène, en comparant ces énergies subjectives. De son étude générale sur une définition très large de l'effet de salle, Lehmann tire un certain nombre de résultats, notamment sur les effets perceptifs des réflexions précoces :

- L'énergie précoce non frontale et la réverbération tardive (le champ diffus) ont autant d'impact sur l'effet de salle ainsi défini ;
- À énergie identique, des réflexions précoces multiples augmentent davantage l'effet de salle que de fortes réflexions isolées ;
- La dilatation temporelle des réflexions précoces n'a pas ou peu d'impact sur l'effet de salle (entre 15 ms et 45 ms), mais a un effet perceptible quand ces réflexions sont tardives (entre 40 ms à 140 ms) ;
- À contenu énergétique identique, une réverbération tardive à décroissance exponentielle ne peut pas se substituer à des réflexions isolées.

À la même période, Rüdiger Wettschurek, doctorant à l'université de Berlin, travaille sur le seuil d'audibilité des réflexions précoces, et cherche à quantifier l'impact de leur volume relatif à celui du son direct sur la perception [18]. La forte dépendance des sensations acoustiques au niveau sonore ayant été mis en avant, le travail de Wettschurek lui a permis d'aboutir à un certain nombre de conclusions en particulier pour le cas d'un écho délayé de 70 ms après le son direct. En Figure 12, il trace le seuil d'audibilité en fonction du niveau sonore pour trois incidences latérales.

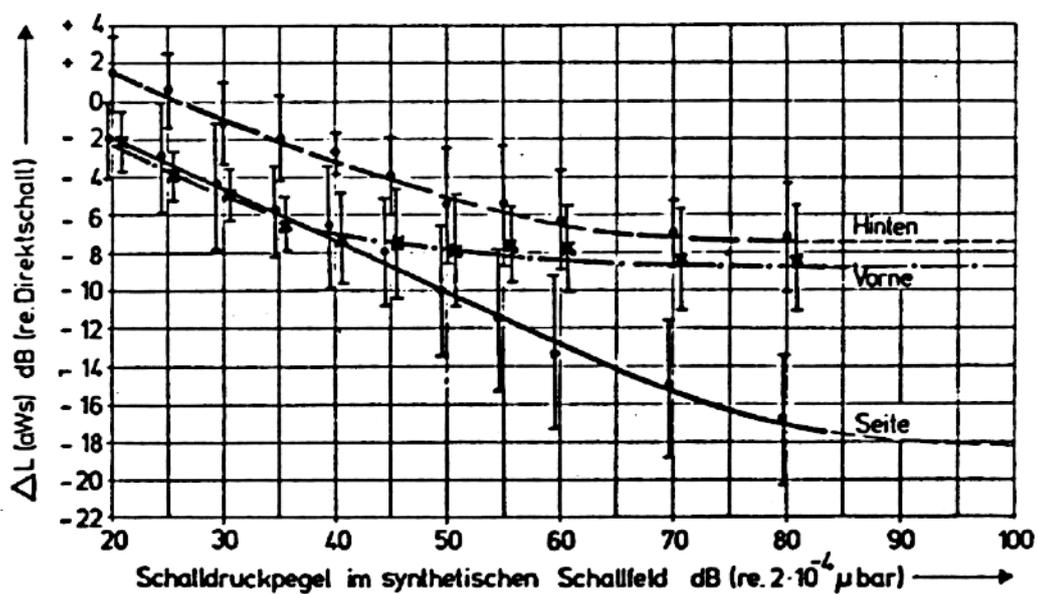


Figure 12 : Seuil d'audibilité d'un écho (à 70 ms du son direct), en fonction du niveau sonore global, paramétré par direction d'incidence: Vorne = incidence frontale; Hinten = incidence arrière; Seite = incidence latérale

Ces résultats permettent plusieurs observations :

- Le seuil d'audibilité d'une réflexion isolée est plus élevé (besoin d'un niveau de réflexion fort) pour une réflexion arrière et augmente à mesure que le niveau est plus fort. Cela peut s'interpréter de deux manières : par la plus grande intégration des réflexions arrières au champ diffus, ou par l'effet d'ombre induit par la tête et l'orientation des oreilles (le seuil de 2 dB observé à partir d'un niveau d'émission de 60 db environ correspondant aux différences mesurées sur les HRTF des oreilles externes des sujets) ;

- Le seuil d'audibilité pour les réflexions latérales est faible, et diminue pour des niveaux élevés, rendant les réflexions plus facilement audibles. Ces résultats pourraient également suggérer que cette perception est non linéaire et que la résolution spatiale du système auditif augmente pour des niveaux sonores élevés<sup>6</sup> ;
- Les réflexions frontales ont le seuil d'audibilité le plus élevé, suggérant une difficulté de discrimination lorsque le système auditif ne peut pas faire appel à sa résolution spatiale.

D'autres recherches ont été menées afin d'étudier l'audibilité des réflexions précoces, en fonction de la nature du signal, de leur intensité ainsi que de leur localisation. En particulier, nous citerons le travail mené en 2001 par Begault *et al* [19]. Ils ont notamment établi les seuils d'audibilité des réflexions dans le cas de la voix ainsi que pour des impulsions de tonalités pures en fonction de leur délai (là où Wettschurek avait travaillé à délai fixe de 70 ms) et de leur direction, dont les données sont présentées en Figure 13 pour la parole et en Figure 14 pour les impulsions tonales.

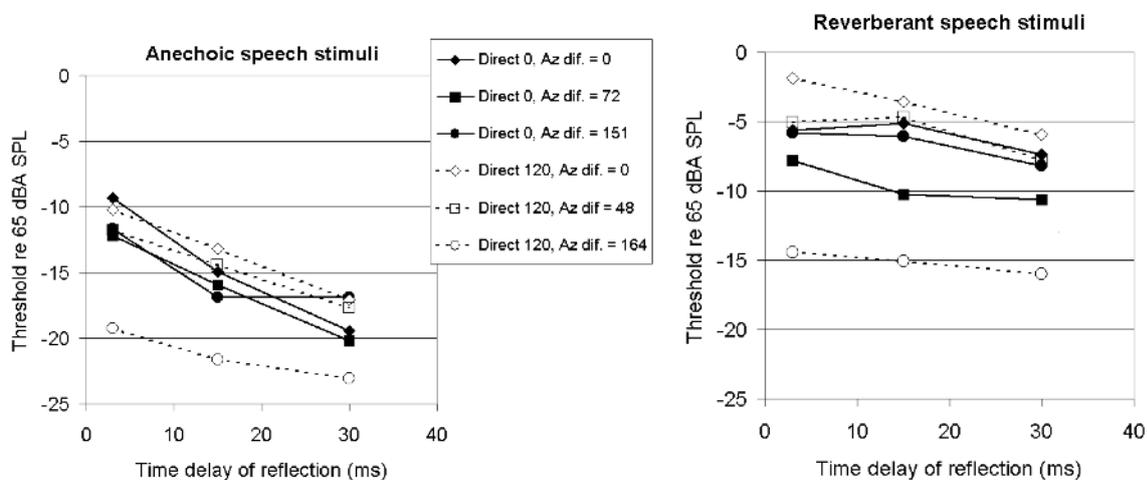


Figure 13 : Seuil d'audibilité moyen pour la détection d'une réflexion dans le cas de la parole en conditions anéchoïque et réverbérante. « Direct » réfère à l'angle d'incidence du son direct et « Az. Dif » réfère à l'azimut relatif de la réflexion par rapport au son direct.

<sup>6</sup> Cela pourrait par exemple expliquer le fait que dans les salles de concert les réflexions sont davantage audibles lors des *forte* que lors des *pianissimo*. Bien que cela puisse également être dû à la non linéarité du phénomène réverbérant.

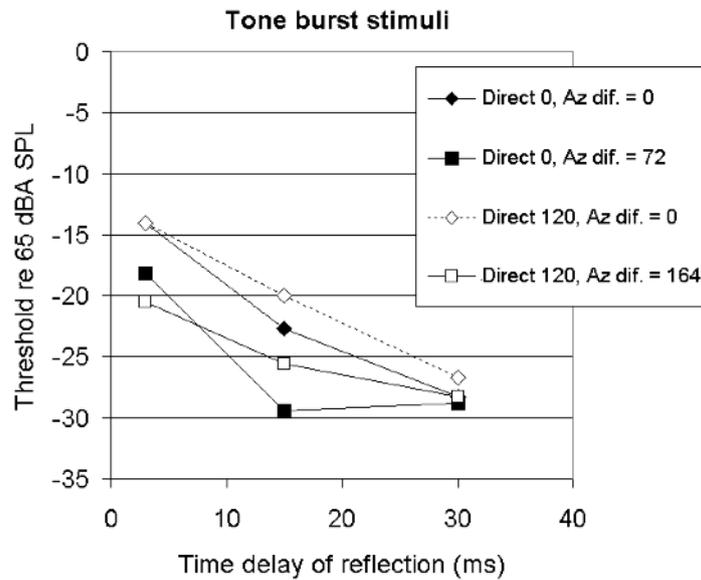


Figure 14 : Seuils moyens d'audibilité d'une réflexion en fonction du temps d'arrivée pour des impulsions tonales en condition anéchoïque.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de l'expérience de Begault et al [19] :

- Les perceptions sont de plus en plus audibles à mesure que le délai augmente (à l'exception du passage de 3 ms à 15 ms pour la parole en environnement réverbérant, ce qui peut être interprété comme une perte d'intelligibilité à ce délai spécifique) ;
- Les réflexions sont davantage perceptibles en environnement anéchoïque ;
- Les réflexions des *bips* sont davantage perceptibles globalement que celles de la parole (d'environ 5 à 8 dB) ;
- La localisation influe fortement sur l'audibilité des réflexions. La plus favorable est généralement celle où l'azimut relatif est le plus grand, notamment pour une provenance latérale de la réflexion en cas de son direct d'azimut de 0°.

## II.C.2. Masquage postérieur

Les réflexions arrivant successivement à la suite du son direct soumettent le système perceptif à des effets de masquage. Le pouvoir masquant d'un son est complexe et dépend de sa nature ainsi que des sons qui lui succèdent. Cela dit, il décroît avec le temps et devient négligeable, quelles que soient les conditions, au bout d'environ 200 ms. Ce phénomène est détaillé graphiquement en Figure 15, d'après les travaux de Zwicker et Feldtkeller [20].

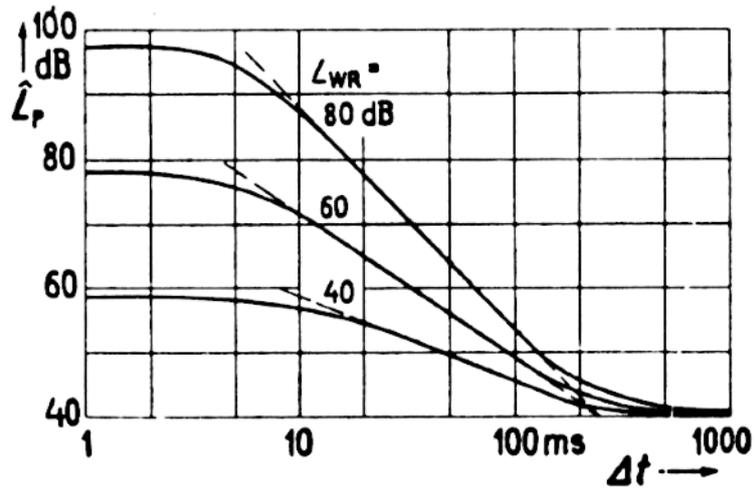


Figure 15 : Masquage postérieur d'une impulsion par un bruit blanc - Niveau seuil de masquage en fonction du temps entre les deux, pour différents niveaux de bruit blanc

## **II.D. Influence des réflexions précoces sur la perception du son direct**

Lorsqu'une ou plusieurs réflexions arrivent après le son direct, cela peut induire des changements dans la perception du son direct, les réflexions n'étant pas toujours bien discriminées mais alors davantage perçues comme une extension du son direct auquel elles se superposent. Dans cette section, les principaux effets perceptifs des premières réflexions sur la perception du son direct sont explicités : augmentation du niveau perçu de la source, de sa distance apparente, modification de son timbre et de sa clarté ou encore de sa largeur apparente.

### **II.D.1. Augmentation de la puissance subjective de la source**

Un effet perceptif des réflexions précoces ayant été largement étudié est l'augmentation du niveau subjectif du son direct. Sous certaines conditions, ces réflexions peuvent très significativement augmenter le niveau du son direct perçu. En 1958, J. P. A. Lochner et J. F. Burger ont mené une étude sur ce sujet ainsi que sur son impact sur l'intelligibilité de la parole [21]. Précisément, ils ont étudié l'effet du délai de la première réflexion sur la fraction de son énergie intégrée à celle du son direct, selon le niveau de la réflexion. La Figure 16 présente le graphique de leurs résultats et permet de conclure comme suit :

- L'intégration dépend du délai de la réflexion et est effective pour des délais allant jusqu'à la dizaine de millisecondes (la proportion d'énergie intégrée diminue à mesure que le délai augmente, sauf dans le cas de la réflexion à +5 dB) ;
- L'intégration dépend du niveau de la réflexion, et se maintient davantage si le niveau de la réflexion diminue (intégration totale jusqu'à 40 ms pour la réflexion à -5 dB).

Cependant, seule l'intégration de réflexions uniques à localisation fixe (suivant le son direct) a été étudiée par Lochner et Burger et ces conclusions pourraient changer avec la multiplication des réflexions et/ou le changement de leur direction. À notre connaissance aucune étude n'a été menée sur le sujet.

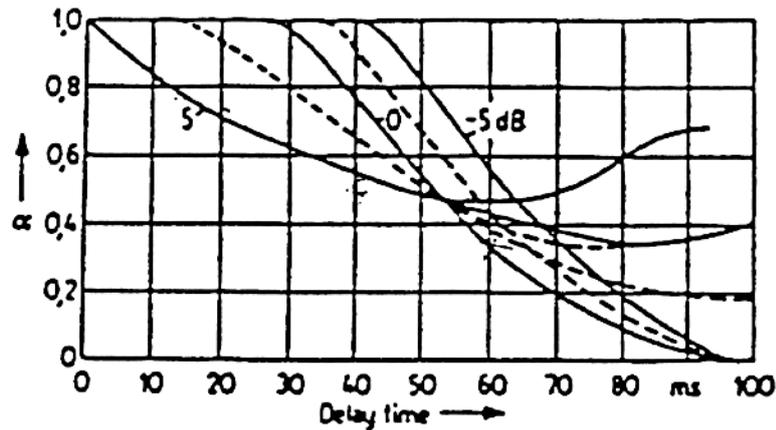


Figure 16 : Fraction de l'énergie de la réflexion intégrée perceptiblement à l'onde directe, en fonction du retard et paramétrée par le niveau de la réflexion relativement au son direct (+5 dB, 0 dB et -5 dB).

### II.D.2. Influence sur la distance apparente de la source

Parmi les nombreux indices permettant la perception de la distance à une source sonore, tels que la perte dans les hautes fréquences causée par la dissipation dans l'air ou tout simplement l'intensité perçue si la source est connue (le champ de pression perd 6 dB par doublement de distance), il est admis que l'un des plus importants en milieu réverbérant est le rapport son direct / son réverbéré, documenté notamment par Nielsen [22]. Ce rapport dépend de la salle ainsi que des positions respectives de la source et de l'auditeur et diminue de 6 dB par doublement de distance en supposant que le champ réverbéré soit homogène.

L'étude en détail du champ réverbéré a montré que les réflexions précoces arrivant entre 20 ms et 50 ms après le son direct sont des indices primordiaux pour la perception de la distance, et que les réflexions latérales sont les plus utiles, tandis que les réflexions suivant la direction de la source peuvent quant à elles être masquées ou être interprétées comme une coloration de la source, comme montré par D. Griesinger [23]. Par ailleurs, Fischetti et al [24] montrent que deux configurations similaires par le niveau du son direct et le rapport son direct / son réverbéré peuvent toutefois mener à des interprétations de la distance à la source différentes. Ces différences s'expliquant notamment par la répartition temporelle de

l'énergie réverbérée, les sources jugées les plus distantes étant celles pour lesquelles elle est la plus tardive.

### II.D.3. Modification de la largeur apparente de la source

Les principales recherches portant sur l'effet des réflexions précoces sur la largeur apparente de la source (ce qui sera par la suite dénommé **ASW** pour *Apparent Source Width*) furent menées par M. Barron et H. Marshall à partir de la fin des années 1970. Ils ont montré [25] que les réflexions précoces en dessous de 80 ms sont responsables de la perception de la largeur de la source, et que cette dernière est très dépendante du degré de latéralité de ces réflexions : les réflexions frontales (qui suivent la direction de la source) ont peu d'effet sur la largeur apparente tandis que la largeur maximale est atteinte pour des réflexions latérales (perpendiculaires à la source). Leurs travaux ont mené à la définition de la mesure nommée fraction latérale (ou **LF** pour *Lateral Fraction*), définie comme le ratio entre l'énergie latérale précoce sur l'énergie précoce totale et calculée comme suit :

$$LF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_L^2(t) dt}{\int_{0ms}^{80ms} p_L(t) dt},$$

où  $p_L^2(t)$  correspond à la puissance acoustique latérale et  $p^2(t)$  à la puissance acoustique totale.

La largeur apparente est également dépendante du contenu fréquentiel des réflexions : la décorrélation (évaluée par la mesure de l'**IACC** pour *Interaural Cross Correlation*, donnant une estimation de la *ressemblance* entre les champs acoustiques arrivant aux deux oreilles) dans les basses fréquences (en-dessous de 500 Hz) augmenterait significativement la largeur apparente. Dans les hautes fréquences, il a été montré [26] que la largeur apparente est dépendante de la décorrélation des enveloppes<sup>7</sup>. Ainsi, la largeur apparente serait

---

<sup>7</sup> L'enveloppe d'un son correspond à l'évolution de son volume au cours du temps

principalement corrélée à la valeur d'IACC précoce autour des bandes fréquentielles centrées sur 500 Hz, 1kHz et 2 kHz [27].

#### **II.D.4. Influence sur la clarté de la source**

Selon Bernanek [28], un principe général est que la clarté décroît à mesure que la réverbération augmente. Comme nous l'avons vu dans la section II.B à la Figure 11, la mesure physique de la clarté usuelle est le *C80*, défini comme le ratio de l'énergie arrivant pendant les 80 premières millisecondes sur l'énergie totale, exprimé en décibels. Typiquement, plus le *C80* augmente, plus la clarté est bonne.

A. Fischetti et J. Jouhaneau ont montré [29] que l'impression de clarté est principalement corrélée à la distribution temporelle des premières réflexions: un fort ITD (pour Initial Time Delay, soit l'écart temporel entre le son direct et la première réflexion) augmente la sensation de clarté. De même, des écarts entre les réflexions (ce qu'ils appellent IG pour *Interspike Gap* mesurés en ms) influencent la clarté perçue : si les IG augmentent, cela laisse le temps au système auditif de se relâcher pour mieux percevoir et discriminer les réflexions suivantes. Le flou est réduit et le « message sonore » est mieux perçu. Cependant, au-delà d'une valeur optimum, l'impression de clarté est réduite par un accroissement de la largeur des réflexions. Afin de favoriser la clarté, une valeur optimum de l'ITD est, selon eux, de 20 ms. Enfin, le niveau crête des réflexions a aussi une influence sur la clarté perçue : de fortes réflexions induisent un plus grand masquage des suivantes et donc une détérioration de la discrimination temporelle de ces dernières.

#### **II.D.5. Influence sur le timbre de la source**

Le timbre d'un son (ou d'un instrument) est une notion complexe mélangeant des propriétés spectrales, temporelles et spatiales. C'est ce qui est généralement considéré comme élément permettant de distinguer deux sons qui auraient un niveau, une durée et une hauteur tonale identiques. Lorsqu'un son se propage dans un espace réverbérant, les réflexions générées au contact des parois vont se mélanger au son direct et créer un filtrage

en peigne, pouvant être interprété par l'auditeur comme une « coloration » du son direct, à savoir une modification de certaines de ses caractéristiques, et particulièrement un changement de son timbre. Le sensation de coloration de timbre est principalement causée par les réflexions arrivant dans les 20 premières millisecondes après le son direct [30]. Dans le cas d'une unique réflexion, la coloration perçue est dépendante de la direction de la réflexion: une réflexion latérale par rapport à la source induit moins de coloration qu'une réflexion suivant la direction de la source [31].

## II.E. Réflexions précoces et sensation d'espace

### II.E.1. Résultats issus de critères objectifs

*« L'impression spatiale correspond à la différence entre se sentir dans la musique et la regarder, comme à travers une fenêtre »<sup>8</sup>*

Les premières réflexions ont également des effets perceptifs qui ne dépendent pas de la source et n'influent pas directement sur elle. Selon leur distribution temporelle et énergétique, elles peuvent donner des informations spatiales sur la largeur de la pièce, participer à une sensation d'enveloppement (souvent considérée comme agréable) ou générer des échos plus gênants. Ces informations, dont certains des effets peuvent être regroupés sous le terme d'impression spatiale ont été étudiées par Barron [32] qui propose une synthèse des effets des premières réflexions selon leur délai et leur intensité relative par rapport à la source. Son étude porte notamment sur le cas d'une réflexion unique d'azimut de 40° par rapport à une source frontale. Ses résultats sont présentés en Figure 17 [32].

---

<sup>8</sup> Traduit de : « The sensation of spatial impression corresponds to the difference between feeling inside the music and looking at it, as through a window », citation du manager du Concertgebouw Orchestra of Amsterdam, rapportée par Barron par exemple dans [32] BARRON, M. (1971). "The subjective effects of first. reflections in concert halls - The need for lateral reflections". Journal of Sound and Vibration 15, 475-494.

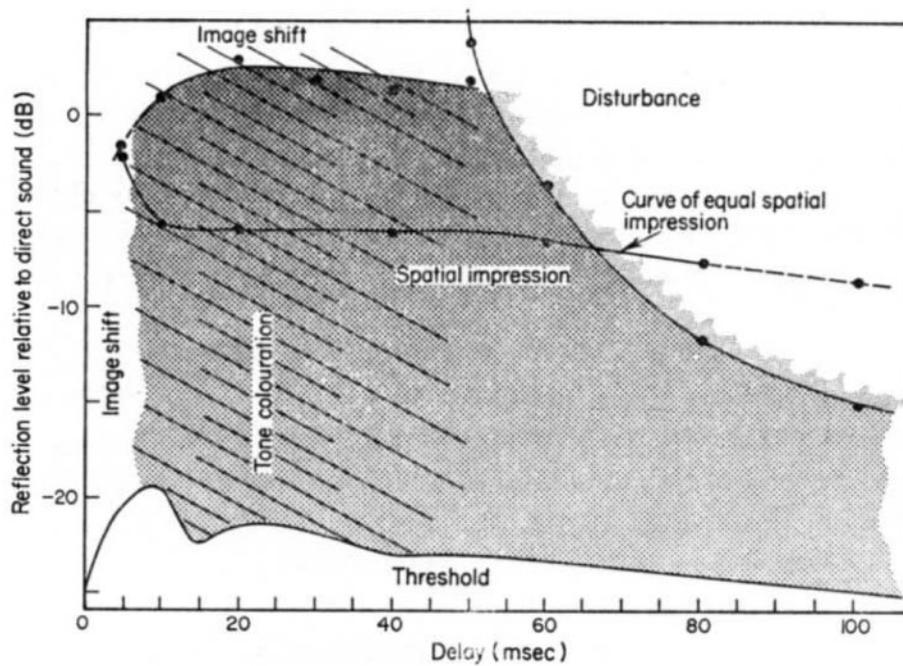


Figure 17 : Effets perceptifs d'une unique réflexion d'azimut de 40° selon le délai et le l'intensité relative par rapport à la source.

Par la suite, Barron s'intéresse à l'influence de la provenance des réflexions précoces [25] et propose, une classification des effets des réflexions précoces selon leur délai et leur provenance, retranscrite en Figure 18.

Délai (ms)	Reflexion frontale	Reflexion latérale
0	Augmentation du niveau de la source	Taille apparente de l'image, glissement de l'image
5	Coloration tonale de la source	Taille apparente de l'image, glissement de l'image
10-20	Coloration tonale de la source	Coloration tonale
30-60	Coloration tonale de la source	Impression spatiale
>80	Écho gênant	Echo gênant

Figure 18 : Effets perceptifs des réflexions précoces selon leur délai et leur provenance spatiale

Dans leurs études, Barron et Marshall utilisent principalement les critères objectifs de corrélation croisée interaurale (ou **IACC** pour InterAural Cross-Corrélation, voir Annexe B) et d'efficacité latérale (**LF** pour Lateral Fraction) dont ils extraient des corrélations avec les observations perceptives liées à l'impression d'espace : selon eux, un résultat généralisable est que l'impression d'espace est augmentée pour des fortes valeurs de IACC et de LF. Cependant, dans les années 1990, la question d'évaluer les meilleurs critères objectifs pour mesurer ces effets perceptifs était toujours ouverte. En 1993, Soulodre a notamment pu démontrer qu'aucun des deux critères (IACC et LF) ne pouvait suffire à expliquer les résultats recueillis dans les tests perceptifs [33]. En 1994, Bradley a publié une comparaison exhaustive de mesures de ces deux critères pour 80 emplacements dans 10 salles différentes et sur 6 bandes d'octaves de 125 Hz à 4 kHz, montrant que les deux critères divergent dans les hautes fréquences tandis que dans les basses fréquences seulement la LF varie significativement [34].

## **II.E.2. La sensation d'espace et le système auditif humain**

Ainsi, au courant des années 1990, les chercheurs ont tenté de trouver des manières nouvelles de comprendre et de décrire l'impression spatiale. Dans cette direction, David Griesinger proposa des critères objectifs définis à partir du fonctionnement du système auditif humain.

### **a) La localisation par le système auditif humain**

L'oreille humaine détermine l'azimut des sources principalement par les différences d'amplitudes et de temps (différences de phase dans les basses fréquences, différences d'enveloppes dans les hautes) entre les ondes acoustiques arrivant aux deux tympans. La détermination de l'élévation ainsi que la discrimination avant / arrière se font quant à elles par analyse des différences spectrales induites par l'effet d'ombre acoustique de la tête et des structures fines des oreilles (filtres HRFT, voir section II.A.3). Les signaux sonores arrivant

aux deux tympans sont traités par les membranes basilaires dont le rôle premier est la séparation du signal selon la fréquence (décomposition tonotopique du spectre). Lorsqu'un son arrive au tympan et que la membrane basilaire est sollicitée par une fréquence, toute une bande de fréquences autour de celle-ci voit son seuil de perception altéré. On parle de bande critique et on estime leur nombre à 24, de largeur variable (environ 1/3 d'octave pour les fréquences moyennes et aiguës et plus large pour les graves), et dont la fréquence centrale s'adapte au signal arrivant. Les variations de pression acoustique sont transformées en impulsions neuronales. Afin d'analyser le signal, les détecteurs de niveau effectuent une intégration à court terme de la pression acoustique dans les bandes critiques. Les détecteurs d'attaque sont divisés en deux catégories :

- Dans les basses fréquences, ils suivent la phase du signal arrivant et se déclenchent à une valeur donnée de la phase du signal ;
- Dans les fréquences médiums et aiguës, ils détectent les variations rapides de l'enveloppe du signal.

Les signaux neuronaux sont ensuite traités aux niveaux supérieurs. A chaque nouvel évènement sonore détecté par déclenchement simultané des détecteurs d'attaque des différentes bandes critiques, les informations arrivant aux deux oreilles sont évaluées. Pour chaque bande critique, la comparaison des niveaux entre les deux oreilles et la comparaison des temps de déclenchement relatifs des détecteurs d'attaque donnent au cerveau les informations nécessaires à la détermination de la localisation de la source. À partir d'elles, le cerveau va déterminer la localisation la plus probable (cette détermination sera aussi influencée par d'autres informations, comme la connaissance préalable de l'espace).

### **b) Localisation et impression d'espace**

Nous avons vu comment le système auditif permet la localisation d'un son unique, mais la tâche est rendue plus complexe en présence de réflexions. Dans le cas d'un son pur arrivant aux oreilles, une réplique de ce dernier mais arrivant à une oreille décalée d'un multiple de la demi-période de l'onde acoustique annulerait totalement la pression acoustique à

cette oreille, tandis qu'elle pourrait doubler à l'autre par jeu d'interférences. De manière générale, toute réflexion se mélangeant au son direct entraîne des interférences « constructives » (lorsque le niveau sonore augmente) ou « destructives » (lorsqu'il diminue). Selon Griesinger, pour un signal variant dans le temps et en présence de multiples réflexions, les interférences résultantes, modifiant dans ce cas encore davantage les signaux reçus par les tympans, induisent une fluctuation de la localisation apparente de la source autour d'une position moyenne [35]. L'oreille effectuant un jugement complexe et robuste face aux interférences (même relativement importantes), cette fluctuation influence peu la localisation précise de la source mais provoque plutôt une augmentation de sa largeur apparente. Afin de qualifier ce phénomène, Griesinger traduit cette fluctuation apparente de la position la source par la notion de *pseudo-angle*, dont la variabilité temporelle détermine la largeur apparente de la source et donne un indicateur de l'impression d'espace. De plus, il détaille les variations du pseudo-angle selon les bandes fréquentielles :

- Dans les basses fréquences, ce sont les variations du pseudo-angle de temps qui sont prédominantes sur la perception. Le pseudo-angle de phase (PAT pour PseudoAngle of Timing) est calculé de la manière suivante :  $PAT = 2 \cdot \arcsin(ITD/0.75ms)$  ;
- Dans les hautes fréquences, ce sont les variations du pseudo-angle de niveau qui sont prédominantes sur la perception. Le pseudo-angle de niveau (PAL pour *PseudoAngle of Level*) est calculé de la manière suivante:  $PAL = 2 \cdot \arctan(I_{left}/I_{right}) - \pi/2$  .

La pertinence de ce critère peut être évaluée par comparaison avec les critères plus anciens comme l'IACC. Globalement, et pour des sons complexes, les deux critères donnent des résultats similaires, mais l'avantage du pseudo-angle est qu'il prend mieux en compte les capacités de localisation dans les basses fréquences, là où l'IACC, en convergeant vers 1 à mesure que l'on descend en fréquence (les différences interaurales d'amplitudes devenant négligeables lorsque les longueurs d'onde sont très grandes), suggère que celles-ci ont peu d'influence sur l'impression d'espace et la largeur apparente des sources, ce qui est contredit par les mesures expérimentales [25][36]. De par sa pertinence expérimentale, le

pseudo-angle permet ainsi d'étendre la compréhension de la localisation et de l'impression d'espace à tout le spectre audible.

De son étude [35], Griesinger détaille une série de conclusions sur l'effet des réflexions précoces sur l'impression d'espace et les capacités de localisation.

#### Conclusions sur la localisation :

- La localisation des réflexions latérales est impossible si leur niveau est de 3 dB ou plus en dessous du son direct, et reste très difficile même à moins de 3 dB en dessous du son direct ;
- Les réflexions latérales n'altèrent pas l'intelligibilité du son direct tandis que les réflexions frontales donnent un effet de coloration et peuvent nuire à l'intelligibilité.

#### Conclusions sur l'impression d'espace :

- L'impression d'espace est favorisée par les réflexions arrivant 10 ms après le son direct ;
- Dans les basses fréquences, une impression d'espace significative nécessite un délai d'au moins 50 ms ;
- Pour contribuer à l'impression d'espace, les réflexions ne doivent pas avoir un niveau inférieur à -20 dB relativement à celui du son direct. Un niveau de -10 dB augmente significativement la sensation d'espace.

