



HAL
open science

Les espaces couplés : comportement, conception et perception dans un contexte de salle de spectacle

Paul Luizard

► **To cite this version:**

Paul Luizard. Les espaces couplés : comportement, conception et perception dans un contexte de salle de spectacle. Acoustique [physics.class-ph]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2013. Français. NNT: . tel-00874238

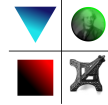
HAL Id: tel-00874238

<https://theses.hal.science/tel-00874238>

Submitted on 17 Oct 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**THÈSE DE DOCTORAT DE
L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité :
Acoustique

Présentée par :

Paul Luizard

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Sujet de la thèse :

**LES ESPACES COUPLÉS : COMPORTEMENT, CONCEPTION ET
PERCEPTION DANS UN CONTEXTE DE SALLE DE SPECTACLE.**

Soutenue le 16 septembre 2013

devant le jury composé de :

Angelo Farina	Professeur à l'Université de Parme	Rapporteur
Judicaël Picaut	Directeur de recherche à l'IFSTTAR Nantes	Rapporteur
Yves Berthaud	Professeur à l'UPMC	Examineur
Tapio Lokki	Associate Professor (tenured) à l'Université Aalto	Examineur
Eckhard Kahle	Fondateur de <i>Kahle Acoustics</i>	Examineur
Brian F.G. Katz	Chargé de recherche au LIMSI-CNRS	Directeur de thèse

Encadrants, équipes de recherche et école doctorale :

Directeur de thèse : Brian F.G. Katz
Equipe Audio-Acoustique,
Laboratoire LIMSI-CNRS,
Rue John von Neumann, 91403 Orsay, France

Co-directeur de thèse : Jean-Dominique Polack
Equipe Lutheries, Acoustique, Musique,
Institut Jean Le Rond d'Alembert,
11, rue de Lourmel, 75015 Paris, France

Ecole doctorale SMAER,
4, place Jussieu, BC 270,
75252, Paris cedex 05, France

Résumé

Cette thèse dont le sujet porte sur les espaces couplés en acoustique des salles s'articule selon trois axes : le point de vue mécanique qui considère les champs acoustiques en régime stationnaire et transitoire ; le traitement des signaux émis et enregistrés permettant de caractériser l'acoustique de tels espaces ; et enfin un aspect perceptif adoptant la position d'un auditeur. Selon chaque axe, les investigations sont cadrées par les limites correspondant aux réalités de la conception de salles de spectacles. Ces travaux ont pour objectif d'obtenir une compréhension plus fine des phénomènes acoustiques mis en jeu dans les espaces couplés et de donner un point de vue global sur le sujet à travers les différentes études mises en œuvre, de la modélisation à la perception.

L'étude des champs acoustiques dans les espaces couplés a été réalisée en comparant plusieurs approches : modèles analytiques, mesures physiques et simulations numériques. En effet, des modèles analytiques basés sur l'acoustique statistique et une équation de diffusion ont été développés et comparés à des mesures sur maquette acoustique ainsi qu'à des simulations numériques basées sur le principe du lancer de rayons. De plus, une comparaison entre différentes méthodes numériques a été menée dans le cadre des salles à volumes couplés : la méthode géométrique de lancer de rayons et les méthodes ondulatoires d'éléments frontière (BEM) et de différences finies en domaine temporel (FDTD). Par ailleurs, une maquette acoustique de salles couplées à l'échelle 1:20 a été réalisée et utilisée pour mesurer des réponses impulsionnelles en modifiant différents paramètres architecturaux comme la surface de couplage ouverte entre les deux salles, la présence d'éléments diffusants, ou encore l'influence de configurations source-récepteur variées.

L'aspect analyse de réponses impulsionnelles de salles couplées a été développé à partir du constat que les indices acoustiques et leurs méthodes de calcul ne sont pas forcément adaptés aux caractéristiques de ces lieux, à savoir les taux de décroissance multiples de l'énergie sonore. Des indices acoustiques pertinents ont été définis, décrivant précisément les spécificités des courbes de décroissance et un code de traitement semi-automatisé a été réalisé afin d'analyser rapidement les réponses impulsionnelles mesurées et simulées.

La perception du son réverbéré dans les espaces couplés est différente de celle des espaces à volume unique, essentiellement à cause des taux de décroissance multiples de l'énergie sonore qui provoquent une faible réverbération précoce en comparaison de la réverbération tardive. Ce phénomène physique peut être interprété par un auditeur comme donnant aux sons à la fois une forte clarté et une impression de réverbération importante, alors que ces concepts sont antagonistes dans un volume unique. Deux types d'expériences perceptives basées sur des tests d'écoute ont été menées, l'une sur la capacité de discrimination de différents environnements réverbérants, l'autre sur l'adéquation subjective entre ces réverbérations et différents ensembles musicaux.

Mots-clés : acoustique des salles, volumes couplés, réverbération, modélisation analytique, méthodes numériques, échelle réduite, perception du son réverbéré.

Abstract

This thesis deals with the acoustics of coupled spaces. It is organized along three axes: a physical point of view which considers acoustic fields in stationary and transient conditions, processing of emitted and recorded sound sequences allowing for characterizing the acoustics of such spaces, and finally a perceptual aspect involving the location of a listener. Along each axis, investigations are framed by the limits corresponding to the actual design of halls. This work aims at providing a more detailed understanding of acoustical phenomena involved in coupled spaces and gives an overall view of the topic through different considerations, from modeling to perception.

The study of acoustic fields in coupled spaces was performed by comparing several approaches: analytical models, physical measurements, and numerical simulations. Analytical models based on statistical acoustics and diffusion equation were developed and compared with scale model measurements as well as numerical simulations based on ray-tracing. In addition, a comparison between different numerical methods has been conducted within the framework of coupled volumes: the geometric method of ray-tracing and wave based methods such as the boundary element method (BEM) and finite-difference time-domain (FDTD). Furthermore, an acoustic scale model of coupled rooms at scale 1:20 was constructed and used to measure room impulse responses while varying different architectural parameters such as the coupling surface between the two rooms, the presence of scattering elements, or the influence of various source-receiver arrangements.

Analysis of coupled room impulse responses was developed from the observation that classical acoustic parameters and their methods of calculation are not necessarily suited to characterize these types of spaces which present multiple sound energy decay rates. Relevant acoustic parameters have been defined, allowing for an accurate description the specifics of decay curves and a semi-automated routine was developed to rapidly analyze both measured and simulated impulse responses.

Perception of reverberated sound in coupled spaces differs from that in single volume spaces, mainly because of the multiple sound energy decay rates providing shorter early reverberation as compared to the late reverberation. This physical phenomenon can be interpreted by a listener as giving the sound both high clarity and reverberance, whereas these concepts are antagonistic in a single volume. Two types of perceptual experiments based on listening tests were conducted, one on the ability to discriminate different reverberant environments, the other on the subjective suitability of these different reverberations regarding various musical ensembles.

Keywords: room acoustics, coupled volumes, reverberation, analytical modeling, numerical methods, reduced scale, perception of reverberated sound

Remerciements

L'achèvement de ce travail de thèse est l'occasion de remercier les personnes qui m'ont entouré au cours de ces dernières années, en particulier Brian et Jean-Dominique qui m'ont encadré au long de cette thèse. Leur enthousiasme, leurs compétences, leurs désaccords (un raisonnement équilibré ne naît-il pas d'une argumentation contradictoire?), la liberté mesurée qu'ils ont su me laisser, leur rigueur intraitable, ont permis au jeune chercheur que je suis devenu de mener à bien ce projet dans lequel il aurait été relativement aisé de se perdre. Je les remercie aussi pour les moments improbables qu'il m'a été donné de partager avec eux. Je pense en particulier à une dégustation de *sahiti* finlandaise avec Brian sur le port de Lahti après deux jours de mesures intensives dans la salle de concert locale, ou encore à une réflexion de Jean-Dominique sur l'alcoolisme juvénile en milieu rural en partageant un petit déjeuner de *baked beans* à Dublin! Globalement et avec un peu de recul, je les remercie surtout pour m'avoir procuré les conditions qui ont permis d'effectuer le travail présenté ici, lié à un certain épanouissement personnel. Je me dois également de remercier ceux qui m'ont introduit dans un laboratoire de recherche : Laurent puis Nathalie et Christophe, sans qui j'aurais certainement quitté l'université plus rapidement.

Un grand merci également aux membres du jury qui ont accepté de donner de leur temps et leur avis pour juger mon travail, pour leurs réflexions et commentaires constructifs menant à la version finale du présent manuscrit. En particulier, merci à Eckhard qui a été disponible depuis Bruxelles pour les instants décisifs depuis le début du projet, et à Tapio qui m'a plusieurs fois impressionné par son approche technique et sensible de l'acoustique des salles lors de conférences et dans son équipe à Helsinki.

Par ailleurs, j'ai eu l'occasion d'effectuer deux séjours d'étude en Amérique du Nord qui ont été particulièrement constructifs puisqu'ils m'ont permis de découvrir d'autres façons d'aborder la recherche, d'établir des collaborations et de découvrir deux pays qui m'étaient inconnus. Pour cela je remercie énormément Catherine Guastavino et Ning Xiang pour m'avoir accueilli dans leurs équipes de recherche. Merci aussi à tous ceux que j'ai pu rencontrer autour du RPI, à Troy : Jason Summers pour les discussions sur les modèles analytiques, Jonas Braasch (fameux concert de Colin Stetson!), Jon, Cameron, Zack, et Sam, mais aussi les généreux Laura & Ben *and all the Greasy Troyans*. Quant à ceux que j'ai pu croiser lors de mon passage à Montréal, merci à Dan pour la programmation et les fléchettes, Julien et Marcelo pour le CIRMMT et les BBQ, Romain & Nat pour l'accueil, Bérengère et ses saltimbanques, Dave & Julie pour leur amour du *Dude*, au *crew* de l'ETS - aka *Rachel and the Polish DJs*, Brice et Filou pour les divagations sur la musique contemporaine, et tous les autres.

Je remercie également mes chers collègues du LIMSI qui m'ont entouré dans cette lointaine contrée que l'on nomme Orsay. D'abord les Anciens, Sylvain, Tifanie, Marc R. et Gaëtan GLP qui m'ont montré *la Voie* du thésard, soit ce qu'il est conseillé de faire et ce qu'il vaut mieux éviter, avec un humour toujours présent, parfois grinçant. Merci à Lionel et David D. pour leurs tablas et trombone respectifs et aussi pour m'avoir attendu avant de terminer le boulot. Enfin, merci à ceux qui restent encore un moment au LIMSI : Marc E. pour sa nippo-belgitude, Olivier pour sa

présence matinale, David PQ pour son enthousiasme débordant, Matthieu pour ses explications BEM et son coup de guitare TNT, Albert pour sa linguistique et sa présente discrétion, Nathalie pour ses encouragements et sa lutte engagée, et Christophe, le Grand Manitou, pour ses claviers multiples et sa curiosité bouillonnante. Un grand merci aux autres membres du laboratoire, particulièrement à l'équipe technique dont Yves et les deux Vincent, qui ont fortement contribué à la construction de la maquette. Merci à Makoto pour sa bonne humeur lors de son passage. Enfin, un ostie d'merci à Renaud qui a crissement bien travaillé pendant trois mois !

Je remercie non moins mes estimés collègues du LAM, et tout d'abord Delphine qui fut en quelque sorte la *Maman* des thésards ces deux dernières années. Merci à ceux de ma génération : Roman pour la lutherie sauvage, la fraîcheur d'esprit et le généreux partage de son bureau, Indiana pour son irrépensible besoin de liberté et Cédrik pour ses blagues de geek et sa gentillesse. Merci aux plus récents : Arthur pour ses guitares, sa bière et sa chaussette à thé, Camille pour le *Quena band* qui verra le jour tôt ou tard, Juan-Pablo pour son sourire permanent, et aussi les autres doctorants : Benoit, Hugo, Alexandre et Dorian. Merci aux autres membres de l'équipe qui contribuent fortement à la bonne ambiance générale, à commencer par Hugues *El Jefe*, Benoit, Claudia, Jean-Loïc, Sylvain, Boris, Michèle, Jean-Marc, Olivier, Joséphine, Laurent, Catherine et Pascal.

Enfin, je remercie énormément mon entourage proche, famille et amis, pour m'avoir écouté raconter *ce que je fais* ou au contraire pour ne pas avoir trop demandé *comment ça avance*. Dans le désordre, merci à Mélo pour avoir si souvent été ma binôme, Alberto et Dr Paratodos pour leur intérêt matriciel, Vincent et Greg pour avoir demandé à lire ma première publi, Jerem et Baptiste pour insister pour que je sois leur clavier, Elodie, Katiouch, Yo, Manon, Captain, Maria, El Griego, Fleur, Marco, Baptiste et Louise pour m'avoir aidé à remplir mes weekends. Merci aussi à Béber et Kókó pour s'être occupés de moi pendant la rédaction. Merci à Dr Adrioune et toutes les Javes pour leur douceur, aux Marlous pour leur fraîcheur créative. Merci à Léléo pour les soupes, à Ro, Oscar et Elise pour les films, Antoine et Florie pour les livres et Ourouk pour le débit verbal de qualité. Merci à mes ex-collègues ACAR Sonia, Fabien, Toutoune et Maro pour le souvenir de ces nuits de charrette. Merci à Papillot qui, en me parlant d'architecture dès le plus jeune âge, a certainement contribué à me donner l'envie de me tourner vers l'acoustique architecturale. Merci à mes parents et mon frère pour m'avoir mené où je suis aujourd'hui, je leur dois beaucoup. Enfin, un immense merci à Ilona qui m'accompagne depuis tant d'années et qui, par sa présence minutieuse et loutinante, me permet d'avancer.

A tous ceux-là, en un mot : Merci !

*« Les mains vides, j'allais à la découverte du temps et de l'espace.
Les mots, comme de joyeux compagnons,
s'élançaient devant mes yeux et tournaient autour de mes oreilles
pour le carnaval de l'oubli. »*

Philippe Soupault
Les dernières nuits de Paris
1928

Table des matières

Résumé	v
Abstract	vii
Remerciements	ix
Table des matières	xiv
1 Introduction générale	1
1.1 Acoustique variable dans les salles	2
1.1.1 Systèmes passifs	2
1.1.2 Systèmes actifs	4
1.2 Fonctionnement et intérêt des salles à volumes couplés	7
1.2.1 Fonctionnement	7
1.2.2 Intérêt	9
1.3 Organisation du manuscrit	12
2 Traitement du signal	15
2.1 Mesures de réponses impulsionnelles	16
2.1.1 Méthode de l'impulsion	16
2.1.2 Méthode de la séquence MLS	18
2.1.3 Méthode du sinus glissant	20
2.1.4 Bilan	22
2.2 Analyses de réponses impulsionnelles	24
2.2.1 Méthode "Marching Line"	25
2.2.2 Bilan	34
3 Modélisation du champ acoustique	37
3.1 Maquette acoustique	38
3.1.1 Généralités	38
3.1.2 Maquette de salle à volumes couplés	42
3.2 Méthodes numériques	49
3.2.1 Comparaison de mesures et méthodes numériques	49
3.2.2 Bilan	60
3.3 Approche analytique	62
3.3.1 Approche statistique pour deux salles couplées	63
3.3.2 Généralisation à N salles couplées	69
3.3.3 Approche par une équation de diffusion	73
3.3.4 Bilan	94

3.4	Auralisation	96
3.4.1	Auralisation par le modèle de diffusion	96
3.4.2	Bilan	103
4	Perception de la réverbération couplée	105
4.1	Discrimination	107
4.1.1	Expérience de discrimination	107
4.1.2	Bilan	123
4.2	Quelle réverbération pour quelle formation musicale?	125
4.2.1	Expérience sur la notion de réverbération appropriée à certaines formations musicales	125
4.2.2	Bilan	135
5	Conclusion générale	137
5.1	Contributions de la thèse	138
5.1.1	Analyse de réponses impulsionnelles couplées	138
5.1.2	Modélisation de champs acoustiques dans des espaces couplés	138
5.1.3	Perception de la réverbération dans des espaces couplés	139
5.2	Perspectives	141
5.2.1	Améliorations de l'algorithme Marching Line	141
5.2.2	Éléments de comparaison du modèle de diffusion	141
5.2.3	Développement du modèle de diffusion	141
5.2.4	Élargissement de l'investigation perceptive	142
5.2.5	Mesures réalisées, pas encore exploitées	142
5.3	Publications liées à la thèse	144
	Bibliographie	145
	Annexes	161
A.1	Définition de quelques indices acoustiques classiques	162
A.2	Salles de concert à volumes couplés existantes	164
A.3	Caractéristiques du matériel de mesure	166
	Liste des tableaux	169
	Liste des figures	174

Introduction générale

Ce travail de thèse porte sur l'acoustique des salles à volumes couplés. Il est intitulé "Les espaces couplés : comportement, conception et perception dans un contexte de salles de spectacles". Il se propose d'élargir le champ de connaissance de l'acoustique des espaces couplés, du comportement des champs acoustiques dans de tels espaces fermés à la perception qu'un auditeur peut en avoir, dans les limites imposées par la conception de tels espaces.

L'approche adoptée tente d'établir des liens entre considérations physiques telles que la modélisation de champs acoustiques et leur prévision d'une part, et d'autre part l'aspect humain de la perception qu'a un auditeur immergé dans ces champs acoustiques. Ainsi ce travail tente d'être le plus complet possible en prenant en compte différentes étapes, de la conception d'une salle de spectacles à l'écoute que peut avoir un auditeur lors d'une représentation. Par ailleurs, les dimensions architecturales considérées lors de cette étude sont similaires à celles de salles construites jusqu'à présent. Une attention particulière a été portée à ce que les différents modèles utilisés soient applicables à la conception de salles. Les résultats obtenus au cours de ce travail ont donc pour objectif de contribuer à enrichir les connaissances globales en acoustique des salles à volumes couplés et de proposer certaines informations pratiques pertinentes aux concepteurs et régisseurs de salles afin d'améliorer la qualité sonore dans de tels espaces.

1.1 Acoustique variable dans les salles

Les salles de concert ont été conçues historiquement selon des observations empiriques dans les lieux précédemment construits, menant à des formes souvent rectangulaires [Barron, 1993] dédiées à certains types de musique. En effet, jusqu’au XIX^e siècle la musique était la plupart du temps composée pour être jouée dans une salle particulière possédant des caractéristiques acoustiques propres. La salle de concert était donc dédiée à un type de musique spécifique, ne pouvant accueillir que certaines formations musicales [Essert, 1997]. C’est au XX^e siècle, avec les progrès en l’acoustique des salles, que des géométries alternatives se sont répandues [Beranek, 2004; Kwon and Siebein, 2007] et certains dispositifs ont été mis en œuvre afin de pouvoir modifier l’acoustique d’une salle. Ce changement majeur bouleverse l’usage d’un lieu de représentation musicale puisqu’il permet d’envisager des types de spectacles différents organisés au sein d’un même espace. Par ailleurs, les contraintes économiques nécessitant une programmation intensive afin de rentabiliser l’espace construit favorisent les projets dont l’acoustique variable permet d’accueillir différents types de formations musicales dans de bonnes conditions. Ainsi plusieurs techniques ont été développées pour modifier l’acoustique d’un lieu. Une distinction peut être faite entre les techniques passives qui utilisent des propriétés mécaniques des matériaux, et les techniques actives qui sont des moyens de contrôle du champ acoustique utilisant des transducteurs électro-acoustiques (microphones et haut-parleurs).

1.1.1 Systèmes passifs

La modification de manière “passive” des caractéristiques acoustiques d’un lieu peut être réalisée en changeant des éléments physiques comme le volume ou l’absorption des parois, pourvu que ces modifications soient audibles. La variation d’absorption peut être due à des rideaux lourds, tirés contre les murs ou dans l’espace pour segmenter ce dernier. Cette solution est simple à mettre en œuvre et souvent utilisée, notamment pour simuler la présence de public, qui fait partie des éléments absorbants dans une salle de concert. Un système plus complexe a été construit dans l’Espace de Projection de l’IRCAM à Paris (Figure 1.1) où les murs sont composés de panneaux rotatifs pouvant présenter une face réfléchissante, diffusante ou absorbante. Cette salle possède une autre particularité : celle de pouvoir modifier son volume par l’ajustement de la hauteur du plafond. Cette capacité de modification du volume est un autre moyen de faire varier l’acoustique de la salle. Elle est également employée par exemple dans la salle de concert Sala à São Paulo au Brésil (Figure 1.2) où le plafond est divisé en unités mobiles. Cela permet de modifier la hauteur sous plafond, ce qui entraîne une variation de l’acoustique de la salle.

Un équilibre doit cependant être trouvé entre les indices acoustiques appelés temps de réverbération (TR) et force sonore (G), dont les définitions se trouvent en annexe A.1. Le temps de réverbération est la durée nécessaire à la décroissance de l’énergie sonore de 60 dB et la force sonore est liée directement au niveau sonore dans la salle. Plus exactement, elle exprime l’amplification de la salle en comparaison avec le niveau sonore en champ libre produit par la même source sonore. Un autre indice acoustique, la précision (C_{80}), aussi appelée clarté par analogie avec l’anglais *clarity*, est inversement proportionnelle au temps de réverbération puisqu’une



FIGURE 1.1 – Vue de l'Espace de Projection de l'IRCAM, Paris, France. Les murs sont faits de panneaux rotatifs constitués de trois faces. L'une est plate et rigide favorisant les réflexions spéculaires, une autre présente une surface irrégulière adaptée à la diffusion du son, la dernière est perforée et absorbante. Le temps de réverbération annoncé peut varier entre 0,4 s et 4 s. Inauguration : 1978 Acousticien : Peutz.