Pour Griesinger, il n'y a pas d'angle optimal pour une réflexion si on veut maximiser l'impression d'espace. En effet, considérant que l'impression d'espace correspond à une capacité de localisation perturbée et sachant que l'effet d'une forte réflexion dépend de la fréquence, les réflexions assurant la meilleure impression d'espace sont les réflexions latérales diffuses.

### II.E.3. Influence sur la sensation d'enveloppement

En situation de concert, la localisation et la précision ne sont pas nécessairement les premiers critères pour évaluer l'acoustique d'une salle. Certaines études [25, 37] montrent par exemple que les auditeurs préfèrent généralement une localisation moins nette au profit d'une légère sensation de flou et d'enveloppement. En effet, les auditeurs ne recherchent pas de manière absolue l'intelligibilité de la musique tandis que dans le cas de la parole (ou du chant dans une certaine mesure), l'intelligibilité est très importante. Dans le cas de la musique instrumentale néanmoins (et cela dépend également des instruments et de l'écriture), les auditeurs ont tendance à préférer une sensation d'immersion ou d'enveloppement. Il est donc important que le son vienne d'autant de directions que possible afin que l'auditeur se sente *au milieu* de la musique, la localisation étant assurée par l'effet de précedence.

Des études ont montré que la sensation d'enveloppement (à laquelle est attachée le critère LEV pour *Listener Envelopment*) est principalement influencée par la réverbération tardive [38, 39], et en particulier que l'IACC calculé à partir de la partie ultérieure à 80 ms de la réponse impulsionnelle correspondait bien à la sensation d'enveloppement perçue. Le rôle des réflexions précoces n'est cependant pas négligeable, et les réflexions latérales ainsi que celles provenant du haut ont une influence sur la sensation d'enveloppement [40]. Par ailleurs, Barron a montré que les réflexions chargées en basses fréquences étaient plus susceptibles de participer à la sensation d'enveloppement que celles centrées autour de 1 kHz (qui provoquent plutôt un élargissement des sources) ou que celles riches en fréquences au-dessus de 4 kHz (provoquant plutôt une perturbation de la localisation) [25].

## II.F. Perception du champ diffus

Le champ diffus, ou queue de réverbération, est la partie tardive de la réverbération, qui se développe comme le mélange des multiples réflexions qui se sont accumulées au point de constituer un champ acoustique homogène (ou approximé comme tel dans la littérature). En faisant abstraction des réflexions précoces qui sont par nature dépendantes de la source sonore, le champ diffus est une propriété acoustique de la salle. Si on fait abstraction des modes fréquentiels qui induisent des irrégularités dans le champ acoustique de la salle, le champ diffus est indépendant de la position d'écoute et se caractérise principalement par sa balance tonale ainsi que par l'allure de sa décroissance. La perception du champ diffus donne des informations spatiales à l'auditeur, en termes de volume et de distance à la source (caractérisée par le ratio entre l'intensité du son direct et celle du son réverbéré ainsi que par l'atténuation du son direct en hautes fréquences), et contribue à la sensation d'enveloppement (notamment à ce que Griesinger nomme BSI pour *Background Spatial Impression* [41]).

La représentation graphique du champ diffus d'une salle se fait généralement en cascade (*waterfall* en anglais), qui relie fréquences, temps, et amplitude. Une telle représentation permet rapidement de se représenter le temps de réverbération ainsi que sa « couleur » (s'il y a prédominance des graves ou des aigus, ou d'une bande fréquentielle en particulier). Un exemple de représentation en cascade est donné en Figure 19 où l'on peut voir les trois dimensions représentées : temps dans l'axe horizontal, niveau dans l'axe vertical et fréquences en profondeur.

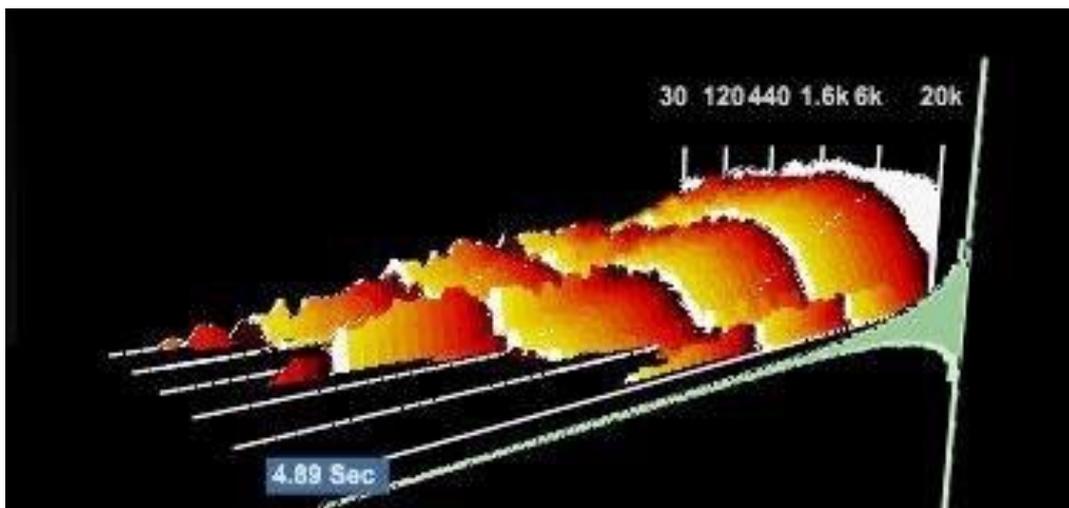


Figure 19 : Représentation graphique en cascade (Waterfall) d'une réponse impulsionnelle. Tirée d'Opera House d'Altiverb 7®

## II.G. Conclusion de la partie II

Après avoir donné quelques rappels d'acoustique en partie I, nous avons en partie II fait un état de l'art des connaissances en matière de perception du son direct, des premières réflexions ainsi que du champ diffus selon de multiples critères : impression d'espace, modification de la largeur apparente et discrimination de la position des sources, coloration tonale ou encore sensation d'éloignement... Les implications perceptives du champ réverbéré sont donc multiples, intriquées et certaines demeurent encore mal connues. Cependant, l'ingénieur du son qui cherche à créer un espace sonore virtuel doit composer avec les outils qui lui sont proposés, outils de réverbération dont les origines remontent aussi loin que celle des outils d'enregistrement et de restitution sonore.

Comme nous allons le voir dans les sections suivantes, les outils de réverbération sont donc issus des connaissances scientifiques en matière de perception, des innovations technologiques, mais aussi des codes esthétiques propre à l'objet musical, ici la musique classique, ayant ses codes esthétiques particuliers et notamment en termes de prise de son et de post-production.

### **III. Le mixage en musique classique : problématiques de la réverbération**

Dans cette partie, et afin de bien comprendre les enjeux propres aux premières réflexions en musique classique, un retour historique sur l'écoute de la musique classique, liée aux évolutions du genre musical et accompagnée par des changements dans la conception acoustique des salles de concert est proposé. Enfin, les problématiques liés à la production de musique classique sont explicitées, de la prise de son à la restitution en passant par le mixage. Ces notions ont vocation à permettre au lecteur de comprendre les implications réelles des premières réflexions de réverbération sur la production de la musique classique avant de passer dans une partie ultérieure à la question spécifique des moteurs de réverbération artificielle.

#### **III.A. Bref historique de l'écoute de la musique classique**

La musique, au sens large d'expression sonore s'est développée dès la préhistoire comme pratique sociale et sacrée, au centre de rituels permettant de communiquer les dieux et les esprits et d'influer sur les phénomènes naturels alors inexplicables par les connaissances scientifiques. Le préhistorien Michel Dauvois [42] démontra que les peintures rupestres découvertes dans trois grottes d'Ariège étaient concentrées dans des zones particulièrement réverbérantes, indiquant la probable association de ces oeuvres picturales à des rites sonores. On peut également mentionner le rôle des cloches d'églises chrétiennes, qui avaient également pour vertu supposée d'éloigner les intempéries [43]. Avec l'avènement des monothéismes et du christianisme en particulier, la musique prend une dimension religieuse et se pratique dans les églises sous forme de chants liturgiques. La musique est alors principalement chantée, et les édifices religieux ont pour vertu de sublimer ces voix par leur effet réverbérant. Les instruments de musique apparaissent dans le cadre religieux à la Renaissance et se développent également dans un cadre profane avec les troubadours. Deux pratiques se distinguent alors : la musique religieuse

indissociable des rituels d'un côté, et la musique au caractère profane qui est jouée hors des cadres religieux, comme la musique de chambre chez les nobles. Avec l'invention de l'opéra au début du XVII<sup>e</sup> siècle, la musique est rendue plus accessible et se développe davantage hors des cadres des rituels religieux. Des salles dédiées à la représentation des œuvres musicales écrites sont construites et permettent la popularisation de la musique « savante ». Avant les développements technologiques permettant l'enregistrement, la musique classique est donc interprétée dans des lieux dédiés et son écoute demeure un acte collectif à diverses échelles : de la musique de chambre, privée, aux Opéras et auditoriums pouvant accueillir des centaines de personnes.

Le développement de l'enregistrement et de la restitution sonore à la fin du XIX<sup>e</sup> et durant tout le XX<sup>e</sup> siècle permettent l'avènement de l'écoute individuelle de la musique classique, d'abord limitée à un usage domestique puis à partir des années 1980 à l'écoute mobile (invention du Walkman par Sony en 1979).

L'écoute de la musique classique, qui a donc une histoire ancienne et ses propres codes, a évolué en particulier au XX<sup>e</sup> avec les innovations technologiques qui ont abouti aux développements d'outils permettant une grande qualité d'enregistrement et de diffusion, ainsi qu'une démocratisation quasiment universelle de l'écoute individuelle et mobile.

## **III.B. Esthétique sonore de la musique classique**

Cette section développe les enjeux esthétiques propres à la musique classique prise dans une définition large puisque sont évoqués les courants baroque, classique et romantique, mais aussi la musique ancienne et la musique classique moderne. Rentrer dans le détail des spécificités musicales de chacun de ces courants n'est pas tant le propos que de comprendre les intrications entre musique et acoustique, en particulier vis à vis de l'énergie précoce de réverbération des salles de concert.

### **III.B.1. Architecture, acoustique et périodes musicales**

*Les informations présentées dans cette section sont en partie tirées de l'ouvrage Concert Halls and Opera House : music, acoustics, and architecture, 2ème édition de Leo Leroy Bernanek, publiée en 2004 d'après l'ouvrage initial publié en 1994 [28].*

#### **III.B.1.a) Qu'est-ce qui fait une bonne acoustique ?**

L'acoustique d'une salle, est l'ensemble de ses caractéristiques physiques constituant la manière dont le champ acoustique provenant de la scène et réverbéré sur les parois évolue sous l'impulsion des sources sonores qui y émettent des sons. On parle souvent de « bonne » ou de « mauvaise » acoustique en ce que, selon le répertoire musical qui y est interprété, chaque salle pourra être considérée comme bien adaptée et donner aux musiciens ainsi qu'aux spectateur une sensation d'écoute agréable. L'appréciation de l'acoustique d'une salle, dont la réverbération est l'élément central, peut être subjective en ce qu'elle peut varier selon les goûts des individus et surtout selon la musique qui est jouée. Néanmoins, l'acoustique des salle a une histoire, et l'évolution qu'elle a connu depuis les premières représentations musicales est intimement liée à celle des courants musicaux et du développement des formations instrumentales. De plus, il est possible de tenter d'évaluer l'acoustique d'une salle à l'aide de paramètres objectifs et de mesures perceptives afin de pouvoir la comparer à d'autres (comme nous l'avons vu dans la partie précédente).

Bien qu'un langage précis soit nécessaire pour comprendre et évaluer l'acoustique des salles, la majorité des musiciens tombent généralement d'accord pour ce qui est de définir ce qui fait une bonne acoustique : la salle doit être extrêmement silencieuse afin que les passages les plus doux (les *pianissimo*) soient clairement audibles, elle doit être suffisamment réverbérante pour accompagner les lignes mélodiques et les crescendos et assez claire pour ne pas créer de confusion lors de changements rapides. Le son doit y être ample, spatial, large, et les basses fréquences doivent s'y propager avec puissance, et il ne doit pas y avoir d'échos qui brouilleraient l'écoute. Enfin, l'acoustique de la salle doit être aussi homogène que possible pour que chaque spectateur puisse profiter de ses qualités quelque soit son siège. Le principal critère d'une acoustique est le temps de réverbération pour ce qu'il affecte directement la capacité des musiciens à fournir la clarté, la balance tonale et le phrasé en cohérence avec l'interprétation des intentions du compositeur.

### **III.B.1.b) L'acoustique des salles et les périodes musicales**

Si lors d'un concert les chefs d'orchestre et les musiciens font face au besoin de tirer le meilleur parti d'une acoustique donnée pour valoriser leur interprétation tout en s'y adaptant, les compositeurs écrivent leurs pièces avec une acoustique particulière à l'esprit. Celle-ci, bien qu'elle puisse varier d'un compositeur à l'autre, est influencée par les tendances de son époque, et chaque grande période musicale se distingue également par un certain nombre de caractéristiques portant sur l'acoustique des salles de concert.

#### **(1) La période baroque**

Malgré la diversité des oeuvres musicales écrites entre 1600 (premier opéra en 1607 avec l'Orpheo de Monteverdi) et 1750 (année de la mort de J. S. Bach, consacrant la fin de l'ère musicale), le terme *Baroque* exprime le style musicale de cette période, basée sur le contrepoint, la richesse harmonique, les ornements et de nombreux contrastes, ainsi que sur la dualité opérée par l'opposition entre soliste et orchestre. Cette période musicale fut le témoin d'une évolution des formes musicales depuis des chœurs non accompagnés vers des formes instrumentales riches tirant parti des contrastes entre les timbres instrumentaux.

Cette diversité d'écritures musicales, allant de la musique de chambre à l'opéra, se développa concomitamment à la fréquentation d'espaces acoustiques aux caractéristiques divergentes : d'un côté les espaces très réverbérants et de l'autre les espaces aux acoustiques plus définies et moins amples, favorisant l'intimité. La tendance esthétique à l'intimité favorisa l'appréciation des acoustiques sèches, procurées par des salles de bal à géométries rectangulaires ou de petits théâtres, aux parois relativement réfléchissantes, procurant une richesse de l'énergie précoce mais assurant un temps de réverbération court (autour de 1.5 secondes). L'influence de la musique sacrée et de la Renaissance s'étant développée dans des espaces très réverbérants comme des chapelles et des églises, le public habitué à cette esthétique continuait de fréquenter ces espaces adaptés aux chorales. Cependant, une grande partie de la musique sacrée composée à la période baroque l'était pour des chapelles aux temps de réverbération plus courts, à l'instar des fugues de Bach aux tempos rapides. Parallèlement, cette période vit l'émergence des églises luthériennes, moins réverbérantes que les églises et cathédrales médiévales. À ce propos, Hope Bagenal, architecte acousticien anglais du XX<sup>e</sup> siècle écrit:

*« Le temps de réverbération réduit des églises luthériennes de par les galeries intérieures, permettant aux parties de cordes d'être distinguées et permettant des tempos rapides fut la chose la plus importante de l'histoire de la musique, car elle mena directement à la Passion selon saint Matthieu et à la Messe en si mineur.<sup>9</sup>»*

---

<sup>9</sup> Traduit de l'anglais: « *The reducing of reverberation in Lutheran churches by the inserted galleries, thus enabling string parts to be heard and distinguished and allowing a brisk tempo was the most important single fact in the history of music because it lead directly to the St. Matthew Passion and the B-Minor Mass* ».

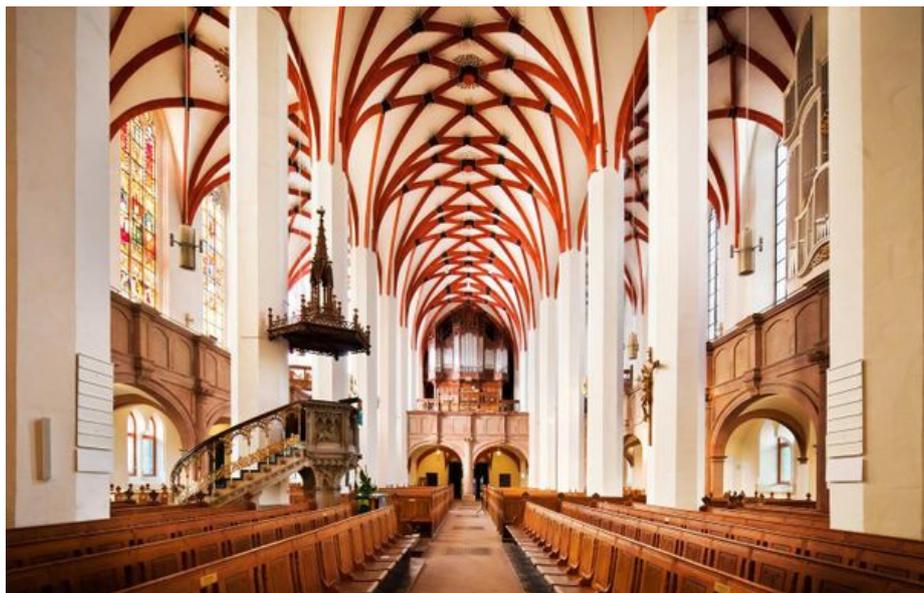


Figure 20 : Intérieur de l'église Saint-Thomas à Leipzig, où J. S. Bach fut maître de chapelle de 1723 à 1750, période durant laquelle il composa la majeure partie de ses oeuvres sacrées. Le temps de réverbération varie entre 1.6 s et 2 s selon l'affluence, ce qui est court pour de la musique chorale appuyée d'orgue.

## (2) La période classique

À la mort de Bach en 1750, la période baroque laisse place à la période classique, représentée par des compositeurs emblématiques tels que Haydn, Mozart et Beethoven. Communément datée entre 1750 et 1820 (bien que cette frontière temporelle fasse débat), elle vu l'accroissement d'un intérêt séculier pour la musique et renouvela le discours des compositeurs, dont l'influence fut accrue grâce à la démocratisation de leur musique vers le grand public. L'utilisation du contrepoint diminua au profit d'écritures de mélodies accompagnées par des harmonies, très utilisées dans les opéras. Délaissant la clarté et la vivacité propres aux compositions de Bach, les compositeurs s'orientèrent vers des écritures pour pupitres et masses orchestrales, résultant en un son plus ample et plus profond, typiques des symphonies classiques.

La musique se démocratisant, les audiences s'élargirent et les concerts furent donnés dans des salles plus grandes qu'auparavant. Progressivement, et avec l'attrait grandissant des musiques orchestrales, l'on construit les premières salles spécifiquement dédiées aux

concerts, dont l'acoustique proposait des temps de réverbération plus longs. Par exemple, le Boston Music Hall (Figure 21), construit en 1852, au temps de réverbération de 1.8 secondes, pouvait accueillir 2400 personnes. Les salles de cette époque gardaient une forme rectangulaire typique de l'époque baroque mais ayant un temps de réverbération plus long, elle permettaient de maintenir une bonne clarté (grâce aux réflexions précoces issues des parois latérales) tout en procurant une réverbération profonde et pleine (fournie dans tout le spectre) adaptée au lignes orchestrales pré-romantiques.



Figure 21 : *Le Boston Symphony Hall. Construit en 1852 avec une architecture typique de la période classique*

### **(3) La période romantique**

La période romantique, qui est communément délimitée entre 1820 et le début du XX<sup>e</sup> siècle, voit se développer un répertoire orchestral très varié, d'effectif grandissant et de compositions instrumentales diversifiées. La musique romantique propose tantôt des mélodies supportées par des harmonies orchestrales complexes, tantôt des multitudes de lignes mélodiques entrelacées dans des matières sonores expressives et organiques. Du point de vue acoustique, la musique romantique se développe dans des réverbérations pleines et peu définies, se traduisant par des temps de réverbération autour de 2 secondes peu chargées en énergie précoce arrivant directement de l'orchestre ou de parois adjacentes. Par exemple, le Concertgebouw d'Amsterdam (Figure 22), construit en 1887, a

un temps de réverbération de 2.0 secondes dans les fréquences médiums et sa largeur limite l'impact des réflexions précoces. Ainsi la musique se développe dans une réverbération modérément définie et riche dans l'ensemble du spectre, en faisant une salle très bien adaptée à la musique écrite à la fin du XIXe siècle. .



Figure 22 : *Le Concertgebouw d'Amsterdam*

#### **(4) La période moderne**

La fréquentation des salles de concert s'est véritablement établie et démocratisée à partir des années 1820, et s'est développée à travers le monde, en Europe, en Amérique de Nord et plus récemment au Japon où plus de 80 salles de concert ont été construites depuis la seconde guerre mondiale. Le défi des salles de concert du XXe siècle fut de proposer une variété d'acoustiques propre à s'adapter aux nouvelles esthétiques portées par de nouveaux instruments acoustiques et le développement des instruments électroniques. Ainsi, l'esthétique « acoustique » (en terme de réverbération) de la période moderne n'est pas uniforme et se disperse du besoin d'intimité à la recherche d'acoustiques très riches et réverbérantes. Des expérimentations de salles à l'acoustique modifiables ont été tentées : rideaux rétractables, panneaux modulaires, plafond mobile, etc. Un exemple est le studio

106 de la Maison de Radio France, dont les parois latérales sont constituées de panneaux à deux faces (une réfléchissante et une absorbante) que l'on peut retourner pour moduler entre une acoustique réverbérante et une plus matte.



Figure 23 : Le studio 106 de la Maison de Radio France

### **III.B.2. Les préférences des auditeurs**

Comme nous l'avons vu, il est difficile de catégoriser de manière absolue les acoustiques et les préférences des auditeurs. Ces dernières varient à l'échelle inter-individuelle mais aussi selon la musique en question et le courant musical dans lequel elle s'inscrit, ainsi que sur les modes esthétiques qui varient dans le temps, donnant des oeuvres des relectures auxquelles le public s'habitue. On l'a vu (voir la section II.B.1), les compromis à faire sont nombreux entre précision, intelligibilité, enveloppement, temps de réverbération, clarté, etc... De manière globale, les auditeurs préfèrent des espaces réverbérants procurant une forte sensation d'enveloppement. Lors de la construction d'une salle, un des objectifs est de réaliser une acoustique qui donne aux auditeurs la meilleure sensation d'espace tout en préservant un minimum d'intelligibilité. M. Barron, qui a procédé à l'évaluation subjective de onze salles de concert britanniques [44, 45], classe les auditeurs en deux catégories

selon leur *minimum* d'intelligibilité acceptable. Certains préfèrent se sentir enveloppés par le son tandis que d'autres favorisent une bonne intelligibilité et donc une bonne séparation entre le son direct issu de l'orchestre et la réverbération de la salle (en particulier l'énergie précoce).

### **III.B.3. Problématiques spécifiques des premières réflexions dans les salles de concert**

De nombreuses études citées dans les sections II.B à II.E ont étayé l'importance des premières réflexions sur la perception via un certain nombre de critères subjectifs plus ou moins quantifiables tels que la clarté, la proximité, la largeur des sources ou l'enveloppement. Tous ces critères entrent en ligne de compte lors du jugement de l'acoustique d'une salle de concert dans des proportions mouvantes selon de nombreux autres critères subjectifs (quelle est notre préférence individuelle ?) et culturels (l'acoustique est-elle adaptée au répertoire interprété ?). Comme on l'a vu, l'importance donnée aux premières réflexions a évolué au cours du développement de salles de concert et des périodes esthétiques. Il n'en reste pas moins que l'on peut tenter de condenser ici les apports des premières réflexions sur le jugement subjectifs des auditeurs dans le cadre de concerts de musique classique:

L'**impression spatiale** a été montrée (notamment par Barron [32]) comme très dépendante des premières réflexions. Le critère le plus important semble être le niveau des réflexions et que leur délai influe peu sur l'impression spatiale sur un intervalle entre 10 et 80 ms. Concernant leur provenance, les réflexions venant du plafond ont un impact plutôt négatif sur l'impression spatiale.

Lors de tests subjectifs utilisant une unique réflexion latérale (d'azimut 60°) délayée de 35 ms et de niveau variable, Reichard et Schmidt [46] ont pu tracer graphiquement la relation entre l'impression spatiale et le ratio entre le niveau de la réflexion et celui du son direct. Ils trouvent une corrélation forte entre les deux, comme l'illustre la Figure 24 :

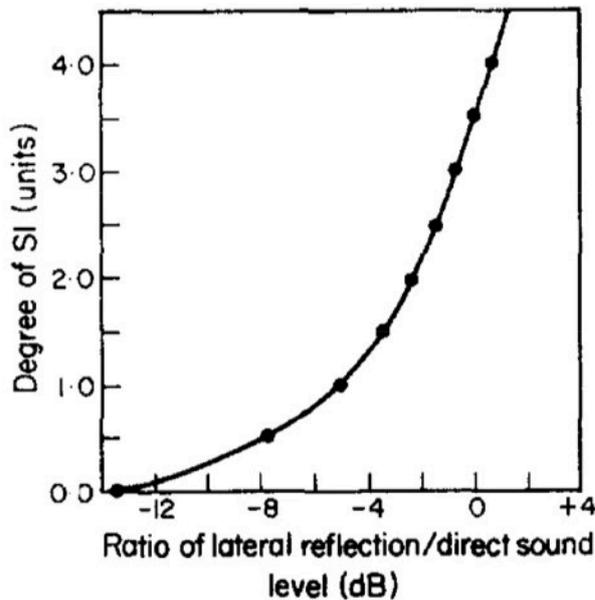


Figure 24 : Courbe du degré d'impression spatiale (SI) en fonction du ratio de niveaux réflexion/son direct, pour une réflexion unique d'azimut de 60° et délayée de 35 ms.

Se basant sur son expérience personnelle d'écoute dans les salles de concert, Marshall explique qu'il existe une qualité acoustique subjective présente dans les salles rectangulaires et absente des salles ovales aux plafonds bas [47, 48]. Selon lui, cette « réactivité spatiale<sup>10</sup> » est liée à la présence de réflexions latérales non masquées et donc à la mesure du ratio de section croisée<sup>11</sup> (ratio entre la largeur et la hauteur de la salle), les bonnes acoustiques étant celles de salles ayant un ratio de section croisée faible (largeur faible devant la hauteur).

Dans ses recherches sur l'acoustiques des salles de concert [28], Bernanek présente l'**ITD** (pour *Initial Time Delay*, soit le temps passé entre l'arrivée du son direct et la première réflexion) comme critère principal pour la qualité de l'acoustique d'une salle de concert, plus encore que le temps de réverbération. Il relie ce paramètre à la sensation d'intimité, et propose la valeur de 20 ms comme optimale. Barron critique cependant ces résultats : selon ses observations, nous sommes peu sensibles aux variations de l'ITD comparativement à notre sensibilité au niveau des réflexions. Il nuance néanmoins

<sup>10</sup> Pour *Spatial Responsiveness*

<sup>11</sup> Pour *Cross Section Ratio*

expliquant que cela dépend de la direction de la première réflexion : si elle vient des parois latérales avec un ITD court, elle contribuera fortement à l'augmentation de l'impression spatiale tandis que venant du plafond elle n'aura pas de tel effet.

Enfin, Griesinger [49] explique que les réflexions contribuent à la **sensation d'enveloppement** mais que celle-ci est fonction de la nature de la source sonore. Pour une source fréquemment large, l'énergie latérale précoces provoque des fluctuations de la différence de temps interaurale (voir section II.E.2.b) pour la définition du pseudo-angle) pouvant induire un glissement de la source pour des fluctuations modulées en dessous de 3 Hz. Pour une modulation fréquente au delà de 3 Hz, ces fluctuations participent à la sensation d'enveloppement. Si la source contient des attaques rapides, les réflexions ne nuisent pas à la perception du son direct (permettant une bonne localisation et une fidélité du timbre) mais participent d'une sensation d'enveloppement.

### **III.C. Du concert à la prise de son et au mixage - Cadre esthétique**

#### **général**

La production musicale peut être définie comme le processus de création d'un objet sonore, allant de la prise de son à l'ensemble de la chaîne de post-production et à sa commercialisation. La production de la musique classique est particulière en ce qu'elle hérite d'une histoire multi-centenaire et donc de codes esthétiques particuliers, on oppose d'ailleurs souvent la musique classique aux musiques dites « actuelles », c'est-à-dire l'ensemble des genres musicaux qui se sont constitués avec les évolutions technologiques permises par l'amplification. N'étant plus tributaires de conditions acoustiques pour leur expression, les musiques actuelles sont faites de codes très différents de ceux encore en vigueur en musique classique, l'ensemble des maillons de la chaîne de production de la musique classique s'attachant globalement à restituer une impression d'acoustique naturelle, et cela ayant des conséquences sur les choix faits par les ingénieurs du son en matière de prise de son et de post-production.

Dans cette partie, nous expliciterons les enjeux spécifiques à la production de musique classique, de la prise de son vers le mixage et la restitution.

#### **III.C.1. La prise de son**

##### **a) Généralités**

La musique classique, comme nous l'avons vu, est un genre musical qui s'est développé dans et par les espaces acoustiques plus ou moins réverbérants, et dont l'évolution esthétique est indissociable de ces derniers. C'est bien là le défi du preneur de son en musique classique : comment, à l'aide de microphones aux caractéristiques et directivités multiples, permettre de rendre compte d'une masse sonore riche et complexe ? Les questions qui ont jalonné les évolutions techniques et l'amélioration des caractéristiques des matériels de prise de son ont été celles de la recherche de la meilleure fidélité et de la plus grande transparence, malgré les contraintes bien réelles de budget et de possibilités techniques. Le rôle du preneur de son en musique classique est particulièrement essentiel,

et cette assertion qui pourrait sembler un truisme prend sa signification en opposition à la prise de son de musiques actuelles où les possibilités offertes par le « re-recording »<sup>12</sup> permet au preneur de son de se focaliser principalement sur la richesse du timbre (bien que quelques dispositifs de multi-microphonie soient indispensables, pour la prise de son de batterie par exemple), tandis que le preneur de son de musique classique doit investir ses choix d'une contrainte supplémentaire, celle de la restitution spatiale de la scène sonore. En 2004, Colin Symes affirme [50] que « Dans les cercles de musique classique, [...] ils n'ont jamais abandonné l'idée que le concert était l'articulation ultime de la musique et que le phonographe devait s'y référer. Les modes de représentation de la musique classique sur disque qui ont abandonné cette référence au concert ont eu tendance, à de rares exceptions près, à être marginalisées<sup>13</sup>».

#### **b) Le dispositif couple microphonique et appoints**

Pour l'enregistrement de musique classique, l'option la plus répandue car considérée comme la plus transparente pour l'audition humaine, est de se baser sur un couple microphonique. Placés au point d'écoute optimal (généralement proche de la position du chef d'orchestre), deux microphones omnidirectionnels séparés d'une certaine distance<sup>14</sup>. De par leur directivité omnidirectionnelle et leur position favorisant une « vue d'ensemble » de l'orchestre, ils captent à la fois le son émis par les instruments et la réverbération de la salle. On trouve également souvent l'utilisation de dispositifs à trois microphones (le Decca Tree, du nom du label britannique de musique classique, constitué de trois capsules omnidirectionnelles [51]), extension du couple stéréophonique omnidirectionnel.

---

<sup>12</sup> Technique couramment utilisée en musiques actuelles, permettant d'enregistrer les musiciens les uns après les autres. L'assemblage des pistes se faisant dans un second temps.

<sup>13</sup> Traduit par Robin Rieuvonet dans son mémoire « Pertinence des traitements dynamiques pour l'écoute de la musique classique en environnement bruyant », ENS Louis Lumière, 2016

<sup>14</sup> L'étude des couples stéréophoniques a notamment été menée en détail par Mike Williams en 1989 et présentée dans son article *Unified Theory of Microphone Systems for Stereophonic Sound Recording* (82e Convention de l'AES).