FIGURE 1.2 – Vue de la Sala à São Paulo, Brésil. Les unités qui composent le plafond sont mobiles en hauteur. Inauguration : 1999. Acousticiens : Artec et Acoustica & Sonica.

décroissance rapide favorise la compréhension de notes ou syllabes successives. Ainsi, réduire le volume d'une salle va diminuer le temps de réverbération, augmenter la clarté et augmenter légèrement la force sonore. Par contre, augmenter l'absorption pour diminuer le temps de réverbération peut diminuer la force sonore de manière importante, ce qui n'est pas forcément propice à la qualité d'écoute. A l'inverse dans une petite salle, diminuer l'absorption pour avoir un TR plus élevé peut mener à des niveaux de force sonore trop importants. De grands réflecteurs peuvent également être utilisés pour orienter l'énergie sonore vers le public ou d'autres éléments de la salle, ce qui modifie l'acoustique du lieu, notamment la clarté du son qui dépend fortement de l'intensité des premières réflexions. De tels réflecteurs ont été utilisés dans la salle Christchurch Town Hall [Marshall, 1979a;b] en Nouvelle-Zélande (Inauguration : 1972. Acousticien : Sir Harold Marshall), afin de fournir au public d'importantes réflexions latérales qui participent à la qualité sonore.

Enfin, la présence d'un volume supplémentaire connecté à la salle principale par une ouverture variable permet des modifications de différentes caractéristiques de la salle principale. Cette salle additionnelle augmente le volume dans lequel se propage l'énergie sonore, dans des proportions dictées par la taille de l'ouverture, nommée surface de couplage. Ainsi le temps de réverbération peut être modifié. Par ailleurs si la salle supplémentaire est plus réverbérante que la salle principale, une réverbération à plusieurs pentes peut alors être observée. Dans ce cas, la salle supplémentaire est appelée chambre de réverbération [Johnson et al., 1995]. La première salle de concert construite avec une chambre de réverbération destinée à modifier l'acoustique de la salle principale est le McDermott Concert Hall [Johnson and Essert, 1991], Morton Meyerson Symphony Center, à Dallas, Texas, USA, inaugurée en 1989. L'acousticien est Artec. Un autre exemple, plus récent, est la salle de concert du Kultur- und Kongresszentrum de Lucerne en Suisse (Figure 1.3) a été construite sur le principe de volumes couplés. Les portes sont construites en béton et montées sur des moteurs qui permettent de régler l'ouverture. Un exemple est donné sur la Figure 1.4. Ces salles font partie de la liste de salles de concert à volumes couplés proposée en annexe dans le Tableau A.2. Notons que la plupart des théâtres et salles d'opéra ont une cage de scène qui est un volume secondaire dans lequel le son produit sur scène peut être réverbéré dans des proportions dictées par la quantité de décors suspendus, plus ou moins absorbants. Ainsi l'effet dû à une décroissance énergétique à plusieurs pentes peut être rencontré dans de tels lieux. La différence avec les salles dont il est question dans cette partie est que l'ouverture entre les volumes n'est pas variable puisqu'il s'agit du cadre de scène.

1.1.2 Systèmes actifs

Une alternative aux systèmes décrits précédemment est possible : il s'agit de systèmes "actifs" qui fonctionnent à l'aide de transducteurs électro-acoustiques et de dispositifs de traitement du signal. Une description détaillée n'est pas l'objet de cette étude et plusieurs recensements des différentes méthodes ont été réalisés [Kleiner and Svensson, 1995; Barnett, 1998; Kaiser, 2009; Poletti, 2010]. Mentionnons simplement le fait que ces méthodes peuvent être utilisées pour atténuer certaines fréquences de résonance dans des salles dont le volume est réduit et pour modifier la réverbération dans de grands volumes. Le contrôle actif dans les salles de



FIGURE 1.3 – Vue de la salle de concert du Kultur- und Kongresszentrum (KKL) à Lucerne, Suisse. Les parois latérales sont composées de portes donnant sur un grand volume vide, la chambre de réverbération. Inauguration : 1998. Acousticien : Artec.



FIGURE 1.4 – Détail de portes entre la salle principale et la chambre de réverbération au niveau d'un balcon, dans la salle du KKL à Lucerne en Suisse.

faible volume, comme les cabines de contrôle dans les studios d'enregistrement, est effectué par émission d'un signal en opposition de phase aux fréquences qui provoquent des résonances, généralement au-dessous de 200 Hz. Cox et D'Antonio [Cox and D'Antonio, 2009] signalent que de tels systèmes sont efficaces à condition que les modes aient un facteur de qualité élevé et soient suffisamment espacés. Ils ajoutent qu'il vaut mieux utiliser un haut-parleur par mode à atténuer pour une efficacité optimale. Le traitement acoustique de grandes salles peut être effectué par différents types de systèmes actifs, essentiellement pour ajouter de la réverbération et renforcer les réflexions latérales. Ils peuvent être constitués de réseaux de microphones placés sur scène ou dans la salle ainsi que de haut-parleurs, connectés à un ordinateur central. Un autre type de système utilise des cellules indépendantes, constituées d'un microphone, une unité de

filtrage électronique, un amplificateur de puissance et un haut-parleur, installées sur les murs et le plafond. Le système CARMEN [Schmich and Vian, 2004; Schmich et al., 2011] développé au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) en est un exemple et fonctionne comme un mur virtuel mobile, au sens où un délai temporel est appliqué par les cellules électro-acoustiques au son réfléchi sur les parois, donnant l’illusion d’une salle dont la largeur et la hauteur peuvent varier.

Les systèmes actifs peuvent produire des conditions acoustiques irréalisables avec des systèmes mécaniques, ce qui peut être particulièrement intéressant pour des créations contemporaines. Certains systèmes peuvent approcher une transparence acoustique telle que leur présence semble totalement indétectable mais il est aussi possible que des artefacts soient audibles, comme une coloration particulière du son due à une réponse en fréquence particulière du système installé, ou encore au placement des éléments électro-acoustiques. De plus, les réflexions artificiellement produites dépendent de la directivité de ces éléments et peuvent mener à des réflexions totalement diffuses, sans réflexions spéculaires, à moins d’utiliser le principe de “Wave Field Synthesis” (WFS) [Berkhout et al., 1993]. Ainsi certains auditeurs et régisseurs de salles sont persuadés que tout élément électronique introduit dans la production du son nuit à la qualité de l’écoute. Dans les années 1950, Vermeulen [Vermeulen, 1958] mentionnait le fait que les éléments électroacoustiques devaient être aussi peu visibles que possible car certains auditeurs étaient persuadés que la qualité sonore était altérée par ces systèmes, alors même que ces derniers ne fonctionnaient pas ! Aujourd’hui encore, l’intégration d’éléments électro-acoustiques dans une salle peut être réalisée de manière discrète, à l’insu du public.

Les systèmes passifs et actifs présentent donc différents avantages et inconvénients, et le choix de l’un ou l’autre dépend fortement de la fonction du lieu et du budget alloué. Ce travail de thèse est concentré sur le système des volumes couplés, susceptibles de produire une certaine variabilité de conditions acoustiques, mais parfois mis en œuvre de manière peu optimisée. Les investigations proposées visent à mieux comprendre le fonctionnement de tels systèmes et à dégager des règles simples capables d’améliorer la conception et l’utilisation de ces espaces.

1.2 Fonctionnement et intérêt des salles à volumes couplés

Le fonctionnement des volumes couplés évoqués précédemment est basé sur l'échange d'énergie acoustique entre deux volumes fermés. Les résultats dépendent en premier lieu de la position des sources et récepteurs dans la salle la plus réverbérante ou la moins réverbérante. En fonction de la configuration adoptée, la décroissance temporelle de l'énergie acoustique peut présenter plusieurs pentes, ce qui est en quelque sorte la signature acoustique des volumes couplés. Cette décroissance particulière, obtenue sous certaines conditions, possède certaines propriétés intéressantes comme la présence simultanée de clarté et réverbération importantes. D'autre part ce type de système permet un jeu sur la spatialisation du son. Cette Section propose une approche qualitative de la description des phénomènes. Une approche plus quantitative est proposée dans la Section 3.3 du Chapitre 3 consacré à la modélisation du champ acoustique.

1.2.1 Fonctionnement

Tout d'abord, rappelons quelques points théoriques sur l'évolution temporelle du champ acoustique dans un espace clos. Une hypothèse simplificatrice largement répandue est l'hypothèse du champ diffus proposée par Sabine alors que l'acoustique des salles était un domaine scientifique nouveau [Sabine, 1922]. Elle est applicable dans un volume fermé dont les dimensions sont similaires selon trois axes orthogonaux. Elle repose sur deux conditions : l'uniformité et l'isotropie de l'intensité acoustique. Cela signifie que la densité d'énergie est identique en tout point du volume et que les directions de propagation du son sont équiprobables. Cette hypothèse est développée dans la Section 3.3 du Chapitre 3. La décroissance temporelle de l'énergie sonore est alors modélisée comme une simple exponentielle dont le taux de décroissance dépend de l'absorption moyenne des parois de la salle et de son volume. Ainsi une représentation sur une échelle logarithmique est une droite décroissante. Considérons maintenant deux salles indépendantes, ayant chacune des caractéristiques architecturales propres (dimensions, surfaces plus ou moins absorbantes, volume). D'après le modèle de champ diffus, la décroissance de l'énergie acoustique dans les deux volumes isolés est représentée par deux droites dont les taux de décroissance sont *a priori* différents. Si une ouverture est pratiquée entre les deux salles contigües, l'énergie acoustique qui se propageait indépendamment dans chaque salle peut maintenant passer de l'une à l'autre. Un échange d'énergie s'établit alors, donnant lieu aux phénomènes associés aux salles couplées. La Figure 1.5 donne un exemple de salle de concert existante, composée de deux salles couplées.

Selon les volumes et les propriétés absorbantes des surfaces des deux salles, trois cas peuvent être distingués. Notons T_1 et T_2 les temps de réverbération de la salle principale et de la chambre respectivement et considérons que les sources et récepteurs sont situés dans la salle principale.

- $T_1 \gg T_2$. La salle est alors plus réverbérante que la chambre. Le son étant émis dans la salle, une partie de l'énergie est transmise à la chambre par la surface de couplage ouverte entre les deux volumes. Comme la chambre est plus absorbante que la salle, son taux de décroissance est moindre. Le taux de décroissance apparent, enregistré dans cette chambre, est en fait celui de la salle qui diffuse le son selon son propre taux de décroissance. De plus,

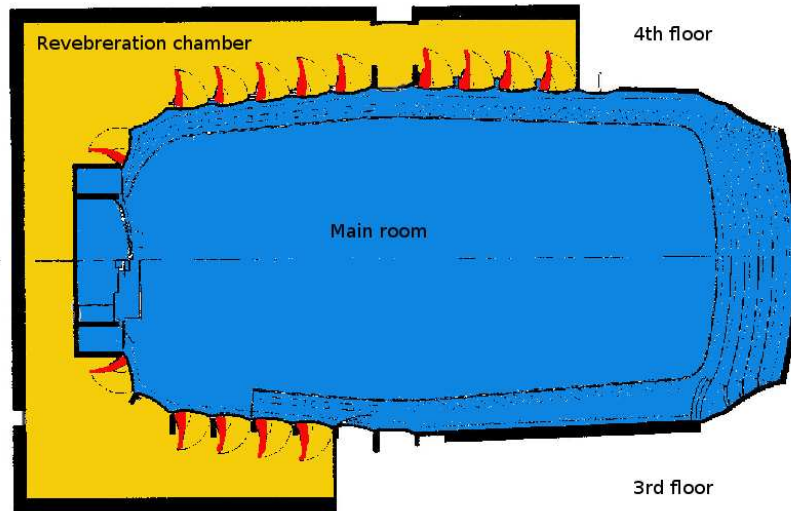


FIGURE 1.5 – Plan des niveaux 3 et 4 de la salle de concert du KKL à Lucerne, Suisse [Kahle et al., 1999]. La salle principale (bleu) est partiellement entourée par la chambre de réverbération (jaune). La surface de couplage est constituée de portes (rouge) dont une photographie est proposée en Figure 1.4. Image tirée de l’ouvrage de Beranek [Beranek, 2004].

la quantité d’énergie réémise vers la salle est faible. Ainsi lorsque la source est située dans la salle la plus réverbérante, le taux de décroissance reçu dans chaque volume est identique et piloté par la salle la plus réverbérante.

- $T_1 \approx T_2$. Les deux volumes ont le même temps de réverbération. Le taux de décroissance de l’énergie sonore est donc identique quel que soit le volume dans lequel se trouvent la source et les récepteurs. Dans ce cas de figure, le couplage ne crée pas de différence.
- $T_1 \ll T_2$. La salle est alors plus amortie que la chambre. Cette configuration justifie l’appellation “chambre de réverbération”. Dans ce cas, l’énergie émise par la source se réfléchit dans la salle principale pendant qu’elle pénètre dans la chambre. Cette dernière renvoie tardivement une partie de cette énergie alors que le taux de décroissance plus important de la salle a fait diminuer rapidement le niveau sonore. Ainsi la courbe de décroissance enregistrée dans la salle principale présente une première pente liée aux réflexions dans ce volume puis une seconde pente dont le taux de décroissance est moins fort, correspondant à la chambre de réverbération.

La Figure 1.6 montre un exemple de décroissances de l’énergie dans deux volumes indépendants (pointillés) puis couplés (traits pleins). Le troisième cas est considéré, avec les temps de réverbération $T_1 = 1\text{ s}$ et $T_2 = 7\text{ s}$. Une fois le couplage effectué, on voit bien les deux pentes au sein de la décroissance reçue dans la salle. Ces pentes sont proches de celles des volumes isolés mais ont des taux de décroissance légèrement différents. Cela est dû au fait que la surface ouverte change l’absorption globale d’un volume, la surface ouverte étant un absorbant idéal. Ainsi la chambre couplée considérée indépendamment est globalement plus absorbante que lorsqu’elle

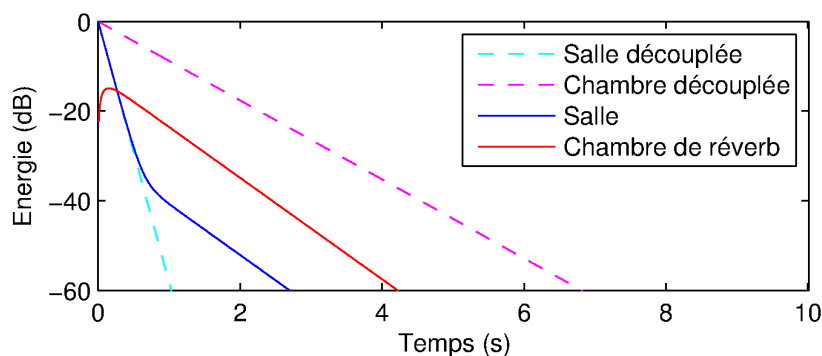


FIGURE 1.6 – Courbes de décroissance temporelle de l'énergie sonore dans les volumes isolés (pointillés) et dans les volumes couplés (traits pleins), simulées grâce au modèle de Cremer et Müller [Cremer et al., 1982] dans le cas d'une excitation impulsionnelle.

est réellement isolée, c'est pourquoi une fois la chambre chargée en énergie (début de la courbe rouge) le taux de décroissance est plus important que dans le cas de la chambre indépendante (droite magenta en pointillés). Ces explications sont détaillées dans la Section 3.3.

Les salles couplées peuvent donc produire une décroissance temporelle de l'énergie acoustique à plusieurs pentes, théoriquement liées au nombre de salles couplées à la salle principale. Il est possible en effet d'envisager un système à plus de deux salles couplées dont la décroissance présente autant de pentes, correspondant aux caractéristiques architecturales des différents volumes. Les conditions pour obtenir de telles décroissances coudées sont simples : placer les sources et le récepteurs dans le même volume qui doit être moins réverbérant que celui auquel il est couplé. Notons que les salles à volumes couplés ne produisent pas nécessairement une acoustique variable. En effet, si la surface de couplage ne peut pas être modifiée, l'acoustique de la salle ne pourra être changée que par d'autres moyens comme l'ajout ou le retrait d'absorbant, généralement des rideaux lourds, ou encore la modification du volume par murs ou plafond mobiles. C'est le cas du Christchurch Town Hall [Marshall, 1979a] où des réflecteurs de grandes dimensions sont installés au dessus du public, créant une surface partiellement ouverte qui sépare l'espace en deux parties, la partie haute étant peu absorbante et permettant au son réverbéré d'être diffusé progressivement vers la partie basse de la salle. Un autre exemple est la salle de la Philharmonie de Paris [Kahle et al., 2007] qui présentera des volumes vides derrière les balcons, sans mécanisme mobile, de sorte que les volumes et l'ouverture entre eux seront constants. Ce principe de construction a été employé récemment dans la salle de Stavanger en Norvège où un volume fixe existe derrière les balcons, bien que le plafond de cette salle soit mobile [Möller et al., 2008].

1.2.2 Intérêt

La particularité principale d'une salle à volumes couplés est la courbe de décroissance à plusieurs pentes, éventuellement modifiable par variation de la surface de couplage ou autres moyens mentionnés ci-dessus.

L'un des avantages de ce type de système est qu'il fournit une variabilité des conditions

acoustiques tout en gardant l’aspect “naturel” du son, sans intervention électronique, comme discuté dans la Section précédente. Ce principe de construction apparaît donc intéressant pour pouvoir programmer dans un même lieu divers types de formations musicales, du musicien soliste à l’orchestre symphonique, nécessitant des environnements sonores différents, notamment en termes de réverbération de l’espace. Toutefois, l’intérêt des salles couplées est davantage mis en valeur avec des formations classiques, les concerts amplifiés disposant généralement de la possibilité d’ajouter une réverbération artificielle directement à la table de mixage. L’intérêt de telles salles pour la musique amplifiée n’est pas dans la qualité de la réverbération naturelle de la salle mais se trouve dans la possibilité de transformer les chambres en absorbeurs sonores. En effet si la surface de couplage est largement ouverte et si un matériau absorbant est déployé dans les chambres, alors l’énergie sonore entrant est largement amortie et seule une faible partie revient dans la salle. Une partie des parois de la salle est alors transformée en absorbeur plus efficace qu’un simple rideau, ce qui contribue à éviter les problèmes de boucle électro-acoustique (effet Larsen) liés à la musique amplifiée.

Par ailleurs, le fait que les décroissances temporelles puissent être composées de deux pentes présente un intérêt particulier car la pente initiale possédant un fort taux de décroissance permet une clarté importante tandis que la pente tardive dont le taux de décroissance est plus faible permet une réverbération conséquente. En effet, la clarté en tant qu’indice acoustique objectif (C_{80}) est définie en annexe A.1 comme le rapport de l’énergie de la réponse impulsionnelle présente dans les 80 premières millisecondes sur l’énergie du reste de la réponse impulsionnelle. Cet indice acoustique est aussi appelé rapport d’énergie précoce/tardif. Ainsi, dans des volumes couplés, il est possible d’obtenir simultanément une clarté (partie précoce de la décroissance) et une réverbération (partie tardive) importantes alors que ces caractéristiques sont généralement contradictoires et inversement proportionnelles dans une salle à volume unique. Un autre indice acoustique défini en annexe A.1 est le temps de décroissance précoce (*early decay time*, EDT), défini à la manière du temps de réverbération comme six fois le temps nécessaire à la décroissance de l’énergie sonore entre 0 dB et -10 dB sur la courbe de décroissance normalisée. Une étude basée sur des séries de mesures dans plusieurs églises [Carvalho, 1994] a montré que les indices TR et EDT présentent une forte corrélation alors que C_{80} est inversement proportionnel à ces grandeurs. De plus, comparer EDT et TR peut être un moyen de repérer une courbure de la décroissance énergétique car EDT est estimé sur une partie plus courte de la décroissance. Ainsi, si TR est supérieur à EDT, il est probable que la réponse impulsionnelle correspondante présente une courbure plus ou moins forte. Il faut cependant rester prudent et ne pas tirer de conclusion hâtive car les différences entre ces deux indices acoustiques peuvent être dues, par exemple, à des réflexions précoces importantes, ce qui n’induit pas forcément la présence de plusieurs taux de décroissance dans la partie réverbérée de la réponse impulsionnelle. Des indices acoustiques adaptés à ce type de réponses impulsionnelles sont définis dans la Section 2.2 et permettent de les caractériser précisément.