Le couple stéréophonique présente donc les avantages de capter « l’empreinte acoustique » de la salle ainsi que la scène spatiale de l’orchestre mais également celui d’une économie de moyens (seulement deux microphones).

Cependant, si le couple stéréophonique peut suffire dans certaines conditions, il est généralement complété par des microphones « d’appoint » qui se focalisent sur des portions de l’orchestre, et ce pour deux raisons principales :

- Rajouter de la clarté et de la présence aux sources qui, selon l’esthétique voulue, pourraient en avoir besoin;
- Suivre les modulations de nuance des différents éléments « appointés », comme mettre en valeur une ligne mélodique d’un instrument particulier.

L’utilisation des microphones d’appoint ont donc pour vocation de fournir certaines informations sonores manquantes dans le couple stéréophonique principal, tout en donnant une certaine flexibilité en vue du mixage. Généralement, les microphones d’appoint sont directifs (il focalisent leur sensibilité dans une ou plusieurs directions spécifiques) et placés à proximité des musiciens. Il n’y a pas de règle à leur placement mais ils sont généralement placés sur chaque sous-ensemble orchestral (violons, altos, violoncelles, contrebasses, cuivres, bois, percussions, etc.), comme l’illustre la Figure 25 à la page suivante.

La difficulté de leur placement réside dans le compromis entre proximité et éloignement :

- Si on est trop proche du sous-ensemble ou de l’instrument appointé, on risque d’avoir un son agressif et déformant le son de l’instrument. (Les instruments acoustiques ne sont pas conçus pour être écouté en proximité, et leur directivité d’émission est conçue pour que le son se développe dans l’espace) ;
- Si on est trop loin, le microphone d’appoint captera trop de sons issus des autres instruments (phénomène de diaphonie ou de « reprise ») limitant ses possibilités d’insertion dans le mixage.

La perception de ces contraintes varie selon les ingénieurs du son et leurs approches respectives, mais la question du placement des microphones d'appoint demeure une problématique essentielle de la prise de son en musique classique.



Figure 25 : Photo d'enregistrement d'orchestre sur laquelle on peut voir des microphones d'appoint placés en haut des pieds de microphones. (Enregistrement dans l'auditorium de Radio France de la musique du film *Valérian* de Luc Besson, dirigée par Alexandre Desplat)

Le dispositif constitué du couple principal stéréophonique et des microphones d'appoint peut également être complété par des « ailes », microphones placés aux extrémités latérales de l'orchestre ou par des microphones dirigés vers les parois de la salle pour ne capter que le champ réverbéré. Quelque soit le nombre de microphones d'appoints utilisés pour la prise de son, la référence en matière d'image stéréophonique reste le couple principal.

### c) L'illusion de la transparence

Comme nous l'avons mentionné précédemment, une notion au coeur du processus de production de musique classique enregistrée est la fidélité, ou la transparence. Au coeur des choix opérés par les ingénieurs du son demeure l'idée de retranscrire une expression réaliste de l'espace acoustique. Cependant cette notion participe d'une tension esthétique : chaque placement de microphone est un choix fait au détriment d'autres possibilités et le résultat d'une prise de son peut être dans le meilleur des cas considéré comme optimal. Il est impossible de retranscrire la réalité, et ce pour plusieurs raisons :

- Aucun microphone n'est purement « neutre ». Chacun propose une version du champ acoustique capté par sa capsule qui lui est propre, en fonction de ses caractéristiques. Si certains ont une bande passante plus linéaire que d'autres, aucun n'est parfaitement transparent. Cet état de fait est bien accepté par les ingénieurs du son et ceux-ci choisissent bien souvent leurs microphones en fonction de la « coloration » qu'ils apportent (on peut penser aux microphones à lampe, plébiscités pour leur « chaleur » apportée par les distorsions harmoniques générées par la lampe) ;
- Aucun dispositif microphonique ne peut retranscrire fidèlement une scène spatiale. En effet, chaque type de couple de microphones est un compromis entre différents critères esthétiques (précision, largeur stéréophonique, stabilité des sources, etc...) mais aucun n'est parfait, et pour cause, le placement du couple principal est systématiquement ajusté en fonction de la scène sonore à enregistrer ;
- Les systèmes de restitution étant très variés, la perception d'une scène sonore proposée par un mixage sonnera différemment d'un système à un autre : casque, haut-parleurs de bureau, systèmes HI-FI... tous ont leurs caractéristiques (fréquentielles, dynamiques, stéréophoniques) qui sont autant d'altérations du mixage original ;
- Chaque individu a sa propre perception sonore. Il est donc impossible de proposer un mixage unique qui ait vocation à retranscrire une réalité universelle. Dans la pratique, un ingénieur du son proposera un mixage travaillé selon des critères subjectifs, issus de son expérience ainsi que de ses préférences personnelles.

### III.C.2. Le mixage de musique classique

La scène spatiale étant donnée par le couple principal, le travail de mixage dans ce genre musical ne consiste pas tant à créer un espace à partir de pistes pas ou peu spatialisées comme c'est le cas dans les musiques actuelles, qu'à améliorer celui déjà présent grâce au couple. Tout en gardant à l'esprit une exigence de réalisme, l'objectif est en grande partie de fusionner les appoints au mixage stéréo (ou multicanal, ce qui sera évoqué dans la section V.C). L'insertion des appoints passe généralement par des traitements de défauts de sources induits par le fait même de la captation de proximité :

- Une dynamique instantanée plus importante qu'elle ne serait à grande distance;
- Des résonances fréquentielles notamment dans les graves et les médiums;
- Une agressivité<sup>15</sup> excessive;

D'autre part, insérer un appoint signifie également le situer dans l'espace sonore. La scène spatiale étant donnée par le couple, chaque instrument ou sous-ensemble est plus ou moins précisément situé dans l'espace selon ses propres caractéristiques d'azimut et de profondeur / distance. Insérer l'appoint doit donc passer par une disposition spatiale de celui-ci, de manière à ce que sa localisation soit aussi proche que possible de celle perçue dans le couple, évitant ainsi des phénomènes de flous non maîtrisés. S'il n'y a pas de méthode unique pour replacer un appoint dans l'espace sonore, on peut toutefois en décrire la trame générale qui se fait en général en deux étapes :

1. Le réglage de son azimut (ou de son panoramique). Pour ce faire, la méthode la plus courante est le panoramique en  $\Delta I$ . Celui en  $\Delta t$ , qui consiste à appliquer des retards différents sur les deux canaux pour aligner leur phase sur les signaux issus du couple, est également utilisé.
2. La gestion de sa profondeur par ajout de réverbération artificielle.

---

<sup>15</sup> Prédominance des fréquences dans la bande [2 kHz, 4 kHz]

Revenons sur ce second point. Du fait de sa directivité, un microphone d'appoint ne capte pas la réverbération de la pièce mais seulement le son émis dans la zone qu'il pointe. De ce fait, le son issu d'un appoint est souvent considéré comme « sec »: il est très « frontal ». Pour le mélanger au couple principal, il ne suffit pas de lui donner une localisation droite/gauche, il faut aussi lui donner de la profondeur afin qu'il suive celle de la même source captée par le couple principal. De cette manière, la fusion peut opérer et il est plus aisé de moduler le volume de l'appoint sans risquer de perturber l'impression spatiale du mixage. La gestion de la profondeur peut se faire de nombreuses manières mais la plus plébiscitée est l'ajout de réverbération artificielle sur l'appoint. Cette question, qui est au coeur de ce mémoire car c'est là que sont travaillées les réflexions précoces, est traitée spécifiquement en partie V.

À la mise en scène globale intégrant les appoints et la gestion de leur niveau dans le temps, l'épate de mastering, qui est souvent mêlée au mixage (comme l'indique le mémoire de Mathilde Genas *Quel Mastering pour la musique classique?* [52]), consiste à traiter le bus master. À ce niveau, les traitements apportés sont donc globaux, dont voici les plus systématiques : suivi manuel du niveau afin de rehausser les niveaux trop faibles, contrôler la dynamique par des compresseurs classiques ou multi-bandes, égaliser le mixage global pour lui donner une coloration tonale particulière, ou encore éviter la saturation numérique avec un limiteur.

### **III.C.3. La restitution stéréophonique - un choix technique normalisé**

#### **a) Description**

Après plusieurs décennies de monophonie pure, la stéréophonie a été inventée dans les années 1930 avec pour but de rendre compte de l'espace sonore reproduit via la diffusion de deux canaux sur deux enceintes séparées. Il était alors imaginé qu'à condition d'un placement optimal de l'auditeur entre les enceintes<sup>16</sup> l'on puisse restituer parfaitement dans

---

<sup>16</sup> On parle de *sweet spot*, en ce qu'il n'existe qu'une position d'écoute idéale en stéréophonie : celle qui forme un triangle équilatéral avec les enceintes.

l'entourage immédiat de celui-ci un champ de pression acoustique identique à celui qui aurait été enregistré. L'objectif mirifique d'une possibilité de sauvegarde d'un moment acoustique, disponible à l'infini et sans altération, a été l'objet du travail des ingénieurs du son depuis lors, et dont les propositions ont dépassé la stéréo pour s'orienter vers des formats « immersifs » à nombre de canaux plus élevé. La stéréophonie demeure cependant le dispositif de diffusion le plus répandu dans le grand public comme chez les mélomanes et ses qualités ne semblent pas menacées par le développement du multicanal qui peine à s'imposer en musique (il est davantage plébiscité pour le son à l'image). Ainsi, elle demeure donc la base de travail de la majorité des ingénieurs du son dans tous les genres musicaux, et ses implications pour l'audition méritent d'être en partie détaillées ici.

#### Critère de latéralisation

En stéréophonie, une source mono diffusée dans les deux enceintes avec une différence de niveau de 15 dB suffit à la percevoir entièrement latéralisée du côté le plus fort. Latéraliser une source est également possible en  $\Delta t$  avec un délai de 0.8 ms (par effet de précedence).

#### Rapport d'anamorphose

En stéréophonie, l'angle de restitution ne restitue pas l'angle de prise de son de manière transparente. Il y a une distorsion de la perspective lorsque l'angle de prise de son est supérieur à 60°, et ce qui est hors de l'angle de restitution est alors « collé » dans une des enceintes.

#### Restitution partielle

Par définition, il n'y a pas d'enceintes à l'arrière en stéréophonie. Il est donc impossible de restituer des ondes venant de l'arrière. Les ondes qui venaient de l'arrière ou des côtés à la prise de son sont toutefois enregistrées (dans le cas de l'utilisation de microphones omnidirectionnels) et sont donc restituées comme venant de l'avant.

### Influence de l'espace d'écoute

L'expérience d'écoute d'un système de diffusion est liée à la réponse de la salle dans laquelle il se situe. La majorité des espaces d'écoute domestiques sont des pièces de taille moyenne dont la réverbération est chargée en énergie précoce et assez courte (moins de 1 seconde). Malgré la directivité des haut-parleurs, il est impossible de faire totalement abstraction de l'effet de salle, et bien que des systèmes de correction et d'optimisation d'écoute existent, ceux-ci permettent une écoute optimale mais imparfaite. Ainsi le champ perçu par l'auditeur est invariablement un mélange de deux champs acoustiques : celui de l'enregistrement et celui de la salle d'écoute. Des études ont cependant montré que les auditeurs sont capables de faire la distinction entre les deux, notamment dans la mesure où l'espace d'écoute leur est familier [53, 54].

#### **b) Optimisation pour la musique classique**

Ces caractéristiques liées au dispositif normalisé de restitution stéréophonique induisent un certain nombre de conséquences dans le mixage de musique classique, où les ingénieurs du son ont cette contrainte de ce que Denis Mercier appelle le *mixage fidèle* [55], consistant en la restitution (sous les contraintes du dispositif technique) d'un champ sonore, en opposition au *mixage inventif*, propre aux musiques actuelles, où généralement aucun espace n'est pré-existant.

Nous avons vu précédemment qu'un critère perceptif pour l'évaluation d'une salle de concert est l'enveloppement. Malgré une variation inter-individuelle portant sur la prédominance de l'enveloppement ou de l'intelligibilité, l'enveloppement demeure un critère essentiel lors du mixage de musique classique pour la majorité du répertoire (la musique de la période baroque favorisant moins l'enveloppement que la musique romantique).

Griesinger a étudié la perception de l'enveloppement dans le cadre de la restitution stéréophonique [49]. Selon lui, la sensation d'enveloppement est corrélée à l'angulation entre les haut-parleurs, selon les fréquences. Par exemple pour une stéréophonie normalisée (haut-parleurs à  $\pm 30^\circ$ ), les fréquences autour de 1,7 kHz procurent une sensation

d'enveloppement. De plus, une sensation d'enveloppement induite par une partie du spectre peut provoquer une sensation d'enveloppement sur l'ensemble du spectre. Ce résultat serait donc une indication pour comprendre l'efficacité de la stéréophonie : il est possible d'avoir une sensation d'enveloppement malgré une disposition des haut-parleurs à  $\pm 30^\circ$ , à condition que le signal soit suffisamment chargé dans certaines bandes fréquentielles (ici autour de 1.7 kHz).

### c) Vers le multicanal

On a dit que le multicanal est encore peu répandu dans la production musicale. Il se développe néanmoins avec la progression des moteurs de rendu multicanal, des systèmes de correction de haut-parleurs, et des habitudes du public, notamment avec la poussée des constructeurs pour des systèmes labellisés Dolby Atmos® simples d'utilisation.

Par ailleurs, le multicanal offre des perspectives intéressantes pour les ingénieurs du son, et en particulier en musique classique où, comme nous l'avons vu, les critères d'enveloppement et d'immersion sont très importants. Des haut-parleurs placés autour de l'auditeur permettant de faire venir du son des côtés et de l'arrière peuvent naturellement être mis à profit pour contribuer à ces sensations.

De la même manière que pour la stéréophonie, Griesinger étudie les placements des haut-parleurs en multicanal afin de maximiser la sensation d'enveloppement [49], motivé par les résultats de Morimoto sur l'importance du ratio avant / arrière [56]. Selon ses observations, de nombreux ingénieurs du son expliquent préférer des haut-parleurs de *surround* placés à  $\pm 150^\circ$  (quand ils sont pourtant typiquement à  $\pm 120^\circ$ ). À cette position, les haut-parleurs induisent des annulations de fréquences autour de 5 kHz qui sont des indicateurs perceptifs d'un son venant de l'arrière. Cependant, ces résultats sont faux dans les bases fréquences, où l'enveloppement est maximisé pour des placements plus latéraux. Cela indique un besoin d'augmenter le nombre de haut-parleurs pour permettre une sensation d'enveloppement optimale sur tout le spectre.

## IV. Mise en espace par ajout de réverbération - La réverbération artificielle

Il existe de nombreux outils de traitement audio qui permettent de donner une sensation d'espace à une source « sèche<sup>17</sup> » : délais, élargisseurs stéréophoniques, *chorus*, *flangers*... Autant de traitements très utilisés en musique actuelle pour les multiples possibilités sonores qu'ils offrent, mais qui sont généralement utilisés comme « effets<sup>18</sup> » et non dans un cadre de restitution spatiale *réaliste*, ne tirant par ailleurs pas (ou peu) leurs origines dans des phénomènes acoustiques naturels. Ainsi, l'outil le plus utilisé pour la mise en espace de sources sonore en musique classique est la réverbération artificielle, outil trouvant son origine dès les prémices des enregistrements sonores et aujourd'hui essentiel aux ingénieurs du son. Cette partie se propose donc de revenir sur l'histoire de la réverbération artificielle, d'explicitier ses enjeux et de décrire les outils actuels. Ce mémoire portant sur la problématique des premières réflexions, une dernière section sera consacrée spécifiquement aux similarités et aux différences de gestion de l'énergie précoce entre certains de ces moteurs de réverbération.

### IV.A. Justification de l'utilisation de réverbération artificielle

#### IV.A.1. L'enjeu du réalisme

Comme nous l'avons mentionné dans la section III.C.2, le mixage de musique classique se distingue en ce qu'il demande à l'ingénieur du son de donner l'illusion de la restitution d'un espace sonore pré-existant, caractérisé par la scène spatiale liée à la disposition des musiciens ainsi que par la réverbération naturelle de la salle, essentiellement captée par le couple principal et dans certains cas par les micros d'ambiance. L'enjeu du réalisme pèse particulièrement sur la question de l'insertion des appoints dans le mixage, la gestion de la

---

<sup>17</sup> Une source qui, par exemple, ayant été enregistrée en proximité, donne un rendu « frontal », c'est-à-dire privé de réverbération.

<sup>18</sup> En opposition à un traitement utilisé dans un but réaliste.

profondeur d'un appoint se fait essentiellement par l'utilisation de réverbération artificielle. Cette dernière est généralement paramétrée pour coller à celle de la salle (temps de réverbération, balance tonale, proportion entre énergie précoce et champ diffus) afin d'avoir la meilleure homogénéité spatiale sur tout la scène stéréophonique. Evidemment, il serait utopique de prétendre à la restitution parfaite de la scène spatiale naturelle de la salle de concert. L'enjeu du réalisme encore une fois est surtout de donner l'illusion d'une réalité flatteuse, tout en s'inscrivant dans des codes esthétiques propres à la musique classique restituée et développés depuis les premiers enregistrements audio.

Par ailleurs, certains ingénieurs du son utilisent les premières réflexions pour « augmenter » la sensation d'espace, par le biais de réflexions marquées et sur-latéralisées (voir section V.B.2)

#### **IV.A.2. La fusion entre les source - la gestion de l'espace**

Un des objectifs de l'utilisation de réverbération artificielle est de favoriser la fusion entre les sources (instrumentistes solistes, pupitres plus ou moins étendus) captées par les différents microphones d'appoint. De par la capacité des premières réflexions à augmenter la largeur perçue des sources et à « décoller » celles-ci (cf Section V), la réverbération artificielle, et en particulier les premières réflexions, permet de créer, à partir des appoints, différents plans sonores ayant différents degrés de profondeur. Elle permet en outre de faire fusionner les sources, leur largeur apparente agrandie permettant de combler les « trous » dans l'espace stéréophonique séparant les différentes sources appointées.

## **IV.B. La réverbération artificielle - historique des technologies**

Les premiers procédés de réverbération artificielle se développèrent dès les années 1920. Par la suite, les évolutions techniques ayant jalonné le XX<sup>e</sup> siècle ont offert aux ingénieurs du son toujours davantage de latitude dans leur travail de l'espace sonore.

Dans cette partie, nous reviendrons sur l'évolution des techniques d'enregistrement sonore et, au regard de cette évolution, nous présenterons l'évolutions des techniques de réverbération, des prémices des années 1920 jusqu'à nos jours.

### **IV.B.1. L'évolution des enregistrements audio**

L'histoire des techniques d'enregistrement et de diffusion sonore est divisée en quatre ères technologiques liées aux innovations qui se sont succédées au cours du XX<sup>e</sup> siècle.

La première, l'ère acoustique, commence en 1857 avec l'invention du phonautographe par Edouard-Léon Scott de Martinville. Il s'agit d'un système de fixation des ondes acoustiques comme lignes bidimensionnelles sur des phonautogrammes. Il est constitué, sur le modèle de l'oreille humaine, d'une membrane vibrante placée au bout d'un tube acoustique transmettant les vibrations sonores à un stylet les gravant sur un cylindre enduit de noir de fumée. Ce procédé ne permettant toutefois pas la reproduction des sons enregistrés sur les cylindres, c'est le phonographe, dont le brevet fut déposé par Thomas Edison en 1877, qui permettra la diffusion des sons préalablement enregistrés. Cet outil, utilisant des cylindres en étain ou en cire, sera progressivement remplacé dans les années 1910 par le gramophone inventé en 1887 par Emile Berliner. Appareil de lecture seule de sons fixés sur un disque d'ébonite ou de celluloid, celui-ci sera toutefois renommé phonographe au cours des années 1920, pour évoluer plus tard en platine vinyle utilisée de nos jours.

A cette époque, les principales préoccupations des ingénieurs du son concernent la qualité de l'enregistrement d'un son brut, sans utilisation de microphone. Les sources doivent fournir suffisamment de puissance acoustique pour imprimer sur le support d'enregistrement, sans traitement intermédiaire encore possible.

En 1925, les labels d'enregistrement décident de s'équiper de matériels électriques. Les deux grandes avancées de cette ère sont l'apparition des microphones et des amplificateurs dans les studios et les salles de concert. Il est alors possible d'enregistrer et de restituer le son d'une source sonore de faible puissance (c'est notamment grâce à cela que la guitare pourra rivaliser avec des instruments à vent ou des percussions). Par ailleurs, les microphones permettent l'acquisition d'un signal plus étendu fréquentiellement. Des filtres électriques sont développés afin de corriger et de contrôler le signal en termes de dynamique et de balance fréquentielle.

La gestion de la réverbération se faisait initialement en changeant la distance de l'instrument au microphone et en fonction des propriétés acoustiques de la pièce. Pour un enregistrement multi-instrumental, on positionne les musiciens à des distances différentes autour du microphone afin de gérer les rapports de puissance entre eux et de doser la réverbération.

Ainsi, la gestion de réverbération, qui est donc avant tout naturelle au début des années 1920, se développe grâce à l'électricité et l'on voit naître différents procédés et outils de réverbération artificielle, qualifiés aujourd'hui d'analogiques (par opposition aux moteurs numériques). Nous détaillons ces procédés dans la section IV.B.2.

Le support vinyle souffre néanmoins d'un inconvénient: il n'est pas effaçable et impose qu'à la moindre erreur de jeu l'enregistrement doit reprendre au début. Cette contrainte voit arriver sa solution avec la technologie magnétique, qui s'impose dans les années 1940. Celle-ci donne la possibilité de récrire sur un support (la bande magnétique) quasiment à l'infini et donc notamment de gagner du temps dans les studios. Cette technologie, associée à l'utilisation généralisée de l'enregistrement multi-pistes dans la deuxième moitié des années 1960, permet une très grande flexibilité d'enregistrement et de construction sonore. La production musicale entre alors dans une ère d'expérimentation sonore permettant le développement des pratiques de mixage en post-production, à l'aide d'outils de correction du son (filtres égaliseurs, compresseurs) et des réverbérations à plaques et à ressort.



Figure 26 : Une des salles de réverbération ou « echo chamber » du studio Capitol à Los Angeles

Enfin, en 1983, le Disque Compact Audionumérique est lancé sur le marché. Il est l'aboutissement d'une campagne de Recherche et Développement de Philips et Sony basée sur les technologies numériques acquises depuis la création du transistor en 1947. Support que l'on peut effacer et récrire quasiment à l'infini, il révolutionne l'écoute musicale domestique, avec une haute qualité de restitution : 44.1 kHz en échantillonnage, 16 bits de quantification, pour un rapport signal bruit théorique de 96 dB, jamais atteint auparavant (60 dB pour le vinyle). Mais les outils numériques ne trouvent en studio leur utilité qu'avec le développement de stations de travail audionumériques à la fin des années 1990 (lancement de la première version du logiciel Pro Tools avec 4 pistes en 1991). Une homogénéisation en numérique de la chaîne de travail et le perfectionnement des convertisseurs permettent l'utilisation de programmes numériques et de cartes numériques externes, évolution majeure des outils de réverbération.

Comme nous l'avons vu, des outils de réverbération artificielle se sont développés tout au long de l'évolution de techniques d'enregistrement et de mixage, au gré de sauts technologiques effectués dans l'industrie. La maîtrise de la sensation de réverbération est devenue un enjeu majeur de la production musicale selon des codes esthétiques pluriels : d'une recherche de naturel à la construction d'effet, dans tous les genres musicaux.

## **IV.B.2. Les outils de réverbération**

### **IV.B.2.a) Les réverbérations analogiques**

Les premiers procédés d'ajout de réverbération artificielle furent développés par RCA dans les années 1920. Ils consistaient à tirer parti de l'acoustique de vraies salles, dites « *chambres de réverbération naturelle* » (ou « *echo chambers* » en anglais). Cela consistait à placer un haut-parleur ainsi qu'un ou plusieurs microphones à différents endroits dans un local aux propriétés acoustiques désirées : temps de réverbération, taux de réflexions, *couleur spectrale*, etc., parfois aux parois modifiables. La géométrie de ces chambres était conçue pour éviter les phénomènes acoustiques gênants (modes acoustiques persistants, échos flottants). Dans ce procédé, le haut-parleur diffuse la source à réverbérer et les microphones enregistrent l'effet de la salle sur le son, donnant différentes caractéristiques sonores, selon le placement (position, orientation) et le choix du modèle (de microphone). Permettant d'accéder à un rendu naturel car provenant directement d'un espace acoustique réel, cette méthode pâtit de l'inconvénient de la lourdeur du procédé technique, de l'encombrement de la pièce et des limitations dans sa modularité.

D'autres types de réverbérations, d'ordre mécanique, se sont développés afin de pallier ces inconvénients. A la fin des années 1920, Laurens et Hammond mettent au point la première réverbération à ressort (*spring reverb* en anglais) dont le principe de fonctionnement est le suivant : un transducteur électromécanique reçoit le signal que l'on cherche à réverbérer et le convertit en mouvement mécanique. Celui-ci est propagé le long d'un ou plusieurs ressorts dont les extrémités opposées sont reliées à un transducteur mécano-électrique qui convertit les oscillations du ou des ressorts en un signal électrique de sortie. Les ressorts,

soumis à une excitation mécanique, permettent la propagation des ondes mécaniques qui se réfléchissent partiellement aux extrémités. Le signal de sortie est donc un signal réverbéré constitué d'une série d'échos, tributaires des propriétés physiques des ressorts et donnant l'impression d'un espace acoustique. Ces ressorts peuvent être utilisés en série ou en parallèle afin d'obtenir un profil énergétique de la réverbération plus proche de celui d'un espace acoustique réel.

Ces outils connurent de nombreuses améliorations au cours des années 1950 et 1960 : mécanismes pour maintenir les ressorts sous tension, utilisation du mode de torsion pour la propagation des ondes... Ces améliorations permirent d'accroître leur résistance aux chocs et aux vibrations, et d'aboutir à l'utilisation de ressorts de faible diamètre, intégrables dans les amplificateurs pour guitare électrique notamment. Dans les années 1970 et au début des années 1980, de nouvelles améliorations furent apportées comme l'ajout de discontinuités d'impédance dans les ressorts, accroissant la densité de la réverbération et réduisant la dispersion, permettant la simulation de petites pièces (« rooms » en anglais) au rendu sonore naturel.

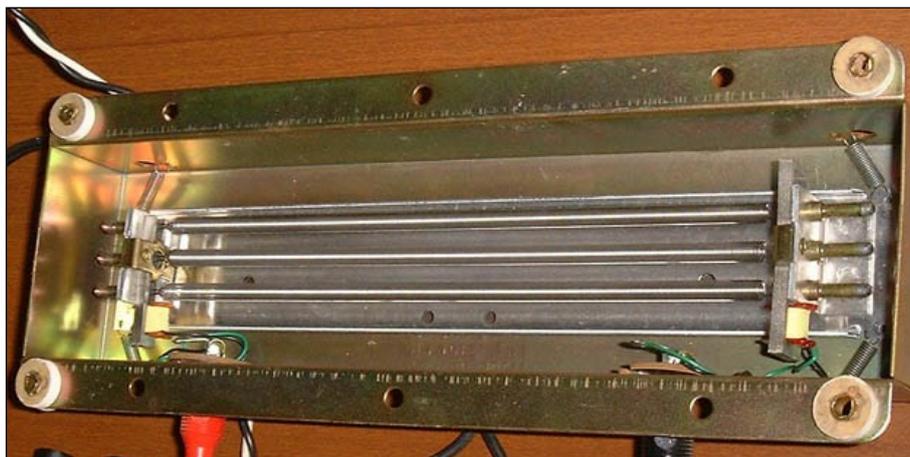


Figure 27 : Une réverbération à ressorts typique d'amplificateur pour guitare électrique

Les années 1950 voient apparaître des réverbérations à plaques (ou « *plates* » en anglais), introduites par l'entreprise allemande EMT. Elles poursuivent le principe de fonctionnement des réverbérations à ressort par l'enregistrement de la propagation d'ondes à travers un milieu mécanique, ici au sein d'une plaque métallique. Cependant, elles offrent une plus grande complexité sonore, de par la vibration bidirectionnelle de la plaque. Les plaques, initialement constituées d'acier, sont excitées par un transducteur placé en un point, souvent proche du centre de la plaque et pouvant, selon les modèles, être déplacé dans les deux dimensions de la plaque. Un ou deux capteurs (dans le cas d'une recherche d'effet stéréophonique) sont placés à des endroits différents de la plaque et captent les vibrations de celle-ci. Par leur modularité et leur principe de vibration bidirectionnelle, les réverbérations à plaques offrent une plus grande complexité sonore que les modèles à ressort. Cependant, leur son très reconnaissable (bien que celui-ci puisse sensiblement changer selon les caractéristiques physiques de la plaque) ne permet pas d'en tirer un effet de réverbération naturelle recherché par les ingénieurs du son.

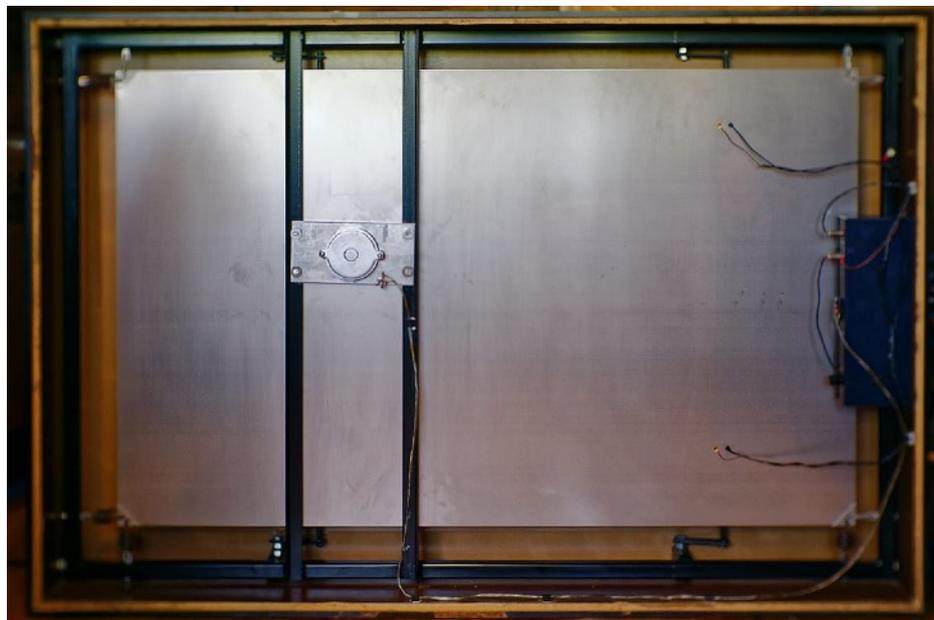


Figure 28 : Vue de dessus d'une réverbération à plaque. Proche du centre et maintenu par des tiges, le transducteur électro-mécanique fait vibrer la plaque. Les capteurs sur la droite enregistrent les vibrations transverses propagées au sein de la plaque .

Les réverbérations analogiques à ressort ou à plaques étaient par nature difficiles à transporter, sensibles aux perturbations mécaniques et acoustiques et nécessitaient des connaissances spécifiques pour leur accordage et leur maintenance. Par ailleurs, les nombreuses imprécisions de fabrication entraînaient des variations sensibles d'un modèle à l'autre, ajoutées aux variations intrinsèques d'un modèle au cours du temps, selon les conditions environnementales. Ces aléas poussèrent les industriels à développer des systèmes portables, moins coûteux et plus fiables, et c'est à la fin des années 1960 que Philips lança le premier BBD (pour « *Bucket Brigade Device*<sup>19</sup>»), premier dispositif de génération de délai audio analogique, utilisant une série de condensateurs alimentés selon les ouvertures d'interrupteurs commandés par des transistors MOS, eux-mêmes contrôlés par une horloge externe. Si les BBD ne devinrent pas populaires, c'est que leur développement coïncida avec l'apparition des premières réverbérations numériques.

#### **IV.B.2.b) Les réverbérations numériques**

##### **(1) Les réverbérations algorithmiques**

L'invention du transistor en 1947 puis du circuit intégré en 1958 permit la conception de circuits numériques miniaturisés, fiables et à la puissance croissante rendant les technologies numériques industriellement viables, en particulier grâce à l'invention de l'algorithmique numérique par la mémorisation d'instructions et de données, initiée par l'architecture von Neumann<sup>20</sup>. L'arrivée de la micro-électronique permit le développement de l'informatique moderne, dont les disciplines propres au traitement numérique du signal audio, et en particulier à la question de la problématique du calcul en temps réel, découlèrent rapidement.

---

<sup>19</sup> Le terme *Bucket Brigade* désigne en anglais les chaînes humaines constituées pour déplacer des objets, initialement des seaux d'eau pour combattre les incendies.

<sup>20</sup> Elaborée en 1945 par le mathématicien américano-hongrois John von Neumann, il s'agit de la première description d'un ordinateur dont le programme est stocké dans sa mémoire.

Les premiers algorithmes numériques de réverbération furent développés au début des années 1960 par Manfred Schroeder et Ben Logan dans le cadre de leurs recherches aux laboratoires Bell, alors pôle international du développement des technologies numériques. Ces algorithmes consistaient en une série de filtres passe-tout<sup>21</sup> permettant la génération d'un effet de réverbération spectralement neutre constitué de séries d'échos décroissants. Grâce à de nombreuses améliorations permises par l'accroissement des ressources computationnelles des processeurs, ces algorithmes fournirent une base pour les premiers processeurs de réverbération commercialisés à partir du milieu des années 1970. Innovation clef dans le domaine des réverbération algorithmiques, l'annonce du premier Réseau de Retards Rebouclés<sup>22</sup> par Jot et Chaigne en 1991 [57]. Présentant une nouvelle structure générale d'algorithme, il permit une gestion séparée des contrôles de l'énergie, du temps et de la diffusion sonore de la réverbération générée. Ce modèle, de par ses avantages en matière de modularité, de relative sobriété calculatoire et d'évolutivité, est aujourd'hui, malgré des solutions plus récentes [58], encore le plus utilisé par les constructeurs de réverbérations algorithmiques.

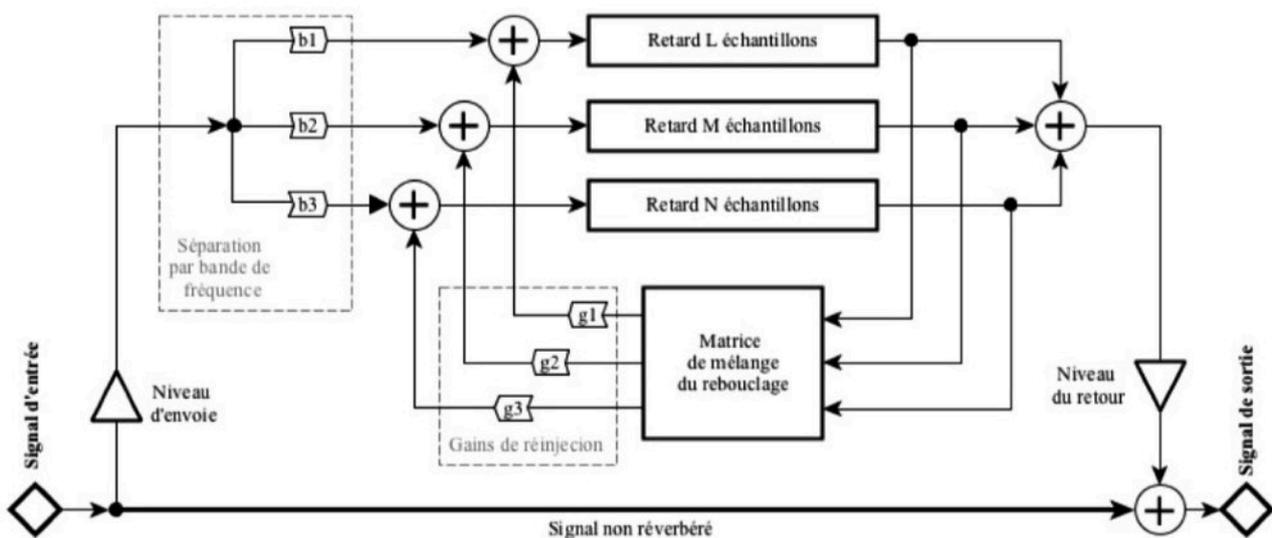


Figure 29 : Structure de base d'un Réseau de Retards Rebouclés

<sup>21</sup> Un filtre passe-tout conserve les rapports d'amplitudes sur tout le spectre du signal mais applique des déphasages qui varient selon les fréquences.

<sup>22</sup> Ou FDN en anglais pour *Feedback Delay Network*

## (1)(a) Réverbérations algorithmiques basées sur des modèles physiques

L'essor des technologies numériques et la croissance des capacités de calcul des processeurs ont permis le développement de réverbérations basées sur des modèles physiques de salles réelles ou virtuelles. Les lois physiques régissant la propagation du son étant bien connues, la difficulté était (et est toujours) de résoudre les équations de propagation pour de grands volumes, aux propriétés acoustiques à définir, et sur tout le spectre des fréquences audibles (communément défini comme l'intervalle [20 Hz ; 20 kHz]). Plutôt que de résoudre directement ces équations, des techniques d'approximations sont utilisées. Si certaines sont utilisables en temps réel, d'autres fournissent des réponses impulsionnelles utilisables par des moteurs à convolution.

Deux techniques de modélisation prédominent aujourd'hui, et sont basées sur deux méthodes différentes :

- Les modèles ondulatoires, basés sur une résolution de l'équation d'onde<sup>23</sup> ;
- Les modèles géométriques assimilant la propagation du son à celle des rayons analogues aux rayons lumineux.

### i) Les modèles ondulatoires

Ces techniques, basées sur des modèles ondulatoires, ont pour principal avantage de prendre intrinsèquement en compte les phénomènes acoustiques de diffractions et d'interférences. Cependant, modéliser la propagation des ondes acoustiques dans des espaces réels complexes est très difficile, et se fait au prix d'approximations numériques. Pour des raisons que nous ne détaillerons pas ici, les techniques par modélisation ondulatoire sont principalement utilisées dans le domaine des basses fréquences, très adaptées notamment en ce qu'elles rendent compte des modes propres<sup>24</sup> des salles,

---

<sup>23</sup> Équation décrivant la propagation d'une onde.

<sup>24</sup> Onde stationnaire dans un milieu fini, un mode propre a pour conséquence l'apparition de « noeuds » et de « ventres », zones spatiales où certaines fréquences s'annulent ou bien se somment selon leur position, par jeux d'interférences constructives et destructives.

l'approche la plus commune étant la méthode temporelle des différences finies (ou FDTD pour l'anglais *Finite-Difference Time-Domain*).

## ii) Les modèles géométriques

Les modèles géométriques de réverbération artificielle négligent l'aspect ondulatoire du son et font l'approximation d'un comportement en rayons analogues aux rayons optiques, soumis aux phénomènes de réflexion et d'absorption. Bien que relativement grossière, cette approximation est néanmoins valide dans la partie haute du spectre où les longueurs d'onde sont petites par rapport aux dimensions des espaces modélisés. En particulier, ces modèles sont pertinents dans la modélisation des réflexions acoustiques sur les parois de l'espace modélisé. Cependant, modéliser la totalité de la réverbération d'un espace - jusqu'à la conversion en chaleur par absorption de la totalité des rayons acoustiques - est difficile : le nombre de chemins acoustiques des réflexions augmente exponentiellement en fonction des ordres des réflexions (l'ordre d'une réflexion correspond au nombre de rebonds effectués par le rayon acoustique au moment de cette réflexion). Les réflexions précoces dites « spéculaires », les plus importantes pour la perception, sont quant à elles en nombre limité et leur calcul en temps réel est possible.

Deux techniques de base sont envisagées pour leur calcul :

1. La méthode image-source : elle assure la détermination de tous les tracés des réflexions spéculaires mais ne peut se limiter qu'aux ordres de réflexions peu élevés ;
2. La méthode par traçage de rayons : basée sur la méthode d'échantillonnage Monte Carlo (basée sur des informations statistiques), elle permet le calcul des réflexions d'ordre élevé, au prix d'une décroissance de sa précision à mesure que les ordres augmentent.

Les modèles ondulatoires et géométriques ont donc des avantages complémentaires : si la méthode ondulatoire est pertinente en basses fréquences, la méthode géométrique sera d'avantage utilisée pour le calcul des premières réflexions. La modélisation du champ diffus

se fait quant à elle par des méthodes séparées prenant en compte les caractéristiques propres à l'environnement (et plus nécessairement à la position de la source, étant donné que l'on considère le champ diffus comme homogène dans la salle).

### (1)(b) Les modèles hybrides

Les méthodes hybrides ont été conçues pour pallier les déficiences particulières de ces techniques, en les associant afin d'être en mesure de modéliser correctement la totalité du champ réverbéré d'un espace donné. Dans le tableau ci-dessous, on peut résumer simplement le principe d'un modèle hybride optimal basé sur une combinaison de différentes techniques, traitant le signal à la fois dans les domaines fréquentiel et temporel.

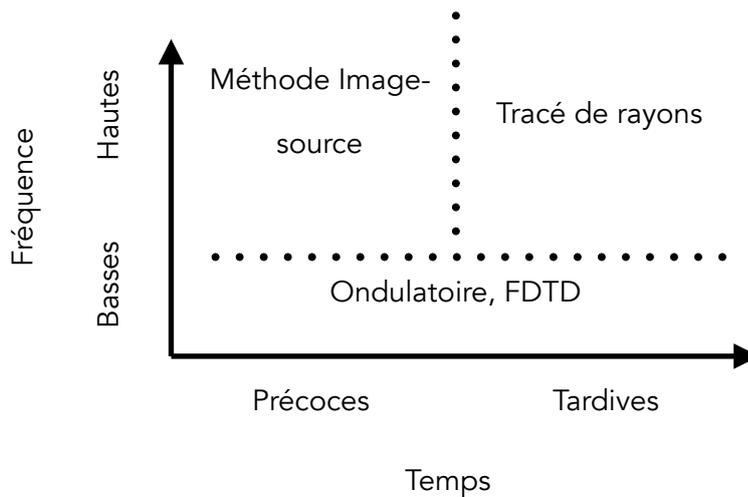


Figure 30 : *Modèle hybride optimal combinant différents modèles.*

## (2) Les réverbérations à convolution

Ces réverbérations sont différentes des modèles cités précédemment en ce qu'elles ne modélisent pas la réponse d'une salle, mais utilisent directement une « empreinte » acoustique mesurée au préalable, en convoluant le signal que l'on cherche à réverbérer par la réponse impulsionnelle (l'empreinte) mesurée dans la salle.

$$(f * g)(i) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(k)g(i - k)$$

*Produit de convolution discret de deux fonctions.*

Les réponses impulsionnelles sont, comme leur nom l'indique, les réponses acoustiques des salles à une impulsion. Si, avant les années 2000, celles-ci étaient mesurées par l'enregistrement de la réponse de la salle à une balle tirée à blanc, une explosion de ballon ou par génération de séquences MLS (pour *Maximum Length Sequence*), le standard est depuis d'utiliser un sweep (ou « glissement ») sinusoïdal, méthode la plus robuste au bruit de fond et la plus précise [16]. Cependant la convolution des réponses impulsionnelles par le signal nécessite un grand nombre de calculs<sup>25</sup>, qui augmente proportionnellement à la longueur des réponses impulsionnelles (et multiplié par le nombre de canaux, une réponse impulsionnelle stéréo proposant généralement une réponse différente par canal). Heureusement, la puissance croissante des processeurs combiné notamment à l'utilisation de la FFT (pour *Fast Fourier Transform*, la transformée de Fourier rapide) diminuant significativement les besoins de ressources de calculs ont rendu cette contrainte secondaire pour la grande majorité des utilisateurs.

La réponse impulsionnelle d'une salle étant par définition l'empreinte acoustique d'une salle, il faut toutefois mentionner que l'acquisition de ces réponses impulsionnelles

---

<sup>25</sup> une réponse impulsionnelle d'une seconde à 48 kHz nécessite 48000 multiplications et additions par échantillon traité.

nécessite de faire des choix : choix du modèle d'enceinte et de microphone (on favorisera des matériels aux caractéristiques fréquentielles les plus transparentes possible), placement de l'enceinte (ou des enceintes dans le cas d'une réverbération multicanale) et du microphone (ou des microphones), choix du signal audio. Ces nombreux paramètres liés à la mesure sont généralement le fruit de choix qu'on pourrait qualifier de *logiques*. Pour une réverbération stéréo par exemple dans le cas d'une salle de concert, deux réponses impulsionnelles seront prélevées, les enceintes étant placées de part et d'autre de la scène et les deux micros seront placés dans la zone d'audience en face de chacune des enceintes. Plusieurs réponses pourront être mesurées à différentes distances ou avec différentes configurations de microphones<sup>26</sup>. Ainsi, une réponse impulsionnelle ne donne jamais que l'empreinte d'une salle dans une configuration précise. Il n'en reste pas moins qu'elles sont bien souvent plébiscitées pour leur « réalisme ».

Cette technique, qui mène donc à un rendu réaliste proche de ce qu'aurait donné l'enregistrement de la source émettant directement dans le lieu, est très plébiscitée dans la plupart des studios de mixage et de post production pour le cinéma, autant pour son rendu que pour sa facilité d'usage. En effet, les moteurs de réverbération à convolution actuels proposent parfois des centaines de réponses impulsionnelles différentes, parmi lesquelles il est facile de naviguer pour trouver celle qui correspondrait le mieux au rendu souhaité. De plus, il est possible d'en réaliser soi-même et de les utiliser de la même manière<sup>27</sup>.

---

<sup>26</sup> L'Altiverb® de AudioEase propose souvent le choix entre des réponses mesurées avec des micros cardioïdes et omnidirectionnels.

<sup>27</sup> AudioEase, le constructeur d'Altiverb® propose notamment un tutoriel pour effectuer soi-même des mesures de réponses impulsionnelles, et fournit les fichiers audio nécessaires aux mesures. Ce tutoriel (en anglais) peut être consulté à cette adresse : <https://www.audioease.com/altiverb/sampling.php>

## **IV.C. La réverbération artificielle - étude et exemples**

Les moteurs de réverbération artificielle sont des outils complexes à utiliser. Il faut à la fois avoir à l'esprit l'ensemble des implications sonores que leur utilisation suppose ainsi que la compréhension de leurs réglages et de leur maniement. Si on retrouve systématiquement des grands principes propres à la définition même de la réverbération (temps de réverbération, balance tonale, répartition énergétique), ces réglages varient d'un modèle à l'autre de manière parfois très significative, si bien qu'il est souvent difficile - de par le temps nécessaire à sa bonne compréhension - de prendre en main une nouvelle réverbération artificielle.

Cette partie se propose de faire une description globale des moteurs de réverbération en expliquant les réglages les plus couramment rencontrés, puis se focalise sur une série d'exemples dont l'utilisation par les ingénieurs du son est fréquente, particulièrement en musique classique.

### **IV.C.1. Ergonomie classique des moteurs de réverbération artificielle**

Cette section propose une description des paramètres les plus courants dans les réverbérations artificielles. Nous ne traiterons ici que des réverbérations numériques, aujourd'hui dominantes dans les studios et qui, bien qu'étant dans leur conception historiquement liées aux réverbérations analogiques, ont leurs spécificités ergonomiques propres.

Une dernière distinction doit être opérée : dans le vaste panel des réverbérations numériques, on trouve deux tendances dans la conception et/ou dans l'ergonomie.

Pour ce qui est de la conception du moteur, on l'a vu dans la section précédente, il existe une variété de techniques pour mettre au point une réverbération : convolution ou modélisation physique à partir de différents modèles...

Concernant l'ergonomie, certains modèles présentent des paramètres dits « bas niveau » en ce qu'ils se réfèrent à des critères physiques objectifs de la réverbération. D'autres en revanche proposent une approche perceptive en présentant des paramètres dits « haut

niveau » en ce qu'ils se réfèrent au lexique de la perception humaine. Ces différences seront explicitées dans la présentation des quelques modèles, qui vont d'un bord à l'autre de cet éventail de possibilités ergonomiques.

### a) Le type de réverbération

Une grande partie des moteurs de réverbération proposent de choisir entre plusieurs pré-réglages correspondant à des types d'environnement ou de réverbérations analogiques.

Les types les plus fréquemment présentés sont :

- Room : Modélisant le comportement acoustique d'une petite salle, il peut se décliner en *Large Room, Médium Room, Bright Room, Dark Room, Wooden Room, etc...* ;
- Hall : Modélise l'acoustique d'une grande salle de concert. Comme la Room, il peut se décliner en *Concert, Bright, Small, etc..* ;
- Chamber : Modélise l'acoustique d'un petit espace imprimant une faible empreinte tonale comparée aux programmes de type *Room* ;
- Spring : Modélise le comportement d'une réverbération analogique de type *Spring Reverb* (réverbération à ressort) ;
- Plate : Modélise le comportement d'une réverbération analogique de type *Plate Reverb* (réverbération à plaque).

### b) Les paramètres liés au volume sonore et à la quantité de réverbération

#### Le paramètre de mélange

Souvent nommé *Mix ou Dry/Wet*<sup>28</sup>, il règle la proportion de son en entrée qui est traité par la réverbération, ou vu différemment, c'est la proportion entre son réverbéré et son non réverbéré en sortie de réverbération. Pour des questions d'habitude de travail, la grande majorité des ingénieurs du son travaillent les réverbérations par le biais de bus<sup>29</sup>, ce qui leur

---

<sup>28</sup> Pour Sec/Mouillé. On dit qu'un son sans réverbération est « sec » et (moins souvent) qu'un son 100% réverbéré est « mouillé »

<sup>29</sup> Procédé de routing interne permettant de dupliquer virtuellement la sortie d'une piste pour l'envoyer en entrée d'une autre (généralement une piste auxiliaire).

permet notamment de faire ce dosage à l'aide de faders. Ils placent donc presque toujours le réglage du mélange sur la position 100% « Wet ».

#### Les niveaux d'entrée / sortie

Certains modèles permettent de modifier en interne le niveau du signal d'entrée et celui de sortie. Ceux-ci sont peu plébiscités par les ingénieurs du son qui préfèrent généralement faire ces réglages hors de la fenêtre du plugin, et ne sont donc pas systématiquement présents.

#### Les niveaux des différentes parties de la réverbération

Plusieurs modèles proposent de régler séparément les niveaux des premières réflexions et du champ diffus. On verra souvent deux boutons, un pour les premières réflexions (généralement nommé *Early*) et un pour la queue de réverbération (nommé *Tail*).

### **c) Les paramètres temporels**

#### Temps de réverbération

Le principal réglage d'un moteur de réverbération, qui est souvent le bouton le plus visible et le plus grand, est celui du temps de réverbération. On le trouve sous la dénomination *Reverb Time*, *Decay Time* ou encore *Space*. Il règle le  $TR60$ <sup>30</sup>, soit le temps mis par la réverbération pour décroître de 60 dB.

#### Le pré-délai

Le pré-délai, ou *Pre Delay* en anglais, règle ce qui a été nommé ITD (pour *Initial Time Delay gap*, à ne pas confondre avec l'ITD désignant l'*Interaural Time Difference*), présenté en millisecondes. Il s'agit donc du temps passé entre le son direct et le début de la réverbération. Sa plage temporelle varie généralement entre 0 ms et 500 ms.

---

<sup>30</sup> Voir section I.B pour la définition du TR60.

#### **d) Les paramètres d'espace**

Ces paramètres permettent d'affiner le réglage de la réverbération en modifiant ce qui s'apparenterait aux caractéristiques acoustiques de l'espace, hors temps de réverbération.

##### La diffusion des premières réflexions

Souvent nommé *Diffusion* ou *Diff*, ce paramètre modifie la diffusion des premières réflexions.

##### La taille de la salle

Généralement nommé *Room Size*, ce paramètre permet de changer la sensation de volume de l'espace à temps de réverbération égal. Il correspond en général à un réglage en mètres cubes, et a donc généralement une influence sur d'autres paramètres tels que la distribution des premières réflexions, directement liée à la distance séparant les parois.

##### La largeur stéréophonique

Certains moteurs intègrent un paramètre d'élargissement stéréophonique généralement nommé *Stereo Width*. Il modifie la fraction latérale (ou *LF* pour *Lateral Fraction*), soit le ratio entre signal monophonique (souvent appelé *Mid*, soit la partie du signal identique entre les deux canaux) et la partie purement stéréophonique (souvent appelée *Side* soit la décorrélation entre les deux canaux).

#### **e) Les paramètres fréquentiels**

Tous les moteurs de réverbération artificielle proposent une section dédiée à l'égalisation de la réverbération, qui se décline souvent en plusieurs paramètres modifiant les propriétés spectrales des différentes parties du champ réverbéré.

Ils sont très divers et permettent tantôt d'égaliser le son entrant dans le moteur et le son sortant (*Post* et *Pre EQ*), tantôt de modifier séparément la balance tonale des premières réflexions et du champ diffus.

## f) Autres paramètres

D'autres paramètres sont souvent proposés par les constructeurs de réverbération artificielle. Ils sont toutefois tirés d'autres types d'effets et incorporés aux moteurs de réverbération pour ajouter des possibilités sonores, notamment dans une esthétique *effet*<sup>31</sup> plus que *réaliste*.

### Attaque

Ce paramètre qui n'est pas présent sur tous les modèles change le temps d'attaque de la réverbération à la manière d'un compresseur. Le plugin ValhallaVintageVerb®<sup>32</sup> présente ce réglage de la manière suivante: « *Contrôle l'attaque initiale de la réverbération. Une plus grande valeur d'attaque peut être utilisée pour ajuster la distance perçue à la source* <sup>33</sup>».

### Compression

Comme l'attaque, ce paramètre est tiré du fonctionnement des compresseurs et permet de réduire la dynamique de la réverbération. La compression étant un traitement complexe, elle est souvent intégrée aux réverbérations de manière sommaire avec un seul réglage, variant entre une absence de compression et une compression maximale. Toutefois, la compression acoustique existe dans la réalité : plus la distance séparant la source et l'auditeur est grande, plus l'onde subit l'absorption de l'air, résultant en une compression globale, bien que prédominante dans les hautes fréquences. Il n'est en outre pas rare que les ingénieurs du son compressent la sortie de leurs réverbérations avec des compresseurs externes.

---

<sup>31</sup> Comprendre le terme « *effet* » en opposition à un traitement visant un rendu réaliste. Un effet est ainsi tout traitement qui s'abstrait dans son rendu de la réalité acoustique.

<sup>32</sup> Voir <https://valhallaDSP.com/shop/reverb/valhalla-vintage-verb/>

<sup>33</sup> Traduit de : « *Attack: controls the initial attack of the reverb decay. Larger Attack percentage = longer attack time. Can be used to adjust the perceived distance from the source within the reverb* »

## Modulation

De nombreux modèles proposent un ou plusieurs réglages de modulation, ajoutant du dynamisme et du mouvement au champ réverbéré. La ValhallaRoom®<sup>34</sup> présente par exemple des paramètres de *Early Mod Rate*, *Early Mod Depth*, *Late Mod Rate* et *Late Mod Depth*. La Fabfilter Pro-R®<sup>35</sup> propose un réglage nommé *Character* présenté comme ceci : « À 0% la réverbération est transparente et prévisible. Le monter à 50% ajoute graduellement de la modulation [...]. À partir de 50% la réverbération est de plus en plus modulée jusqu'à une sensation d'effet chorus [...]<sup>36</sup> ».

---

<sup>34</sup> Voir <https://valhalladsp.com/shop/reverb/valhalla-room/>

<sup>35</sup> Voir <https://www.fabfilter.com/products/pro-r-reverb-plugin-in>

<sup>36</sup> Issu et traduit de : « *The Character knob brings life to the reverb sound in various ways. At 0%, the reverb is as transparent and predictable as possible. Turning the knob up to 50% gradually introduces some modulation and more pronounced early echoes together with subtle yet noticeable late echoes. From 50% and up, the reverb begins modulating more and more, up to a chorus-like effect at 100% which works well on vocals and synths* ».

## IV.C.2. Description de quelques moteurs de réverbération artificielle

Il existe un très grand nombre de moteurs de réverbération artificielle, dans une grande diversité d'esthétiques et d'approches. Certains font totalement abstraction des réalités acoustiques et se concentrent sur le rendu sonore, d'autres sont basés sur des modèles physiques et proposent une ergonomie qui en découle, basée sur des critères objectifs. Par ailleurs, si la puissance des processeurs intégrés aux ordinateurs a considérablement augmenté, et ce de manière quasiment constante depuis des décennies, il n'en demeure pas moins que certains constructeurs ne proposent leurs réverbérations qu'intégrées à des processeurs DSP<sup>37</sup> externes, développés spécifiquement pour le traitement du signal audio en temps réel. Enfin, il existe des réverbérations à tous les prix, entre de nombreux modèles gratuits et d'autres coûtant plusieurs milliers d'euros.

Dans cette partie, une description de certains des moteurs de réverbération artificielle les plus utilisés actuellement dans le mixage de musique classique est faite, traitant des aspects de conception, d'ergonomie et donnant certains détails techniques. Toutefois ces descriptions ne sont pas exhaustives et nous engageons celui ou celle qui voudra en savoir plus à consulter les sites internet des fabricants.

### a) **Bricasti M7®**

Faisant office de référence en mixage de musique acoustique et très présente dans les studios, la Bricasti M7® est une réverbération algorithmique stéréophonique haut de gamme ayant été conçue par Bricasti, entreprise fondée par des anciens ingénieurs de Lexicon, et mise sur le marché en 2008. Elle fait partie des moteurs de réverbération qui fonctionnent via un processeur DSP externe et une télécommande, et n'est donc pas disponible en plugin<sup>38</sup>.

Si la conception des algorithmes est confidentielle, l'approche utilisée pour la M7® est celle d'une prise en compte des lois de l'acoustique, alors que l'approche traditionnelle de

---

<sup>37</sup> Pour *Digital Signal Processing* (traitement numérique du signal)

<sup>38</sup> Programme de traitement numérique du son intégré à un logiciel audio

conception de moteurs de réverbération, plus focalisée sur le résultat sonore seul, consiste plutôt en l'utilisation de filtres et de délais rebouclés (comme vu en section IV.B.2). Selon l'un des fondateurs de Bricasti, Brian Zolner, le moteur audio de la M7® est divisé en trois étages pouvant être réglés séparément :

- Un moteur dédié à la gestion des premières réflexions ;
- Un dédié à la gestion du champ diffus ;
- Un dédié à l'énergie précoce grave (entre 20 Hz et 80 Hz), conçu spécifiquement pour fournir la profondeur et la puissance des salles de concert dans ces fréquences.

Les algorithmes de la M7® sont conçus pour obtenir le plus grand réalisme possible. Son succès dans les studios confirme par ailleurs la réussite de cet objectif, car la M7® est très souvent décrite pour cette qualité par les ingénieurs du son. Les algorithmes de la M7® , basés notamment sur le comportement naturel des ondes sonores, colorent de fait moins le son que les moteurs traditionnels basés sur des filtres passe-tout et des délais rebouclés. De ce fait, la M7® utilise peu de modulation<sup>39</sup>, outil servant historiquement à réduire la coloration des algorithmes traditionnels.



Figure 31 : Face et arrière du processeur de réverbération Bricasti M7®

<sup>39</sup> Traitement d'un signal par un autre, typiquement une onde sinusoïdale. On distingue la modulation en amplitude (AM) qui dans le langage musical génère un « tremolo » et la modulation en fréquence (FM) qui génère un « vibrato ».

La M7® propose plus de 200 pré-réglages parmi lesquels des *Halls, Plates, Chambers, Ambient Spaces* modifiables par 15 paramètres<sup>40</sup> notamment le VLF Cut pour *Very Low Frequency Cut*, dédié aux très basses fréquences. Pour ce qui est des spécificités techniques, la M7® peut travailler en 24 bits avec un échantillonnage à 192 kHz, entièrement symétrique, avec une gigue<sup>41</sup> inférieure à 20 ps, et un taux de distorsion harmonique inférieur à 0,01%.

De par son prix relativement élevé (3990€ pour le processeur et 2290€ pour la télécommande Bricasti M10®<sup>42</sup>), la M7® n'est majoritairement présente que dans les studios professionnels de mixage, particulièrement en musique acoustique ayant besoin d'un moteur de réverbération flexible au rendu « naturel ».

### **b) AudioEase Altiverb®**

Commercialisée en 2011 en version 7, l'Altiverb® est une réverbération à convolution disponible sous la majorité des formats de plug-ins pour Mac et Windows. Progressivement devenue un standard aussi bien dans l'industrie de la musique que du son à l'image, elle est plébiscitée pour sa simplicité d'usage et pour la qualité et la quantité de sa base de réponses impulsionnelles. Stéréo en version normale et supportant le multicanal jusqu'au 5.1 en version XL, elle permet à l'utilisateur de naviguer parmi des centaines de réponses impulsionnelles : grandes salles de concert, moteurs de réverbération numériques et analogiques, cockpits d'avions ou tubes en plastique. Sa banque de réponses impulsionnelles<sup>43</sup> est régulièrement mise à jour par l'ajout de réponses enregistrées par les

---

<sup>40</sup> Voir le manuel de la M7® consultable en anglais à l'URL suivant: <http://www.bricasti.com/images/M7.pdf>

<sup>41</sup> La gigue d'un signal audionumérique est le phénomène de fluctuation de ce signal caractérisé par un glissement de sa phase ou une dispersion temporelle. Des valeurs trop élevée peuvent entraîner des erreurs de récupération des données.

<sup>42</sup> Prix consultés en mai 2019 sur le site Thomann : <https://www.thomann.de/fr/index.html>

<sup>43</sup> Il est possible de naviguer dans le catalogue de réponses impulsionnelles de l'Altiverb® à cette adresse: <https://www.audioease.com/altiverb/browse.php>

ingénieurs du son d'AudioEase, dans différents formats et dans différentes configurations (pour une salle on pourra choisir entre plusieurs configurations de microphones et différentes distances à la source). De plus, il est possible d'ajouter soi-même de nouvelles réponses impulsionnelles utilisables dans Altiverb®, AudioEase incitant d'ailleurs ses utilisateurs dans cette direction<sup>44</sup>.

En plus du changement de réponse impulsionnelle, et comme présenté en Figure 32, il est possible de modifier le temps de réverbération ainsi que des paramètres *Bright* et *Size*, d'utiliser un égaliseur intégré à trois bandes, de régler les niveaux d'entrée et de sortie et enfin de régler des paramètres temporels (*pre delay* et *attack*). En déroulant le menu *TIME*, on découvre (en bas à droite de la même figure) des paramètres de réglage des niveaux différenciés de l'énergie précoce (*early*) et du champ diffus (*tail*).



Figure 32 : Fenêtre principale de l'Altiverb 7®

Enfin, il est possible de visualiser la réponse impulsionnelle sélectionnée dans une représentation en forme d'onde (*waveform*) ou bien de « cascade » (*waterfall*, comme vu en

<sup>44</sup> Un tutoriel est disponible sur leur site à cette adresse : <https://www.audioease.com/altiverb/sampling.php>

section II.F), et d'utiliser le menu *positionner*, qui permet de simuler différents positionnements des haut-parleurs, dont la sortie serait le champ réverbéré capté par un ou plusieurs microphones placés dans une chambre réverbérante virtuelle<sup>45</sup>.