Un autre point d’intérêt des salles à volumes couplés est le jeu sur la spatialisation du son qui est rendu possible par les différentes positions de la surface de couplage. En effet, selon les positions relatives de la source et de la surface de couplage, il est possible de modifier

l'homogénéité du champ acoustique. Comme il est montré dans la Section 3.3, si la source et la surface de couplage sont proches, la variation de certaines caractéristiques comme le niveau sonore et le niveau à partir duquel apparaît le point de courbure des décroissances est faible en comparaison de ce qui est observé si la source et la surface de couplage sont placées à l'opposé l'une de l'autre. Le champ acoustique est alors beaucoup plus inhomogène et ce phénomène peut être intéressant à utiliser, par exemple dans une optique de composition et de mise en scène de pièces, notamment contemporaines. Enfin, étant donné que la partie tardive des sons vient de la chambre de réverbération, il paraît possible de donner une certaine "directivité" à la réverbération tardive selon l'emplacement de la surface de couplage, pourvu que la densité d'énergie soit suffisante dans la chambre et que l'ouverture soit localisée. Si cette dernière est distribuée sur toute une paroi, l'image sonore du son tardif apparaîtrait plus large et moins précisément localisable. Cette notion de réverbération "directive" est un concept difficile à mettre en pratique dans une salle à volume unique suffisamment diffuse. En effet, un tel phénomène devient possible dans une salle présentant certaines parois parallèles entre elles, provoquant des "échos flottants", ce qui occasionne une concentration de l'énergie dans une partie de l'espace, lentement diffusée dans le reste de la salle, pouvant donner l'impression que la réverbération tardive vient de cette partie spécifique de la salle. Toutefois, même si ce phénomène est possible, les acousticiens font généralement en sorte de l'éviter, préférant favoriser l'homogénéité du champ acoustique dans les salles de concert.

Notons que la construction d'une salle de concert à volumes couplés est onéreuse car elle nécessite une surface au sol et une infrastructure généralement plus importantes que pour une salle à volume unique équivalente en termes de nombre de sièges (jauge). Notons que cette considération est générale et certains cas particuliers de salles à volume unique peuvent présenter un volume par siège supérieur à ce qui peut être trouvé dans des salles couplées comprenant le volume de chambre de réverbération. Certains paramètres architecturaux correspondant à plusieurs salles de concert à volumes couplés sont présentés en annexe A.2. De plus, un autre aspect susceptible de rendre un maître d'ouvrage réticent face à un projet de salle à volumes couplés est le fait que la salle devra être réglée, avec plusieurs configurations de couplage adaptées à différentes formations musicales. Cette phase de l'opération peut paraître plus coûteuse et complexe que dans le cas d'une salle à volume unique. Bien que le coût total de chaque projet soit réparti différemment entre les équipes de travail, les matériaux employés, les différentes phases de construction, etc. les projets de salles à volumes couplés sont certainement plus onéreux en général que les projets de salles à volume unique, hors cas particuliers. Ces considérations doivent être prises en compte et ne favorisent pas l'élaboration de grands projets de salles de concerts basés sur le principe des volumes couplés.

1.3 Organisation du manuscrit

La présentation du contexte d'étude proposée dans la Section précédente montre que l'utilisation des volumes couplés offre certains avantages du point de vue de la conception de salles de spectacle. Pourtant, malgré l'expérience acquise avec la construction de plusieurs salles de concert à volumes couplés dont certains exemples figurent en annexe A.2, les réalisations n'atteignent pas toujours le succès attendu. La motivation principale de ce travail de thèse est donc de mieux comprendre les enjeux liés à l'acoustique des volumes couplés, tant du point de vue physique que perceptif. Autrement dit, la problématique de cette thèse peut être formulée de la manière suivante : quels sont les effets physiques et perceptifs relatifs à différents paramètres architecturaux des salles à volumes couplés ?

Des éléments de réponse sont proposés dans ce manuscrit de thèse organisé selon trois axes, à l'image de l'approche adoptée pour traiter le sujet de recherche. Ces trois axes permettent d'aborder les différentes questions sous plusieurs angles complémentaires et d'envisager globalement l'acoustique dans des espaces couplés. Ces trois axes correspondent aux Chapitres 2, 3 et 4 qui composent le cœur du manuscrit :

- Le traitement du signal (Chapitre 2)
 - Quels signaux utiliser pour mesurer les réponses impulsionnelles de salles ?
 - Quels indices acoustiques permettent de caractériser une réponse impulsionnelle de salles couplées ?
 - Comment caractériser une série de réponses impulsionnelles de salles couplées ?
- La modélisation du champ acoustique (Chapitre 3)
 - Quels sont les moyens de modéliser l'acoustique des volumes couplés ?
 - Quels sont les avantages et inconvénients de chaque méthode ?
 - Quelles informations sont obtenues en comparant ces méthodes ?
- La perception de la réverbération couplée (Chapitre 4)
 - Comment caractériser la sensibilité d'auditeurs aux variations de la réverbération couplée ?
 - Quelle réverbération est plus adaptée à quel type de formation musicale ?

Le traitement du signal (Chapitre 2) prend place principalement au cours des mesures et analyses de réponses impulsionnelles de salles. Plusieurs méthodes de mesure sont décrites, de l'enregistrement rudimentaire d'un son impulsif aux techniques plus complexes faisant intervenir des éléments de traitement du signal. Ces méthodes sont comparées et les avantages et défauts de chacune sont explicités, justifiant le choix qui a été fait pour les mesures dans des maquettes. L'analyse de réponses impulsionnelles couplées nécessite également un traitement particulier, différent de celui qui est préconisé dans la norme ISO 3382 dédiée [ISO3382-1, 2009]. Un programme d'analyse a été écrit pour estimer les valeurs d'indices acoustiques spécifiques aux réponses impulsionnelles possédant plusieurs taux de décroissance.

La modélisation du champ acoustique (Chapitre 3) est l'aspect de ce travail lié à l'acoustique au sens physique. L'un des moyens employés est la modélisation par maquette acoustique. Une maquette a été construite à l'échelle 1:20 au LIMSI et représente deux salles couplées. Elle est modulable et permet de tester une variété de configurations en termes de géométrie, d'absorption des parois, de taille et position de surface de couplage, de position de source sonore et récepteurs. Ce type de modélisation présente l'avantage d'inclure l'ensemble des phénomènes physiques liés à la propagation des ondes sonores dans un espace clos, tels qu'ils existent à échelle réelle. Une autre manière d'aborder la modélisation est le développement de modèles analytiques décrivant le comportement du champ acoustique dans les salles couplées. En effet, une approche statistique peut être employée pour décrire la distribution de l'énergie dans de grands volumes, où l'approche modale n'est valable qu'aux très basses fréquences. Deux modèles décrivant la décroissance de l'énergie sonore dans le temps et l'espace ont été développés en utilisant d'une part une combinaison de deux modèles statistiques et d'autre part une équation de diffusion. Par ailleurs, la modélisation acoustique peut être réalisée par simulations numériques. Plusieurs méthodes existent, basées sur une approche particulière ou ondulatoire des phénomènes sonores. La plupart des simulations effectuées pendant cette thèse utilisent la méthode de lancer de rayons et une étude comparative s'est penchée sur plusieurs méthodes différentes afin d'en déceler les degrés d'efficacité pour l'application aux volumes couplés. Enfin, la dernière Section de ce Chapitre 3 du manuscrit se place comme une transition entre modélisation et perception sonore. Elle traite de l'auralisation dans les volumes couplés, avec une étude présentant une méthode basée sur le modèle de diffusion. Cette méthode permet d'écouter virtuellement l'acoustique d'une salle à volumes couplés en tenant compte des positions relatives de la source sonore, de la surface de couplage et du récepteur qui définit le point d'écoute.

La perception de la réverbération (Chapitre 4) peut apparaître comme la finalité du travail de l'acousticien dans un contexte de salle de concert, au sens où le travail sur le comportement du champ acoustique est mis en œuvre dans le but de procurer une qualité d'écoute optimale à l'auditeur. Ainsi l'étude de la perception de la réverbération dans les espaces couplés se place naturellement à la fin de ce travail de thèse. Une première étude s'est concentrée sur l'estimation d'un seuil de perception relatif à la variation de la taille de la surface de couplage ouverte entre deux salles. Plutôt que de se baser sur un indice acoustique comme le temps de réverbération ou la clarté, nous avons choisi de prendre comme référence un paramètre architectural, la surface de couplage. Une correspondance avec des indices acoustiques a été réalisée de ma-

nière à pouvoir établir des parallèles avec les recherches précédentes. Lors d'une seconde étude incluant un test d'écoute, il a été demandé aux participants quelle réverbération, parmi une collection, était plus adaptée au type de musique écoutée. Les réverbérations proposées étaient issues de quatre configurations de couplage et d'une salle à volume unique. Ce test avait pour objectif de déterminer une tendance, selon les jugements subjectifs d'auditeurs, de la taille de surface de couplage la plus adaptée à différentes formations musicales, en comparaison avec une réverbération à décroissance linéaire.

Le Chapitre 5 de conclusion propose un récapitulatif des contributions de la thèse et ouvre sur des perspectives possibles après ce travail.

Traitement du signal

Ce Chapitre a pour objectif de décrire les méthodes utilisées pour la mesure (Section 2.1) et l'analyse (Section 2.2) de réponses impulsionnelles (RI) de salles, en particulier du point de vue du traitement du signal.

La mesure peut être réalisée par divers moyens consistant à recueillir la réponse du système considéré lorsqu'il est excité par une impulsion. Le système en question est la salle proprement dite, l'excitateur est la source sonore et la réponse est enregistrée par un récepteur, en l'occurrence un microphone. Cette opération revient à estimer la fonction de transfert acoustique de la salle $H(s) = \mathcal{L}(h(t))$, \mathcal{L} étant l'opérateur de Laplace, la salle étant vue comme un système physique excité par une impulsion de Dirac $\delta(t)$. Ainsi, la réponse impulsionnelle de la salle peut être écrite telle que :

$$RI(t) = \delta(t) * h(t), \quad h(t) = \mathcal{L}^{-1}(H(s)). \quad (2.1)$$

Les méthodes de mesure décrites dans la Section 2.1 sont connues et largement utilisées dans la communauté de l'acoustique des salles. Une comparaison est proposée afin de donner une idée des avantages et inconvénients de chacune.

L'étape suivant la mesure est l'analyse d'une réponse impulsionnelle de salle qui permet d'extraire différentes informations sur l'acoustique du lieu où la mesure a été effectuée. Plusieurs indices acoustiques calculés d'après la réponse impulsionnelle ont été définis dans le but de quantifier cette dernière. Alors que ces indices sont utilisés pour décrire et comparer des salles à volume unique dont la décroissance temporelle de l'énergie est quasi-exponentielle, l'application aux salles à volumes couplés s'avère moins efficace et ne permet pas la description complète de la réponse impulsionnelle. La méthode d'analyse ainsi que les estimateurs associés qui ont été développés au cours de cette thèse sont présentés en Section 2.2 et les Chapitres suivants montreront divers exemples de leur utilisation.

Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Écart maximal (dB)	± 1	± 1	± 1	± 3	± 5	± 6

TABLE 2.1 – Ecart de directivité maximal pour qu’une source soit considérée omnidirectionnelle selon la norme ISO 3382 [ISO3382-1, 2009]. Les écarts sont mesurés en décibels par bandes d’octave en champ libre. Le signal émis est un bruit rose.

2.1 Mesures de réponses impulsionnelles

Plusieurs méthodes de mesure de réponses impulsionnelles de salles ont été développées, de la simple impulsion à des signaux plus complexes nécessitant un post-traitement. Trois types de signaux utilisés pour les mesures acoustiques dans les salles sont décrits dans cette Section. L’objectif de chacun est de fournir une méthode fiable et répétable, simple d’utilisation, qui permette d’obtenir un signal ayant une dynamique suffisante, soit un bruit de fond suffisamment bas, pour calculer les différents indices acoustiques. De plus la directivité de la source sonore est importante et des sources omnidirectionnelles sont majoritairement utilisées. Selon la norme ISO en vigueur ISO3382-1 [2009], le caractère omnidirectionnel d’une source est défini par les limites de variation de niveau sonore selon l’angle de mesure en champ libre. Ces valeurs limites figurent dans le Tableau 2.1.

2.1.1 Méthode de l’impulsion

La méthode la plus simple de mesure de réponse impulsionnelle de salle consiste à émettre un son de manière brève et localisée : une impulsion acoustique. L’excitation devant être répétable tout en couvrant une large gamme fréquentielle, un simple claquement de mains n’est pas envisageable sur le long terme. La répétabilité d’une mesure n’est pas définie clairement dans la norme ISO 3382 [ISO3382-1, 2009]. Cependant, une étude [Vorländer and Bietz, 1994] s’est penchée sur la répétabilité des mesures du temps de réverbération et signale que la norme ISO 5725 [ISO5725-1, 1990], qui définit la répétabilité de mesures inter-laboratoires, prévoit une limite de répétabilité de mesures en termes de niveau de probabilité à 95%. Ce critère est basé sur l’écart-type calculé sur plusieurs résultats de mesures répétées dans des conditions similaires.

Un pistolet d’alarme est un moyen efficace et largement utilisé pour émettre une impulsion sonore répétable, dont l’énergie est suffisamment importante dans les bandes de fréquence utilisées, typiquement entre 125 Hz et 4 kHz, et répartie dans l’espace de manière quasi-omnidirectionnelle [Lamothe and Bradley, 1985]. Les spectres présentés dans cette étude montrent une variation de l’énergie sonore d’environ 10 dB entre 125 Hz et 4 kHz alors que la directivité varie de moins de 5 dB au maximum dans le plan vertical et horizontal. L’excitation acoustique fournie est donc relativement homogène en fréquence et en espace, ce qui fait que ce type de sources est souvent utilisé en acoustique architecturale. Bradley [Bradley, 1986] a proposé une étude où des mesures de réponses impulsionnelles sont effectuées au pistolet d’alarme dans plusieurs salles dont les caractéristiques acoustiques sont variées. Il apparaît que ces mesures présentent une forte corrélation à la fois entre elles et avec un modèle analytique, montrant la répétabilité et la précision de telles sources. Au contraire Griesinger [Griesinger, 1996] affirme

que ce type d'excitation n'est pas suffisamment répétable. De plus, il rapporte que des mesures en chambre anéchoïque montrent une différence de plus de 20 dB de l'énergie émise dans le plan horizontal et vertical à 1 kHz, mettant en doute le caractère omnidirectionnel du son émis par des armes à feu. Enfin, il souligne que de tels objets peuvent poser problème, notamment pour le transport par avion, à l'entrée de certains bâtiment ou en présence de public.

Une autre possibilité est l'utilisation de pièces de bois frappées l'une contre l'autre, à la manière d'un clap de cinéma. Ce type de source sonore a été étudié par Canac [Canac, 1967] et plusieurs profils de réponse en fréquence ont été obtenus, selon la géométrie des objets, qu'il s'agisse d'éléments plats en bois ou en métal, ou encore de boîtes ouvertes sur un côté, frappées l'une contre l'autre. Certains claps favorisent les hautes fréquences et présentent une différence d'amplitude de 30 dB entre 100 Hz et 3 kHz. D'autres présentent une réponse en fréquence plus régulière avec des oscillations dans l'intervalle ± 10 dB entre 50 Hz et 10 kHz. L'auteur indique qu'*avec de l'habitude, l'émission est constante à 1 ou 2 décibels près*. Il indique également que la fréquence minimale pouvant être atteinte par un clap dépend de la longueur du grand côté telle que $a = \lambda/4$. Cette technique a été étudiée plus récemment par Sumarac et al. [Sumarac-Pavlovic et al., 2008] en termes de réponse en fréquence et directivité. Les résultats ne sont pas à la hauteur des performances du pistolet d'alarme avec un accroissement d'énergie d'environ 30 dB de 125 Hz jusqu'à un plateau à 1 kHz et au-delà, ainsi que des diagrammes de directivité n'atteignant pas la régularité de la méthode précédente. Cependant les auteurs soulignent le fait que ce système, dont l'acquisition est aisée, permet la réalisation de mesures dans des conditions où un système plus encombrant ne peut pas accéder. Cette méthode est donc considérée comme un système d'appoint non négligeable.

Une alternative est possible avec les ballons de baudruche qui représentent une source sonore dont le transport est particulièrement aisé. Pätinen et al. [Pätynen et al., 2011] ont enregistré l'éclatement de ballons de différentes tailles et calculé les spectres et diagrammes de directivité de 125 Hz à 4 kHz. Les résultats sont comparables à ceux obtenus par les claps en termes de directivité, mais sont différents pour ce qui est de la réponse en fréquence. Alors que les claps possèdent une énergie croissante avec la fréquence jusqu'à un plateau, l'énergie des ballons augmente de quelques décibels de 125 Hz à 250 Hz puis diminue d'environ 15 dB jusqu'à 4 kHz. Ainsi ce système de source impulsionnelle n'est pas non plus aussi performant que le pistolet d'alarme mais possède les qualités d'un système léger, permettant des mesures rapides sans contrainte de planification aussi forte. Griesinger [Griesinger, 1996] ajoute que ce mode d'excitation est peu répétable, en particulier si l'explosion est pratiquée à la main avec un objet pointu, sans système automatique, comme celui de l'étude précédente [Pätynen et al., 2011]. Par ailleurs, leurs mesures montrent que le spectre délivré par un ballon dépend de la direction d'éclatement, avec des différences de plus de 20 dB aux fréquences situées entre 2 kHz et 3 kHz.

Enfin, Arana [Arana et al., 2003] a réalisé des mesures de réponses impulsionnelles en utilisant des pétards. Ces explosifs sont présentés comme des sources possédant un spectre croissant sur environ 20 dB de 125 Hz à 4 kHz. Leur indice de directivité a été mesuré inférieur à 1 dB, traduisant un caractère quasi-omnidirectionnel dans ces bandes d'octave. Les mesures de temps de réverbération par bandes d'octave répétées dix fois présentent un écart-type de 0,07 s au

	pistolet d'alarme	clap	ballon	pétard
Variation d'amplitude entre 125 Hz et 4 kHz (dB)	10	30	15	20
Variation de directivité (dB)	5	10	10	1

TABLE 2.2 – Variation d'amplitude spectrale et de directivité pour plusieurs types de sources impulsionnelles.

maximum, ce qui montre que ce type de source mène à une importante répétabilité des résultats.

Le Tableau 2.2 propose une synthèse des avantages et inconvénients des sources impulsionnelles.

2.1.2 Méthode de la séquence MLS

L'utilisation de séquences MLS (Maximum-Length Sequence) remonte aux années 1960 avec les travaux de Davies [Davies, 1966]. Les séquences MLS sont des séries binaires périodiques pseudo-aléatoires qui permettent de mesurer des réponses impulsionnelles de systèmes linéaires. En effet, appliquer une telle séquence source $S(t)$ à un système linéaire permet d'enregistrer une réponse $R(t)$ qui, après inter-corrélation [Havelock et al., 2008] avec le signal d'excitation $S(t)$, donne la réponse impulsionnelle $RI(t)$ du système telle que :

$$RI(t) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S(\tau)R(\tau + t)d\tau, \quad (2.2)$$

où T est la période de la séquence MLS. Le traitement des données étant réalisé avec des variables discrètes par voie informatique, l'opération devient alors :

$$RI(n) = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^L S(k)R(k + n), \quad (2.3)$$

où $L = 2^N - 1$ est la longueur d'une période de la séquence, N étant un entier appelé ordre de la séquence.

La réponse impulsionnelle ainsi obtenue est donc périodique alors que les réponses de salles ne le sont pas. Pourtant la réponse mesurée avec cette méthode peut être considérée identique à la réponse correspondant à une impulsion sonore idéale pourvu que la période de la séquence MLS soit supérieure ou égale à la durée de la réponse impulsionnelle mesurée entre le son direct et le début du bruit de fond [Rife and Vanderkooy, 1989]. Cette condition posée, ces auteurs indiquent que le temps de mesure doit être le double de la période de la séquence MLS. Le son d'excitation produit par une séquence MLS est un bruit blanc, dont le spectre est plat. Un exemple de séquence MLS est donné en Figure 2.1 où il est possible d'observer le caractère pseudo-aléatoire de la séquence.

Schroeder [Schroeder, 1979] a montré par des mesures dans la salle du Glockensaal à Brème en Allemagne que la méthode MLS permet d'obtenir un rapport signal sur bruit suffisant pour exploiter les mesures, même avec un niveau sonore d'émission faible. Il indique que des mesures de ce type peuvent être pratiquées pendant une représentation ! Il rapporte également une démonstration pendant laquelle il a pu mesurer une réponse impulsionnelle de salle alors qu'il

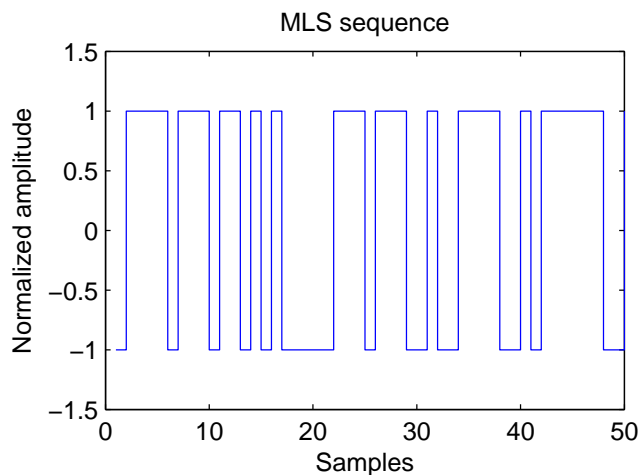


FIGURE 2.1 – Extrait d'une séquence MLS sur 50 échantillons.

donnait un cours. L'utilisation d'un faible niveau sonore est rendu possible par la multiplication des séquences et le moyennage du signal enregistré. Dans l'exemple de la salle de concert, 200 réponses de la salle ont été enregistrées.

Chu [Chu, 1990] a effectué des mesures moyennées et mentionne un gain en dynamique de $10 \log_{10}(n)$, n étant le nombre de mesures moyennées. Il souligne que la méthode permet de travailler en environnement bruyant. En effet, une étude [Dunn and Hawksford, 1993] qui compare la méthode MLS à l'excitation par impulsions périodiques et identiques (Periodic Impulse Excitation - PIE) rapporte que la méthode MLS offre une résistance au bruit supérieure à celle de la méthode PIE. La quantification de cet avantage est de $10 \log_{10}(L + 1)$ avec L la longueur d'une période. Par contre, la méthode MLS présente un désavantage en ce qui concerne la distorsion pour les bandes de fréquence significativement plus basses que la fréquence d'échantillonnage.

Selon Vorländer et al. [Vorländer and Kob, 1997], l'utilisation de la méthode MLS produit un gain en dynamique entre 11 dB et 20 dB comparé à la méthode de mesure classique par bruit blanc, plus sensible au niveau de bruit de fond, dans le cas d'une mesure d'isolation acoustique d'une paroi. La méthode par émission de bruit blanc consiste à émettre un tel bruit d'un côté de la paroi et à calculer l'atténuation par la différence des niveaux sonores mesurés de chaque côté de cette paroi.

Enfin, Xiang et al. [Xiang and Schroeder, 2003] ont montré qu'il est possible de réaliser une mesure simultanée de deux réponses impulsionnelles avec deux sources et un seul récepteur en utilisant la méthode MLS. Le principe de mesure est basé sur des séquences MLS réciproques telles que $\{b_i\} = \{a_{-i}\}$. Chacune d'entre elles est émise par une source et le signal enregistré subit ensuite une inter-corrélation avec chaque signal d'entrée afin d'obtenir deux réponses impulsionnelles distinctes correspondant aux deux configurations source-récepteur. En effet pour un signal $S_i(t)$ émis et un signal $R_j(t)$ reçu, la fonction de transfert du système est calculée comme suit :

$$S_i(t) \otimes R_j(t) = \sum_{k=1}^n \phi_{ik}(t) * h_{kj}(t); \quad i = 1, \dots, n, \quad (2.4)$$

où le symbole \otimes représente l'inter-corrélation décrite à l'équation 2.3 et $\phi_{ik}(t) = s_i(t) \otimes s_k(t)$

est l'inter-corrélation entre les signaux des sources i et k . Les séquences propres à chaque source étant telles que :

$$\phi_{ik}(t) = \begin{cases} \delta(t), & \text{si } i = k \\ 0, & \text{si } i \neq k \end{cases}, \quad (2.5)$$

il vient naturellement que la réponse impulsionnelle correspondant à ce couple source-récepteur est estimée par :

$$RI_{ij}(t) = S_i(t) \otimes R_j(t). \quad (2.6)$$

Cette technique de mesures simultanées peut s'avérer particulièrement utile lorsque plusieurs agencements de sources et récepteurs doivent être testés en un temps réduit. Il est alors possible d'ajouter plusieurs sources et récepteurs afin d'augmenter le nombre de réponses impulsionnelles mesurées simultanément. Toutefois, les auteurs signalent que le rapport signal sur bruit obtenu est indépendant du nombre de récepteurs mais diminue d'au moins 3 dB par ajout d'une source supplémentaire.

2.1.3 Méthode du sinus glissant

Une étude pionnière [Heysler, 1967] a présenté une méthode appelée *time delay spectrometry*, utilisant un sinus dont la fréquence varie linéairement dans le temps, développée pour mesurer la réponse en fréquence d'une source acoustique en milieu réverbérant.

Une autre étude [Berkhout et al., 1980] a proposé l'utilisation d'un sinus dont la fréquence varie dans le temps pour mesurer des réponses impulsionnelles (RI). Elle se base sur une modélisation du signal enregistré dans la salle telle que :

$$\begin{aligned} v(t) &= w(t) * u(t) + n(t) \\ &= w(t) * \sum_i r_i(t - \tau_i) + n(t), \end{aligned} \quad (2.7)$$

où $v(t)$ est la RI globale du système {salle + chaîne d'acquisition} convoluée avec le signal d'excitation qui est un sinus glissant, enregistrée par un récepteur, $w(t) = w_0(t) * w_s(t) * w_r(t)$ est la RI de la chaîne d'acquisition mesurée en chambre anéchoïque ($w_0(t)$ est le signal d'excitation, $w_s(t)$ et $w_r(t)$ sont les RI de la source et du récepteur respectivement), $u(t)$ est la RI idéale de la salle pouvant être décomposée en une somme de réflexions r_i , ou retours, arrivant au récepteur avec un retard τ_i . Le signal $n(t)$ représente le bruit de fond dans la salle. Afin d'estimer la RI $u(t)$ de la salle sans l'influence de la chaîne d'acquisition, la méthode consiste à déterminer le filtre $f(t)$ tel que $f(t) * w(t) = \delta(t)$, dont la réponse en fréquence est de la forme $F(\omega) = A(\omega) \exp(-j\phi(\omega))$, $\phi(\omega)$ étant la phase de la fonction de transfert $F(\omega)$. Le signal obtenu peut alors s'écrire :

$$\begin{aligned} v'(t) &= f(t) * v(t) \\ &= f(t) * [w(t) * u(t) + n(t)] \\ &= w'(t) * u(t) + n'(t). \end{aligned} \quad (2.8)$$

Dans cette dernière expression, la résolution de la réponse filtrée est définie par la longueur de $w'(t)$ et son rapport signal sur bruit est donné par le niveau d'énergie du terme $n'(t)$. Cette

étude souligne le fait que la résolution dépend de la largeur de la gamme fréquentielle utilisée et le rapport signal sur bruit obtenu dépend de la durée du signal émis. En effet plus le signal d'émission est long, plus la quantité d'énergie émise est importante et permet un enregistrement plus détaillé.

Farina [Farina, 2000] ajoute que cette méthode permet une mesure simultanée de réponse impulsionnelle et de distorsion du système considéré, ce qui nécessitait précédemment deux mesures distinctes. Il décrit le signal d'émission du sinus glissant comme :

$$x(t) = \sin(f(t)), \quad (2.9)$$

dont la fonction temporelle $f(t)$ pilote l'évolution linéaire des pulsations de ω_1 à ω_2 (en rad/s) telle que :

$$\frac{d}{dt}f(t) = \omega_1 + \frac{\omega_2 - \omega_1}{T}t, \quad (2.10)$$

où T est la durée totale du sinus glissant et on obtient, par intégration :

$$f(t) = \omega_1 t + \frac{\omega_2 - \omega_1}{T} \frac{t^2}{2}. \quad (2.11)$$

Une évolution fréquentielle logarithmique est possible, permettant une émission de l'énergie sonore pendant un intervalle de temps constant dans chaque bande d'octave ou de tiers d'octave, avec la forme suivante :

$$f(t) = \frac{\omega_1 T}{\ln\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)} \left[\exp\left(\frac{t}{T} \ln\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)\right) - 1 \right]. \quad (2.12)$$

Afin d'éviter les problèmes liés à la synchronisation temporelle, l'auteur recommande de n'utiliser qu'une seule émission de sinus glissant, sans répétitions permettant de moyenner le signal enregistré. Si le signal d'émission est suffisamment long, le rapport signal sur bruit obtenu est au moins supérieur de 60 dB en comparaison d'une mesure effectuée avec une impulsion de même amplitude maximale. Griesinger [Griesinger, 1996] préconise au contraire l'utilisation de sinus glissants de courte durée, inférieure au temps de réverbération de la salle, afin de conserver un avantage des sources impulsives : le fait d'enregistrer directement les réflexions tardives sans avoir à les extraire du stimulus continu. Il recommande particulièrement le sinus glissant de courte durée pour mesurer des systèmes légèrement variables dans le temps. Un exemple de sinus glissant est proposé en Figure 2.2 sur lequel on peut voir l'évolution de la fréquence du signal sinusoïdal au cours du temps.

Dans le cas de mesures impulsionnelles destinées à l'auralisation, Müller et al. [Müller and Massarani, 2001] affirment qu'un rapport signal sur bruit de 90 dB est nécessaire et que seule la méthode du sinus glissant est susceptible de fournir une telle mesure. Par ailleurs, ces auteurs mentionnent le fait que le sinus glissant peut subvenir aux problèmes liés à une réponse en fréquence irrégulière de la chaîne d'acquisition. Pour ce faire, il suffit d'appliquer au signal d'émission un gain dans certaines bandes de fréquences selon un filtrage inverse. Le même type d'opération permet d'utiliser des sources sonores à plusieurs voies dont les haut-parleurs ont des réponses en fréquence différentes et obtenir un large spectre global d'émission dont le niveau reste régulier.

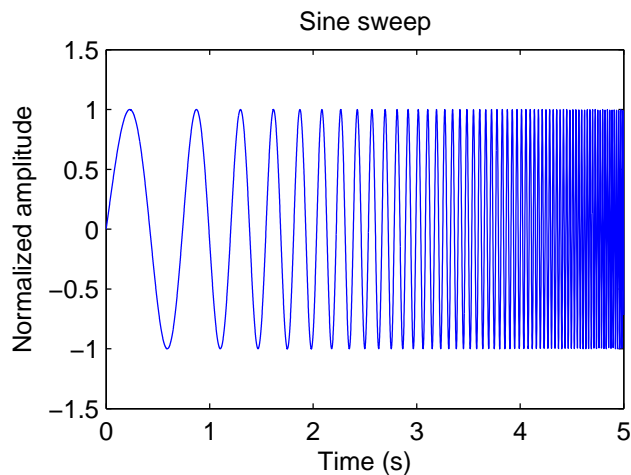


FIGURE 2.2 – Exemple de sinus glissant sur une durée de 5 secondes.

Une étude plus récente de Farina [Farina, 2007] dresse un bilan de la méthode du sinus glissant et mentionne quelques inconvénients comme la présence éventuelle d'un pré-écho dans la réponse impulsionnelle mesurée. Ce phénomène est en partie lié aux limites de la bande fréquentielle du signal ainsi qu'aux enveloppes de début et de fin qui peuvent présenter des discontinuités induisant des oscillations indésirables dans le signal déconvolué. Un moyen de remédier à ce défaut, selon l'auteur, est d'étendre la bande fréquentielle jusqu'à la fréquence de Nyquist (la moitié de la fréquence d'échantillonnage) ce qui permet d'annuler l'influence de l'enveloppe de fin de signal, essentiellement responsable de l'apparition des oscillations. Une autre raison est liée au matériel analogique utilisé pour les mesures qui peut présenter des perturbations aux basses fréquences. L'auteur recommande alors d'utiliser un filtre inverse généré à partir de la réponse impulsionnelle de la chaîne d'acquisition, selon la méthode de Kirkeby [Kirkeby et al., 1998]. Cette opération peut être vue comme une égalisation de l'équipement de mesure afin d'obtenir la fonction de transfert de la salle la plus fidèle possible.

2.1.4 Bilan

Une étude comparative de Stan et al. [Stan et al., 2002] établit des différences entre diverses méthodes de mesure, notamment celles de la MLS et du sinus glissant. Il apparaît que la méthode MLS est moins sensible aux bruits (blanc, impulsif ou autre) que celle du sinus glissant, ce qui permet des mesures en présence de public. Par ailleurs, la méthode du sinus glissant permet d'obtenir le rapport signal sur bruit le plus important. De plus, elle sépare nettement la réponse linéaire des distorsions harmoniques, au contraire de la méthode MLS qui est très sensible aux non-linéarités du système mesuré. Ainsi la méthode du sinus glissant est indiquée comme la plus appropriée dans un lieu inoccupé et silencieux.

En ce qui concerne les sources impulsionnelles, qui sont jugées moins efficaces que les méthodes décrites ci-dessus, le pistolet d'alarme donne de meilleurs résultats que le matériel plus léger que sont les ballons et claps. Cependant ces derniers sont moins contraignants et permettent d'effectuer des mesures à moindres frais. Par ailleurs, les haut-parleurs permettent d'utiliser un

signal d'excitation filtré (MLS, sinus glissant) et d'obtenir, par exemple, un spectre plus plat, ce qui autorise la réalisation de mesures calibrées en excitant les différentes bandes de fréquence avec la même intensité.

Dans une maquette acoustique, il est possible d'utiliser un pistolet d'alarme à échelle réduite. Le niveau sonore étant trop important pour les microphones utilisés au cours du présent travail, cette piste a été abandonnée. Une alternative existe : la source à étincelle qui monte haut en fréquence, au-delà de 100 kHz, mais dont le niveau sonore est faible et nécessite une moyenne sur de nombreuses prises, donc un temps de mesure long, pour atteindre un rapport signal sur bruit suffisant et obtenir des mesures exploitables. Ce paramètre est d'autant plus importante dans des volumes couplés où il est nécessaire d'identifier des taux de décroissance de réverbération tardive à des niveaux significativement inférieurs à celui du son direct. Le choix s'est donc tourné, pour la présente étude, vers un système de source sonore comprenant des haut-parleurs et basé sur la méthode du sinus glissant.

Notons que cette Section traite de sources dites omnidirectionnelles bien que l'équipe de San Martin [San Martin et al., 2007] ait mesuré des variations supérieures au seuil de perception de plusieurs indices acoustiques selon l'orientation d'une source sonore de type dodécaèdre, comprenant douze haut-parleurs. L'utilisation de dodécaèdres pour l'excitation acoustique d'une salle n'est donc pas idéale et la notion de source omnidirectionnelle doit être considérée avec précaution. D'autre part, certaines études récentes utilisent des sources non localisées et à directivité contrôlée comme un orchestre de haut-parleurs [Pätynen et al., 2008b; Lokki, 2013] qui simule la présence de divers instruments sur scène. En plus de cette source sonore étendue sur scène, les réponses impulsionnelles sont enregistrées par un récepteur permettant de déterminer la direction d'incidence de l'énergie acoustique. Un tel système de mesure est donc radicalement différent des sources et récepteurs omnidirectionnels classiques et change considérablement l'approche de la mesure acoustique dans une salle. Une discussion des conséquences de l'utilisation d'un tel système est au-delà des objectifs du présent travail de thèse qui se concentre sur les problématiques liées aux volumes couplés en utilisant une méthode de mesure classique dont les avantages et inconvénients sont connus.

2.2 Analyses de réponses impulsionnelles

Cette section traite de l'analyse des réponses impulsionnelles dans le cas particulier des réponses de salles couplées. Pour ce faire, elle reproduit l'article intitulé *Coupled volume multi-slope room impulse responses : a quantitative analysis method*, paru à l'occasion de la conférence 8th *International Conference on Auditorium Acoustics*¹. Le résumé en anglais, soumis au comité de la conférence pour acceptation et ne faisant pas partie de la publication officielle, est ajouté avant l'article.

Tout d'abord, en accord avec certaines études précédentes [Xiang and Goggans, 2001; Ermann and Johnson, 2005; Bradley and Wang, 2005], nous avons constaté que les indices acoustiques classiques ne donnent pas accès à des informations pertinentes lorsqu'ils sont appliqués aux réponses impulsionnelles de salles couplées qui présentent plusieurs pentes. De nouveaux indices acoustiques adaptés sont alors définis. Une revue de littérature énonce différentes manières d'analyser ces signaux. Une description de l'algorithme proposé est ensuite donnée, suivie d'une comparaison avec une méthode déjà publiée [Xiang and Goggans, 2001], basée sur l'analyse de trois réponses impulsionnelles dont deux artificielles et une mesurée dans une salle de concert à volumes couplés. Cette nouvelle méthode calculant les indices acoustiques à partir de différents types de courbes de décroissance de l'énergie dans les salles, les résultats obtenus à partir de ces différentes courbes sont présentés et comparés.

Notons qu'une méthode alternative de détection d'indices acoustiques a été développée [Grillon, 1995] dans le cas de courbes de décroissance à deux pentes. Elle considère la partie médiane d'une courbe de décroissance, après 200 ms et avant un point de la courbe situé 10 dB au-dessus du niveau du dernier point de cette courbe, supposé représenter le niveau de bruit de fond. Une régression linéaire de cette portion de courbe de décroissance est ensuite soustraite à la portion elle-même, de sorte qu'une courbe composée de deux segments de droite coupant chacun l'axe temporel est obtenue. Une analyse fréquentielle permet d'obtenir les pentes de ces parties rectilignes, la première négative, la seconde positive, confirmant ainsi la présence de deux pentes distinctes au sein de la courbe de décroissance. Le point de courbure est déterminé en utilisant une régression linéaire sur la première partie droite de la portion de courbe de décroissance. L'écart-type associé à cette régression linéaire permet de localiser la divergence de la courbe vers sa deuxième linéarité. Le point de courbure est alors localisé en première approximation au point où la distance entre la régression linéaire et la courbe de décroissance est égale à l'écart-type. Répéter l'opération sur l'autre partie de la courbe de décroissance permet d'estimer le point de courbure comme le point de la décroissance le plus proche du point d'intersection des deux régressions linéaires. Notons enfin que cette méthode fonctionne avec une courbe de décroissance suffisamment lisse et trouve une limite lorsque la courbe de décroissance analysée présente une irrégularité trop importante. De plus l'élimination des 200 premières millisecondes peut paraître arbitraire et mener à manquer des informations utiles. Par ailleurs, la méthode de détection du bruit de fond appliquée systématiquement suppose que la réponse impulsionnelle

1. Luizard, P.; Katz, B.F.G. "Coupled volume multi-slope room impulse responses : a quantitative analysis method", Proc. Institute of Acoustics, 8th International Conference on Auditorium Acoustics, Dublin, 20-22 May, 2011. Vol. 33. Pt.2, pp. 169-176.

est suffisamment longue pour faire apparaître ce bruit de fond et que la courbe de décroissance est assez lisse pour pouvoir ne considérer que le dernier point de cette dernière.

2.2.1 Méthode “Marching Line”

Abstract

Over several decades acousticians have been exploring the use of coupled volumes as a means to offer variability to a room’s acoustics which exceed the possibilities of simple curtains and moving reflectors. The use of a coupling volume, connected to the primary spectator volume, can provide a non-linear decay, allowing for a degree of independence in the adjustment of clarity and reverberance, depending primarily on the variation of coupling area. This passive architectural-acoustic system can be seen in so-called “reverberation chambers”, but also in the exploitation of stage house volumes and movable ceiling designs. This acoustical phenomenon can also be found in more general situations, under certain conditions, providing multi-slope decays of acoustic energy. Quantification of double-slope/multi-slope decays has not been standardized, and different methods are found in previous studies. This study examines the suitability of some of the most often cited methods and highlights some problematic issues that are not present when analyzing single slope decays. A method is proposed which estimates the equivalent reverberation time for each slope as well as important elements of the decay curve, such as the bending points, while requiring few user input parameters. The method does not require an a priori knowledge of the number of decays, while an optimized version for double-slope decays has been developed.

COUPLED VOLUME MULTI-SLOPE ROOM IMPULSE RESPONSES: A QUANTITATIVE ANALYSIS METHOD

P Luizard LIMSI-CNRS, BP 133, 91403 Orsay, France, email: paul.luizard@limsi.fr
 LAM team of Institut Jean Le Rond D'Alembert, UPMC, Paris, France
 BFG Katz LIMSI-CNRS, BP 133, 91403 Orsay, France, email: brian.katz@limsi.fr

1 INTRODUCTION

Several places, for example theaters, auditoria or even churches, present an interesting acoustic feature: a non-linear sound decay (Fig.1). This phenomenon is provided under specific conditions by various architectural volumes, which are acoustically linked to each other. Acousticians have been interested in understanding the relationship of acoustic fields in these volumes, and their interactions. Knowledge on these phenomena has led architects and acousticians to design concert halls based on the coupled volume principle in last decades¹, with more or less success. The concert halls built in Lucerne, Switzerland² and more recently in Suzhou, China³ and soon in Paris, France⁴ are relevant examples. Therefore precise analysis of sound energy decay in such places is necessary. Moreover standardization of an analysis method still does not clearly exist for non-linear sound energy decays⁵. Furthermore a fine knowledge of the sound energy decay is necessary to estimate the influence of variations of reverberation on the perception of a listener in such places⁶. While analytical models⁷⁻¹⁰, that describe non-linear decays for step or impulse response, provide smooth decay curves, the ones from measurements or numerical simulations are generally more jagged than the latter, and hence more difficult to analyze. An accurate analysis method has to be robust in order to point out the relevant characteristics, despite the fluctuations of decay curves. This paper will first present sound decay models and different analysis methods developed in recent years, based on two different principles. Then a new method for estimating non-linear decay characteristics is proposed. Finally some problematic issues will be raised concerning the use of Schroeder backward integration¹¹ for non-linear decays.

2 PREVIOUS RESEARCH

Analytical models of sound energy decay in coupled rooms have been proposed^{9,10}, assuming diffuse sound field hypothesis. These models can be used to predict the behavior of sound fields in halls, but also to develop relevant tools for analyzing multi-slope decay curves. Among the methods used to quantify relevant non-linear decay curve parameters, two main procedures exist. On the one hand a direct method is used, combining calculations of equivalent reverberation times^{12,13}, and proposing several parameters to describe non-linear decays. This approach allows working with sound decays containing a maximum of two slopes. On the other hand a model-based method is used, which minimizes the error between a decay function estimation and the Schroeder integration function¹⁴. Relevant parameters are then extracted from the selected model of sound decay which allows more than two slopes¹⁵⁻¹⁷.