Les réponses impulsionnelles fournies par AudioEase ont été enregistrées à 44.1 kHz ou 48 kHz. Point intéressant, ils ne fournissent pas de réponses impulsionnelles à échantillonnage plus élevé car, selon eux, aucune information sonore intéressante n'a été décelée dans l'octave [24 kHz - 48 kHz]. Ainsi, pour des projets utilisant des échantillonnages différents, AudioEase recommande de maintenir le moteur de la réverbération à 44.1 ou 48 kHz afin d'éviter une surcharge processeur causée par le sur-échantillonnage des réponses impulsionnelles. Une des contraintes des moteurs de réverbération à convolution étant la latence liée à l'opération de convolution, nécessitant un grand nombre d'opérations, la surcharge processeur demeure une contrainte réelle à l'heure actuelle.

Au mois de mai 2019, l'Altiverb 7® coûte 499€ en version *regular* et 849€ en version XL<sup>46</sup>.

### **c) Ircam Verb v3®**

En 2010, la société Flux lança la Verb v3®, plugin de réverbération algorithmique basée sur une modélisation acoustique développée par les chercheurs de l'IRCAM<sup>47</sup>. De par sa conception tirée des lois de l'acoustique, la Verb v3® se distingue des autres moteurs de réverbération algorithmique en ce qu'elle permet de reproduire et synthétiser les caractéristiques acoustiques particulières à un environnement sonore théoriquement cohérent. Pour autant, elle est extrêmement modulable en ce qu'elle permet notamment une séparation complète de l'énergie précoce et de la queue de réverbération pour un rendu se voulant « naturel ».

---

<sup>45</sup> Pour plus d'information, se référer au manuel d'Altiverb 7® disponible (au mois de mai 2019) à l'adresse suivante : [https://www2.spsc.tugraz.at/add\\_material/audiotechnik/manuals/70\\_Software/AudioEase/Altiverb%20%20manual.pdf](https://www2.spsc.tugraz.at/add_material/audiotechnik/manuals/70_Software/AudioEase/Altiverb%20%20manual.pdf)

<sup>46</sup> Prix consultés sur le site d'AudioEase à l'adresse : <https://www.audioease.com/altiverb/>

<sup>47</sup> L'IRCAM (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique) est un centre français de recherche scientifique, d'innovation technologique et de création musicale.

Son fonctionnement repose sur une modélisation du champ réverbéré en trois phases : les réflexions précoces, le cluster (ou grappe de réflexions, étape intermédiaire évoquée en section I.A.3) et le champ diffus. Chaque partie peut être isolée et traitée par un égaliseur à trois bandes (*Low Gain*, *Mid Gain* et *High Gain*), et les deux premières peuvent voir le niveau et leur distribution temporelle modifiés. Un réglage important est celui du volume de la pièce (*Room Size*) qui peut varier entre 10 m<sup>3</sup> et 15000 m<sup>3</sup>.

Une section *Option* permet de jouer sur l'absorption de l'air, la densité modale, la largeur stéréophonique et son panoramique. Le temps de décroissance du champ diffus peut être réglé indépendamment selon trois zones fréquentielles (*Low*, *Mid* et *High*) dont il est possible de changer les fréquences de coupures. Enfin, un égaliseur permet de modifier la balance tonale globale de la pièce virtuelle (*Room*) dans laquelle se propagerait le champ sonore. Comme sur la majorité des plug-ins de réverbération, il est possible de modifier les niveaux d'entrée et de sortie (sur une plage dynamique [-12 dB; +12 dB]) et de modifier le mélange son direct / réverbéré.



Figure 33 : Fenêtre principale de l'Ircam Verb v3®

Enfin, il est possible de glisser progressivement entre deux réglages (A et B) par modification automatique des paramètres et d'automatiser cette transition.

La Verb v3® est donc une réverbération singulière en ce qu'elle propose une grande panoplie de réglages issus de critères objectifs, eux-même tirés d'une approche de la modélisation acoustique qui, autant qu'elle relie entre eux certains paramètres (changer le volume de la salle influera également sur la répartition temporelle des trois sections de la réverbération) tout en donnant un maximum d'amplitude pour les régler indépendamment.

Parmi les exemples cités dans cette section, la Verb v3® est la réverbération qui pousse le plus loin la compréhension du phénomène réverbérant régie par des lois physiques (c'est par exemple la seule à intégrer l'absorption de l'air, la densité modale ou l'existence indépendante du *cluster*, la grappe de réflexions intermédiaires).

L'Ircam Verb v3® peut être configurée en multicanal (jusqu'à 10 canaux), supporte le Dolby Atmos® et peut fonctionner à fréquence d'échantillonnage jusqu'à 192 kHz en natif (formats de plugins pour Mac et Windows) et 384 kHz sur les processeurs Pyramix®.

Au mois de mai 2019, l'Ircam Verb v3® coûte 319€<sup>48</sup>.

#### **d) Fabfilter Pro-R®**

Commercialisée en 2016 par Fabfilter, entreprise néerlandaise ayant auparavant développée des plugins perçus comme novateurs comme leur compresseur Pro-C® ou leur égaliseur Pro-Q2®, le plugin de réverbération artificielle Pro-R® présente une ergonomie simple et intuitive basée sur sept réglages principaux (boutons rotatifs) et une approche mêlant paramètres perceptifs et objectifs.

Du côté perceptif, le bouton principal nommé *Space* permet un réglage du temps de réverbération, ne modifiant pas en interne qu'un seul paramètre mais bien un ensemble de propriétés sonores faisant correspondre la réverbération à un espace acoustique de taille variable. Également, on trouve un bouton *Distance* permettant de régler perceptiblement

---

<sup>48</sup> Prix consulté sur le site de Flux à l'adresse : <https://www.flux.audio/project/ircam-verb-v3/>

la distance à la source (entre *Close* et *Far*), un bouton *Character* (entre *Clean* et *Chorus*) donnant un certain dynamisme à la réverbération ou encore un bouton *Brightness* (entre *Dark* et *Bright*) influant sur la balance tonale de la réverbération.

Du côté des paramètres objectifs, on trouve un bouton *Decay Rate* (entre 50% et 200%), changeant à *TR60* égal la répartition temporelle de l'énergie et un bouton *Stereo Width* (entre *Mono* et *Spacious*) permettant de modifier la largeur stéréophonique de la réverbération.

On trouve par ailleurs deux égaliseurs graphiques, un nommé *Decay Rate EQ*, permettant de modifier précisément le temps de décroissance de certaines bandes fréquentielles (jusqu'à 6), et un nommé *Post EQ*, permettant d'égaliser la sortie du plugin.

On trouve par ailleurs un réglage de pré-délai pouvant être réglé entre 0 ms et 500 ms, les réglages des niveaux d'entrée et de sortie (entre  $-\infty$  et +36 dB) et des panoramiques d'entrée et de sortie (accessibles via un clic sur les niveaux d'entée/sortie), présentés sur la bannière inférieure de la fenêtre du plugin présenté en Figure 34.



Figure 34 : Fenêtre de la réverbération Fabfilter Pro-R®

La Pro-R® se positionne donc à l'interface entre une interface analytique classique et des paramètres perceptifs, ce qui en fait une réverbération originale dans sa conception et très plébiscitée depuis sa sortie. Le plugin est disponible dans tous les formats pour Mac et Windows et sa licence coûte 169€<sup>49</sup>.

### e) Valhalla Room®

Commercialisée en 2016 par la société ValhallaDSP spécialisée dans la conception de plugins de réverbération, la ValhallaRoom® est une réverbération analytique basée sur un ensemble complet de paramètres objectifs précis. Comme le montre la Figure 35, sa fenêtre présente trois sections :

- Les principaux réglages sous forme de jauges glissantes : mélange entre son brut et son réverbéré (*MIX*), pré-délai (*PREDELAY*), temps de décroissance (*DECAY*, pouvant aller jusqu'à 100 s), filtre passe-bas (*HIGH CUT*) et profondeur (*DEPTH*) ;
- La section dédiée au contrôle des premières réflexions (*EARLY*) ;
- La section dédiée au contrôle de l'énergie tardive (*LATE*) ;

Concernant ces deux dernières sections, chacune possède en partie les mêmes types de paramètres objectifs tels que la longueur (*Early Size* ou *Late Size*, pouvant aller de 1 ms à 1 s), la modulation (*Mod Rate* et *Mod Depth*). Elles se différencient cependant par d'autres paramètres. Pour la section *Early*, on trouve le paramètre *Early Send*, permettant de régler la proportion de réflexions précoces dans le moteur de réverbération tardive, ainsi que le paramètre de diffusion de ces réflexions (*Diffusion*), contrôlant la densité des premières réflexions. Concernant spécifiquement la section dédiée à l'énergie tardive, on trouve des réglages liés à la balance tonale du champ diffus : réglages des temps de décroissance dans les graves et les aigus et les fréquences de coupures respectives (à 1 kHz et 8 kHz par défaut).

Enfin, on trouve le choix du mode de réverbération (*REVERB MODE*) qui permet de choisir entre 12 algorithmes de réverbération, parmi lesquels on peut citer *Large Room*, *Bright*

---

<sup>49</sup> Prix consulté en mai 2019 sur le site de Fabfilter à l'adresse : <https://www.fabfilter.com/products/pro-r-reverb-plugin-in>

Room, Dark Chambre ou encore Narcissus (décrit comme « sous-échantillonné avec des réflexions précoces clairsemées, une modulation aléatoire et une coloration sombre et légère en ressources CPU<sup>50</sup> »).

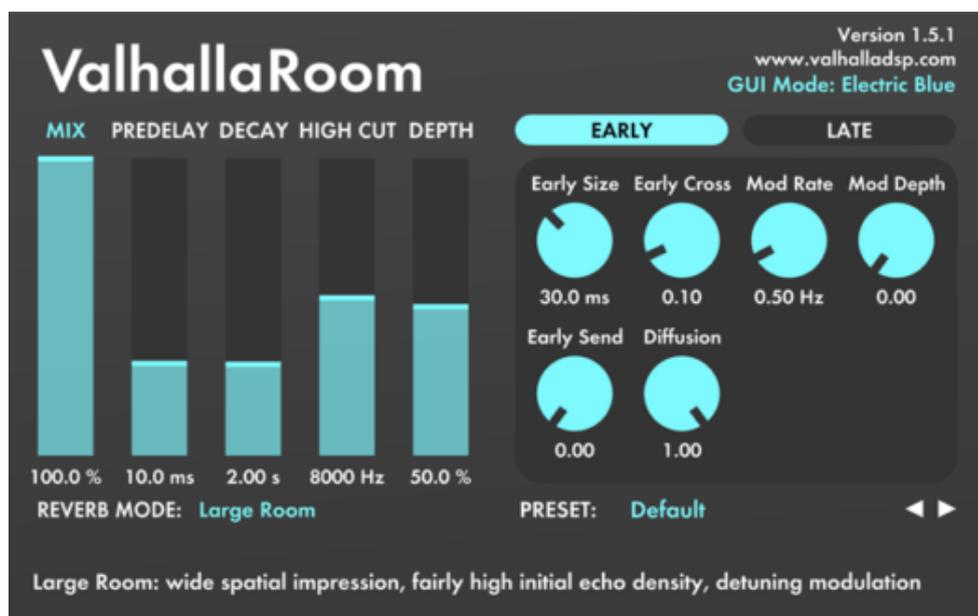


Figure 35 : Fenêtre de la réverbération ValhallaRoom®

De par la multiplicité de ses réglages, de sa faible consommation en ressources processeurs, de ses qualités sonores saluées<sup>51</sup> et de son prix modique (elle coûte 50\$<sup>52</sup>), la réverbération ValhallaRoom® est un outil devenu incontournable pour la gestion de l'énergie précoce notamment.

<sup>50</sup> Traduit de « *Downsampled, sparse initial echo density, random modulation, dark tone, low CPU* ».

<sup>51</sup> La ValhallaRoom est à la troisième place des meilleures réverbérations algorithmiques selon le classement 2016 du site communautaire GearsLutz. Le classement est consultable en mai 2019 à l'adresse : <https://www.gearsLutz.com/board/best-studio-gear/1100626-best-reverb-plugins.html>

<sup>52</sup> Prix consulté en mai 2019 sur le site de ValhallaDSP à l'adresse : <https://valhalladsp.com/shop/reverb/valhalla-room/>

## f) Quantec Yardstick 2492®

Moins connus que les autres moteurs de réverbération cités dans cette section, les modèles de réverbération artificielle de Quantec, basés sur leur algorithme Quantec Room Simulator (QRS) sont pourtant appréciés de nombreux professionnels de la musique ou du son à l'image. Et pour cause, l'approche de Quantec quant à la conception de leur algorithme est original en ce qu'il est basé sur une modélisation du comportement acoustique des salles du point de vue de la dynamique des fluides, considérant une salle comme un résonateur à grande échelle<sup>53</sup>, là où la majorité des autres constructeurs préfèrent une approche géométrique couplée à des filtrages et des modulations. Cette approche donne un rendu perçu comme extrêmement réaliste, quel que soit le mode de réverbération utilisé.



Figure 36 : Face avant du Quantec Yardstick 2492®

Le Yardstick 2492® propose 250 pré-réglages et un affinage de la réverbération limité en nombre de réglages (RT60 entre 10 ms et 100 secondes, volume de la salle entre 1 et 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, densité de l'énergie précoce, ...), l'approche du QRS tendant vers la génération d'une unique simulation d'espace. Le réglage se fait donc par le temps d'arrivée de la première réflexion et par les deux paramètres ayant trait au champ diffus. Cette simplicité de paramétrage liée à la conception de l'algorithme permet toutefois d'obtenir une très grande variété d'espaces.

---

<sup>53</sup> Pour plus d'informations, voir (en anglais) : [http://www.quantec.com/index.php?id=room\\_simulation](http://www.quantec.com/index.php?id=room_simulation)

Le Yardstick 2492® est une réverbération externe fournie avec une télécommande logicielle compatible pour windows et mac (Figure 37), fonctionne en entrées et sorties stéréo à 24 bits et jusqu'à 192 kHz et coûte 2900€<sup>54</sup>.



Figure 37 : Fenêtre du logiciel de contrôle du Yardstick 2492®

<sup>54</sup> Prix consulté sur le site de Quanteq à l'adresse : <http://www.quanteq.com/index.php?id=products>

### IV.C.3. Gestion de l'énergie précoce - étude de quatre plug-ins de réverbération

Comme cela a été montré dans la section précédente, les nombreuses approches propres à la conception des moteurs de réverbération artificielle et à leur ergonomie offrent une grande diversité d'outils pour les ingénieurs du son. Cette diversité se retrouve dans les approches relatives à la gestion de l'énergie précoce. Dans cette section dédiée à l'étude technique de ces possibilités, il ne sera pas question des choix opérés par les ingénieurs du son dans la pratique, cette dernière question faisant l'objet de la partie V de ce mémoire.

Cette section propose une analyse quant à la gestion de l'énergie précoce pour quatre modèles de réverbération: **Altiverb 7®**, **Fabfilter Pro-R®**, **Flux Verb v3®** et **Valhalla Room®** (les études de la Bricasti M7® et de la Quantec Yardstick 2492® étant rendues très difficiles d'un point de vue logistique de le fait qu'il s'agit de de réverbérations externes).

#### a) Les choix d'ergonomie

Ces quatre moteurs de réverbération proposent des ergonomies liées à des approches différentes (les informations présentées ici complètent celles données dans les descriptions générales proposées dans la section précédente, et ont vocation à synthétiser les informations relatives à la gestion de l'énergie précoce) :

- **Altiverb 7®** étant une réverbération à convolution (la seule parmi les quatre étudiées ici), elle ne passe donc pas par une modélisation acoustique et se limite donc au traitement de la réponse impulsionnelle choisie. Par conséquent, la séparation entre énergie précoce et champ diffus est opérée par une troncature temporelle (fenêtrage) de la réponse impulsionnelle. Le moteur détecte la transition et opère un fondu croisé (ou *cross-fade* en anglais) entre les deux<sup>55</sup>.

---

<sup>55</sup> Ajoutons ici que malgré notre demande d'informations sur la méthode de détection, aucune réponse n'a été donnée et il ne nous est donc pas possible de préciser sur quels critères cette détection est faite (proportion temporelle de la réponse impulsionnelle, détection des pics de premières réflexions, calcul de l'auto-corrélation, ...).

Ainsi, la gestion de l'énergie précoce se fait par activation ou non de celle-ci via un bouton, et un potentiomètre permet de moduler son niveau entre  $-\infty$  et +24 dB (idem pour le champ diffus, nommé *tail*). Comme sur les autres moteurs, un pré-délai peut être réglé entre 0 ms et 500 ms. Il est toutefois possible de modifier la répartition temporelle de l'énergie avec un potentiomètre *Size* qui opère une dilatation temporelle (*stretching*) sur la partie *early* de la réponse impulsionnelle.

- La **Pro-R®** est, comme nous l'avons vu, une réverbération algorithmique accordant une grande place aux critères perceptifs. Bien que la modélisation de l'énergie précoce soit prise en compte dans le moteur, aucun réglage ne traite spécifiquement de celle-ci, outre le pré délai. L'ensemble des réglages ont une influence sur l'énergie précoce, qui est étudiée dans la section suivante.
- La **Valhalla Room®** est une réverbération algorithmique proposant exclusivement des réglages « bas niveau » issus de critères objectifs. L'ensemble de ces réglages sont décrits dans la partie précédente. Nous précisons ici que la tendance de ce moteur de réverbération étant à la gestion séparée de multiples paramètres, cela impose une prise de distance avec la réalité des phénomènes acoustiques.
- La **Flux Verb v3®** est, comme nous l'avons vu, basée sur les travaux des chercheurs de l'IRCAM sur la modélisation acoustique. Ses réglages, à l'instar de la Valhalla Room®, sont de type « bas-niveau ». Reposant sur un modèle acoustique, certains de ses réglages globaux influencent l'énergie précoce :
  - le paramètre *size* (de 10 m<sup>3</sup> à 15000 m<sup>3</sup>) modifie le volume de la salle et étire ou compresse la distribution temporelle des réflexions précoces (et également du reste du champ réverbéré) ;
  - Le paramètre *width* (entre 1° et 180°) permet d'augmenter ou de réduire la corrélation entre les deux canaux (en stéréophonie). D'un point de vue

acoustique, on pourrait faire le rapprochement avec un changement de la valeur de l'*IACC*<sup>56</sup> ;

D'autres paramètres sont en outre spécifiquement dédiés aux premières réflexions :

- Le paramètre *Shape* modifie la répartition énergétique des réflexions précoces. À son minimum (0.1), les réflexions voient leurs amplitudes décroître de manière exponentielle, à sa valeur moyenne (0.5), toutes les réflexions sont de même amplitude. À son maximum (0.9), c'est l'inverse, et les réflexions voient leurs amplitudes croître de manière exponentielle. Selon le constructeur, des réflexions à niveau constant seraient typiques d'un espace où les surfaces réfléchissantes seraient à même distance de l'auditeur, tandis que des réflexions décroissantes en amplitude seraient typiques d'un espace où les surfaces réfléchissantes seraient groupées à proximité de l'auditeur [59] ;
- Les paramètres *Minimum* et *Maximum* permettent de choisir les temps d'arrivée de la première (entre 1 ms et 30 ms) et de la dernière (jusqu'à 120 ms) réflexion ;
- Le paramètre *distribution* permet de répartir temporellement les premières réflexions. Concentrées après la première à 0.1, elles sont réparties uniformément à 0.5 et concentrées avant la dernière à 0.9.

Enfin, rappelons qu'il est possible d'utiliser un égaliseur à trois bandes dédié aux premières réflexions.

Des paramètres analogues sont par ailleurs proposés pour la gestion de la grappe de réflexions (*cluster*) dont la densité est plus élevée de par la nature du phénomène réverbérant.

---

<sup>56</sup> Voir Annexe 2.

Remarque : Si les observations à venir peuvent permettre de montrer des différences entre les quatre moteurs de réverbération, elle ne prévalent pas sur l'écoute. Dans ce sens, le lecteur pourra se référer au site <https://reflexionsprecoces.home.blog/><sup>57</sup> pour des exemples sonores.

### **b) Les types de technologie et les implications sonores**

L'ensemble de ces choix de conception et de possibilités ergonomiques ont des conséquences directes sur la génération des premières réflexions. Il est possible d'observer quelque unes de ces différences par les réponses impulsionnelles de ces plugins, ce que nous proposons dans cette partie. Nous proposons ici d'observer les réponses impulsionnelles<sup>58</sup> pour différentes configurations qui seront explicitées. Les formes d'ondes présentées correspondent à (*pour la version pdf de ce document*):

- **En jaune, la sortie de l'Altiverb 7®**, paramétrée sur la réponse impulsionnelle **Concertgebouw** ;
- **En bleu, la sortie de la Pro-R®** ;
- **En vert, la sortie de la Verb v3®** ;
- **En rose, la sortie de la Valhalla Room®**.

Pour chaque observation, le signal d'entrée est une impulsion de Dirac (un échantillon à 0 dBFS<sup>59</sup>), et les faders sont également placés à 0 dBFS.

### **a) Cas n°1 : Energie précoce par défaut**

La première configuration que nous analysons est le cas, pour chaque plugin, d'un réglage par défaut, isolant autant que possible l'énergie précoce.

---

<sup>57</sup> Les détails sur ce site sont donnés en partie VI.

<sup>58</sup> Ces réponses ont été obtenues et visualisées à l'aide du logiciel Pro Tools®.

<sup>59</sup> Pour dB *Full Scale*, soit le niveau numérique maximal.

Tous les pré-délais ont été fixés à 10 ms et le temps de réverbération à 200 ms (temps donné par l'Altiverb® pour la longueur de la portion d'énergie précoce de la réponse impulsionnelle).

Réglages spécifiques :

- Altiverb® : *Tail coupée* ;
- Pro-R® : *Space à 0.20 s, STEREO WIDTH sur MONO* (afin de visualiser ultérieurement l'effet de l'élargissement stéréophonique) ;
- Verb v3® : *Cluster et Reverb coupés* ;
- Valhalla Room® : *Decay à 0.20 s, Late Size à 0. Depth à 100%*, de manière à pouvoir visualiser les premières réflexions (à 0%, *Depth* concentre toute l'énergie dans la plage fréquentielle paramétrée par *Early Size* - ici à 30 ms - et mélange les fronts des premières réflexions à un champ diffus extrêmement resserré).

Les formes d'ondes générées sont présentées en Figure 38.

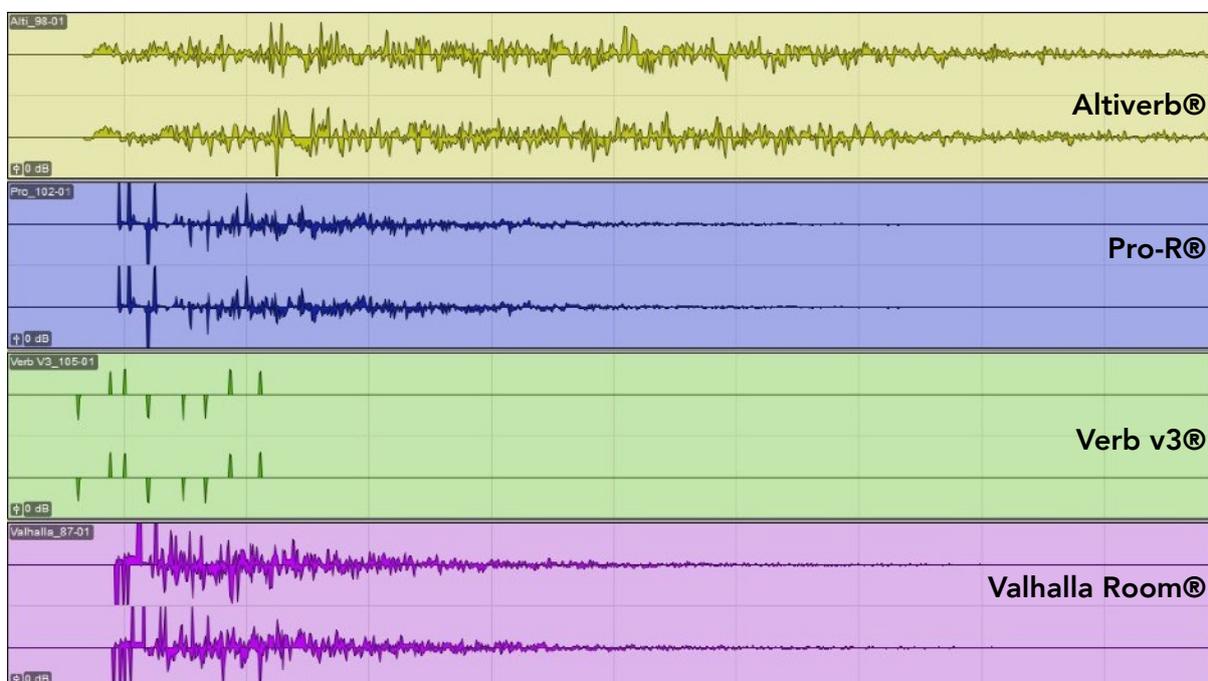


Figure 38 : Formes d'ondes des sorties stéréophoniques des quatre moteurs de réverbération.  
Cas n°1 : Énergie précoce par défaut

### Observations :

On voit bien ici la différence entre la Verb v3® et les autres réverbérations. Elle est la seule à ne présenter aucun champ diffus, mais seulement quelques pics (identiques sur les deux canaux) correspondant aux réflexions précoces. La réponse de l'Altiveb® elle est la plus étalée dans le temps malgré un temps de réverbération affiché de 0.20 ms, ce qui s'explique par sa nature de réverbération à convolution, tributaire de l'acoustique de la salle à laquelle la réponse impulsionnelle choisie correspond.

En termes de répartition énergétique de l'énergie précoce, les trois autres diffèrent sensiblement. L'Altiverb® présente deux réflexions franches précédées d'une montée (*build up*), tandis que la Pro-R® présente une première réflexion franche et une série d'autres légèrement atténuées suivies d'un signal plus homogène, et que la Valhalla® a une énergie plus concentrée mais dont les réflexions sont moins distinctes.

Enfin, on remarque que les réponses de la Verb v3® et de la Pro-R® sont toutes deux purement monophoniques (signaux droite et gauche identiques, celle du dessus correspondant à la gauche et celle du dessous à la droite).

### **b) Cas n°2 : Augmentation de la largeur stéréophonique**

Nous pouvons dans ce deuxième cas observer le comportement de ces réverbérations si on cherche à élargir la stéréophonie pour les deux réverbérations précédemment monophoniques, ainsi que celle de la Valhalla Room®.

### Réglages spécifiques :

- Altiverb® : cette réverbération ne présente pas d'élargissement stéréophonique, aucune modification n'est apportée aux réglages précédents ;
- Pro-R® : *STEREO WIDTH* au maximum (*Spacious*) ;
- Verb v3® : *Width* sur 180° (70° par défaut) ;
- Valhalla Room® : *Early Cross* à 1 (0 auparavant).

Les formes d'ondes générées sont présentées en Figure 39.

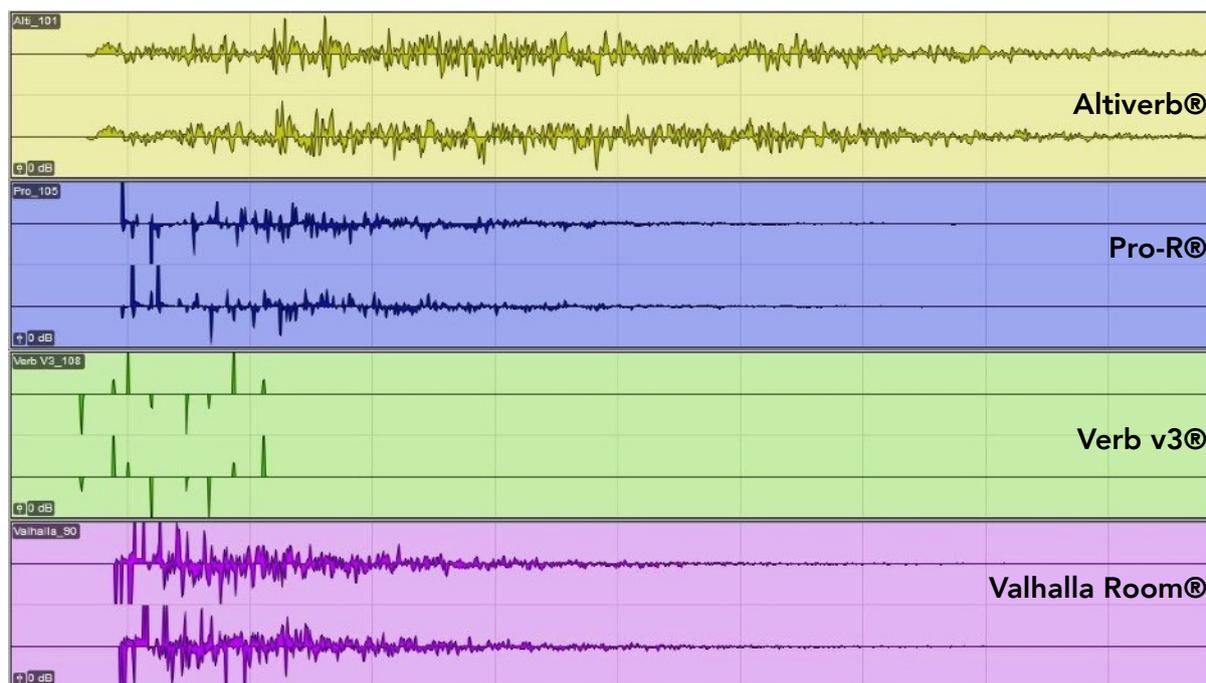


Figure 39 : Formes d'ondes des sorties stéréophoniques des quatre moteurs de réverbération.  
Cas n°2 : Élargissement stéréophonique

#### Observations :

Deux réverbérations ont introduit une décorrélation bien visible : la Verb v3® et la PRo-R®. Semblant être basé sur le même principe, l'élargissement stéréophonique n'a pas affecté la distribution spatiale des réflexions mais les amplitudes sont maintenant décorrélées : quand une amplitude est plus faible d'un côté, elle est plus forte de l'autre, en alternance dans l'ordre successif des réflexions. Dans le cas de la Verb v3®, les réflexions sont en phase : cette méthode a l'avantage d'être compatible pour la monophonie (la sommation ne produira pas d'annulations de phase). Dans le cas de la PRo-R®, elles sont en opposition de phase, cependant ici les différences d'amplitudes sont telles qu'en sommation monophonique la réflexion la plus forte prédominera largement sur la plus faible, l'annulation de phase ne posant donc pas a priori un problème audible important.

Le signal issu de la Valhalla Room® est plus difficile à analyser, et bien qu'une différence soit visible, il est difficile de conclure à un élargissement stéréophonique effectif dans ce cas-ci.

### c) Cas n°3 : Gestion du panoramique d'entrée

Le dernier cas d'étude est celui du suivi du panoramique du signal d'entrée. Ici, le panoramique d'envoi dans les moteurs de réverbération est réglé totalement à gauche.

#### Réglages spécifiques :

- Altiverb® : *Tail coupée* ;
- Pro-R® : *Space à 0.20 s, STEREO WIDTH sur 100%* ;
- Verb v3® : *Cluster et Reverb coupés* ;
- Valhalla Room® : *Decay à 0.20 s, Late Size à 0. Depth à 100%*.

Les formes d'ondes générées sont présentées en Figure 40.