2.1 Multi-slope decay models

Considering the case of N volumes – the sound source and receiver being placed in the same one – connected by apertures S_{ij} , an analytical model of sound energy decay in each room has been proposed⁹, assuming diffuse sound field hypothesis.

$$E_i(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij} e^{-2\delta_j t} \quad (1)$$

where constants a_{ij} are the initial values of energy decay in each room and δ_j are the equivalent decay rates of sound pressure in each room, linked to others. This estimation of energy decay provides, under specific conditions, a bent decay curve which presents straight portions and can be

described by relevant parameters: T_j the equivalent reverberation times of the slopes, and the bending points coordinates (MS_{ij} ; MS_{Lj}) in time and decay level (Fig.1). A few years later, a more detailed analytical model of sound energy decay in the particular case of two coupled rooms has been proposed¹⁰. Considering two volumes – V_1 containing the sound source and receiver, and V_2 termed reverberation chamber – connected by an aperture S_{12} , assuming once again diffuse sound field hypothesis in each volume, a statistical estimation of sound energy is given as follows.

$$\begin{cases} E_I(t) = E_{I1}e^{-2\delta_1 t} + E_{I2}e^{-2\delta_{II} t} \\ E_{II}(t) = E_{II1}e^{-2\delta_1 t} + E_{II2}e^{-2\delta_{II} t} \end{cases} \quad (2) \quad \text{where} \quad \begin{cases} \delta_{I,II} = \frac{1}{2}(\delta_1 + \delta_2) \mp \sqrt{\frac{1}{4}(\delta_1 + \delta_2)^2 - (1 - \kappa^2)\delta_1\delta_2} \\ \kappa^2 = \frac{S_{12}^2}{(A_1 + S_{12})(A_2 + S_{12})} \end{cases} \quad (3)$$

with constants E_{ij} , whose analytical form can be expressed, are the initial values of energy decay in each room and κ the coupling constant. The natural decay rates of sound pressure in each room, without coupling, depend on architectural parameters: V_i , S_{12} , A_i the equivalent absorption area and c the speed of sound, such that $\delta_i = c(A_i + S_{12})/(8V_i)$. The corresponding reverberation times are $T_{1,2} = 6.9/\delta_{1,2}$. When the rooms are coupled, the decay rates become $\delta_{I,II}$ (eq.3). This estimation of energy decay can provide, in the less reverberant volume, a bent decay curve (Fig.1, Table 1) which can be described by four relevant parameters: T_{early} and T_{late} the equivalent reverberation times of the slopes, and the bending point coordinates (DS_t ; DS_L) in time and decay level.

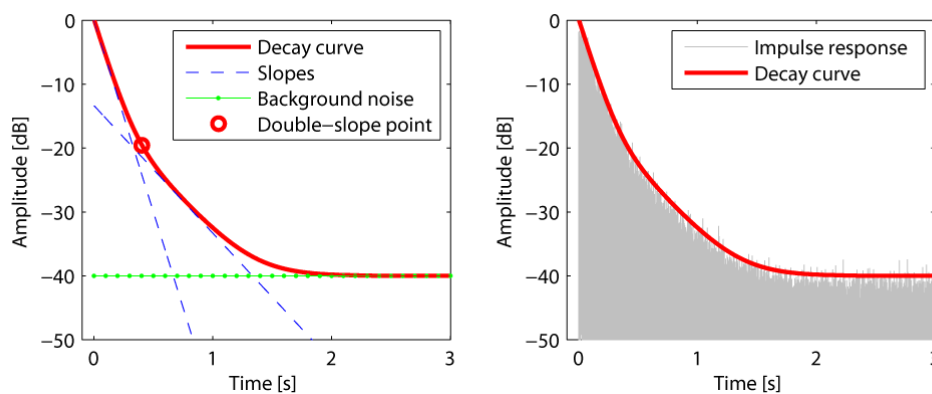


Fig.1 Double-slope decay curve (left); impulse response in dB scale (right)

2.2 Analysis methods based on classical parameters

In the last decade, a number of studies have proposed to quantify double-slope sound decays with decay time ratios. For example¹² T_{30}/T_{15} and T_{60}/T_{15} have been used as metrics to quantify the degree of curvature between the early and late parts of double-slope sound decay. Both T_{30}/T_{15} and T_{60}/T_{15} provide the same kind of information, with the latter requiring a significant signal-to-noise ratio (SNR) of at least 65 dB, which is not always easy to obtain in real measurement conditions. These quantifiers give a general indication of the curvature of the decay curve, but are not able to uniquely characterize a decay curve. Furthermore there is no indication concerning the number of slopes in the decay. Note that ISO 3382-2 (2008), in annex B, suggests using T_{30}/T_{20} to quantify the degree of curvature of decay curves as the percentage of deviation from a perfectly straight line. This recommendation is proposed as an informative point, in the annex of the standard⁵, and is not meant as a means of evaluating the decay curve, but only as an indication of deviation from linearity. Nevertheless, following this same idea, a previous study¹³ proposed the ratio LDT/EDT with EDT (Early Decay Time) being the equivalent 60 dB decay time calculated by a least squares fit to the portion of the decay curve between 0 and -10 dB⁵, and LDT (Late Decay Time) being similarly estimated between -25 and -35 dB. In contrast to T_{30}/T_{15} , LDT/EDT does not use overlapping decay regions. As such, the value of the latter will be higher for a given decay curve, which allows detecting smaller differences between the early and late parts of decays. However, the main weakness of LDT/EDT is the fact that the sound decay ranges used are fixed. If the bending point lies e.g. between -25 and -35 dB, estimation of LDT will be erroneous. Moreover,

as other parameter ratios, this quantifier is not able to detect more than two slopes within the sound decay.

2.3 Model-based methods

An alternative method has been proposed in a previous study based on least squares principle to quantify relevant non-linear decay curve characteristics¹⁴. This method has been subsequently developed as an analysis method using a Bayesian probabilistic framework¹⁵⁻¹⁷, allowing access to the relevant decay curve parameters and the number of slopes within the sound decay. Both methods are based on an analytical model of sound decay, containing several parameters which determine a unique decay curve.

$$F(\mathbf{A}, \mathbf{B}, t_k) = \sum_{j=1}^m A_j G_j(B_j, t_k), \quad 0 \leq t_k \leq L \quad \text{where } G_j(B_j, t_k) = \begin{cases} \exp(-B_j t_k), & j = 1, \dots, m-1 \\ L-t_k, & j = m \end{cases} \quad (4)$$

The first $(m-1)$ terms of G_j correspond to the different slopes within the decay curve. The term $(L-t_k)$ stands for the constant background noise. A collection of parameters is tested to approach the decay curve considered. Those parameters are set to minimize the error between so-called decay function estimation and Schroeder integration function. To do so, the first study mentioned uses the least squares method while the second one performs Bayesian analysis¹⁵⁻¹⁷. The relevant parameters are then extracted from the selected model. The latter approach has the important advantage that both the number of slopes and the value of decay time of each individual slope can be cohesively estimated within one inference framework. A drawback of this Bayesian parameter estimation is its complexity, which makes this method not easy to implement.

3 “MARCHING LINE” METHOD

Theoretically, a multi-slope decay function is composed of different damped exponentials⁹ and a constant background noise. To describe a multi-slope decay curve, one needs to know several relevant parameters: the decay rates of the different straight portions and the coordinates (time; level) of the bending points. The method proposed here is based on a direct comparison between the decay curve and linear regressions. It provides the number of slopes with equivalent reverberation times, and the coordinates of bending points between two consecutive slopes. The input decay curve can be calculated by different manners, as discussed in section 4.

3.1 Starting point

Taken a measured or simulated impulse response, a first estimation of starting point of associated decay curve corresponds to the maximum of the squared impulse response. A backward integration curve is then calculated and normalized to 0 dB. To avoid errors due to strong early reflections whose amplitude might be superior to direct sound, refinement is performed by catching the last point of this curve superior to -0.1 dB, defining the starting point of decay curves.

3.2 Adjustable values

Some options are available to make the linear regressions closer to the decay curve and thus the results more accurate. The following adjustable values are part of the algorithm as the input options.

L_{Begin} : decay level to start the analysis. Default = -5 dB.

L_{End} : decay level to stop the analysis. Default is 10 dB over the background noise level.

$L_{BetweenSlopes}$: decay level between the end of a linear regression and the beginning of the next one, in order to avoid curved part of the decay around a bending point. Default = 10 dB.

L_{Step} : decay level between each iteration to evaluate a larger linear regression. Default = 1 dB.

L_{DevMax} : RMS deviation maximum threshold between decay curve and linear regression.

3.3 Stepwise linear regressions

To estimate equivalent reverberation times of linear portions of the decay curve, linear regressions are performed. Since reverberation time estimation requires a decay of at least 10 dB, the first

linear regression is calculated for points between L_{Begin} and $(L_{Begin} - 10 \text{ dB})$. RMS deviation between the decay curve and the regression is calculated and if this value is inferior to L_{DevMax} , a new iteration begins with the lower limit $(L_{Begin} - 10 \text{ dB} - L_{Step})$. If D is the decay curve and LR is the last linear regression calculated between t_u and t_l , the upper and lower limits respectively, the RMS deviation is calculated as follows.

$$RMS_{dev} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=t_u}^{t_l} [LR(t) - D(t)]^2} \quad \text{Where } N \text{ is the number of points between } t_u \text{ and } t_l. \quad (5)$$

If the decay curve presents at least two different slopes, the RMS deviation will strongly increase around the bending area. Iterations are stopped when the RMS deviation value is superior to L_{DevMax} . An equivalent T_{60} is estimated using the last linear regression. Next slope is then searched in the same manner, starting from the decay curve point corresponding to $(D(t_l) - L_{BetweenSlopes} \text{ dB})$.

3.4 Bending points coordinates estimation

As soon as two consecutive linear regressions are obtained, one can calculate their intersection point M_i , whose coordinates are (t_i, L_i) . The corresponding i^{th} bending point is assumed to be the nearest point from M_i within the decay curve. Distance between M_i and each point of the decay curve is then calculated, as follows.

$$dist(j) = \sqrt{(t_j - t_i)^2 + (D(t_j) - L_i)^2} \quad (6)$$

The so-called bending point is the point within the decay curve corresponding to the minimum of vector $dist$. Since two consecutive linear regressions are needed to estimate a bending point, if m slopes are detected, $(m-1)$ bending points will be found.

3.5 Optimized algorithm version

If the user knows that only two slopes are present within the decay curve, e.g. in case of two volumes with homogeneously distributed absorbent material, a specific algorithm can be performed. The first slope is detected as previously explained. To detect the second one, linear regressions are calculated from the end of decay curve, i.e. the point corresponding to L_{End} . The upper limit for those regressions is set at $(L_{End} + 10 \text{ dB})$ and is stepwise incremented with L_{Step} for the upper limit, until the RMS deviation is superior to L_{DevMax} . This algorithm version assumes that the decay curve presents only two slopes and requires a precise estimation of the background noise level to correctly set L_{End} , but it avoids the need for setting $L_{BetweenSlopes}$, which makes parameters estimation more precise.

4 BACKWARD INTEGRATION OR ENVELOPE

The accepted analysis method for energy decays is the backward integration of squared impulse response¹¹. While this robust method produces a decay curve equivalent to averaging an infinite number of trials, its dependency to the upper limit of integration can lead to a significant drawback when considering multi-slope decays. An important point is that this method provides a decay curve corresponding to a step response of the room, since the impulse response is integrated. Analytical models allow comparisons between decay curves corresponding to step and impulse responses. As a result, the bending point is found to be translated upwards along the first slope.

4.1 Backward integration of multi-slope decay

The backward integration of squared impulse response proposed by Schroeder is defined for the time range $[t; \infty]$. Assuming f the impulse response recorded at a receiving point, the ensemble average of the squared sound decay is obtained as follows.

$$\langle s^2(t) \rangle = \int_t^{\infty} [f(x)]^2 dx \quad (7)$$

When using this method, upper limit of integration becomes a finite value t_{max} . This limit has to be chosen carefully because if t_{max} is too large, the background noise will corrupt the decay curve by overestimating energy level, and if t_{max} is too small, information is lost and the SNR is reduced. In

single-slope case, a slightly too large value of t_{max} is acceptable because the decay rate of the curve is not changed. Concerning multi-slope case, different values of parameters can be found, as mentioned in previous studies^{14,15}, depending on the upper limit of integration and the SNR, which provides an ambiguous decay rate for the late slopes (Fig.3, left; table 1). Therefore using backward integration can lead to uncertain results in specific cases.

4.2 Envelope approach

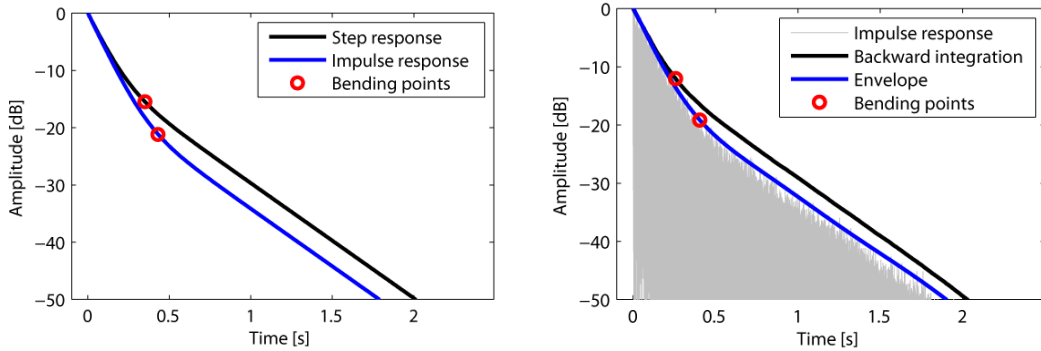


Fig.2 Theoretical step & impulse response decay curves from Cremer's model (left); Simulated impulse response in dB scale, analyzed by backward integration & envelope (right)

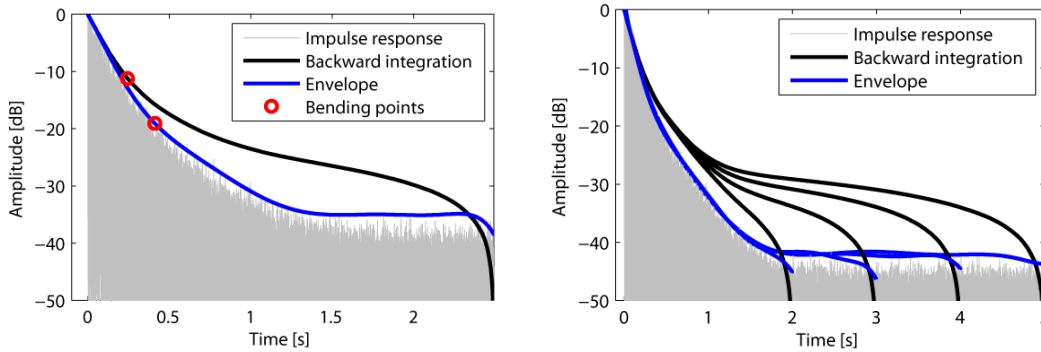


Fig.3 Simulated IR with low SNR, analyzed by backward integration & envelope (left); Backward integrated and envelope decay curves for 4 upper time limits (right)

		T_{early} (s)	T_{late} (s)	DS_t (ms)	DS_L (dB)
Fig.1	Step	1.00	3.00	417	-20.0
	Impulse	1.12	2.97	340	-15.2
Fig.2 left	BIC	1.16	3.07	324	-12.1
	Env	1.18	3.13	455	-19.5
Fig.3 left	BIC	1.22	3.18	318	-11.1
	Env	1.19	3.11	460	-20.1

		T_{early} (s)	T_{late} (s)	DS_t (ms)	DS_L (dB)
Fig.3 right	BIC (tmax=2)	1.25	3.16	316	-13.7
	Env (tmax=2)	1.20	3.10	428	-19.9
	BIC (tmax=3)	1.26	3.36	333	-14.2
	Env (tmax=3)	1.19	3.04	416	-19.6
	BIC (tmax=4)	1.26	3.72	352	-14.7
	Env (tmax=4)	1.16	3.03	405	-18.8
	BIC (tmax=5)	1.26	4.03	367	-15.0
	Env (tmax=5)	1.18	3.06	413	-19.4

Table 1 Analysis parameters values for Fig.1, 2 & 3

An alternate approach to obtain a decay curve is using the envelope of the impulse response, which provides a different decay curve from the backward integration method. On the one hand, the level of bending points is lower than found with backward integration method, corresponding to the difference between step and impulse response cases¹⁰ (Fig.2; table 1), which are analytically linked by a derivative relationship. On the other hand, the obtained decay curve appears to be much less affected by residual background noise length at the end of the impulse response as compared to the integration method (Fig.3, right), which provides an increased SNR for analysis (Fig.3, left). This approach has been implemented in two steps. First a direct envelope is calculated, in the same

manner as a backward integration: starting from the end of impulse response, the algorithm comes back to the beginning, step by step, keeping the highest level between a point and the next one. As a result, a decreasing curve is obtained. To smooth this curve, a polynomial interpolation is calculated, with sufficiently high order, e.g. 10, to correctly fit the latter. This method tends to avoid problems during analysis due to fluctuations in measured impulse responses, by replacing a jagged curve by a much smoother decay curve.

The alternative to the backward integrated curve (BIC) proposed here is then a smooth decreasing curve, whose SNR is weekly dependent on background noise (Fig.3), which is helpful in problematic cases of low SNR or truncated IR where RT estimations can be erroneous^{14,15}. In the context of multi-slope decay curves, even more than in single-slope cases, RT estimations are needed over classically defined parameters and thus larger SNR are required. The main drawback of this room impulse response treatment is that the decay curve obtained does not stand for an ensemble average, as would be a backward integrated curve. Hence a compromise is pointed out between the ability to accurately detect the background noise level when SNR is low and to get numerous impulse responses, in order to allow estimating relevant, precise decay curve parameters. Furthermore one should raise the question of the pertinence of these methods relative to human sound perception. In a musical context it has been shown that the late reverberation time ("stop chord" response) is associated with perceptions of reverberance while the early decay time is more associated with the sense of "running reverberation". In the context of multi-slope decays, the problem is compounded. The transition points, and their definition, must be addressed.

5 EXPERIMENTAL RESULTS

Three different IRs (Table 2, Fig.4) have been analyzed, using both the model-based method and the new Marching Line method. Two of them have been synthesized and one has been measured in a real concert hall with reverberation chambers. Results from both methods are compared, as well as results from the new method, using backward integration and the envelope approach (Table 3). The latter uses first the general algorithm without an a priori knowledge of the number of slopes within the decay curve. If two slopes are detected, the optimized algorithm is used to obtain more accurate results.

		T_{early} (s)	T_{late} (s)	DSL (dB)	Noise Level (dB)
Synthesis parameters	IR1	2.00	5.00	-29.0	-60
	IR2	1.00	3.00	-19.5	-35

Table 2 Synthesis parameters values for IR 1 & 2

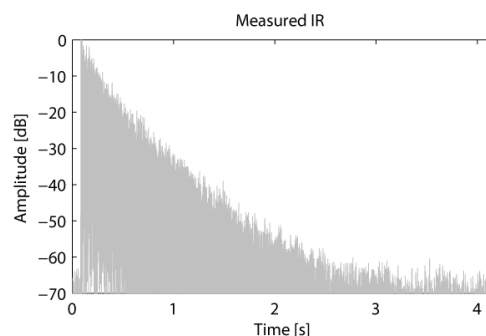


Fig.4 IR3 measured in a concert hall with reverberation chambers

5.1 Synthesized impulse responses

The synthesized IRs are produced by applying a designed decay curve onto white noise, according to synthesis parameters (Table 2). The first IR presents a 60 dB SNR, with two distinct slopes. The second IR is built in the same manner, with a much lower SNR, so that the second slope is ambiguously melt with background noise.

Results (Table 3) show a strong similarity for IR1, especially in estimation of T_{early} and T_{late} by model-based method and by new method with envelope approach. IR2 analysis provides more scattered values, particularly for T_{late} , which underlines difficulty of accurately estimating a second-slope reverberation time when SNR is weak. The relative difference is calculated between

controlled synthesis parameters and corresponding analysis parameters estimated with both methods. Low differences are obtained by new Marching Line method with envelope approach, as well as model-based method, except for the second RT of *IR2*, which has very low SNR. New method has less accurate results when analyzing BIC: relative differences are up to 15%. Analysis of synthesized IRs show that the new method is more accurate when used with the envelope approach than backward integrated curve. Model-based method is very precise but can be sensitive to SNR since using BIC. Hence its estimation of T_{early} is accurate but T_{late} can be misestimated because of high background noise level.

		T_{early} (s)	T_{late} (s)	DS_t (ms)	DS_L (dB)
IR 1	Bayesian	2.01	5.02	817	-21.2
	ML (BIC)	2.11	4.92	861	-22.1
	ML (Env)	2.01	4.95	988	-27.1
IR 2	Bayesian	1.00	2.54	206	-9.7
	ML (BIC)	1.16	3.18	225	-10.3
	ML (Env)	1.01	2.9	343	-19.5

Table 3 Analysis parameters from Bayesian analysis & Marching Line (ML) methods

5.2 Measured impulse response

The measured IR (Fig.4). has been recorded in a real concert hall with reverberation chamber. One can note that the slope is not the same at the top and bottom of *IR3*. The difficulty is estimating the point where the transition happens. Results for the different methods are provided in Table 4. Model-based method found three slopes within the corresponding decay curve, with the final bending point appearing at -45 dB in an IR with a background noise level of -60 dB, or -50 dB for BIC on which the calculation is performed, which may be questionable due to noise corruption. The Marching line method offers different results depending on the parameter details, however, characteristics of the two first slopes are quite similar between methods, with RT values in the same range for the model-based method and the new method with envelope approach. These results are less homogeneous than those of synthesized IRs, maybe because the measured IR is more jagged. Moreover the difference between the initial and final decay rates is weaker in this example than in synthesized IRs, which makes the analysis more difficult.