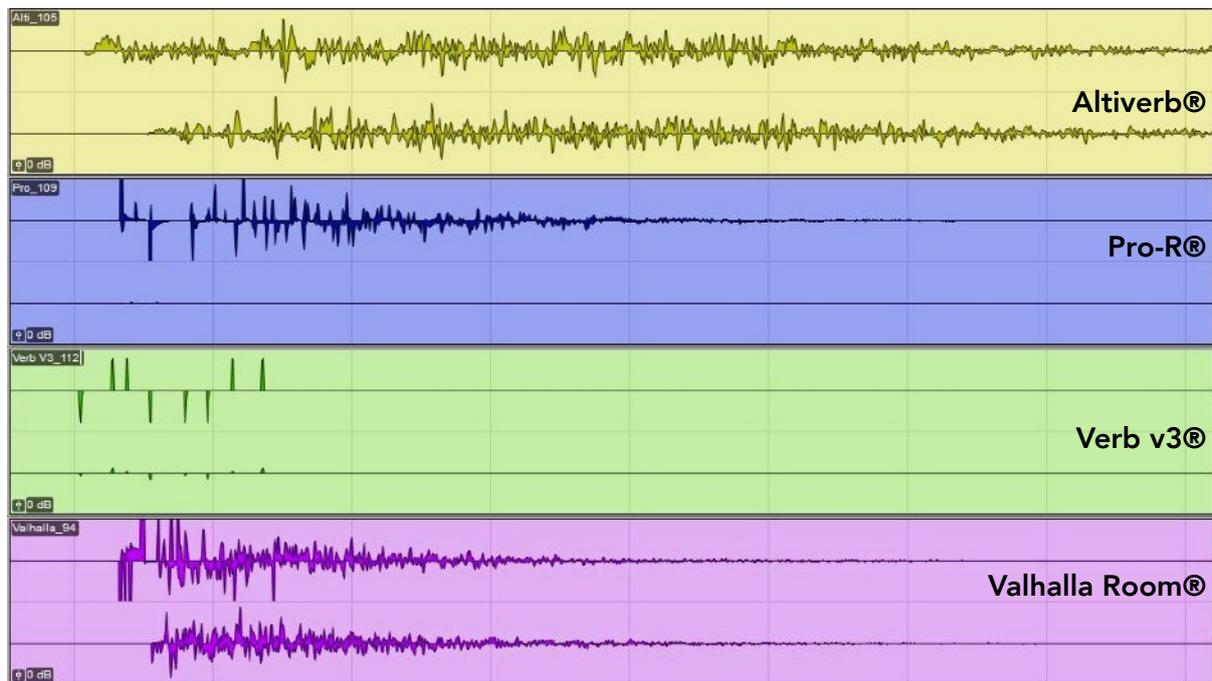


Figure 40 : Formes d'ondes des sorties stéréophoniques des quatre moteurs de réverbération.  
Cas n° 3 : Suivi du panoramique de la source

### Observations :

Les changements qui sont visibles pour les quatre plugins témoignent des différences de conception:

- Dans le cas de l'Altiverb®, on remarque principalement l'introduction d'une différence de temps ( $\Delta t$ ) entre les deux canaux, le gauche arrivant naturellement en premier, de manière à exploiter l'effet de précedence. Si on mesure cette différence, on trouve approximativement 10 ms, ce qui est amplement suffisant pour « coller » l'image sonore à gauche (voir section II.A.3.b) pour les détails sur la localisation en stéréophonie). Ce comportement est une conséquence de la gestion du moteur de l'Altiverb® en configuration stéréophonique : en réponse à nos questions sur le sujet, un employé d'Audio Ease nous a expliqué que, pour leur mesure, ils prennent deux microphones et deux enceintes, et enregistrent les réponses impulsionnelles avec chacune des enceintes alternativement. Ainsi, lorsqu'un signal est envoyé dans un seul des canaux (ici le gauche), c'est comme si seulement l'enceinte de gauche sur la scène produisait du son, que les deux microphones capteraient (la sortie de la réverbération), le plus lointain captant le signal avec un décalage temporel (ici le droit).
- Dans le cas de la Pro-R® et de la Verb v3®, le suivi de panoramique se fait seulement par différence d'intensité ( $\Delta I$ ), de manière à suivre le panoramique de la source (on observe qu'il reste très peu de signal sur le canal droit).
- Dans le cas de la Valhalla Room®, il s'agit d'un mélange des deux : différences de temps et d'intensité.

Ces trois approches pour le suivi de panoramique peuvent trouver une analogie dans les couples de prise de son stéréophonique, certains étant basés sur le  $\Delta t$  (couple AB), sur le  $\Delta I$  (couple XY) ou sur un mélange des deux (couple ORTF). De manière analogue à l'éventail des possibilités que ces couples offrent en prise de son<sup>60</sup>, ces trois approches

---

<sup>60</sup> La prise de son stéréophonique n'étant pas limitée à l'usage exclusif de ces couples standardisés.

dans la conception du suivi du panoramique des sources sont autant de possibilités laissées aux ingénieurs du son en termes de rendu sonore spatial de l'énergie précoce.

## V. La gestion de l'énergie précoce en pratique - points de vue d'ingénieurs du son

Afin de comprendre les enjeux liés aux premières réflexions de réverbération en musique classique, nous avons interrogé des ingénieurs du son qui, selon les spécificités propres de leurs pratiques professionnelles, ont pu nous donner un ensemble de réponses qui sont autant de pistes de réflexion quant à la compréhension du problème et aux possibilités d'approches concrètes, de la prise de son au mixage. Chacun d'entre eux a accepté que ses propos figurent dans ce mémoire.

Ces ingénieurs du son sont :

- Frédéric Changenet, ingénieur du son à Radio France et professeur à la FSMS<sup>61</sup> ;
- Hervé Déjardin, ingénieur du son au département innovation de Radio France ;
- Alban Moreau, ingénieur du son indépendant et ingénieur acousticien ;
- Thomas Vingtrinier, ingénieur du son indépendant ;
- Daniel Zalay, ingénieur du son et MMO<sup>62</sup> à Radio France ;

Cette partie propose une synthèse de la compréhension des enjeux liés à la gestion de l'énergie précoce en musique classique, d'après les témoignages de ces ingénieurs du son. Cette synthèse n'a pas de vocation totalement exhaustive et universelle, elle propose plutôt des axes d'approches et de réflexion sur le sujet, basés sur un nombre limité d'ingénieurs du son interrogés. Enfin, et pour plus de détails, les transcriptions de ces entretiens sont fournies en Annexe 4 de ce mémoire.

---

<sup>61</sup> Formation Supérieure au Métiers du Son au Conservatoire de Paris.

<sup>62</sup> Musicien Metteur en Ondes.

## V.A. Le niveau d'importance - les effets perceptifs

Qu'elles soient issues de la prise de son ou bien générées par des réverbérations artificielles, tous les ingénieurs du son interrogés les considèrent importantes, et s'accordent à dire qu'elles ont un impact significatif sur le son, notamment dans le cas des microphones d'appoint, pouvant recevoir des réflexions d'amplitude importante.

Alban Moreau précise que les premières réflexions peuvent être divisées en trois catégories:

- Le *champ direct étendu*, soit les toutes premières réflexions qui auront pour effet principal une coloration de la source par filtrage en peigne
- Les réflexions de second ordre, plus tardives qui sont plutôt à même d'influer sur la largeur apparente de la source
- Les réflexions précoces tardives qui participent surtout de la sensation d'enveloppement.

Pour Thomas Vingtrinier, les premières réflexions sont fondamentales en ce qu'elles permettent de replacer dans l'espace sonore virtuel une source captée par un microphone d'appoint. De la même manière, Frédéric Changenet et Daniel Zalay parlent de « décoller » la source : les premières réflexions permettent de rendre une source moins frontale, car moins « sèche ».

Les premières réflexions sont aussi des indicateurs d'espace. À ce sujet, Frédéric Changenet explique que ce sont elles qui signent l'espace en donnant les informations sur sa taille, sur la nature des parois ainsi que sur le positionnement de la source dans celui-ci.

Corroborant les résultats des études perceptives donnés en partie II, les ingénieurs du son interrogés expliquent que les réflexions précoces ont donc des implications perceptives multiples. Il est difficile de séparer l'action des réflexions sur le timbre de la source sans jouer sur d'autres paramètres tels que la largeur ou la distance apparente.

## **V.B. Les premières réflexions : entre prise de son et réverbération**

### **artificielle**

Nous avons vu en partie III que l'esthétique dominante en musique classique est celle d'une mise en espace de la scène sonore de manière réaliste, et dont les techniques de prise de son rendent le mixage tributaire de l'acoustique captée par les micros principaux (couple stéréophonique, Decca Tree ou autre) lors de l'enregistrement.

Les premières réflexions faisant partie intégrante du champ réverbéré, elle font l'objet d'attentions particulières chez les preneurs de son qui doivent composer avec elles, qu'elles soient vues comme des avantages dont il est intéressant de tirer parti, ou comme un inconvénient, en vue du mixage notamment.

### **V.B.1. Les objectifs et limites de la prise de son**

#### **a) L'influence de la salle d'enregistrement**

Type de salle d'enregistrement, de formations instrumentale, de dispositif microphonique : les cas de figure sont si multiples qu'il est difficile de généraliser un comportement type face aux premières réflexions lors de la prise de son. Cependant, on peut chercher à catégoriser les environnements acoustiques qui seront plus ou moins favorables. En effet, les premières réflexions peuvent représenter un inconvénient pour le preneur de son. Daniel Zalay explique que dans certaines salles ayant une acoustique très chargée en premières réflexions (et pouvant par ailleurs être appréciée du public), celles-ci peuvent nuire à la prise de son par un surplus d'informations et une dégradation des timbres des instruments. Et bien que l'acoustique générale de la salle de concert puisse être favorable, les réflexions précoces sont inévitables notamment dans les microphones d'appoint proches des instruments et du sol, le premier réflecteur sonore.

Ainsi la majorité des ingénieurs du son interrogés voient les premières réflexions naturelles avec circonspection, le danger d'une coloration non maîtrisée pouvant significativement dégrader du timbre des sources.

Par ailleurs, bien qu'elles soient d'importants indicateurs de la localisation des sources, que ce soit dans un environnement réel ou en restitution stéréophonique (ou multicanale), les microphones d'appoints, de par leur nature monophonique, sont incapables de restituer la direction des réflexions. Hormis la spatialité captée par le couple principal, il est impossible de tirer partie de la localisation des réflexions à la prise de son.

### **b) L'influence de la reprise**

Un élément important à prendre en compte parallèlement aux réflexions précoces est la reprise. Pas nature inexistante pour un instrumentiste seul, ou très faible pour une formation réduite (là aussi selon les instruments et la disposition des musiciens), la reprise dans une formation orchestrale peut devenir rapidement très problématique à mesure qu'on éloigne l'appoint de la source. À ce sujet, Thomas Vingtrinier explique que plus une source est baignée dans le son des autres instruments et les réflexions précoces, plus l'importance de ces dernières décroît et se limite à leur influence sur le timbre et sur la profondeur. On pourrait vouloir capter la source la moins « polluée » possible et donc au plus près, mais cela pose d'autres problèmes sur le timbre et la dynamique du son direct, la majorité des instruments acoustiques projetant un son ayant vocation à se développer dans l'espace. Ainsi, on entre dans un compromis entre la beauté du timbre naturel de l'instrument et la quantité de reprise, la proportion des réflexions précoces étant vue comme une conséquence de choix faits vis à vis de ce compromis.

### **c) Gestion des réflexions précoces et placement des sources**

Alban Moreau voit les premières réflexions comme un outil important pour la réussite de la prise de son, tout d'abord comme un moyen d'augmenter le volume apparent d'une source et donner l'empreinte acoustique du lieu. Par exemple, il explique que dans un enregistrement de piano, il cherchera souvent un emplacement proche d'un mur pour favoriser leur influence en ce sens. De manière générale, lors de l'écoute de la réverbération de la salle en vue de la prise de son, il accorde plus d'importance aux

réflexions précoces qu'au champ diffus, se laissant principalement guider par la coloration qu'elles induisent sur le timbre des sources.

D'un autre côté, Daniel Zalay explique qu'une tendance dans le cas d'enregistrements dans des salles de concert est à la disposition des musiciens vers le centre du plateau et donc loin des parois les plus proches, afin de garder des réflexions tout en limitant leur niveau.

Enfin, Thomas Vingtrinier explique en exemple que dans le cas de l'enregistrement d'un clarinettiste, il a remarqué qu'une réflexion venant du sol colorait significativement et presque systématiquement le son. Il cherche alors à atténuer l'impact de cette réflexion à l'aide d'un tapis posé au sol (faisant office d'absorbant) ou en se rapprochant de l'instrument. De manière général, il utilise souvent des panneaux absorbants pour atténuer les réflexions précoces à la prise de son.

#### **d) Autres facteurs de choix**

On l'a vu, les réflexions précoces sont perçues comme très importantes mais également délicates à gérer à la prise de son, de par leurs influences perceptives multiples et la présence d'autres contraintes comme la reprise ou la diversité énorme des couplages entre instruments et salles. De plus, leur influence au moment des choix de prise de son est à relativiser par l'importance de choix inconscients assumés par les ingénieurs du son. Thomas Vingtrinier explique au sujet du rendu des premières réflexions à la prise du son qu'il considérera spécifiquement cette question dans des cas particuliers de problèmes de timbre ou d'éloignement ressenti trop important. Pour Alban Moreau, l'influence des premières réflexions ne va pas systématiquement résulter en un choix précis, bien que ce soit quelque chose qu'il garde toujours à l'esprit.

On peut également relativiser l'influence des réflexions précoces sur les choix de prise de son en raisonnant par ordre de priorité. En effet, cette question n'est pas évoquée comme première priorité par les ingénieurs du son. Thomas Vingtrinier insiste sur l'importance à accorder avant tout au son direct et à sa mise en espace, avant de considérer la problématique des premières réflexions. Pour Alban Moreau également, certaines prises de

son peuvent se dérouler de telles manières à ce qu'il n'aura pas la possibilité d'accorder beaucoup de temps à la gestion de leur rendu.

Un dernier facteur relativisant l'importance des réflexions précoces est celui du confort de jeu des musiciens, qu'Alban Moreau explique être la priorité première. Ainsi, il ne cherchera pas à placer un musicien à un endroit où les réflexions précoces sont intéressantes si l'instrumentiste n'y est pas à l'aise pour son jeu.

## **V.B.2. Quelle utilisation des réverbérations artificielles ?**

On a vu que plusieurs des ingénieurs du son interrogés cherchent à limiter l'impact des réflexions précoces à la prise de son. Cela ne signifie pas pour autant qu'ils cherchent à les éviter au moment du mixage, et bien souvent une prise de son claire et pas trop encombrée d'énergie précoce incontrôlée permet une grande latitude sur l'ajout des réflexions en mixage à l'aide de réverbérations artificielles.

### **a) Objectifs**

L'objectif premier de l'ajout de réflexions précoces est la recherche du réalisme, celles-ci étant considérées comme le pont entre le son direct et la réverbération tardive. Elles sont donc essentielles pour donner à l'oreille l'illusion d'un espace sonore cohérent. Pour Thomas Vingtrinier, le couple principal donne la mise en scène spatiale et le rôle de l'appoint est de donner un éclairage sur une source qui doit néanmoins s'intégrer à cette mise en scène, ce qui est permis notamment par le recours à ces premières réflexions.

L'objectif est donc de modifier des paramètres perceptifs tels que la largeur apparente ou la distance apparente, tout en jouant sur le timbre. À ce propos, Alban Moreau explique utiliser parfois les premières réflexions comme un égaliseur qui aurait des effets secondaires perceptifs spatiaux.

Également, il est possible de jouer sur la spatialité des premières réflexions. À la question de savoir si les réflexions doivent suivre ou non la localisation de la source, les ingénieurs

répondent que, s'il serait envisageable de les placer à d'autres endroits, ils optent généralement pour une localisation identique, à l'instar d'Hervé Déjardin, qui explique que la recherche de reproduction d'un phénomène acoustique naturel implique des réflexions suivant la localisation des sources. De plus, pour Frédéric Changenet, localiser les réflexions ailleurs que superposées à la source contribueraient d'avantage à un flou qu'à une précision spatiale. Pour Thomas Vingtrinier, il peut néanmoins être intéressant d'accentuer la position d'une source qui serait insuffisamment latéralisée par des réflexions « tirant » cette source sur le côté.

### **b) Limites**

Plusieurs ingénieurs du son témoignent cependant des limites aux possibilités offertes par les réverbérations artificielles. Frédéric Changenet explique que dans le cas d'un orchestre, beaucoup de microphones d'appoint captent une reprise non négligeable et déjà beaucoup de premières réflexions. En rajouter en mixage risque alors de beaucoup détimbrer les sources. Ainsi, dans certains cas, la problématique des réflexions précoces est à un niveau d'importance inférieur à celui de la gestion de la reprise. Alban Moreau explique alors travailler d'abord à ce que la reprise soit favorable avant de penser aux premières réflexions. Et si la reprise n'est pas évitée mais participe du son capté par les microphones, ajouter des réflexions précoces revient à superposer deux étages d'énergie précoce ce qui peut être ressenti comme incohérent.

À ce sujet, Frédéric Changenet précise que l'on peut toujours tenter de faire tendre la sonorité des réflexions précoces ajoutées à celles présentes à la prise, on n'aura cependant jamais la bonne fonction de transfert qui nous assurerait une cohérence parfaite, de toute manière illusoire au vue de l'interaction entre tous les microphones.

### **c) Outils et configurations**

Plusieurs possibilités d'utilisations d'outils et de configurations sont explicitées par les ingénieurs du son. Concernant les outils, il ressort clairement que l'ensemble des réverbérations sont complémentaires, et que chacune peut être vue comme un outil spécialisé dans la résolution d'un problème spécifique. Cependant, les tendances divergent

sensiblement. Certains ingénieurs du son favorisent des réverbérations qui assurent une cohérence des réflexions, et préfèrent en ce sens n'utiliser qu'un seul moteur de réverbération par mixage (Frédéric Changenet, Hervé Déjardin). D'autres en revanche utilisent simultanément plusieurs moteurs, la configuration la plus classique étant un duo de réverbérations, l'une dédiée aux réflexions précoces et l'autre au champ diffus.

Thomas Vingtrinier qui emploie souvent cette méthode nuance toutefois en expliquant que la séparation habituelle entre ces deux parties de la réverbération demeure artificielle à son oreille et il émet des doutes quant à la validité aussi bien théorique que pratique de ce modèle. Dans un recherche de réalisme, il explique envoyer (par le biais d'un bus) le retour des réflexions précoces dans le moteur dédié au champ diffus, ce qui participe à la fusion entre ces deux parties.

Des limitations matérielles demeurent, et les réverbérations externes étant favorisées pour leur rendu plus beau et réaliste que la majorité des plugins, elles sont cependant limitées en nombre d'entrées/sorties, ce qui est un inconvénient quant aux possibilités de *routing*<sup>63</sup>.

#### **d) Remarques supplémentaires**

Deux remarques supplémentaires peuvent être faites au sujet des premières réflexions ajoutées par réverbération artificielle :

##### *Influence du cadre esthétique de la stéréophonie*

Comme nous l'avons vu dans la section II.C.3, l'espace perçu en stéréophonie est une anamorphose de la réalité, une distorsion de l'espace acoustique réel, que ce soit du fait de l'angle de prise de son ou du fait que le son venant de l'arrière à la prise de son est perçu comme venant de l'avant à la restitution. De plus, les microphones d'appoint accentuent les incohérences acoustiques quand il s'agit de les mélanger au couple principal. La stéréophonie en musique classique est alors constituée d'un ensemble de codes

---

<sup>63</sup> Le mot anglais *routing* désigne la configuration d'entrées/sorties pour une situation donnée (traitement analogique externe, plugin interne, pistes dans un logiciel audio, ...).

esthétiques qui tolèrent donc un manque de cohérence acoustique au profit d'un plaisir d'écoute. Les ingénieurs du son sont clairs là dessus, il s'agit bien davantage d'aboutir à un bel objet sonore plutôt qu'à un rendu réaliste mais inintéressant. Les démarches allant dans le sens de la compréhension de la réalité physique des phénomènes acoustiques sont des pistes de réflexion qui ne doivent pas cloisonner les choix techniques et esthétiques opérés au mixage.

### Influence du local d'écoute

Lorsqu'un ingénieur du son mixe avec des enceintes (et non au casque), les parois de son studio réagissent au son et génèrent leur propre réverbération. Il en va de même pour les salles d'écoute domestiques, souvent bien plus réverbérantes et à forte concentration en énergie précoce. Partant du constat que les réflexions précoces du local participent à l'expérience d'écoute, Alban Moreau explique limiter ses recours aux premières réflexions trop précoces, l'espace temporel « manquant » étant bien souvent comblé par la réverbération du local d'écoute.

## **V.C. L'influence du format de diffusion**

Les remarques qui ont été faites jusqu'ici l'ont été dans le cadre d'un mixage stéréophonique. Cependant de nombreux ingénieurs du son travaillent aussi en différents formats multicanaux et si certains enjeux demeurent, certaines différences peuvent être explicitées quant à la gestion de l'énergie précoce.

### **V.C.1. Quels enjeux pour le multicanal ?**

La principale différence apportée par le multicanal est l'ajout des haut-parleurs à l'arrière de l'auditeur. Cela implique des possibilités en termes de restitution acoustique, gagnant alors un degré de réalisme par rapport à la stéréophonie et se rapprochant de l'expérience d'écoute en salle de concert. Si la stéréophonie s'accommode d'incohérences spatiales, le

multicanal pose à ce sujet de nouveaux enjeux. À ce sujet, Frédéric Changenet explique que ces incohérences, induites par l'ajout de réflexions précoces par des moteurs classiques, deviennent trop audibles et qu'il devient primordial de chercher un moteur de réverbération qui permette la création de réflexions précoces cohérentes. Pour lui, la stéréophonie et le multicanal sont comme deux mondes très différents, où les questions des premières réflexions, de l'élargissement des sources et de l'enveloppement ne se posent pas de la même façon.

### **V.C.2. Des outils différents**

Les ingénieurs du son interrogés travaillant beaucoup en multicanal expliquent que l'outil aujourd'hui le plus adéquat est selon eux le Spat® de l'IRCAM, notamment dans sa version Revolution®, commercialisée en 2018. Avec ce moteur, il est possible de travailler en mode « objet » : chaque piste est considérée comme un objet à placer dans un espace sonore virtuel aux caractéristiques acoustiques modifiables. Ainsi, toutes les sources sont sujettes à la même réverbération cohérente. Le travail en mode objet n'écarte pas la possibilité de travail dans une configuration plus standard comme le 5.1, format pour lequel Hervé Déjardin explique favoriser plutôt les réverbérations à convolution.

### **V.C.3. Conclusion de cette partie**

Cette partie dédiée aux pratiques des ingénieurs du son nous a permis de mieux comprendre les problématiques liées à la gestion de l'énergie précoce, qu'on soit en situation de prise de son ou en mixage. Il en sort que si les ingénieurs du son s'accordent à considérer les réflexions précoces comme importantes, et s'entendent sur les effets perceptifs, leurs témoignages font la démonstration d'approches très diverses, s'opposant parfois. Il est donc difficile de prétendre à une synthèse univoque de ces propos, dont le substrat serait une méthode claire, justifiée et efficace quant à ces problématiques. Evidemment, cela est aussi lié au cadre d'étude, le mixage en musique classique qui, comme nous l'avons vu précédemment, demeure un objet esthétique en appelant à la subjectivité des auditeurs comme des ingénieurs du son. Et bien que le but décrit soit

souvent celui de la création d'un « bel objet sonore », les méthodes pour y parvenir sont multiples et hermétiques à toute forme de hiérarchisation objective.

Nous pouvons toutefois synthétiser les grandes lignes explicitées dans cette partie. Concernant la prise de son, certains ingénieurs du son cherchent éviter les réflexions précoces de manière à minimiser des effets de filtrage et de flou non maîtrisés et difficiles à corriger en mixage. À l'inverse, certains les considèrent précieuses car tout autant pourvoyeuses d'informations sonores importantes que difficiles à reproduire par la suite. Les pratiques en mixage découlent de ce qui a été fait à l'enregistrement et les ingénieurs du son étant généralement chargés des deux aspects, leurs pratiques s'inscrivent en cohérence avec l'étape de prise de son. Parmi les ingénieurs du son questionnés, ceux qui cherchent plutôt à éviter les premières réflexions à la prise utilisent des réverbérations assurant une bonne cohérence de la réverbération (le *Spat*® par exemple). Ceux qui semblent moins catégoriques à la prise de son utilisent davantage plusieurs moteurs en se concentrant sur le rendu sonore, bien que leurs choix soient souvent justifiés par la théorie acoustique (on peut prendre ici l'exemple de Thomas Vingtrinier qui envoie ses premières réflexions dans le champ diffus, témoignant d'un besoin de cohérence avec le monde « réel »). Pour ce qui concerne le rendu des réflexions précoces, nous pouvons noter une certaine prévalence des effets sur le timbre de la source (coloration) et d'augmentation de la distance apparente. D'autres critères, tels que la largeur apparente, la spatialité des réflexions ou encore la sensation d'enveloppement sont moins voire peu directement mentionnés.

Enfin, si certains outils sont très utilisés (la *Bricasti M7*® en particulier), il n'est pas d'homogénéité quant aux choix opérés par les ingénieurs du son. Cela témoigne à notre sens de la complexité de la réverbération et des difficultés que pose la gestion de l'énergie précoce, impliquant une diversité d'approches ayant toutes une dimension exploratoire. En effet, une caractéristique commune aux propos des ingénieurs du son interrogés est aussi une forme de doute, fécond en ce qu'il mène à la recherche perpétuelle de nouvelles manières de faire, et dans la capacité de remise en question qu'il suppose.

## VI. Constitution d'un site dédié aux effets perceptifs des réflexions précoces

Les considérations théoriques et pratiques quant aux enjeux de l'énergie précoces exposées dans ce document permettent une compréhension de plusieurs facettes du problème, mais celle-ci demeure limitée pour quiconque souhaiterait pouvoir écouter certains effets des réflexions précoces appliqués à des enregistrements d'instruments réels. Pour pallier ce problème, nous avons mis en place un site internet sous la forme d'un blog sur lequel nous avons posté un certain nombre d'extraits sonores.

Le site est accessible à l'adresse suivante : <https://reflexionsprecoces.home.blog/>

Ces extraits sonores sont répartis selon les effets perceptifs à écouter, sous différentes pages accessibles via le lien « *Extraits sonores* » accessible depuis la page d'accueil.

Ceux-ci sont issus de trois enregistrements :

- Un enregistrement de saxophone solo interprétant un extrait de *It Don't Mean a Thing* de Duke Ellington effectué en chambre anéchoïque. S'il ne s'agit pas ici de musique classique, la nature anéchoïque de l'enregistrement permet de distinguer clairement l'effet de la réverbération artificielle ;
- Un enregistrement d'un quatuor de saxophones composé par Roger Calmel et enregistré au studio Sequenza ;
- Un enregistrement de la pièce orchestrale *Eôn* de Moritz Reich, composée pour le concours Île de Créations et enregistré à la Maison de l'Orchestre National d'Île de France.

Ils ont été faits par nos soins dans des conditions techniques explicitées pour chaque catégorie, et selon des choix de réglages également précisés et justifiés. Ils n'ont donc pas valeur de mixage de musique classique, mais plutôt de démonstrateurs adéquats.

En outre, nous y avons également posté les retranscriptions des entretiens avec les ingénieurs du son (présentes dans ce document en Annexe 4).

Pour finir, un certain nombre d'informations théoriques quant à la compréhension des phénomènes acoustiques et perceptifs en jeux ont également été rappelés.

## Conclusion générale

Les informations théoriques sur la propagation du son en champ libre et dans les espaces clos ont permis le développement des connaissances issues de la littérature scientifique quant aux multiples effets perceptifs des premières réflexions de réverbération, dont l'importance sur la perception spatiale a été démontrée à plusieurs niveaux : perception de distance, de localisation, d'enveloppement mais aussi de timbre ou de niveau sonore des sources. Cette base théorique, s'appuyant sur de nombreuses études, auront permis au lecteur de se familiariser avec les enjeux relatifs aux réflexions précoces et d'en comprendre les implications pour la musique classique, analysées par la suite. Ayant précisé le contexte de l'étude qui est celui de la production de musique classique (au sens de la prise de son et du mixage) par un détour sur une approche historique de l'esthétique du genre, nous avons pu détailler les principes généraux de la réverbération artificielle, ainsi que ses implications quant à la gestion de l'énergie précoce de réverbération. Avoir établi ces fondements techniques et esthétiques nous a ensuite permis de détailler les enjeux propre à la gestion des premières réflexions dans un cadre de prise de son et de mixage de musique classique. En effet, ces deux étapes sont intrinsèquement liées notamment par la scène spatiale, tributaire de la réverbération et mise en place à la prise de son. Il a été notamment montré que les réflexions précoces de réverbération font partie intégrante de l'esthétique sonore de la musique classique et que leur prise en compte apparait comme nécessaire à chaque étape du processus de production. Cette étude s'est terminée par l'analyse des propos recueillis auprès d'ingénieurs du son professionnels, en majorité spécialistes de musique classique, montrant des considérations variées : si tous s'accordent à leur donner une grande importance en particulier pour la mise en espace d'une source, des divergences quant aux manières de les utiliser autant en prise de son qu'en mixage sont manifestes. Nous espérons que cette synthèse, qui tente d'observer un ton neutre, permettra au lecteur de mieux appréhender ces questions encore peu documentées. Enfin, et pour permettre au lecteur curieux de se rendre compte des effets perceptifs des réflexions précoces dans un contexte de mixage musical, nous avons développé un site internet proposant un éventail

d'extraits sonores explicitant par l'écoute certains de ces effets, assortis d'explications techniques afin de lui donner une existence autonome tout en complétant la présente étude.

Les questions relatives à la réverbération en musique classique restent ouvertes et de nombreux aspects restent à creuser. Si nous avons pu nous entretenir avec quelques ingénieurs du son, tous font montre de pratiques singulières, ce qui tend à nous faire penser que davantage de témoignages auraient pu révéler certains enjeux que nous n'avons pas explicités. Et quand bien même nous aurions fourni une étude plus exhaustive, il n'en demeure pas moins que la production de musique classique garde une dimension d'interprétation faisant appel à une part de subjectivité chez les ingénieurs du son qui, loin de chercher ce qui serait la *meilleure* manière d'opérer, assument volontiers leurs singularités au profit de projets musicaux en tirant parti.

Au travers de cette étude, nous avons donc pu dégager de grandes tendances propres à la pratique des ingénieurs du son de musique classique concernant la gestion de l'énergie précoce, ainsi que certains points de divergences, notamment sur leurs considérations de la question à la prise de son. Cependant, il reste des enjeux qui pourraient être davantage explorés. En ce sens, nous pouvons penser à la question de l'influence de la formation instrumentale, car l'on peut penser que la gestion de l'énergie précoce ne se fait pas de la même manière en quatuor qu'en formation orchestrale (notamment à cause d'une reprise moindre). Également, les questions relatives à la spécificité du multicanal, où les outils et les approches ne sont plus les mêmes qu'en stéréophonie, gagneraient à être explorées à l'heure d'importants développements technologiques et d'initiatives en faveur d'une plus grande immersion, critère très important en musique classique.

## Bibliographie

- [1] **ORGANIZATION, I. S.** (1997). "Acoustique - Mesurage des paramètres acoustiques des salles".
- [2] **SABINE, W. C.** (1900). *Reverberation. Collected Papers on Acoustics*. The American Architect and The Engineering Record.
- [3] **WALLACH, H., Newman, E. B., Rosenzweig, M. R.** (1949). "The precedence effect in sound localization". *The American Journal of Psychology* LXII, 315-336.
- [4] **HAAS, H.** Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache. University of Göttingen, Germany. 1949
- [5] LITOVSKY, R. Y., Colburn, H. S., Yost, W. A., Guzman, S. J. (1999). "The precedence effect". *AES Journal* 106, 1633-1654.
- [6] **LITOVSKY, R. Y. a. M., N. A.** (1994). "Sound localization precision under conditions of the precedence effect: Effects of azimuth and standard stimuli". *AES Journal* 96, 752-758.
- [7] **LITOVSKY, R. Y., Shinn-Cunningham, B. G.** (2001). "Investigation of the relationship among three common measures of precedence: Fusion, localization dominance and discrimination suppression". *AES Journal* 109, 346-358.
- [8] **DIZON, R. M., Litovsky, R. Y.** (2004). "Localization dominance in the median-sagittal plane: Effect of stimulus duration". *ASA Journal* 115.
- [9] **CHIANG, Y.-C. a. F., R. L.** (1998). "The influence of broadband noise on the precedence effect". *ASA Journal* 104.
- [10] **HARTMANN, W. M.** (1983). "Localization of sound in room". *ASA Journal* 74.
- [11] **SHINN-CUNNINGHAM, B.** (Year). Learning reverberation: Considerations for spatial auditory displays. Proceedings of the ICAD, 126-134.
- [12] **HELLEMAN, H. W.** Sensitivity of the Human Auditory System to the Spatial Variations in Single Early Reflections. Delft University. 2003
- [13] **BLAUERT, J.** (1997). *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*.
- [14] **MERTENS** (1960). "Directional hearing in stereophony : theory and experimental verification". In EBU (ed).
- [15] **FRANSSEN, N. V.** (1962). *Stereophony*. Eindhoven, The Netherlands: Philips Technical Library.
- [16] **GUY-BART STAN, J. J. E., Dominique Archambeau** (2002). Comparison of different impulse response measurement techniques. *Journal of the Audio Engineering Society*.

- [17] **LEHMANN, U.** Untersuchungen zur Bestimmung des Raumeindrucks bei Musikdarbietungen und Grundlagen der Optimierung. 1975
- [18] **WETTSCHUREK, R.** Über die Abhängigkeit raumakustischer Wahrnehmungen von der Lautstärke. TU Berlin. 1976
- [19] **BEGAULT D. R., M. B. U., Anderson M. R.** (2001). "Early Reflection Thresholds For Virtual Sound Sources". *Proceedings of the 2001 International Workshop on Spatial Media*.
- [20] **E. ZWICKER, R. F.** (1981). *Psychoacoustique: l'oreille récepteur d'informations*.
- [21] **J. P. A LOCHNER, J. F. B.** (1958). "The subjective masking of short time delayed echos by their primary sound and their contribution to the intelligibility of speech". *Acustica* 8, 1-10.
- [22] **NIELSEN, S. H.** (1993). "Auditory Distance Perception in Different Rooms". *AES Journal* 10, 755-770.
- [23] **GRIESINGER, D.** (Year). *The Theory and PRactice of Perceptual Modeling - How tu use Electronic Reverberation to add Depth and Envelopment without Reducing Clarity*. Proceedings of the 21st Int. Conf. on Sound Design.
- [24] **A. FISCHETT, J. J., Y. Hemim** (1992). "Relations between spatialisation, geometrical parameters and acoustical criteria in concert halls". *Applied Acoustics* 37, 233-247.
- [25] **M. BARRON, H. M.** (1981). "Spatial Impression Due to Early Lateral Reflections in Concert Halls : The Derivation of a Physical Measure". *Journal of Sound and Vibration* 77, 211-232.
- [26] **R. MASON, T. B., F. Rumsey** (2005). "Frequency dependency of the relationship between perceived auditory source width and the interaural cross-correlation coefficient for time-invariant stimuli". *ASA Journal* 117, 1337-1350.
- [27] **T. OKANO, L. B., T. Hidaka** (1998). "Relations among interaural cross-correlation coefficient (IAAC), lateral fraction (LF) and apparent source width (ASW) in concert halls". *ASA Journal* 104, 255-265.
- [28] **BERNANEK, L.** (2nd. ed. 2004). *Concert Halls and Opera Houses. Music, Acoustics, and Architecture*.
- [29] **A. FISCHETTI, J. J.** (1991). "The Infulence of First Reflection Distribution on the Quality of Concert Halls". *Applied Acoustics* 35, 233-245.
- [30] **U. POTRATZ, I. B., T. Görne** (2005). "Designing early reflecion patterns suitable for audio recordings by means of acoustic modelling". *AES 118th Convention*.
- [31] **ZUREK, P. M.** (1979). "Measurement of binaural echo suppression". *ASA Journal* 66.
- [32] **BARRON, M.** (1971). "The subjective effects of first. reflections in concert halls - The need for lateral reflections". *Journal of Sound and Vibration* 15, 475-494.

- [33] **G. A. SOULODRE, J. S. B., D. R. Stammen** (1993). "Spaciousness judgments of binaurally reproduced sound fields". *125th ASA Convention*. Ottawa, Canada.
- [34] **BRADLEY, J. S.** (1994). "Comparison of concert hall measurements of spatial impression". *ASA Journal* 96, 3525-3535.
- [35] **GRIESINGER, D.** (2012). "Measures of Spatial Impression and Reverberance based on the Physiology of Human Hearing". *AES 111th Int. Conference*.
- [36] **J. BLAUERT, U. M., W. Lindermann** (1986). "Supplementary psychoacoustical results on auditory spaciousness". *Acustica* 59, 292-293.
- [37] **ANDO, Y.** (1985). *Concert Hall Acoustics*. Springer.
- [38] **M. MORIMOTO, K. I., K. Sakagami** (2001). "The role of reflections from behind the listener in spatial impression". *Applied Acoustics* 62, 109-124.
- [39] **G. A. SOULODRE, M. C. L., S.G. Norcross** (2003). "Objective measures of listener envelopment in multichannel surround systems". *AES Journal* 51, 826-840.
- [40] **A. WAKUDA, H. F., K. Fujimoto, K. Isogai, K. Anai** (2003). "Effects of arrival direction of late sound on listener envelopment". *Acoust. Sci. & Tech* 24, 179-185.
- [41] **GRIESINGER, D.** (1999). "Objective Measures of Spaciousness and Envelopment". *16th AES Int. Conf.*
- [42] **M. DAUVOIS, I. R.** (1988). "La dimension sonore des grottes ornées". *Bulletin de la Société préhistorique française* 85, 238-246.
- [43] **CORBIN, A.** (2000). *Historien du sensible: Entretiens avec Gilles Heuré*. In L. Découverte (ed), pp. 103-126.
- [44] **BARRON, M.** (1988). "Subjective study of British symphony concert halls". *Acustica* 66, 1-14.
- [45] **BARRON, M.** (1993). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. E&FN Spon.
- [46] **W. REICHARDT, W. S.** (1967). "Die Wahrnehmbarkeit der Veränderung von Schallfeldparametern bei der Darbietung von Musik". *Acustica* 18.
- [47] **MARSHALL, A. H.** (1967). "A note on the importance of room cross-section in concert halls". *J. Sound Vib.* 5.
- [48] **MARSHALL, A. H.** (1968). "Levels of reflection masking in concert halls". *J. Sound Vib.* 7.
- [49] **GRIESINGER, D.** (1998). "General overview of spatial impression, envelopment, localization, and externalization". *15th AES Int. Conference*.
- [50] **SYMES, C.** (2004). *Setting the Record Straight : A Material History of Classical Recording*. Wesleyan University Press.

- [51] **STREICHER, R.** (2003). "The Decca Tree - It's not just for stereo anymore". Audio Engineering Associates.
- [52] **GENAS, M.** Quel mastering pour la musique classique? 2015
- [53] **RUMSEY, F.** (2002). "Spatial quality evaluation for reproduced sound : Terminology, meaning, and a scene-based paradigm". *AES Journal*, 651-666.
- [54] **TOOLE, F. E.** (2008). "Sound Reproduction : Loudspeakers and Rooms". *Focal Press*.
- [55] **MERCIER, D.** (2013). Le livre de techniques du son - Tome 3 - 4e édition. Dunod.
- [56] **M. MORIMOTO, Z. M.** (1989). "Auditory Spaciousness and Envelopment". *13th ICA*. Yugoslavia.
- [57] **J.-M. JOT, A. C.** (Year). Digital delay networks for designing artificial reverberators. Proceedings of the 90th AES Convention.
- [58] VALIMAKI VESA, J. D. P., Lauri Savioja, Julius O. Smith, Jonathan S. Abel (2012). "Fifty Years of Artificial Reverberation". *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing* 20.
- [59] **FLUX** "VERB - Room Acoustics & Reverberation processor Manual" . pp. 10.

# Index des Figures

Figure 1 : Correspondances entre température, célérité, masse volumique et impédance acoustique pour quelques valeurs indicatives.....	13
D'après <b>Wikipédia</b> , « Impédance acoustique », URL : <a href="https://fr.wikipedia.org/wiki/Imp%C3%A9dance_acoustique">https://fr.wikipedia.org/wiki/Imp%C3%A9dance_acoustique</a>	
Figure 2 : Représentation d'une réflexion par image-source .....	15
<i>Figure personnelle</i>	
Figure 3 : Illustrations de réflexions spéculaires <b>(a)</b> , diffuses <b>(b)</b> et de diffraction sur le coin d'un obstacle <b>(c)</b> .....	16
D'après <b>MERIMAA, Juha</b> , <i>Analysis, synthèses, and perception of spatial sound - binaural localization modeling and multichannel loudspeaker reproduction</i> , Thèse de doctorat, Université Technologique d'Helsinki, 2006.	
Figure 4 : Premières réflexions acoustiques dans une salle.....	18
D'après <b>TEXIER, Hélène</b> , <i>De la pertinence du choix des réverbérations artificielles en fonction des sources musicales</i> , p.12, Mémoire de recherche de l'Ecole Nationale Supérieure Louis Lumière, 2000.	
Figure 5 : Réponse impulsionnelle (mise au carré, afin de l'avoir que des pics positifs).....	20
D'après <b>DELORME, Samuel</b> , <i>Nouvelle approche de la synthèse de champ réverbéré : intégration des positions relatives des sources au sein d'un espace acoustique</i> , Mémoire de fin d'études de l'Ecole Nationale Supérieure Louis Lumière, 2018.	
Figure 6 : TR60 et EDT.....	22
D'après <b>TEXIER, Hélène</b> , <i>De la pertinence du choix des réverbérations artificielles en fonction des sources musicales</i> , p.14, Mémoire de recherche de l'Ecole Nationale Supérieure Louis Lumière, 2000.	
Figure 7 : Valeurs minimums pour la perception de délais minimum pour différentes valeurs d'angle d'incidence.....	27
D'après <b>HELLEMAN, H. W.</b> , <i>Sensitivity of the Human Auditory System to the Spatial Variations in Single Early Reflections</i> , Delft University, 2003	
Figure 8 : Biais et flous de localisation dans le plan horizontal pour différentes valeurs d'angle d'incidence.....	30
D'après <b>BLAUERT</b> , <i>Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization</i> , The MIT Press, 1997.	

Figure 9 : Système de restitution stéréophonique.....32  
*Figure personnelle*

Figure 10 : Localisation de la source fantôme en fonction des différences de temps et d'intensité en restitution stéréophonique.....33  
D'après **FRANSSEN, N. V.**, *Stereophony*, Philips Technical Library 1962

Figure 11 : Principaux critères perceptifs d'évaluation spatiale et les critères objectifs correspondants.....35  
D'après **DELORME, Samuel**, *Nouvelle approche de la synthèse de champ réverbéré : intégration des positions relatives des sources au sein d'un espace acoustique*, Mémoire de fin d'études de l'Ecole Nationale Supérieure Louis Lumière, 2018.

Figure 12 : Seuil d'audibilité d'un écho (à 70 ms du son direct), en fonction du niveau sonore global, paramétré par direction d'incidence.....37  
D'après **WETTSCHUREK, R.**, *Über die Abhängigkeit raumakustischer Wahrnehmungen von der Lautstärke*, TU Berlin, 1976

Figure 13 : Seuil moyen pour la parole en conditions anéchoïque et réverbérante .....38  
D'après **BEGAULT et al.**, « Early Reflections Thresholds for virtual sound sources », Proceedings of the 2001 International Workshop on Spatial Media, 2001.

Figure 14 : Seuils moyens pour des impulsions tonales en condition anéchoïque.....39  
D'après **BEGAULT et al.**, « Early Reflections Thresholds for virtual sound sources », Proceedings of the 2001 International Workshop on Spatial Media, 2001.

Figure 15 : Masquage postérieur d'une impulsion par un bruit blanc - Niveau seuil de masquage en fonction du temps entre les deux, pour différents niveaux de bruit blanc.....40  
D'après **ZWICKER, E.**, *Psychoacoustique : L'oreille récepteur d'informations*, 1981.

Figure 16 : Fraction de l'énergie de la réflexion intégrée perceptiblement à l'onde directe, en fonction du retard et paramétrée par le niveau de la réflexion relativement au son direct (+5 dB, 0 dB et -5 dB).....42  
D'après **LOCHNER, J. P. A.**, « The subjective making of short time delayed echos by their primary sound and their contribution to the intelligibility of speech », *Acustica* (8), p.1-10, 1958.

Figure 17 : Effets perceptifs d'une unique réflexion d'azimut de 40° selon le délai et l'intensité relative par rapport à la source.....46  
D'après **BARRON, M.**, « The subjective effects of first reflections in concert halls - The need for lateral reflections », *Journal of Sound and Vibration*, 15, p.475-494, 1971.

Figure 18 : Effets perceptifs des réflexions précoces selon leur délai et leur provenance spatiale.....	46
D'après <b>BARRON, M.</b> , « Spatial Impression Due to Early Lateral Reflections in Concert Halls : The Derivation of a Physical Measure », <i>Journal of Sound and Vibration</i> , 77, p. 211-232, 1981.	
Figure 19 : Représentation graphique en cascade ( <i>Waterfall</i> ) d'une réponse impulsionnelle. Tirée d'Opera House d'Altiverb 7®.....	53
<i>Figure personnelle (capture d'écran)</i>	
Figure 20 : Intérieur de l'église Saint-Thomas à Liebig.....	59
D'après Travel Leisure, « Follow in the Footsteps of J.S. Bach on this Musical Tour of Germany », consulté en mai 2019, URL : <a href="https://www.travelandleisure.com/culture-design/music/bach-tour-germany">https://www.travelandleisure.com/culture-design/music/bach-tour-germany</a>	
Figure 21 : Le Boston Symphony Hall.....	60
D'après Mass Moments, « Ground Broken for Symphony Hall », consulté en mai 2019, URL : <a href="https://www.massmoments.org/moment-details/ground-broken-for-symphony-hall.html">https://www.massmoments.org/moment-details/ground-broken-for-symphony-hall.html</a>	
Figure 22 : Le Concertgebouw d'Amsterdam.....	61
D'après <b>COLLI Frederico</b> , « Amsterdam Concertgebouw », consulté en mai 2019, URL : <a href="http://www.federicocolli.eu/highlights/55-amsterdam-concertgebouw">http://www.federicocolli.eu/highlights/55-amsterdam-concertgebouw</a>	
Figure 23 : Le studio 106 de la Maison de Radio France.....	62
D'après 20 minutes, « Paris : Dans les coulisses de la vente aux enchères de Radio France », consulté en mai 2019, URL : <a href="https://www.20minutes.fr/paris/2424751-20190118-video-paris-coulisses-vente-encheres-radio-france">https://www.20minutes.fr/paris/2424751-20190118-video-paris-coulisses-vente-encheres-radio-france</a>	
Figure 24 : Courbe du degré d'impression spatiale (SI) en fonction du ratio de niveaux réflexion/son direct, pour une réflexion unique d'azimut de 60° et décalée de 35 ms.....	64
D'après <b>REICHARD, W.</b> , « Die Wahrnehmbarkeit der Veränderung von Schallfeldparametern bei der Darbietung von Musik », <i>Acustica</i> , 18, 1967.	
Figure 25 : Photo d'enregistrement d'orchestre sur laquelle on peut voir des microphones d'appoint placés en haut des pieds de microphones.....	69
D'après <b>LESPRIT, Bruno</b> , « Une symphonie française pour Valérian », <i>Le Monde</i> , publié le 6 mars 2017, URL : <a href="https://www.lemonde.fr/cinema/article/2017/03/06/une-symphonie-francaise-pour-valerian_5089693_3476.html">https://www.lemonde.fr/cinema/article/2017/03/06/une-symphonie-francaise-pour-valerian_5089693_3476.html</a>	

Figure 26 : Une des salles de réverbération ou « echo chamber » du studio Capitol à Los Angeles.....	80
D'après <b>Dante, Fumo</b> , « 6 chambres d'écho qui ont façonné le son de la musique pop », <i>Reverb</i> , 22 mars 2019, consulté en avril 2019, URL : <a href="https://reverb.com/news/6-echo-chambers-that-shaped-the-sound-of-popular-music">https://reverb.com/news/6-echo-chambers-that-shaped-the-sound-of-popular-music</a>	
Figure 27 : Une réverbération à ressorts typique d'amplificateur pour guitare électrique...82	
D'après <b>JCJ</b> , « Petit visite dans un ampli de guitare », 14 octobre 2007, consulté en avril 2019, URL : <a href="http://www.tsf-radio.org/forum/forumgc.php?show=45612">http://www.tsf-radio.org/forum/forumgc.php?show=45612</a>	
Figure 28 : Vue de dessus d'une réverbération à plaque.....83	
D'après <b>Corbo-Billy</b> , « Commentaire sur la news : La réverbe de l'IM90 gratuite pour Altiverb », 14 juin 2018, consulté en avril 2019, URL : <a href="https://fr.audiofanzine.com/reverb-a-convolution-logicielle/audio-ease/altiverb-7/forums/t.642860,commentaires-sur-la-news-la-reverbe-de-l-im90-gratuite-pour-altiverb.html">https://fr.audiofanzine.com/reverb-a-convolution-logicielle/audio-ease/altiverb-7/forums/t.642860,commentaires-sur-la-news-la-reverbe-de-l-im90-gratuite-pour-altiverb.html</a>	
Figure 29 : Structure de base d'un Réseau de Retards Rebouclés.....85	
D'après <b>Valimaki et al</b> , « Fifty Years of Artificial Reverberation », <i>IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing</i> , 20(5), p.1426, 2012.	
Figure 30 : Modèle hybride optimal combinant différents modèles.....88	
D'après <b>Valimaki et al</b> , « Fifty Years of Artificial Reverberation », <i>IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing</i> , 20(5), p.1433, 2012	
Figure 31 : Face et arrière du processeur de réverbération Bricasti M7®.....98	
D'après <a href="http://www.woodbrass.com">woodbrass.com</a> , URL : <a href="https://www.woodbrass.com/peripheriques-analogiques-effet-pro-bricasti-design-m7-p188265.html">https://www.woodbrass.com/peripheriques-analogiques-effet-pro-bricasti-design-m7-p188265.html</a>	
Figure 32 : Fenêtre principale de l'Altiverb 7®.....100	
<i>Image personnelle (capture d'écran)</i>	
Figure 33 : Fenêtre principale de l'Ircam Verb v3®.....102	
<i>Image personnelle (capture d'écran)</i>	
Figure 34 : Fenêtre de la réverbération Fabfilter Pro-R®.....104	
<i>Image personnelle (capture d'écran)</i>	
Figure 35 : Fenêtre de la réverbération ValhallaRoom®.....106	
<i>Image personnelle (capture d'écran)</i>	

Figure 36 : Face avant du Quantec Yardstick 2492®.....	107
D'après <i>Vintage King Audio</i> , « Quantec Yardstick 2493 Analog/Stereo Room Simulator », consulté en mai 2019, URL : <a href="https://vintageking.com/quantec-yardstick-2493-analog-stereo-room-simulator">https://vintageking.com/quantec-yardstick-2493-analog-stereo-room-simulator</a>	
Figure 37 : Fenêtre du logiciel de contrôle du Yardstick 2492®.....	108
D'après C.A.M.R, «The Studio Hardware », consulté en mai 2019, URL : <a href="https://bohnes.de/e_hardware.html#Backend">https://bohnes.de/e_hardware.html#Backend</a>	
Figure 38 : Formes d'ondes des sorties stéréophoniques des quatre moteurs de réverbération. Cas n°1 : Énergie précoce par défaut.....	113
<i>Image personnelle (capture d'écran)</i>	
Figure 39 : Formes d'ondes des sorties stéréophoniques des quatre moteurs de réverbération. Cas n°2 : Élargissement stéréophonique.....	115
<i>Image personnelle (capture d'écran)</i>	
Figure 40 : Formes d'ondes des sorties stéréophoniques des quatre moteurs de réverbération. Cas n°3 : Suivi du panoramique de la source.....	116
<i>Image personnelle (capture d'écran)</i>	

# Annexes

## A. Annexe 1 - Attributs subjectifs de la qualité acoustique<sup>64</sup> de

Léo Bernanek

QUALITY		ANTITHESIS	
<i>Noun form</i>	<i>Adjectival form</i>	<i>Noun form</i>	<i>Adjectival form</i>
1 intimacy, presence	intimate	lack of intimacy lack of presence	non-intimate
2 liveness, fullness of tone reverberation	live reverberant	dryness deadness lack of reverberation	dry dead unreverberant
3 resonance warmth	resonant warm	dryness lack of bass	dry brittle
4 loudness of the direct sound	loud direct sound	faintness ... weakness ...	faint ... weak ...
5 loudness of the reverberant sound	loud ...	faintness ... weakness ...	faint ... weak ...
6 definition, clarity	clear	poor definition	muddy
7 brilliance	brilliant	dullness	dull
8 diffusion	diffuse	poor diffusion	non-diffuse
9 balance	balanced	imbalance	unbalanced
10 blend	blended	poor blend	unblended
11 ensemble	—	poor ensemble	—
12 response, attack	responsive	poor attack	unresponsive
13 texture	—	poor texture	—
14 no echo	echo-free anechoic	echo	with echo echoic
15 quiet	quiet	noise	noisy
16 dynamic range	—	narrow dynamic range	—
17 no distortion	undistorted	distortion	distorted
18 uniformity	uniform	non-uniformity	non-uniform

<sup>64</sup> Comprendre une acoustique dont la qualité fasse consensus. Bien que cette définition soit large, Bernanek la définit notamment comme propre à « fournir une expérience d'écoute optimale » (tiré de «The qualities that make up this optimum listening experience », L. Bernanek, *Concert Halls and Opera Houses*, p. 2.

## B. Annexe 2 - Principaux critères objectifs de caractérisation de l'acoustique d'une salle

- $TR_{60} = -0.163 \frac{V}{S \cdot \ln(1 - \alpha)}$ , Temps mis par la réverbération pour voir son énergie

décroître de 60 dB, où  $V$  est le volume de la salle,  $S$  la surface totale de ses parois et  $\alpha$  le coefficient moyen d'absorption

- $C_{80} = 10 \log_{10} \left( \frac{\int_0^{0.8} p^2(t) dt}{\int_{0.8}^{\infty} p^2(t) dt} \right)$  - Critère d'évaluation de la clarté, proportion d'énergie

arrivant sous les 80 ms après le son direct.

- $T_S = 10 \log_{10} \left( \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right)$  - Temps central, barycentre énergétique de la réponse

impulsionnelle.

- $LF = 100 \frac{\int_{5ms}^{80ms} p^2(t) \cos^2(\theta) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}$  - Efficacité latérale indiquant le ratio d'énergie

provenant d'une direction donnée, ayant un azimut  $\theta$

- $IACC(\tau) = \frac{\int p_{gauche}(t) * p_{droite}(t + \tau) dt}{\sqrt{\int p_{gauche}^2 * \int p_{droite}^2}}$  - Corrélation croisée interaurale (IAAC :

*InterAural Cross Correlation*), indiquant la corrélation entre les signaux arrivant aux deux oreilles.

- $EDT = (t[-15dB] - t[0dB])$  - Temps de décroissance précoce (EDT : *Early Decay Time*)

## C. Annexe 3 - Questionnaire destiné aux ingénieurs du son :

### *La problématique des réflexions précoces*

#### **Question préliminaire**

1. Quel est votre activité, et quelle type de musique enregistrez-vous / mixez-vous en majorité?

#### **Considérations générales sur les premières réflexions**

2. Considérez-vous les premières réflexions comme importantes dans le cadre d'un mixage de musique classique?
3. Pour quelle(s) raison(s)?
4. Lors de l'ajout de réverbération artificielle sur les microphones d'appoint, quelle importance accordez-vous au rendu des premières réflexions en particulier?

#### **La prise de son**

5. Concevez-vous vos configurations de prise de son également en considérations des premières réflexions, et de leur spatialité?
6. Si oui, quelles sont les conséquences sur vos choix de prise de son?

#### **La gestion des premières réflexions**

7. Vous arrive-t-il d'ajouter des premières réflexions seules, indépendamment du champ diffus?
8. Utilisez-vous simultanément plusieurs réverbérations différentes sur une même source? Dans quelle(s) condition(s) et pourquoi?
9. Modifiez-vous souvent le réglage du pré-délai, et à quelle fins?
10. Dans la disposition des premières réflexions, accordez-vous de l'importance à leur disposition spatiale (leur panoramique et leur largeur stéréo)?
11. Généralement, choisissez-vous de gérer le panoramique de vos premières réflexions à l'envoi, au sein de votre moteur de réverbération ou bien en panoramique de retour?
12. Généralement, choisissez-vous des premières réflexions qui suivent la direction spatiale de la source à laquelle vous les ajoutez? (exemple: si un pupitre de violons est situé sur la gauche, faites-vous provenir les premières réflexions également de la gauche?) Plus généralement, Spatialisez-vous les premières réflexions, et à quel endroit dans l'image sonore?

13. Utilisez-vous un autre type d'effet pour parvenir à simuler l'effet de l'ajout de premières réflexions?

### **Le multicanal**

14. Dans le cas d'un mixage multicanal (si vous en pratiquez), considérez-vous que les problématiques liées aux premières réflexions sont différentes d'un mixage en stéréophonie? Et dans quelle mesure?

### **Les outils**

15. Quels outils privilégiez-vous pour la génération de premières réflexions? (réverbérations à convolution, algorithmiques ou hybrides, et lesquelles?)

16. Vous sentez-vous limité(e) par les outils actuels en terme de possibilités techniques de gestion des premières réflexions?

17. Même question, mais en terme de productivité et d'efficacité?

18. Mêmes questions dans le cas d'un mixage multicanal? Ressentez-vous des différences? Si oui, lesquelles?

## D. Annexe 4 - Retranscription d'entretiens avec des ingénieurs du son

Cette annexe présente les transcriptions des entretiens menées avec les ingénieurs du son que nous avons pu interroger dans le cadre de ce mémoire. Chacun d'entre eux a accepté que ses propos soient restitués de manière nominative.

### D.1. Frédéric Changenet - Ingénieur du son à Radio France

#### Pouvez-vous vous présenter?

*Je suis ingénieur du son à Radio France. J'ai fait beaucoup de son live et beaucoup de WFS pour des concerts de tous types. J'ai aussi beaucoup travaillé sur le son immersif dans le cadre des Fictions et Documentaires, ainsi qu'un travail avec les orchestres pour permettre à l'auditorium de Radio France d'avoir un rendu binaural satisfaisant, ainsi qu'en stéréo (qui est encore le système principal de diffusion) et en 5.1 (format qu'on doit fournir). Donc travail sur les méthodes de travail pour avoir un rendu satisfaisant sur les différents formats. Avant ça, j'ai beaucoup travaillé sur les musiques électroniques, ce qui change tout par rapport à des sources acoustiques où on est en quelque sorte contraints par la relation entre les pistes (la reprise) et le référent visuel. Pour ce qui est du mixage en multicanal, on travaille globalement sur deux types de workflow.*

*Premier type de workflow: en 8.0 avec Nuendo.*

*Deuxième type de workflow: on travaille directement en objet avec le Spat Revolution. Sur les orchestres c'est ça qu'on utilise. On reçoit du mixeur stéréo toutes les sorties directes traitées et post fader. On demande une réverbération en 4.0. Tout rentre dans le Spat qui intègre, une Room binaurale et une Room 5.1. On récupère le mix 5.1 qu'on downmix en stéréo (qui doit être le même que le mix en sortie de console). Le but étant à terme de supprimer la stéréo en sortie de console et que la stéréo finale soit exclusivement fournie par le downmix du 5.1 fourni par le Spat. L'avantage de ça serait de ne plus avoir à utiliser la réverb de la console et d'utiliser seulement la réverb du Spat ce qui assurerait une parfaite cohérence des premières réflexions.*

#### Est-ce que vous considérez les premières réflexions importantes en musique classique? Si oui pour quelles raisons?

*Oui bien sûr. C'est elles qui signent l'espace, qui donnent la taille de l'espace, la nature des parois, le positionnement de la source dans la salle. Que ce soit réaliste ou pas n'a pas d'importance, d'ailleurs les mixages de musique classique ne sont pas forcément réalistes.*

#### Lorsque vous ajoutez les premières réflexions sur les micros d'appoint, est-ce que vous accordez de l'importance à leur rendu?

*À vrai dire je me méfie beaucoup de l'ajout de premières réflexions. Par exemple dans le cas d'un orchestre où on a un couple principal ou un Decca Tree, puis en « appoints » ce qu'on appelle un panoramique de cordes, à savoir une rampe de microphones (6 en général) en semi-proximité sur les cordes. On les nomme P1 à P6. On a P3 et P4, ceux qui sont devant le chef, qui vont être généralement complètement latéralisés gauche-droite parce qu'ils vont aussi capter les bois. Si on devait retranscrire leur emplacement réel sur la scène on aurait une image des bois très resserrée. Et P2 et P5 qui sont respectivement sur le premier violon et le premier violoncelle vont être plus resserrés afin d'avoir les solos violon/violoncelles pas trop excentrés.*

Ces micros de proximité captent donc tout l'orchestre et pas conséquent énormément de premières réflexions. Du coup si on en rajoute encore en mixage, on risque de beaucoup trop détimbrer. Sans parler de la reprise qui fait que les micros sont tous en interaction.

Lors de la prise de son, accordez-vous de l'importance au rendu des premières réflexions sur les emplacements des micros?

Par contre je peux te parler de mon travail sur les fictions. Pour l'enregistrement on utilise beaucoup le système [croix IRT + perche]. L'avantage de ce système sur le couple est que dans un couple les informations spatiales sont déjà codées et que ça n'a pas de sens de vouloir faire du mixage objet avec (car ça voudrait dire cumuler deux codages de spatialisation ce qui ne marche pas bien). Donc travailler avec l'objet « comédien » pris à la perche qu'on peut spatialiser comme on veut. Du coup on veut éviter les premières réflexions à la prise. C'est là que la croix IRT est utile: on l'éloigne pour ne pas avoir de son direct afin d'éviter d'avoir une spatialisation de la position du comédien dans le couple avant de la croix IRT. Donc on l'éloigne pour qu'elle ne capte pas de son direct mais simplement des premières réflexions.

Mais ça c'est impossible à faire en prise de son d'orchestre.

Dans le cadre d'un mixage en musique classique, est-ce que ça vous arrive d'ajouter des premières réflexions seules, séparée du champ diffus?

Oui, mais surtout en fictions et en documentaires. Notamment pour externaliser les sources prises en proximité pour le binaural. Je me suis par ailleurs posé la question de premières réflexions différentes pour le binaural et le mix sur enceintes, car leurs implications de sont pas les mêmes (externaliser pour le binaural, alors que sur enceinte il y aura toujours les premières réflexions de la salle d'écoute qui iront s'ajouter), mais ça pose des questions de workflow quand nous on essaie d'avoir un seul mixage objet qui soit compatible sur tous les formats.