An idea of sensibility of the Marching Line method can be estimated by varying input main parameter L_{DevMax} and compare output results. Small variations can lead to small changes when applied to a regular, simple IR like *IR1*. Nevertheless analysis of ambiguous *IR3* leads to important changes (Table 4) since 2 to 4 slopes are found for small variations of input parameter. This shows the dependence of the method on the nature of IR. This raises the question of a threshold to determine several slopes within a decay curve. A further study could try to propose a perceptual criterion which would give a suitable number of slopes, e.g. based on "just noticeable difference" applied to coupled volume reverberations.

	T 1 (s)	T 2 (s)	DS_1 (ms)	$DS_L 1$ (dB)	T 3 (s)	DS_2 (ms)	$DS_L 2$ (dB)	T 4 (s)	DS_3 (ms)	$DS_L 3$ (dB)
Bayesian	1.19	2.63	258	-10.9	4.82	1857	-44.61			
L_{DevMax} (dB)										
0.04	1.21	2.10	286	-12.9	2.65	898	-30.7	3.23	1360	-41.4
0.05	1.23	2.17	306	-13.7	3.00	1080	-35.1			
0.09	1.26	2.27	345	-15.0						

Table 4 Analysis parameters from Marching Line method with envelope approach & Bayesian method on measured *IR3*

6 CONCLUSION

Among the coupled volume acoustic issues, analysis accuracy has an important place. A quantitative approach is necessary and thus quantifiers which exactly describe a multi-slope decay curve are required. This study proposes to use equivalent reverberation time of each straight portion of energy decay curve and the bending points coordinates, dynamically estimated, contrary to fixed parameters previously used with multi-slope curves. Before using quantifiers, one has to

choose a means to obtain a relevant decay curve. The backward integration of the squared impulse response is commonly used, but can present major drawbacks in certain cases such as with low SNR. Furthermore the choice of upper time limit of integration can influence the quantifier values. Therefore an envelope approach is proposed, which yields larger SNR with smoothed decay curves and a lower dependence on upper time limit truncation. Comparison of model-based Bayesian analysis method and the new Marching Line method made on three different impulse responses has shown a general similarity, decreasing for ambiguous cases of low SNR and low RT differences. Further discussions can be conducted on the limiting decay level for estimating a slope different from the background noise, as well as criterion to limit the number of slopes within decay curves.

7 ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Dr. Ning Xiang for his support in providing the Bayesian analysis results for this study.

8 REFERENCES

1. R. Johnson, E. Kahle, R.ESSERT, Variable coupled cubage for music performance, MCHA95. Japan. (1995).
2. E. Kahle, R. Johnson, B.F.G. Katz, The new konzertsaal of the KKL Center, Lucerne, Switzerland. II Preliminary acoustical measurements, *Acta Acoustica* v.85, S2. (1999).
3. B.F.G. Katz, E. Kahle, Design of the new Opera House of the Suzhou Science & Arts Cultural Center, Proc. 9th Western Pacific Acoustics Conference (WESPAC), Korea. (2006)
4. E.Kahle, Y. Jurkiewicz, N. Faille, T. Wulfrank, B.F.G. Katz, La philharmonie de Paris concert hall competition, Part 2, Proc. intl. Symp. on Room Acoustics (ISRA), Spain. (2007).
5. ISO 3382-2:2008 (E), Measurement of room acoustic parameters, Part 2, (2008).
6. I. Frissen, B. F.G. Katz, C. Guastavino, Perception of reverberation in large single and coupled volume, Proc. of the 15th Intl. Conf. on Auditory Display, Denmark. (2009).
7. H. A. Davis, Reverberation equations for two adjacent rooms connected by an incompletely soundproof partition, *Philos. Mag.* 50, 75–80. (1925).
8. C. F. Eyring, Reverberation time measurements in coupled rooms, *J. Acoust. Soc. Am.* 3, 181–206. (1931).
9. H. Kuttruff, *Room Acoustics*, 5th ed Spon Press (1st ed 1973), 154–159. (2009).
10. L. Cremer, H. A. Muller, *Principles and applications of room acoustics*, Applied Science. (1978).
11. M. R. Schroeder, New method of measuring reverberation time, *J. Acoust. Soc. Am.* 37, 409–412. (1965).
12. M. Ermann, Coupled volumes: Aperture size and the double-sloped decay of concert halls, *Build. Acoust.* 12, 1–14. (2005)
13. D. T. Bradley and L. M. Wang, Optimum absorption and aperture parameters for realistic coupled volume spaces determined from computational analysis and subjective testing results, *J. Acoust. Soc. Am.* 127, 223–232. (2010).
14. N. Xiang, Evaluation of reverberation times using a nonlinear regression approach, *J. Acoust. Soc. Am.* 98, 2112–2121. (1995).
15. N. Xiang, P. M. Goggans, Evaluation of decay times in coupled spaces: Bayesian parameter estimation, *J. Acoust. Soc. Am.* 110, 1415– 1424. (2001).
16. N. Xiang, Robinson, Botts, Comment on “Optimum absorption and aperture parameters for realistic coupled volume spaces determined from computational analysis and subjective testing results”, *J. Acoust. Soc. Am.* 128, 2539–2542. (2010).
17. N. Xiang, P.M.Goggans, T.Jasa, P.Robinson, Bayesian characterization of multiple-slope sound energy decays in coupled-volume systems, *J.Acoust.Soc.Am.* 129, 741–752. (2011).

2.2.2 Bilan

Cet article montre que la méthode Marching Line proposée donne des résultats comparables à ceux de la méthode basée sur les probabilités bayésiennes. La différence majeure entre ces deux méthodes est le fait que la seconde utilise un modèle paramétrique pour calculer ses estimateurs, ce qui nécessite une connaissance *a priori* de l'ordre de grandeur de ces estimateurs pour ne pas faire exploser les temps de calcul. Une étude récente sur les réponses impulsionnelles présentant des taux de décroissance multiples dans un volume simple [Green, 2013] a utilisé cette méthode pour les analyses. Cet exemple montre qu'il est difficile d'avoir une idée *a priori* sur le nombre de pentes d'une courbe de décroissance puisqu'il est possible d'obtenir des décroissances à plusieurs pentes dans une salle à volume unique, principalement à cause de la distribution de l'absorption dans la salle. Ainsi il est nécessaire de faire varier le nombre de pentes du modèle de décroissance de la méthode bayésienne pour obtenir le résultat le plus proche de la courbe analysée. Ainsi Marching Line possède l'avantage de pouvoir fonctionner sans connaissance préalable du système analysé. Par contre, l'utilisation des deux méthodes après la publication de cet article a révélé que la méthode Bayésienne est plus stable, notamment pour l'analyse de réponses impulsionnelles bruitées dont la courbe de décroissance énergétique est particulièrement irrégulière. Chaque méthode comporte donc des qualités et des défauts, de sorte que l'analyse la plus performante en termes de rapidité et de précision consisterait en une première approche avec Marching Line, donnant des valeurs pertinentes pour initialiser les paramètres du modèle de décroissance permettant une analyse plus fine dans un second temps avec la méthode de "Bayesian parameter estimation". La méthode Marching Line a été utilisée dans plusieurs études présentées dans ce manuscrit de thèse, notamment pour l'analyse de séries de réponses impulsionnelles similaires. Dans ce cas particulier où de nombreux récepteurs étaient alignés et proches les uns des autres, le réglage des paramètres d'entrée a été automatisé après calibrage à partir de l'analyse manuelle de la première réponse impulsionnelle de la série afin de pouvoir traiter l'ensemble des réponses impulsionnelles rapidement. Par exemple, le paramètre définissant le niveau de départ de l'algorithme devait être adapté au niveau du son direct qui variait fortement selon la position du récepteur dans la salle. De même, l'irrégularité des courbes de décroissance variant selon la bande fréquentielle considérée, le paramètre de seuil d'écart *rms* entre la portion de décroissance et la régression linéaire correspondante doit être adapté en conséquence. De manière générale, cette méthode est fiable et fonctionne correctement comme le montre la comparaison présentée dans cet article.

Par ailleurs, une remarque a été formulée par David Griesinger à la suite de la présentation orale donnée pendant la conférence, insistant sur la comparaison entre les différentes courbes de décroissance possibles. Selon lui, la courbe enveloppe de la réponse impulsionnelle n'est pas utilisable car elle n'a pas subi d'intégration temporelle sur une certaine durée, comme le fait l'oreille humaine. La courbe dite de Schroeder [Schroeder, 1965] est intégrée dans le temps, même si la durée d'intégration n'est pas la même que pour l'oreille, ce qui rendrait son utilisation légitime. Ainsi la procédure proposée ne présenterait pas de lien avec la perception auditive, ce qui la rendrait non pertinente pour être utilisée en acoustique des salles. Selon les auteurs de cet article, il ne paraît pas absurde d'utiliser des procédures d'estimation qui ne soit pas

liées directement à la perception du phénomène mesuré, autrement dit à l'énergie sonore, s'il permet d'obtenir des valeurs d'indices acoustiques plus précises dans certains cas comme pour un faible rapport signal sur bruit. L'important réside dans le fait d'être capable de comprendre les grandeurs physiques mises en jeu afin de pouvoir les interpréter. Enfin les comparaisons réalisées au cours des expériences présentées dans l'article montrent une certaine proximité des résultats de temps de décroissance précoce et tardif pour les deux types de courbes utilisées, ainsi qu'une évolution similaire du point de double pente, dans les cas de dynamique importante.

Modélisation du champ acoustique

La modélisation du champ acoustique permet d'une part de mieux comprendre les influences de différents paramètres sur la distribution de l'énergie sonore dans l'espace, d'autre part elle donne la possibilité de prévoir le comportement des systèmes étudiés dans différentes configurations. La modélisation acoustique a été développée à différentes échelles et pour divers espaces. Dans chaque cas, selon les particularités rencontrées, les fondements théoriques différents rendent les méthodes de modélisation plus ou moins adaptées. Il est possible d'utiliser des méthodes de modélisation physiques, typiquement des maquettes à échelle réduite, représentant plus ou moins schématiquement, selon le niveau de détail nécessaire, une salle ou une rue. Ces méthodes présentent l'avantage de restituer les phénomènes physiques des champs acoustiques observables dans la réalité, au facteur d'échelle près. Par contre leur mise en œuvre peut être longue et relativement onéreuse. Une autre solution se développant depuis quelques dizaines d'années, maintenant plus largement utilisée que la modélisation physique, est la modélisation numérique. Les champs acoustiques sont représentés virtuellement selon différentes techniques afin d'estimer leurs caractéristiques. La méthode source-image est utilisée pour modéliser les réflexions spéculaires, à la façon d'un miroir, en acoustique des salles ou environnementale dans les espaces extérieurs. La modélisation acoustique des petites salles, comme les cabines de contrôle des studios d'enregistrement, est fréquemment réalisée par méthodes ondulatoires ou modales du fait des faibles dimensions des espaces considérés comparées aux longueurs d'onde mises en jeu, alors que la méthode du lancer de rayons est plus utilisée dans les grands volumes, où la densité modale est élevée. Dans ces espaces larges, il est possible d'appliquer des théories statistiques basées sur des bilans d'énergie en considérant une salle comme un système physique fermé. De plus, une équation de diffusion empruntée à la thermodynamique peut être utilisée pour décrire l'évolution spatio-temporelle de l'énergie sonore dans un grand espace fermé.

Ce Chapitre se penche sur les moyens mis en œuvre au cours de ce travail pour modéliser le champ acoustique dans des espaces couplés par différentes approches, historiquement développées pour les salles à volumes uniques, de la maquette physique à différentes méthodes numériques, en passant par l'approche analytique. Les avantages et inconvénients de chacune sont étudiés dans les différentes Sections au regard des problématiques mises en jeu et une ouverture est finalement proposée vers une méthode d'auralisation, l'équivalent auditif de la visualisation, permettant de "faire entendre" l'acoustique d'une salle à partir d'un modèle virtuel.

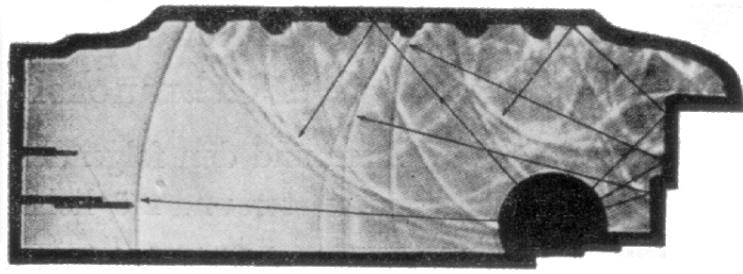


FIGURE 3.1 – Strioscopie permettant de visualiser des fronts d’onde dans une coupe longitudinale du Gewandhausaal à Leipzig en Allemagne. D’après Engl [Engl, 1939] cité dans [Rindel, 2002].

3.1 Maquette acoustique

3.1.1 Généralités

Les maquettes acoustiques ont été les premiers moyens techniques de prévoir le comportement et la propagation d’une onde dans un espace clos. L’utilisation de maquettes acoustiques capables de reproduire des conditions sonores s’approchant de la réalité est discutée pour la première fois par Lord Rayleigh [Rayleigh, 1878]. Parallèlement et même depuis plus longtemps, la cuve à onde a été utilisée. Maus [Maus, 1976] rapporte que Scott Russel, un physicien anglais, a émis la possibilité d’une analogie entre les ondes de surface de l’eau et les ondes sonores en 1844. Il s’agit d’une cuve dont la section horizontale représente une coupe du milieu de propagation étudié. Une fois la cuve remplie d’eau, il suffit de donner une impulsion localisée ou de faire vibrer la surface de manière continue pour pouvoir suivre le déplacement de l’onde de surface qui se propage et se réfléchit sur les parois de la cuve. Davis [Davis, 1925b] a ensuite utilisé le principe de la cuve à ondes avec des coupes de salles de concert en prenant des clichés afin d’observer la progression des fronts d’onde, malgré une dispersion de l’énergie qui ne correspond pas exactement à celle des ondes acoustiques.

Établissant une liste de méthodes de modélisation de l’acoustique des salles, Rindel [Rindel, 2002] mentionne une autre technique de visualisation de fronts d’onde, développée par Sabine [Sabine, 1913; 1922], basée sur la strioscopie, ou Méthode de Schlieren (*Schlieren photography* en anglais) dont une illustration se trouve à la Figure 3.1. Cette technique, utilisée principalement pour visualiser les écoulements de fluides, permet d’observer des fronts d’ondes formés par des ultra-sons dans un milieu enfumé comme le montre la Figure 3.1. Une source à étincelle est placée sur la scène (la boule noire sur l’image) et émet une impulsion qui va se propager et se réfléchir sur les parois, établissant un champ acoustique.

Plus tard, Spandöck [Spandöck, 1934] a pu mettre en pratique les considérations théoriques de Rayleigh, à mesure que les transducteurs électro-acoustiques se sont perfectionnés. Il a ainsi diffusé dans une maquette à trois dimensions un enregistrement à une vitesse augmentée correspondant au facteur d’échelle de la maquette, puis enregistré le son résultant à haute vitesse avant de le rejouer à vitesse normale. Cette opération avait pour but d’ajouter à l’enregistrement initial un effet de salle propre à la maquette. C’est en quelque sorte la version pionnière de ce

que l'on appelle aujourd'hui "auralisation".

Knudsen [Knudsen, 1970], dans son historique des modèles destinés à tester l'acoustique des salles, évoque une méthode optique développée par Leonard [Leonard, 1954], utilisant le concept de "rayon sonore" par analogie avec le rayon lumineux, permettant de définir l'orientation des premières réflexions à partir de l'angle des parois entre elles ainsi que leur courbure.

La relation essentielle des mesures à échelle réduite est celle qui met en jeu le facteur d'échelle par la loi de similarité acoustique, comme le rappellent Barron [Barron, 1983] et Polack et al. [Polack et al., 1988] et lie la longueur d'onde considérée aux dimensions de la maquette :

$$c = \frac{d}{t} = f\lambda, \quad (3.1)$$

où c est la célérité du son, constante dans un milieu de propagation donné, d la distance parcourue, t le temps de vol, nécessaire pour couvrir cette distance, f la fréquence de l'onde émise, λ la longueur d'onde correspondante. A échelle réduite d'un facteur N , les longueurs d'ondes doivent être adaptées pour que la simulation soit valide :

$$d' = \frac{d}{N} \quad \& \quad \lambda' = \frac{\lambda}{N}. \quad (3.2)$$

On obtient les relations suivantes :

$$c = \frac{d'}{t'} = f'\lambda', \quad (3.3)$$

ce qui entraîne une diminution de l'échelle temporelle et une augmentation de la gamme de fréquence utilisée.

$$t' = \frac{t}{N} \quad \& \quad f' = Nf. \quad (3.4)$$

Cette dernière relation montre qu'à petite échelle où d est réduit d'un facteur donné N , f doit augmenter d'autant car le rapport égal à c doit rester constant. Ainsi les mesures à échelle réduite sont réalisées en partie dans le domaine des ultra-sons, selon la valeur du facteur d'échelle. Par ailleurs, Barron souligne le fait que l'absorption des matériaux devient problématique pour les facteurs d'échelle élevés (autour de 1:50), donc à haute fréquence, car il n'est pas facile de trouver des matériaux qui reproduisent correctement le comportement fréquentiel d'absorption à échelle réelle. Par contre si le facteur d'échelle n'est pas trop élevé (autour de 1:10), l'absorption des parois peut être choisie de manière plus fine et pose moins de problème, d'autant plus que la plupart des parois d'un auditorium sont plutôt réfléchissantes qu'absorbantes, ce qui est plus facile à réaliser à échelle réduite.

Par ailleurs, Polack et al. [Polack et al., 1988] signalent que la célérité du son varie selon le milieu de propagation, ce qui doit être pris en considération lorsqu'un gaz (généralement de l'azote) différent de l'air est introduit dans la maquette, selon l'expression $K = c_m/c_r$ où c_m est la célérité du son dans l'air de la salle réelle et c_r est la célérité du son dans le gaz contenu dans la maquette. En effet, le principal problème des mesures à échelle réduite vient de l'absorption des hautes fréquences par l'air. Knudsen donne des valeurs d'absorption du son dans l'air mais aussi dans l'oxygène et dans l'azote selon le taux d'humidité et la température [Knudsen, 1933]. L'absorption du son dans l'air a été étudié théoriquement selon les principes de la thermodynamique. La thèse de doctorat de Nezan [Nezan, 1993] propose une expression exacte du coefficient

d'atténuation de l'air, plus complexe que l'Equation (3.5). Une autre étude [Evans et al., 1972] donne une approximation de ce coefficient, basée sur le temps de relaxation des atomes des gaz qui composent l'air. Le modèle d'absorption proposé est le suivant :

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2}{\gamma P_0 c} \left(\frac{4}{3} \eta + \frac{\gamma - 1}{C_p} \kappa + \gamma a_d D_{12} \rho \right), \quad (3.5)$$

où P_0 est la pression du gaz, f la fréquence, γ le quotient spécifique du gaz, c la célérité du son aux basses fréquences, η la viscosité du gaz, C_p la capacité thermique à pression constante, a_d une constante de diffusion moléculaire, D_{12} le coefficient de diffusion pour un mélange d'oxygène (O_2) et d'azote (N_2), ρ la densité du gaz et κ la conductivité thermique. De plus, des mesures aux hautes fréquences, entre 4 kHz et 100 kHz, ont été réalisées pour 92 combinaisons de température et d'humidité relative [Bass and Shields, 1977], ce qui a permis d'obtenir des lois empiriques applicables aux ultra-sons. Ainsi, plusieurs méthodes ont été pratiquées pour obtenir des mesures pertinentes aux hautes fréquences. L'absorption sonore étant beaucoup plus faible dans l'azote, une solution consiste à rendre la maquette imperméable à l'air extérieur et à la remplir l'azote avant chaque série de mesures. Cette procédure a été utilisée, notamment à l'université de Delft [Kosten and de Lange, 1965] aux Pays-Bas, mais s'avère particulièrement contraignante à mettre en œuvre. Notons qu'elle est également dangereuse au sens où le manque d'oxygène peut présenter un risque d'étouffement pour le personnel effectuant les mesures. Une autre possibilité pour diminuer significativement l'absorption des hautes fréquences est de réduire fortement l'humidité relative de l'air. L'étude de Polack et al. [Polack et al., 1988] a montré que l'assèchement de l'air, même jusqu'à obtention d'une humidité relative de 2%, n'est pas suffisant pour assurer efficacement une reproductibilité du système de mesure en comparaison avec les résultats à pleine échelle. La conclusion proposée est de se tourner vers une compensation numérique de l'absorption sonore en utilisant un modèle, par exemple celui proposé à l'équation (3.5). Barron [Barron and Chinoy, 1979] qui indique que la compensation numérique est la solution la plus adéquate, suggère d'utiliser une expression simplifiée de l'absorption de l'air décrite par :

$$m = (33 + 0.2\theta) f^2 10^{-12}, \quad (3.6)$$

où θ est la température en °C et f la fréquence en Hz. Cette absorption m est exprimée en m^{-1} et traduit l'amortissement de l'énergie acoustique selon la distance parcourue par l'onde, pour une humidité relative de 50%. La compensation numérique a aussi été utilisée pour des mesures sur une maquette de rue dédiée à l'étude de la propagation sonore en milieu urbain [Picaut and Simon, 2001]. D'une manière générale, c'est la méthode de compensation de l'absorption due à l'air la plus répandue. Toutefois, cette méthode n'est pas la plus appropriée pour obtenir un rapport signal sur bruit optimal, puisque la compensation fréquentielle s'applique à l'ensemble du signal enregistré, y compris au bruit de fond [Meynial et al., 1993] si ce dernier n'est pas supprimé avant d'effectuer la compensation. Les plus hautes fréquences étant rapidement amorties, la correction nécessaire est de plus en plus importante au cours du temps. Ainsi le gain appliqué occasionne une augmentation du niveau de bruit de fond au long de la réponse impulsionnelle mesurée, dans des proportions observables mais qui restent suffisamment faibles

Échelle	Fréquence (kHz)					
	0,125	0,25	0,5	1	2	4
1:1	0,125	0,25	0,5	1	2	4
1:8	1	2	4	8	16	32
1:10	1,25	2,5	5	10	20	40
1:20	2,5	5	10	20	40	80
1:50	6,3	12,5	25	50	100	200

TABLE 3.1 – Fréquences centrales des bandes d’octave selon l’échelle

pour que la réponse soit exploitable. Un moyen d’éviter cette augmentation du niveau de bruit de fond est d’appliquer la compensation numérique en utilisant une transformation continue en ondelettes [Hornikx, 2008]. Enfin, si le facteur d’échelle choisi est très important, les mesures aux hautes fréquences, par exemple au-delà de 100 kHz, nécessitent l’évacuation de l’air dans la maquette car ces fréquences seraient amorties trop rapidement et le signal reçu serait trop faible. La compensation numérique de l’absorption de l’air n’est donc valable que jusqu’à une certaine gamme de fréquences, qui dépend du rapport signal sur bruit requis pour l’exploitation des mesures.

Comme évoqué précédemment, il existe plusieurs systèmes pour modéliser une source sonore à échelle réduite. Le choix est principalement dicté par la bande de fréquence à exciter, et donc par l’échelle de la maquette. Le Tableau 3.1 donne un aperçu des fréquences centrales des bandes d’octave selon l’échelle voulue. Il apparaît que certaines échelles de réduction écartent certains types de transducteurs, tant les fréquences à exciter sont élevées.

Par exemple, Marshall a utilisé une source à étincelle pour l’étude du Christchurch Town Hall, dans des maquettes aux échelles 1:100 et 1:50 [Marshall, 1979a]. En effet, aux échelles utilisées, un transducteur électroacoustique de type haut-parleur ne peut pas fournir suffisamment d’énergie et la source à étincelle s’avère nécessaire. Pour des fréquences moins élevées, il est possible d’utiliser des transducteurs électroacoustiques qui délivrent une quantité d’énergie plus importante dans leur bande de fréquence optimale, ce qui permet d’effectuer moins de répétitions de mesures. Une alternative a été développée par Xiang [Xiang, 1989] qui a conçu une source sonore haute fréquence dont les transducteurs sont en polyfluorure de vinylidène (PVDF), un matériau polymère piézoélectrique. Un autre exemple, utilisant cette fois des céramiques piézoélectriques, est le développement d’une source dodécaédrique pour les mesures en maquette acoustique [Tahara et al., 2003]. De manière générale, un compromis doit être trouvé entre largeur de bande à exciter, directivité de la source et puissance émise compte tenu de la taille de la maquette afin d’obtenir un rapport signal sur bruit suffisant en une durée raisonnable.

Enfin, il existe des systèmes de mesure qui prennent en compte l’ensemble de la chaîne d’acquisition, du pilotage de la source à l’enregistrement des données et leur traitement. Parmi eux, MIDAS [Polack et al., 1988; 1992] et sa version libre OpenMIDAS fonctionnent quelle que soit l’échelle de mesure.

3.1.2 Maquette de salle à volumes couplés

La maquette utilisée au cours de ce travail de thèse a été construite dans le but de fournir des données de mesures physiques, dans une démarche exploratoire au regard de diverses configurations de la salle. Les données recueillies ont notamment servi de référence lors de comparaisons avec des simulations numériques et des modèles analytiques.

3.1.2.1 Fabrication : géométrie et matériaux

Cette maquette est composée de deux cavités réunies autour d'une paroi commune, serrée entre ces cavités. La géométrie de cette maquette à l'échelle 1:20 est relativement simple. Il s'agit de deux pavés liés par une surface commune qui modélisent deux salles acoustiquement couplées, comme illustré sur le schéma de la Figure 3.2 et la photographie de la Figure 3.3. Cette paroi peut être fermée, laissant chaque volume indépendant, ou alors ouverte, donnant lieu à un couplage acoustique entre les cavités. Notons que la paroi commune, étant faite de plastique rigide de 11 mm d'épaisseur, isole fortement les cavités l'une de l'autre, bien que cette considération ne soit pas très utile puisque la paroi commune comporte une surface de couplage ouverte pour la grande majorité des mesures. Une paroi fermée est utilisée uniquement pour mesurer les temps de réverbération de chaque salle indépendante, par exemple pour calibrer un modèle. Ainsi l'atténuation sonore de la paroi fermée n'est jamais un problème pour les travaux effectués dans la maquette. Ce dispositif permet différentes configurations de couplage selon la géométrie de l'ouverture pratiquée dans cette surface. Par ailleurs, les parois étant couvertes par des matériaux différents dans chaque salle, les temps de réverbération obtenus dans les salles indépendantes sont différents. En effet, des matériaux plus absorbants sont placés dans la grande salle, rendant cette dernière moins réverbérante que la salle plus petite, appelée chambre de réverbération. La structure de cette maquette est réalisée en plaques de polychlorure de vinyle (PVC) avec une paroi en plexiglas pour garder le plafond transparent afin de vérifier que le matériel est bien en place pendant les mesures. Les dimensions choisies correspondent à une moyenne des dimensions des salles à volumes couplés existantes [Beranek, 2004], visibles dans le Tableau 3.2. Les dimensions de la salle de Lucerne sont celles dont la maquette s'approche le plus.

Échelle	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Surface (m ²)	$\bar{\alpha}$
Salle principale						
1:1	44	24	18	19000	4560	0,38
1:20	2,2	1,2	0,9	2,38	11,4	0,38
Chambre de réverbération						
1:1	14	24	18	6050	2040	0,10
1:20	0,7	1,2	0,9	0,76	5,1	0,10

TABLE 3.2 – Caractéristiques architecturales de la maquette

L'intérieur de la maquette a dû être aménagé afin d'éviter les échos flottants qui se produisaient entre les surface parallèles. De plus, l'ajout de relief, comme les balcons, a contribué à

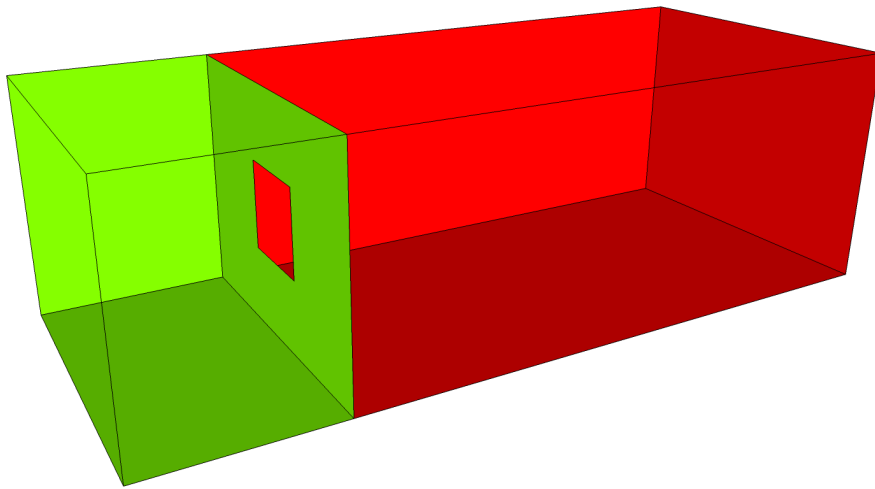


FIGURE 3.2 – Schéma de la première version de la maquette construite au LIMSI.

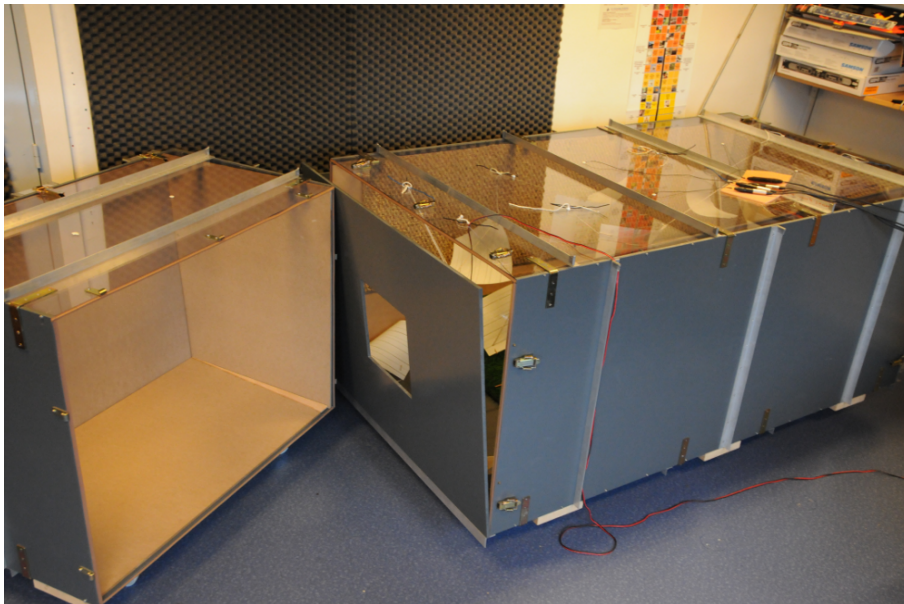


FIGURE 3.3 – Photographie de la maquette construite au LIMSI.

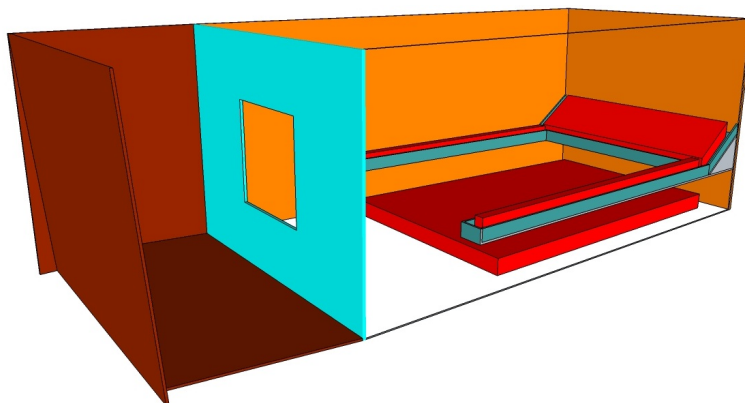


FIGURE 3.4 – Schéma de la maquette du LIMSI. La salle principale est aménagée avec des balcons.

rendre la diffusion du son plus importante, rendant le champ acoustique plus homogène dans la maquette. Ainsi des planches de médium (MDF) ont été ajoutées et posées de manière légèrement non-parallèle aux parois de PVC, selon un angle de 2° comme le montre la Figure 3.4. Les balcons n'étant pas suffisants en termes d'éléments diffusants et pour éviter des réflexions trop fortes sur le plafond qui devait rester plat et rigide pour permettre la visibilité, des éléments courbes en plastique rigide ont été suspendus dans la salle principale, comme le montre la Figure 3.5. Sur cette image, le public est représenté par de l'herbe synthétique. L'absorption de ce matériau a été mesurée dans la chambre réverbérante miniature prêtée par Radio France, visible sur la Figure 3.6, et montre des coefficients d'absorption (Figure 3.7, [Luizard, 2010; Schoeffter]) de l'énergie acoustique en fonction de la fréquence légèrement plus basses (à environ 40% d'absorption entre 200 Hz et 1 kHz) que les valeurs moyennées à partir des valeurs données dans 20 documents de référence (à environ 45% d'absorption entre 500 Hz et 4 kHz) [Nishihara and Hidaka, 2001]. Notons que Beranek [Beranek, 1969; 1998] propose une valeur plus élevée, autour de 80% d'absorption entre 500 Hz et 4 kHz. Ces valeurs dépendent, entre autre, du matériau qui couvre les sièges, plus ou moins absorbant, et changeant d'une salle à l'autre. Ainsi les valeurs obtenues par le gazon artificiel sont peut-être un peu basses par rapport à la moyenne générale mais correspondent à quelques salles réelles.

Finalement, dans le cadre d'une étude comparative avec des méthodes numériques de modélisation du champ sonore exposée dans la Section suivante, les balcons ont été déposés et l'ensemble des parois à l'exception du plafond ont été couvertes de jonc de mer, un matériau fait de fibres naturelles tressées présentant un léger relief qui favorise la diffusion aux hautes fréquences.

3.1.2.2 Matériel de mesure

Les mesures ont été effectuées avec un matériel dont les réponses en fréquence sont présentées en annexe A.3, couramment utilisé dans le domaine de l'audio, par opposition au matériel de mesure acoustique classique. En effet, la carte d'acquisition est une Fireface 800 avec des préamplificateurs Octamic produits par RME, les microphones sont des DPA 4060, appelés



FIGURE 3.5 – Photographie de la salle principale, aménagée avec des balcons et des réflecteurs courbes diffusants.

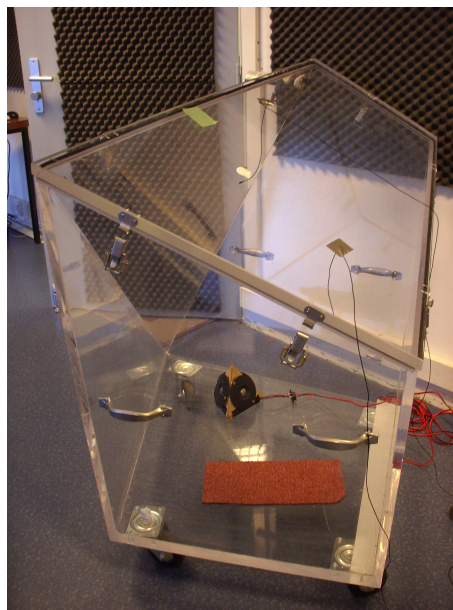


FIGURE 3.6 – Photographie de la maquette de chambre réverbérante servant à mesurer l'absorption des matériaux aux hautes fréquences.

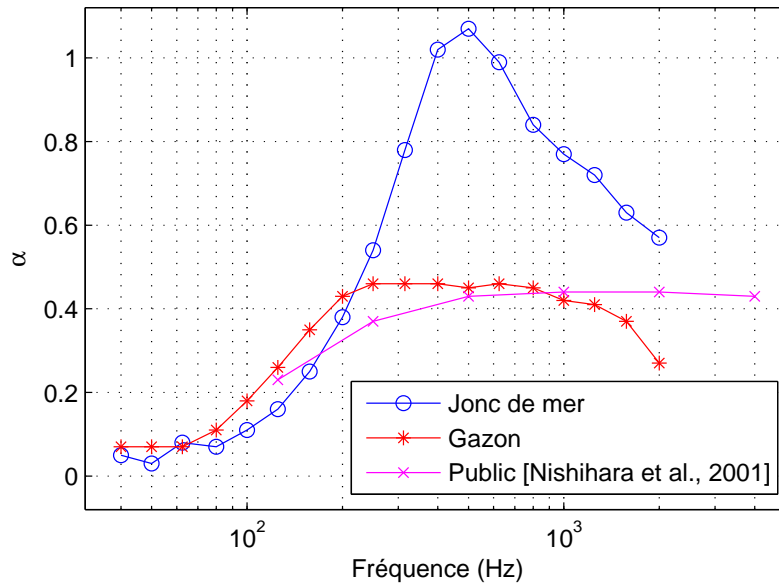


FIGURE 3.7 – Coefficients d'absorption (α_{Sabine}) du jonc de mer et du gazon synthétique, mesurés aux hautes fréquences, affichés à l'échelle 1. L'absorption du public assis dans des salles de concert a été moyennée, provenant de 20 livres différents [Nishihara and Hidaka, 2001].



FIGURE 3.8 – Photographie de la salle principale couverte de jonc de mer, avec la source à 12 tweeters et un alignement de microphones.

“micros cravate”, omnidirectionnels à condensateur dont le diaphragme mesure 1/4 de pouce. L’alimentation électrique de la source est fournie par un amplificateur Samson Servo 120a. La source a d’abord été une pyramide à base triangulaire dont les trois faces visibles possèdent un haut-parleur (transducteurs de type tweeter). Cette géométrie est un bon compromis entre la directivité de la source sonore et sa taille qui doit rester raisonnablement faible lorsqu’elle est rapportée à l’échelle 1:1, compte tenu des dimensions des transducteurs. Les autres sources utilisées sont les dodécaèdres miniatures proposés par Dr-Three, qui ont l’avantage d’être plus proches d’une source omnidirectionnelle grâce à leurs 12 tweeters, visible sur la Figure 3.8, ayant un encombrement moindre comparé à ceux de la source tétraédrique.

Ce matériel n’est pas vendu pour fonctionner dans le domaine des ultra-sons mais les essais ont montré qu’il est possible d’obtenir une dynamique suffisante pour calculer des indices acoustiques jusque dans la bande d’octave centrée sur 40 kHz. La carte d’acquisition et l’amplificateur de source ont une réponse en fréquence semblable, qui ne diminue que de 5 dB entre 20 Hz et 80 kHz. Les facteurs limitant l’accès aux hautes fréquences sont donc les sources et les récepteurs. L’intérêt d’utiliser un tel matériel réside dans le fait qu’il permet d’obtenir un signal ayant une dynamique importante malgré une source relativement peu puissante aux hautes fréquences. En effet le rapport signal sur bruit obtenu permet d’estimer des temps de réverbération sur une décroissance de 20 dB dans la bande d’octave centrée sur 40 kHz, soit 2 kHz à pleine l’échelle. Un matériel de mesure plus classique, composé de microphones GRAS 40 DP, d’un préamplificateur Nexus de Brüel & Kjær et d’une carte d’acquisition National Instruments a également été testé. Les microphones GRAS 40 DP (1 mV/Pa) étant 20 fois moins sensibles que les DPA 4060 (20 mV/Pa), ils nécessitent une excitation sonore plus puissante pour obtenir un rapport signal sur bruit suffisant, par exemple une excitation de type impulsionnelle, typiquement une source à étincelle, ce qui demande un temps beaucoup plus long pour effectuer des mesures répétées pour obtenir une réponse impulsionnelle. Une source impulsionnelle de type pétard ou pistolet à amorce aurait pu être employée mais elle aurait posé une difficulté de fabrication pour être actionnée depuis l’extérieur de la maquette. Par ailleurs, le choix a été fait de travailler avec la méthode du sinus glissant qui semblait être le meilleur compromis pour obtenir des mesures de qualité.

Le système logiciel qui commande la chaîne de mesure a été codé par Brian Katz et fonctionne sous Matlab. Il génère le signal source, l’envoie à la carte d’acquisition, reçoit le signal enregistré et effectue la déconvolution nécessaire avec le signal source ainsi qu’un filtrage passe-bande selon les fréquences excitées dans la maquette. Il est alors possible de visualiser la réponse impulsionnelle déconvoluée pour chaque récepteur directement après une mesure et ainsi de vérifier la présence de certaines caractéristiques (rapport signal sur bruit suffisant, durée suffisante, double pente éventuelle). De plus, cette procédure permet de connaître précisément l’instant d’envoi du signal d’excitation et d’utiliser la même base temporelle pour la source et l’ensemble des récepteurs, ce qui est impossible avec une commande de déclenchement de source extérieure au système de mesure.

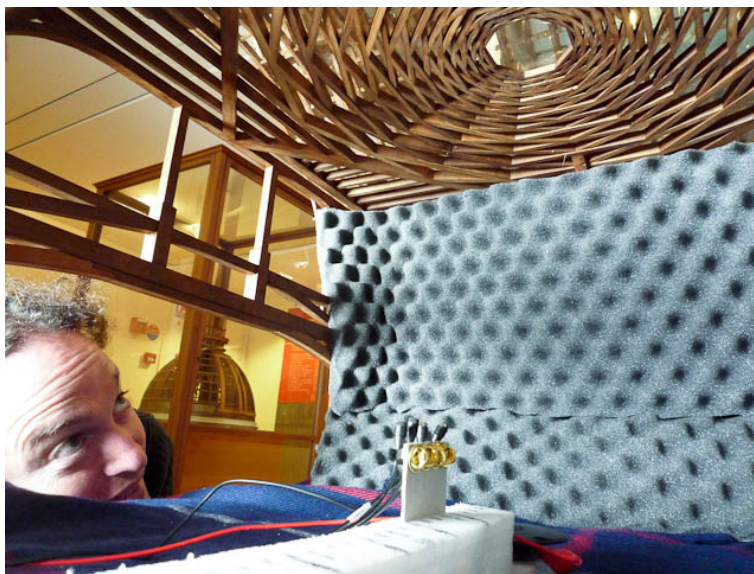


FIGURE 3.9 – Photographie de la configuration de mesure sur la maquette du Musée des Arts et Métiers.