Par contre en orchestre, comme je le disais plus tôt j'évite, car ajouter des premières réflexions à d'autres ça peut vite être contreproductif. Dans le cas d'une prise de son traditionnelle [couple principal + appoints], on est obligé de s'appuyer sur les premières réflexions pour intégrer les appoints au mixage. Mais pour le choix du placement des micros et de leur distance aux sources, est-ce qu'inconsciemment on va le faire pour une raison de timbre des sources par rapport à la distance ou par rapport à la présence de premières réflexions. D'autre part, les appoints étant monophoniques, on perd leur spatialité, qui est une donnée importante. Du coup les premières réflexions naturelles sur les appoints ça me semble plutôt un inconvénient.

Quand on travaille en stéréo, on a développé des usages de mixage qui marchent au prix d'une mise en espace non cohérente. Mais dès lors qu'on travaille sur des formats supérieurs et plus précis en spatialisation les incohérences ne passent plus du tout.

Pour moi en fait il y a deux mondes séparés que sont la stéréo et le son immersif qui sont deux manières vraiment différentes de représenter l'espace. Et du coup notamment la question des premières réflexions en tant qu'outil d'élargissement des sources ne se pose vraiment pas de la même manière.

Est-ce que ça vous arrive d'utiliser plusieurs réverbérations sur une même source?

Oui bien souvent, mais pas en musique acoustique sauf cas très particuliers. En musique électronique, je vais généralement utiliser une réverb très courte pour les premières réflexions qui va signer l'espace, et une plus longue qui aura peu de premières réflexions.

Et dans un mixage de musique acoustique, quel type de réverbération allez-vous utiliser?

Une qui contient tout, et le mélange des premières réflexions naturelles avec les artificielles est une conséquence plutôt indésirable mais de second ordre.

Changez-vous souvent le réglage du pré-décal? Si oui pourquoi?

Le pré-décal est pour moi un des paramètres les plus importants dans une réverb. Et le choix de sa valeur se fait surtout par rapport à la perception de l'espace et quel type d'espace j'ai envie de créer plutôt que par rapport à la couleur de la source.

Quelle attention portez-vous à la disposition spatiale des premières réflexions ajoutées à une source?

En musique électronique, je vais utiliser des réverbérations stéréo qui vont donc suivre la spatialité de la source, même en automation de mouvement. Donc même en multicanal je vais utiliser des réverbération petit volume stéréo pour maîtriser la provenance des réflexions, notamment pour avoir une bonne externalisation. Mais en musique classique avec des sources classiques, il y a de très forts marqueurs culturels qui sont pas de l'ordre de la cohérence spatiale. On va au maximum essayer d'appuyer la localisation de la source mais ça ne marche pas très bien parce qu'on n'a pas la bonne fonction de transfert et à cause de la reprise. Et puis ça dépend aussi des instruments qui ne rayonnent pas tous de la même façon (les cuivres induisent plus de reprise que d'autres instruments par exemple). Et du coup des premières réflexions localisées ailleurs que sur la source vont plus ajouter du flou que de permettre une localisation différente maîtrisée. Mais c'est aussi lié à notre workflow où on utilise la réverb 4.0 du mixage. Si on pouvait utiliser seulement la réverb du Spat par exemple on pourrait vraiment recréer des premières réflexions cohérentes, mais c'est un travail en cours.

Est-ce que ça vous arrive d'utiliser d'autres types d'effets que de la réverbération pour simuler un effet type « premières réflexions »?

Oui, des délais par exemple, mais seulement sur des mixages non réaliste comme de la musique électronique, mais pas sur du classique.

Vous sentez-vous limité par vos outils en terme d'ergonomie?

Oui, des problèmes qui sont toutefois en partie levés avec le Spat. Mais on ne peut pas encore avoir des snapshots<sup>65</sup> et donc des mémoires de réverbérations. J'ai d'une part des outils qui sont trop peu précis spatialement (type la réverb TC-electronic en 4.0) mais pratiques en termes d'ergonomie. De l'autre j'ai le Spat qui peut faire des espaces très précis mais qui reste un peu compliqué à utiliser au niveau de la réverb. On a par exemple une seule réverb par Room. Donc on ne peut pas avoir plusieurs réverbs différentes à moins de multiplier le nombre de moteurs de rendu par le nombre de réverbs différentes.

Même question mais en termes de productivité?

Pour les fictions par exemple, il y a toujours un manque d'outils en termes de réverbérations multicanales en mode objet (il n'y a que celle du Spat), donc un manque réel de choix.

---

<sup>65</sup> Fonction d'enregistrement des réglages, qu'il est possible de rappeler ultérieurement.

## D.2. Hervé Déjardin - Ingénieur du son au département Innovation de Radio France

### Pourriez-vous vous présenter?

Je suis ingénieur du son au département innovation de Radio France. Je travaille sur toutes les formes musicales et pas seulement musicales (fictions, cinéma sonore, etc..). Je ne travaille pratiquement qu'en multicanal type « son 3D ».

### Quelle importance accordez-vous aux premières réflexions?

Elles ont leur importance, autant que le champ diffus, car elles donnent des infos sur la spatialisation. Elles permettent de caractériser le lieu et donnent des informations sur la localisation des sources.

### Vous arrive-t-il d'ajouter de premières réflexions par réverbération artificielle? Et dans quel cas?

Oui. Quand on perçoit trop une source appointée, on peut baisser son niveau mais ajouter des premières réflexions va permettre de « décoller » la source pour la rendre cohérente dans le mix.

### Vous arrive-t-il d'appliquer plusieurs réverbérations sur une même source?

Pas vraiment, ça m'arrive exceptionnellement. Dans le cadre d'un mixage type « classique » on va favoriser une seule réverb. Après pour de la création tout est permis mais pour du mixage classique quand ça arrive c'est que quelque chose ne va pas dans le mixage.

### Est-ce que ça vous arrive de séparer les premières réflexions et le champ diffus?

Non, ou très rarement, je préfère utiliser un moteur de réverbération unique.

### Sur le pré-décal, est-ce que ça vous arrive souvent de le modifier et dans quel cas?

Le pré-décal va permettre de décoller une source et donner une perception de distance. Donc ça m'arrive, mais il n'y a pas de cas d'école.

### Concernant la disposition spatiale des sources, est-ce que c'est important pour vous que les premières réflexions suivent la direction de la source?

Dans la musique classique, on va essayer de reproduire un phénomène acoustique naturel. Dans ce cas les premières réflexions sont situées proche de la source alors que le champ diffus est omnidirectionnel.

Et si les réflexions ne sont pas dans l'axe de la source c'est qu'il y a un problème dans l'acoustique. Celles qui vont avoir la plus grande importance perceptive vont généralement venir du sol et donc arriver rapidement.

### Vous arrive-t-il de passer par un autre effet qu'un moteur de réverbération pour produire un effet type « première réflexions »?

Oui tout à fait. Sur une voix par exemple, un délai pur peut donner un effet de prolongation tout en rendant la voix plus intelligible, surtout quand il y a une masse sonore importante autour.

### Quel(s) type(s) de réverbération utilisez-vous? Et dans quels cas?

Ça va dépendre du cahier des charges. Si je suis en 5.1 je vais plutôt opter pour des moteurs à convolution alors qu'en objet j'utiliserai plutôt les réverbs du Spat. Mais pas de préférence systématique.

Est-ce que vous vous sentez limité par les outils de réverbération actuels en termes d'ergonomie et/ou de rendu?

Le Spat fait très bien le job. On pourrait rentrer dans les détails mais globalement ça marche très bien. Le spat en particulier à sa propre logique en ce qu'il est conçu par des acousticiens et pas par des ingénieurs du son.

Même question mais en termes de productivité?

Il pourrait y avoir des améliorations notamment sur le routing, mais sinon pour moi il n'y a pas plus de problème que ça.

### D.3. Alban Moreau - Ingénieur du son indépendant et ingénieur acousticien

#### Pouvez-vous vous présenter?

Mon approche est un peu particulière. Elle est double parce que je suis ingénieur du son et aussi ingénieur en acoustique des salles. Et le sujet des premières réflexions est aussi un sujet qu'on aborde dans l'acoustique.

#### Quelle est votre activité, quel type de musique enregistrez/mixez-vous en majorité?

Je fais de la musique acoustique principalement. J'aime mettre tous les musiciens dans la même salle. Je fais aussi beaucoup de baroque, classique, contemporain et moins souvent de la musique du monde et du jazz.

#### Les premières réflexions sont-elles importantes dans le cadre d'un mixage de musique classique?

Oui, essentielles. Notamment en terme de largeur apparente des sources qui sont liées aux premières réflexions. Mais ça dépend de quelles premières réflexions on parle : soit plutôt du champ direct étendu (les toutes premières réflexions qui travaillent plutôt sur le timbre) ou les réflexions plus tardives qui influent sur la largeur apparente (les anglais appellent ça spaciousness) ou enfin les dernières qui participent plutôt de l'enveloppement. Elles sont très corrélées à la préférence, surtout par leur lien avec la sensation d'enveloppement. En cela elles sont effectivement très importantes.

#### Lors de l'ajout par réverbération artificielle, quelle importance accordez-vous à leur rendu?

Très important, sur le timbre, la distance et la largeur apparentes. Mais elles ne sont pas nécessairement perçues comme tel. Par exemple si on parle du champ direct étendu, je les utilise aussi comme un égaliseur, qui permet aussi de jouer sur les autres paramètres perceptifs.

#### À la prise de son, est-ce que vous accordez de l'importance aux premières réflexions? Si oui, comment en tenez-vous compte?

Oui même si ce n'est pas toujours la priorité (on peut avoir divers impératifs selon les conditions faisant qu'on ne peut pas toujours s'accorder suffisamment de temps pour gérer leur rendu). Mais typiquement je vais par exemple mettre un piano proche d'un mur, pour d'une part augmenter le volume apparent et aussi donner l'emprunte du lieu. Même si ça ne résulte pas nécessairement en choix précis, c'est toujours quelque chose que j'ai en tête.

#### On est alors dans une opposition entre reprise et premières réflexions?

Tout dépend du contexte. Parfois la reprise est problématique et parfois pas, idem pour les premières réflexions. En général je m'arrange pour que la reprise soit jolie. Mais je ne pense pas en terme spécifiquement aux premières réflexions au sens physique et objectif, mais plus en termes perceptifs avec des critères de largeur, de distance apparente, etc.. Par exemple, quand je visite une nouvelle salle, j'attache beaucoup plus d'importance aux premières réflexions et moins au champ diffus. Quelque chose qui me guide vraiment est le timbre. Les premières réflexions jouent beaucoup dessus et c'est plus difficile de recréer ça artificiellement. Tout cela à partir du moment où les musiciens sont à l'aise pour jouer, ce qui reste le critère le plus important.

#### Est-ce que ça vous arrive d'ajouter seulement des premières réflexions sur une source en coupant le champ diffus?

Oui, séparer les premières réflexions du champ diffus par le biais de deux moteurs de réverbération ne me dérange pas a priori. Pour ce qui est du routing en général j'envoie les

deux retours dans le bus mix mais ça m'est arrivé dans des cas très particuliers d'envoyer le retour des premières réflexions dans la réverbération type champ diffus. Il se peut dans certains cas que je passe les sources dans trois moteurs différents.

Dans ce cas, comme peu de types de réverbérations sont capables de proposer une vraie séparation des deux, quels sont ceux que vous utilisez?

Ici j'ai la Bricasti, l'Altiverb, les Valhalla, et l'Ircam Verb. Mais la réverb est un outil très puissant et très complexe, car tellement de paramètres sont impactés par la réverb. Elle ne sont pas toutes aussi précises les unes que les autres. On peut aller assez loin avec l'Ircam Verb tandis que la Bricasti propose d'autres réglages intéressants. En fait elles gèrent toutes la question à leur manière et sont plutôt complémentaires.

Est-ce que le pré-délai est important pour vous et comment le réglez-vous?

Pour moi oui c'est important. Niveau méthode on a tous nos trucs et si on remarque qu'une valeur donnée marche bien on pourra avoir tendance à l'utiliser un peu par défaut. Cela dit personnellement je préfère travailler en corrigeant ce qui pose problème plutôt que d'appliquer des recettes. Donc j'irai généralement le régler si à l'écoute je sens que le régler pourra m'aider.

Dans le cadre de mes études en acoustique j'ai travaillé sur l'effet du local d'écoute sur la perception du champ stéréophonique. Quelque chose d'important à ce sujet est que généralement le local apporte beaucoup d'énergie précoce qui vient s'ajouter perceptiblement au champ stéréophonique diffusé, avec des premières réflexions très rapides. Du coup c'est vrai que pour cette raison je préfère laisser un gap avec un pré-délai pas trop court, gap que les réflexions sur local d'écoute va remplir. En ce sens le mixage au casque peut poser problème parce que sans les réflexions du local au mixage on pourra avoir tendance à mettre trop d'énergie précoce dans notre mixage.

Quelle importance accordez-vous à la localisation spatiale des premières réflexions?

En général je ne pose pas tellement la question. Parfois quand j'ai besoin de plus d'énergie au centre j'envoie en mono mais je ne travaille pas spécifiquement le panoramique des premières réflexions.

Utilisez-vous d'autres effets pour simuler l'effet perceptif des premières réflexions?

Ça m'est arrivé mais de manière très anecdotique. La réalité est que je trouve que la gestion des premières réflexions est suffisamment délicate avec les outils qui y sont dédiés que je ne vais pas m'y essayer avec des outils supplémentaires, sauf cas très particulier. Mais j'ai très rarement eu ce besoin.

Vous arrive-t-il de mixer en multicanal?

Oui mais pas souvent, juste pour des prises de son pour de la vidéo. Mais pour moi la question des premières réflexions est la même, donc ça n'engage pas plus.

Est-ce que vous vous sentez limité par les capacités des outils, en termes de rendu et/ou d'ergonomie?

Je commencerai par dire la première limitation c'est moi-même. Cela dit quelque chose qui pourrait manquer c'est la génération des graves, leur rondeur ou leur précision qui ne remplaceront jamais ceux qu'on peut avoir dans une vraie salle. Mais si je rate un disque c'est de ma faute mais pas à cause d'un déficit dans les outils.

Même question, mais en termes de productivité?

Non pas particulièrement.

#### D.4. Thomas Vingtrinier - Ingénieur du son indépendant

##### Quelle est votre activité, quel type de musique enregistrez/mixez-vous en majorité?

Résolument de la musique acoustique, ce qui inclue musique classique, jazz, world musique, un peu de musique de film et un peu de chanson. En enregistrement, montage, mixage et mastering.

##### Considérez-vous les premières réflexions comme importantes, et dans quelle mesure concernant leur rendu?

En fait, plus j'avance, plus je me pose la question du crédit à donner à la dichotomie entre les premières réflexions et le champ diffus (à quoi on pourrait ajouter le cluster). Sans remettre en cause le modèle, je me demande si primo c'est comme ça que l'acoustique fonctionne et d'autre part si c'est comme ça que l'oreille fonctionne. Pour exemple, il y a beaucoup d'outils qui permettent de séparer les deux. Dans les deux cas, le rendu manque de naturel ce qui est lié certainement à des raisons de non linéarité et aussi au fait que dans la « vraie vie » les premières réflexions elles-même sont teintées d'un halo local qui ne serait pas seulement résultant des premières réflexions. Si ça peut fonctionner pour les toutes premières réflexions, je ne suis pas convaincu que ça fonctionne sur l'ensemble des premières réflexions.

Par ailleurs, derrière le terme de « premières réflexions », on parle aussi de mise en espace avec tout ce que ça implique. Donc elles sont fondamentales pour replacer une source dans l'espace, mais ça pose aussi la question de ce que donne un micro qui capte aussi des choses de l'acoustique. Ajouter une réverbération à un micro implique nécessairement de superposer deux réponses impulsionnelles, ce qui a des implications sur le rendu notamment quand on recherche une reproduction réaliste de l'espace.

##### Quand vous rajoutez des premières réflexions sur un micro d'appoint, quelle importance accordez-vous à leur rendu?

Ce n'est pas très simple car il y a beaucoup de paramètres liés. Dans le cas d'une prise de son acoustique du type [couple + appoints], j'ai une mise en scène donnée par la paire principale et le rôle de l'appoint est de donner un éclairage sur une source particulière qui doit néanmoins s'intégrer dans la paire principale. Donc concrètement, je devrais appliquer des premières réflexions qui remettraient cet appoint dans la position virtuelle de l'instrument depuis la paire. Mais en travaillant, on se rend compte que le fait même de mélanger un appoint à la paire principale, la sommation elle-même va faire qu'on aura pas une perspective naturelle notamment en question de remise en cohérence temporelle et de timbre modifié par filtrage en peigne. Donc on ne peut pas mathématiquement tout mettre en cohérence et c'est bien sur la somme des deux qu'on va agir et pas sur l'appoint seul. Et pour que l'ensemble sonne bien, on va peut-être se rendre compte que si ta source est un peu à gauche par exemple, il faudra que tes premières réflexions tirent encore un peu à gauche pour détourner davantage la source. Donc ce n'est pas la question seulement de la mise en scène « mathématique ». Et il ne faut pas oublier qu'on est dans un environnement spécifique, et en stéréo on ne pourra jamais recréer le front d'onde tel qu'il s'est propagé dans la pièce à l'enregistrement. On reste donc dans la simulation, ce qui dit aussi interprétation, goût.

##### À la prise de son, accordez-vous de l'importance au rendu des premières réflexions naturelles?

Je pense qu'il y a des processus inconscients qui sont en oeuvre. De là à dire que de manière consciente ça va influencer sur mes choix je ne pense pas, sauf dans des cas spécifiques comme lorsque j'ai des souci principalement de timbre, ou de trop de réverb ressentie au point de captation. Par exemple souvent quand on enregistre une clarinette, j'ai remarqué qu'on a souvent une première réflexion qui vient du sol et qui colore beaucoup

par filtrage en peigne. Je vais donc souvent chercher à l'éteindre ou l'atténuer avec un tapis sous le clarinettiste. Quand j'ai trop de réverb ressentie, je vais soit me rapprocher de l'instrument soit atténuer l'acoustique (avec des panneaux par exemple) mais là on touche plus au champ diffus.

Mais généralement je serais plutôt en mode « soustractif » dans le sens où j'aurai plutôt tendance à chercher à les éviter si elles me gênent plutôt qu'à aller chercher une position qui les mette en scène. D'autant plus que l'appoint étant très généralement mono, on perd de toute façon la notion de direction des premières réflexions.

### En mixage, vous arrive-t-il d'ajouter des premières réflexions seules indépendamment du champ diffus?

Vraiment pas, pour les raisons évoquées tout à l'heure. À mon oreille ça ne marche pas. Alors je vais parfois choisir des réverbérations plus ou moins chargées en énergie précoce ou en champ diffus.

### Vous arrive-t-il d'utiliser simultanément plusieurs réverbérations sur un même source et pourquoi?

Idéalement si j'ai un bon outil que je sais bien régler, ça devrait suffire. Mais pour des raisons de facilité, j'utilise souvent une réverbération orientée premières réflexions pour simuler un éloignement de ce micro pour le rendre cohérent avec la paire principale. Ensuite j'envoie le retour de cette réverb courte dans une autre réverb orientée champ diffus. Donc tout en dénigrant la dichotomie, dans la réalité je vais choisir deux réverbérations. Mais même si j'envoie en partie la source directement dans la longue réverb, j'insiste sur le fait que ce qui fait le gros du boulot en termes de fusion et d'intégration, c'est la courte envoyée dans la longue. Cette structuration me permet d'aller plus rapidement à la source parce que ça me permet de partager les réverb pour plusieurs sources (parce que surtout en hardware on est limité en nombre de canaux) tout en me donnant un pilotage naturel entre éloignement (en gérant les premières réflexions) et enveloppement (en gérant la partie champ diffus). Globalement je vais plutôt laisser le fader de la piste des premières réflexions à 0, et donc je vais gérer l'envoi de la source dans la première, pas trop fort pour avoir de la marge mais suffisamment pour que la fusion s'opère.

Et puis ça me paraît cohérent de considérer les premières réflexions comme des sources secondaires virtuelles qui vont aussi baigner dans un espace acoustique.

### Est-ce que tu vous modifiez souvent le réglage du pré-délai, dans quel cas et pourquoi?

Le pré-délai joue sur plusieurs choses. Déjà beaucoup sur le timbre donc plus le pré-délai est long plus on détoure la source et inversement plus on la colore.

Après ça va dépendre de l'instrument dont il s'agit. Pour des timbales par exemple, est-ce qu'on va faire en sorte de les sentir éloignées comme dans la réalité ou alors plutôt de les préciser (en augmentant le pré-délai), ce qui relève alors purement un choix esthétique. En général on se contente pas seulement d'éloigner un instrument (de manière à le rendre cohérent avec la paire principale) pour pouvoir ensuite jouer sur son volume, on fait plus que ça et on rentre dans le choix esthétique où on va jouer sur la précision ressentie. Les micros d'appoint ne servent pas seulement à doubler ce qui est déjà dans la paire principale et permettent de créer une sorte de « réalité augmentée ».

### Accordez-vous de l'importance à la disposition spatiale des premières réflexions? Si oui comment procédez-vous?

En mixage classique dans tous les cas je n'ai aucune source mono. Je vais systématiquement créer à partir d'un appoint une source stéréo où j'appliquerai des délais différents à gauche et à droite pour remettre en phase par rapport au couple principal. Donc je pars d'une source stéréo déjà mise en scène par le biais de celle donnée par la paire principale. Donc avant la mise en espace des premières réflexions, le son direct est déjà lui

à remettre en espace! Ce qui est d'un ordre de priorité plus important que la problématique de premières réflexions. Donc la source étant déjà placée par  $\Delta t$  et un peu par  $\Delta I$ , la réverb suit naturellement la localité de la source et les premières réflexions sont normalement cohérentes.

Cela dit ça peut arriver d'aller modifier un peu leur disposition spatiale selon les cas, comme pour accentuer la position d'une source.

### Vous sentez-vous limité par vos outils en terme de rendu et d'ergonomie?

On aimerait bien pouvoir maîtriser totalement la réverbération de nos appoints et avoir des outils très précis qui permettent de gérer les réflexions de manière cohérente pour tous les appoints. Mais ce serait oublier la reprise entre les micros qui est tel que de toute manière, en caricaturant un peu, toute la finesse qu'on peut faire sur les premières réflexions disparaît au profit de la reprise. Idéalement, faudrait faire une mesure du côté sec de la source dans un appoint, et appliquer en fonction les premières réflexions. Plus une source serait « dry » plus on pourrait faire ce qu'on voudrait avec les réverb artificielles, et plus une source serait « wet » à cause de la reprise plus ça devient inutile de sculpter précisément les premières réflexions et alors elle ne serviraient qu'à la gestion de la profondeur et/ou du timbre. Or pour avoir une source « dry » il faut s'approcher de l'instrument ce qui est rarement beau et limite la capacité de fusion. Donc on est dans une sorte de compromis entre la beauté du timbre naturel de l'instrument et la quantité de reprise.

Pour revenir à la question, j'ai toujours quelques chose à redire sur le naturel car j'entends très souvent un son « sec » auquel on a collé une réverb. Et c'est seulement certaines réverbs qui me donnent un rendu naturel et immersif. La première à me donner ça c'était la Bricasti mais je trouve que ça ne va pas jusqu'au bout. Et la première qui me satisfasse vraiment à ce niveau là c'est la Quantec. Sur leur moteur de réverb on ne peut régler que la copie du son direct décalé dans le temps et le reste est basé sur la compression de fluide dans un espace, ce qui est très original, et finalement très réaliste pour moi.

Idéalement il faudrait un outil qui permette de mettre en insert sur chaque piste des moteurs de réverb qui seraient synchronisés entre eux. On aurait accès globalement à la définition de la réverb (sa longueur, sa balance tonale) et pour chaque instance on aurait un levier plutôt sur les critères de distance et d'enveloppement.

Si je prend les reverb de l'Ircam qui sont très précises et donnent très bien la sensation d'être dans une pièce, je les trouve malgré tout un peu trop neutres et manquent cette coloration des grandes salles qui peut être donnée par les moteurs les plus aboutis. Donc bien souvent ce que tu vas avoir comme précision sur la mise en scène, tu vas le perdre sur la qualité des timbres de la coloration...

Donc au final ma méthode c'est plutôt d'utiliser des réverbs au son qui me plaît vraiment et que j'alimente par des sources qui sont déjà remises en espace par l'alignement temporel. Mais si on pouvait m'offrir l'équivalent du rendu Quantec dans un processeur de type Spat je serais très heureux, mais ça pose des questions de puissances de processeurs.

## D.5. Daniel Zalay - Ingénieur du son et MMO à Radio France

### Quelle est votre activité, quel type de musique enregistrez/mixez-vous en majorité?

Je travaille dans le milieu de classique en tant que directeur artistique et ingénieur du son, pour la captation de concert ou de CD, soit en stéréo soit en multicanal, pour des projets avec ou sans image (les projets avec image étant de plus en plus présents). Et je fais ça depuis une petite trentaine d'années.

### Est-ce que vous considérez les premières réflexions (enregistrées ou rajoutées en mixage) importantes?

C'est évidemment un sujet dans la mesure où elles nous embêtent plus qu'autre chose en fonction du niveau et du délai de ces réflexions. A priori ça n'a pas tant de sens de parler de réflexions en soit sans préciser leur rapport au son direct et leur densité. C'est un inconvénient quand on le subit et ça nécessite de se débrouiller, de prendre des mesures à la prise de son.

### En prise de son, quelle importance accordez-vous au rendu des premières réflexions?

J'attache de l'importance à la manière dont le champ acoustique se construit et en cela les premières réflexions comptent, et c'est aussi par la perception de ces premiers fronts d'onde de réverbération qu'on va avoir des informations d'espace. Donc on est attentifs. Cela dit, comme maintenant on a beaucoup d'outils de réverbération artificielle qui fonctionnent bien, on va essayer d'avoir une prise de son qui fonctionne à la base, mais qu'on va très souvent retoucher à la marge en mixage.

Mais ce rapport aux premières réflexions a aussi évolué dans le temps. Quand j'ai fait ma formation au conservatoire, on mettait pratiquement systématiquement des panneaux derrière les instruments sous prétexte de renforcer ces premières réflexions. Mais concrètement on faisait du filtrage en peigne non contrôlé et ça colorait beaucoup le son. Maintenant je considérerais que moins on a de réflexions incontrôlées mieux c'est. Un autre exemple : il y a longtemps j'ai enregistré un Requiem de Brahms en version deux pianos et chœur. J'ai eu l'idée de mettre les choristes pas trop loin de mur dans l'idée de renforcer le son. Et finalement le son n'était pas beau, les premières réflexions apportées par le mur colorant trop le son.

Au final, en prise de son on cherche à obtenir un son fidèle à la source et le danger des réflexions est de dénaturer le son. Cela dit on a quand même beaucoup de possibilités pour les utiliser en faisant attention : le couvercle du piano, augmenter la distance pour chercher une coloration qui soit belle...

Un dernier exemple serait la comparaison entre l'auditorium de Radio France et la Philharmonie. On a deux salles très différentes.

Dans l'auditorium on a une dominance de premières réflexions assez importante et à la philharmonie une bonne maîtrise des premières réflexions combinées à la réverbération tardive, faisant qu'on peut avoir 3.5 secondes à 500 Hz sans que ça gêne parce qu'elle est bien gérée, avec une très grande sensation d'espace. Dans l'auditorium la prédominance des réflexions précoces n'est pas favorable à la prise de son parce que c'est très compliqué de s'en affranchir pour créer un espace plus vaste. On peut aussi prendre le point de vue des musiciens : dans une salle comme la philharmonie, le fait que le son revienne dans une longue réverbération très spacieuse, ça va influer positivement sur leur interprétation car ils peuvent jouer avec, tandis qu'à l'auditorium c'est plus compliqué car la réverbération est plus courte et revient beaucoup moins sur scène. Une dernière chose sur cette comparaison, la nature assez sèche de l'acoustique de l'auditorium fait qu'on peut entendre individuellement chaque musicien, alors qu'un orchestre est fait pour fusionner, ce qui nécessite un champ diffus bien contrôlé. Cela dit une formation baroque à l'auditorium marche très bien, notamment avec le plateau à plat qui augmente un peu le TR60 et qui permet une bonne fusion.

Est-ce que vos choix de prise de son en termes notamment de placements tiennent compte des premières réflexions?

A vrai dire pas tellement. On a besoin des marqueurs acoustiques de la salle, et un appoint trop proche est impossible à faire fusionner dans le mixage. Donc on va placer les appoints à une certaine distance des instruments pour avoir ces deux avantages. Mais ça dépend de la salle, on appréciera d'avoir des premières réflexions dans une salle à l'acoustique favorable, et inversement on essaiera de s'en affranchir si l'acoustique n'est pas flatteuse, comme je le disais par rapport à l'auditorium et la philharmonie par exemple. On a une tendance qui est de placer les musiciens au centre de la salle ou du plateau pour les éloigner des murs et minimiser l'impact des premières réflexions. Leur présence est importante mais c'est important de contrôler leur niveau qui s'il est trop fort peut être vraiment gênant.

En mixage, vous arrive-t-il d'ajouter des premières réflexions seules, indépendamment du champ diffus?

Ça peut arriver, dans le cas d'appoints trop proches, pour « décoller » la source.

Et vous arrive-t-il d'utiliser plusieurs moteurs de réverbération sur une même source?

Oui, aussi de manière très classique pour séparer l'énergie précoce et le champ diffus, pour avoir un mixage homogène et cohérent.

Et avez-vous des préférences en termes de natures de réverbérations?

Non pas particulièrement, j'utilise toutes les variétés selon les projets qui peuvent être différents même dans le classique. Chaque outils a ses intérêts. J'ai vu beaucoup de gens mélanger aussi, entre les convolutions qui peuvent très bien marcher mais avec lesquelles on peut être trop limités sur la gestion précise de l'espace, et les réverbérations comme la Bricasti.

Est-ce que vous modifiez souvent le réglage du pré-décal, dans quel cas et pourquoi?

Oui, parce que ça va gérer

Il y a longtemps, avant les développements des réverbérations numériques d'aujourd'hui, on avait tendance à mettre des pré-décalis longs et des temps de réverbération plutôt courts, les réverbérations étant trop mauvais pour marcher sur des temps longs. En fait on cherchait déjà à décoller la réverbération du signal direct et c'est toujours ce qu'on fait aujourd'hui, typiquement en réglant le pré-décal entre 12 et 36 ms. L'idée est de trouver la bonne fusion entre le son direct et l'arrivée de la réverbération.

Est-ce que vous accordez de l'importance à la disposition spatiale des premières réflexions?

C'est peu commun, en tout cas ce n'est pas une habitude de rentrer dans ce niveau de finesse, bien que ce soit possible. Mais il faut aussi considérer les temps de mixage. Disons que ça pourra aider si on a un problème particulier qu'on n'arrive pas à résoudre, on pourra alors aller chercher des choses comme ça.

Vous arrive-t-il d'utiliser d'autres types d'effets que de la réverbération pour simuler un effet type « premières réflexions »?

Non pas tellement, je préfère prendre une réverbération conçue pour. Et je dirais qu'en général quand on joue avec une acoustique réelle moins on mets de choses artificielles mieux on se porte. Je vais être caricatural mais les enregistrements les plus beaux sont ceux où tout a été fait à la prise de son qui peut être très simple, à deux micros ou un peu plus, mais placés avec beaucoup d'attention. Comme rien n'était rajouté de manière artificielle, l'oreille n'a pas à décoder des choses qui pourraient sembler incongrues. En fait à force d'ajouter de l'information on fait un choix, et il y a des prises de son faites avec beaucoup de micros mais qui sont épuisantes à écouter.