3.1.2.3 Autre maquette utilisée

Au début de la thèse, une série de mesures a été réalisée sur une maquette conservée au Musée des Arts et Métiers à Paris. Cette maquette à l'échelle 1:25 a été construite au XIX^e siècle pour illustrer un travail de charpente qui consiste à utiliser des poutres de faible longueur tout en obtenant un plancher ayant une portée importante. Ainsi une géométrie particulière est mise en œuvre et l'étude [Katz, B.F.G. ; Delarozière, O. ; Luizard, P. "A ceiling case study inspired by an historical scale model", Proc. Institute of Acoustics, 8th International Conference on Auditorium Acoustics, Dublin, Ireland, 20-22 May, 2011. Vol. 33. Pt.2, pp. 314-321.] visait à quantifier l'effet de ce plancher sur l'acoustique de la salle située en dessous. Une photographie de la maquette en Figure 3.9 montre cette géométrie. Les mesures ont été effectuées avec une série de récepteurs placés au niveau du sol, selon la projection d'un rayon de la structure du plancher, la source sonore étant placée au centre. Cette source devant être orientée vers le haut et pointer vers une seule direction, un tweeter seul a été utilisé, placé légèrement plus haut que les récepteurs et orienté vers le centre de la structure. Des séries de mesures avec ce plancher apparent, une plaque de plexiglas placée au-dessus, ont été comparées à des mesures effectuées lorsque la plaque de plexiglas était placée juste sous le plancher, simulant une surface réfléchissante, remplaçant le plancher par une surface plate et rigide.

Cette étude a permis d'utiliser la chaîne d'acquisition dans un contexte différent de celui du laboratoire et les analyses effectuées, étant différentes de ce que nous avons fait jusque là, ont contribué à élargir le spectre des possibilités offertes par nos mesures sur maquette acoustique.

3.2 Méthodes numériques

Les mesures effectuées dans la maquette, décrites dans la Section précédente, ont été systématiquement comparées à des simulations numériques basées sur la méthode du lancer de rayons. La mise en œuvre de ces simulations a été réalisée avec le logiciel CATT-Acoustic [Dalenbäck, 1996] développé par Bengt-Inge Dalenbäck. Ce logiciel est largement utilisé dans les bureaux d'étude acoustique travaillant sur les salles de spectacles et le bâtiment en général. Une étude comparative a élargi le spectre des simulations utilisées avec un logiciel commercial similaire, ODEON [Naylor, 1993], développé par Jens Holger Rindel et Claus Lynge Christensen. Les méthodes basées sur le lancer de rayons considèrent uniquement la propagation du son en ligne droite, ce qui ne permet pas de modéliser *a priori*, par exemple, le phénomène de diffraction à proximité des bords des parois autrement qu'en utilisant des sources secondaires artificielles positionnées sur les arêtes de certaines surfaces. Ces méthodes sont donc des approximations des phénomènes physiques et les développeurs de codes de calcul ont dû appliquer certaines techniques pour rendre ces méthodes plus réalistes. Par exemple, le degré de diffusion des parois peut être simulé par la loi de Lambert [Kuttruff, 1973] qui définit la direction d'un rayon réfléchi selon une loi de probabilité en cosinus. Ces logiciels basés sur la méthode de lancer de rayons ont été comparés à des codes de calcul basés sur des méthodes ondulatoires.

Théoriquement, les méthodes ondulatoires qui résolvent l'équation des ondes ou l'équation d'Euler donnent des résultats exacts car ces équations fondamentales de l'acoustique permettent de décrire l'ensemble des phénomènes relatifs à la propagation des ondes sonores. Toutefois, la mise en œuvre des codes de calcul peut être problématique et rendre les résultats obtenus moins proches de la réalité physique. Par exemple, la définition du maillage dans l'espace ou de l'impédance des parois peut s'avérer difficile à réaliser pour simuler une salle particulière et mener à des différences significatives en comparaison avec des mesures physiques. La méthode d'éléments frontière (*Boundary Element Method*, BEM) [Otani and Ise, 2006] utilisée pour cette étude a été codée par Makoto Otani de l'université Shinshu au Japon et la méthode des différences finies en domaine temporel (*Finite-Difference Time-Domain*, FDTD) [Botts and Xiang, 2011] a été codée par Jonathan Botts de l'université Aalto en Finlande.

3.2.1 Comparaison de mesures et méthodes numériques

Cette étude a donné lieu à un article reproduit dans cette Section, intitulé *Comparison of sound field measurements and predictions in coupled volumes between numerical methods and scale model measurements*, présenté lors du 21th *International Congress on Acoustics*¹. Notons que les parties théoriques de cet article traitant des méthodes BEM et FDTD ont été rédigées par les auteurs des codes correspondants. Le premier auteur a rédigé le reste de l'article.

L'étude consiste à comparer les réponses impulsionnelles issues de mesures dans la maquette de salle à volumes couplés, à des positions données de source et récepteurs, pour une configura-

1. Luizard, P. ; Otani, M. ; Botts, J. ; Savioja, L. ; Katz, B.F.G. "Comparison of sound field measurements and predictions in coupled volumes between numerical methods and scale model measurements", Proc.21st International Congress on Acoustics, Montreal, Canada, 2-7 June, 2013.

tion de couplage donnée, à celles issues de différents types de simulations numériques (lancer de rayons, BEM, FDTD) pour la même géométrie de salle. La méthodologie employée est la suivante : des mesures dans les salles découplées de la maquette ont permis d'envoyer aux auteurs des codes BEM et FDTD des valeurs de temps de réverbération par bandes de tiers d'octaves pour calibrer les modèles numériques avec des valeurs d'impédance de parois adéquates, afin d'avoir des modèles équivalents avant le couplage des salles. Les simulations ont ensuite été lancées dans le modèle de salles couplées avec ces valeurs d'absorption, l'objectif étant de comparer le comportement des codes de calcul une fois le couplage réalisé. Le premier auteur s'est chargé des mesures dans la maquette, des simulations par lancer de rayons avec CATT-Acoustic et ODEON, ainsi que des analyses de l'ensemble des réponses impulsionnelles. Les courbes de décroissance de l'énergie acoustique sont analysées à l'aide d'indices acoustiques adaptés aux décroissances à plusieurs pentes, définis dans la Section 2.2. Les résultats montrent que les simulations par lancer de rayons sont les plus fidèles aux mesures physiques, le code utilisant la méthode FDTD donne des résultats légèrement plus éloignés et le code utilisant la méthode BEM présente les résultats les moins proches des mesures. Diverses hypothèses expliquant ces disparités sont proposées ainsi que des solutions permettant d'y remédier.

Proceedings of Meetings on Acoustics

Volume 19, 2013

<http://acousticalsociety.org/>



**ICA 2013 Montreal
Montreal, Canada
2 - 7 June 2013**

Architectural Acoustics

Session 4pAAa: Room Acoustics Computer Simulation II

4pAAa4. Comparison of sound field measurements and predictions in coupled volumes between numerical methods and scale model measurements

Paul Luizard*, Makoto Otani, Jonathan Botts, Lauri Savioja and Brian F. Katz

***Corresponding author's address: Audio & Acoustics, LIMSI-CNRS, Orsay, 91403, Ile de France, France, paul.luizard@limsi.fr**

Prediction of sound fields in closed spaces can be achieved by various methods, either physical or numerical, based on different theoretical features. While the benefits and limitations of many methods have been examined for single volume spaces, there has been little effort in examining these effects for coupled volume situations. The present study presents a case study comparing theoretical, experimentally physical measurements on a scale model, and various numerical methods, namely boundary element method (BEM), finite-difference time-domain (FDTD) and ray-tracing through the commercial software CATT-Acoustic and ODEON. Although these numerical methods all use 3D numerical models of the architecture, each is different. Ray-tracing is more suitable to geometries with larger planes; BEM requires a more regular finer surface mesh; and FDTD requires a volumetric mesh of the propagation medium. A simple common geometry based on the scale model is used as a basis to compare these different approaches. Application to coupled spaces raises issues linked to later parts in the decay due to multi-slope decay rates, as well as diffraction phenomenon due to acoustic energy travelling between coupling surfaces from one volume to another. The ability of these numerical methods to adequately model these effects is the question under study.

Published by the Acoustical Society of America through the American Institute of Physics

INTRODUCTION

Coupled volume concert halls have been of increasing interest during the last decades and several venues have been built with this principle. This architectural choice provides variable acoustics and interesting features such as a high sense of sound clarity while keeping an important impression of reverberation for the audience. This particularity is due to the non-exponential sound energy decay generated by the difference of reverberation time in the main room and the acoustic control chamber. The latter can act as a giant absorber or as a reverberator depending on its own reverberation as compared to the one in the main audience room. However this type of concert hall does not always work as well as desired in terms of control chamber efficiency. Therefore acoustics prediction in the context of coupled spaces is of primary importance and the present study proposes a comparison of several available methods to address the different issues.

The procedure followed in the present study to compare several numerical simulation methods is to consider physical measurements in a coupled space scale model as a reference. The chosen geometry is a very simple, schematic coupled system composed of two rooms with different reverberation times acoustically linked by a single aperture. Both boundary element method (BEM), finite-difference time-domain (FDTD) and geometrical methods are implemented on a common 3D-model representing the actual scale model, resized at scale 1:1. Thus initial configurations are the same for the different methods and the obtained impulse responses allow for comparison of both computation time and accuracy of acoustical parameters.

SIMULATION METHODS

Two main digital room acoustics modeling approaches are available, namely geometrical and wave-based methods. The geometrical approach assumes straight sound trajectories by using rays or cones of energy and is based on the same principles as light simulations whereas wave-based methods consist in solving the wave equation, allowing for typical wave phenomena such as diffraction in the neighborhood of edges. Those methods require discretization of the considered space or its boundary in a series of grids composed of small elements. BEM and FDTD are wave-based methods while the commercial software CATT-Acoustic and ODEON are based on geometrical acoustics.

Boundary Element Method

This subsection outlines the boundary element method (BEM) used to simulate the acoustic phenomena in a sound field [1]. The acoustic pressure $p(\mathbf{s})$ at position \mathbf{s} within the volume V is written as

$$p(\mathbf{s}) = \mathbf{g}_s \mathbf{A} - (\mathbf{G}_{ns} + j\omega\rho\mathbf{G}_s \mathbf{Y}) \hat{\mathbf{P}},$$

where

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_s &= [G(\mathbf{r}'_k|\mathbf{s})] \in \mathbf{C}^N, \\ \mathbf{G}_s &= \left[\iint_{S_j} G(\mathbf{r}_j|\mathbf{s}) dS \right] \in \mathbf{C}^M, \\ \mathbf{G}_{ns} &= \left[\iint_{S_j} \frac{G(\mathbf{r}_j|\mathbf{s})}{\partial n} dS \right] \in \mathbf{C}^M, \\ \mathbf{A} &= [q_1, q_2, q_3, \dots, q_N]^T \in \mathbf{C}^N, \\ \mathbf{Y} &= \text{diag}(y_n(\mathbf{r}_1), y_n(\mathbf{r}_2), y_n(\mathbf{r}_3), \dots, y_n(\mathbf{r}_M)) \in \mathbf{C}^{M \times M}, \end{aligned}$$

M : the number of surface elements,

Luizard et al.

N : the number of sources,
 S_j : the j -th surface element ($j = 1 \dots M$),
 \mathbf{r}'_k : point source position ($k = 1 \dots N$).
 \mathbf{r}_j : center of S_j ,
 p : acoustic pressure,
 G : the Green function, written as $G(\mathbf{r}|\mathbf{s}) = \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{s}|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{s}|}$,
 q_k : volume velocity of the source k ,
 ω : angular frequency,
 ρ : air density,
 \mathbf{n} : normal vector,
 y_n : acoustic admittance in the normal direction.

Therein, $\hat{\mathbf{P}}$ is the acoustic pressure on the surface elements, *i.e.* surface pressure, given by the following equation:

$$\left(\frac{1}{2}\mathbf{I}_M + \mathbf{G}_n + j\omega\rho\mathbf{G}\mathbf{Y}\right)\mathbf{P} = \mathbf{g}\mathbf{A},$$

where

$$\begin{aligned} \mathbf{G} &= \left[\iint_{S_j} G(\mathbf{r}|\mathbf{r}_i) dS \right] \in \mathbf{C}^{M \times M}, \\ \mathbf{G}_n &= \left[\iint_{S_j} \frac{G(\mathbf{r}|\mathbf{r}_i)}{\partial n} dS \right] \in \mathbf{C}^{M \times M}, \\ \mathbf{g} &= [G(\mathbf{r}'_k|\mathbf{r}_i)] \in \mathbf{C}^{M \times N}. \end{aligned}$$

For an arbitrary receiver position $\mathbf{s} \in V$, $p(\mathbf{s})$ represents a transfer function at a frequency $\omega/(2\pi)$. Subsequently, an impulse response is obtainable by calculating $p(\mathbf{s})$ for all the required frequencies and by application of discrete Fourier transform (DFT) to them.

Sound field simulation inside a room is categorized as an interior problem of the integral equation. To apply BEM to room acoustics simulation, boundary surface of the room is discretized, or meshed, into a set of surface elements. Acoustic admittance, which is inverse of acoustic impedance, is assigned to each surface element, and its value is determined for each one-third octave band from a corresponding absorption coefficient. The above BEM formulation assumes locally-reacting absorption, or admittance, which possibly leads to discrepancies as compared to measured results.

Finite Difference Methods

Finite difference methods in room acoustics are typically used to generate numerical solutions to the second-order, scalar wave equation, $p_{tt}(x, y, z, t) - c^2 \nabla^2 p(x, y, z, t) = s(x, y, z, t)$. Here, subscripts indicate partial derivatives, and s is a source term. The variable, p , is in this case, and most often pressure, but it could also represent velocity potential or other scalar quantity. In contrast with many wave-acoustic simulation methods, the output of a finite difference simulation will be the broadband, time-domain history of a pressure pulse propagating throughout the geometry. As such, the solution must be discretized in time and on a volumetric grid in space.

A finite difference solution to this wave equation first requires discretization. For efficiency and simplicity, in this work, the discretization is uniform, with spatial and temporal discretization periods h and Δt , respectively. The acoustic pressure, p , is then constrained to this grid: $p(x, y, z, t) \equiv p(kh, lh, mh, n\Delta t) \equiv p_{k,l,m}^n$, where k, l, m, n are integer indices. The differential operators of the wave equation may be approximated by finite difference operators, and also evaluated on the grid. For instance, the temporal differentiation becomes $p_{tt} = (p^{n+1} - 2p^n + p^{n-1})/\Delta t^2 + \mathcal{O}(\Delta t^2)$. The derivative approximation can be realized by evaluating the pressure at nearest-neighbor time steps, in this case.

The spatial approximation is analogous, and when combined, the discrete wave operator results in an *update equation* that expresses future pressure values as an *explicit* function of present and past pressure values. Using 26 nearest-neighbor values, instead of the standard 6, to update the pressure, the time-stepping may be coarser and the usable bandwidth of the scheme increases. Although the scheme requires more operations per local update, the increased bandwidth and isotropy reduce memory requirements and the number of local updates required.

The approach taken to generate the grid for the scale model—which maximizes regularity of the update equations and thus efficiency—is to truncate nodes on a regular grid lying outside the specified boundary. The result when the boundaries do not align with coordinate axes is a stair-stepped or pixelated approximation. At long wavelengths, the excess scattering should not substantially affect the results, but it is one potential source of error or deviation from other simulation methods.

The boundary conditions are assigned to be locally reacting [2], which for general, frequency-dependent impedance involves a convolution at each boundary node with a time-domain impedance function [3]. If the impedance is assumed to be frequency-independent, the convolution at each boundary node is reduced to the complexity of a typical field update. With constant impedance, the boundary condition may be written in differential form, $p_t + c\xi p_n = 0$, where ξ is the specific acoustic impedance, and p_n is the spatial gradient normal to the boundary. If a forward difference is used to approximate the normal gradient, the boundary update for walls, edges, and corners can be written such that they are independent of orientation [2]. To approximate frequency-dependence, the simulations are repeated with varying constant impedance and combined for the broadband result as suggested in [4].

Geometrical approach

The geometrical approach in room acoustics simulation requires a finite number of rays [5], beams [6], or cones [7] which are emitted from a spherical sound source in all directions and all of them are traced in a sound environment. The listener is represented by a spherical volume, and rays which reach this volume are added to the output signal as reflections characterized by energy magnitude and time delay. The image-source method [8] can be used as well. In this case the first reflected paths from a source are replaced by direct paths from virtual sources which are images of the source considering the boundaries as mirrors.

In order to achieve statistically valid results, the number of rays penetrating the receiving volume object should be significantly large. Furthermore reflections can be either specular or diffuse [9], allowing for effects due to frequency-dependent scattering properties of the boundaries. In the particular case of coupled volumes the number of incident rays must be sufficiently great so that the latter enter the adjacent volume and produce a specific late reverberation.

Advanced software such as ODEON or CATT-Acoustic combine different methods. For instance image-source model is used for the first reflections up to a certain order while cone-tracing simulates the largest part of the room response. Note that for single volume spaces the reverberation tail can be extrapolated from the early part since the time-energy decay is assumed to be exponential and the simulation becomes statistical. This option must not be used in coupled spaces where multi-slope time-energy decays are expected and therefore cones must be used until the end of simulation [10]. The versions used in the present study are ODEON 10.1 Auditorium and CATT-Acoustic v8.0k, TUCT v1.0f:2 release.

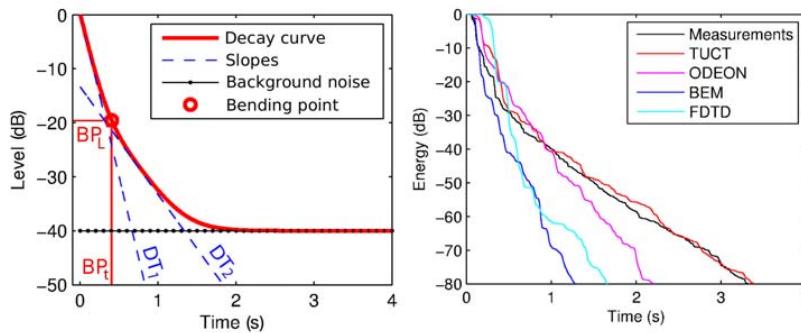
COMPARISON OF RESULTS

In order to start comparisons on a common basis, reverberation times are calibrated in each independent room of digital models according to measurements in the uncoupled scale model, as

Luizard et al.

TABLE 1: Target reverberation times in each independent room, before coupling. Values from measurements in the scale model, rescaled to 1:1.

Frequency band (Hz)	125	250	500	1000	2000
RT in main room (s)	1.99	1.60	1.53	1.22	0.90
RT in control chamber (s)	13.88	10.63	8.48	5.01	3.21

**FIGURE 1:** a. (left) Definition of acoustical parameters adapted to multi-slope energy decay curves. b. (right) Time-energy decay curves in the third-octave band for impulse responses from various methods

presented on table 1. After calibration, coupling was realized by opening an area between the rooms, allowing for sound energy exchange. All measurements and simulations are performed with one source and four receivers.

Since the source and receivers are placed in the less reverberant room, non-exponential decays is expected i.e. double slopes should be obtained [11]. Furthermore precise comparison of various time-energy decays requires accurate quantification tools. Several quantifiers and methods have been proposed to describe non-exponential decays [12], [13]. The quantification method called *Marching Line* [14] is used in this study. It proposes to describe the decays as a series of straight lines having specific decay rates and crossing each other in the neighborhood of the decay bending points at certain coordinates (time;level). The corresponding parameters are the decay time of each slope DT_i and the coordinates of bending points in time BP_{t_i} and level BP_{L_i} as presented in figure 1a.

Scale Model Measurements

Measurements are conducted in a coupled volume scale model composed of a main room and a reverberation chamber. The coupling wall can be changed easily, allowing for different coupling configurations. In order to avoid flutter echoes the side and rear walls are slightly tilted in each room. Most of the boundaries are covered with a diffusive and softly absorptive material in the main room except on the ceiling which is kept transparent for visibility reason. Although the reverberation chamber is smaller than the main room it is build with medium-density fiberboard and PVC plastic which are hard materials making this cavity more reverberant than the large one.

The receivers are DPA 4060 microphones, the source is a custom 3-speakers tetrahedron driven by a Samson Servo amplifier connected to a RME Fireface audio interface. Since the scale has to be 1:20 to work with dimensions of a real large concert hall, measurements have to be performed at high frequencies, up to 40 kHz to reach the octave band centered on 1 kHz back to scale 1:1 according to the scale factor of 20. For purpose of clarity, results are expressed at scale 1 to be directly comparable with the simulations.

Luizard et al.

TABLE 2: Boundary condition settings for each simulation method

Frequency band (Hz)	Main Room				Chamber			
	125	250	500	1000	125	250	500	1000
Admittance [BEM] (10^{-4})	1.96	2.20	2.26	2.77	0.280	0.320	0.432	0.746
Reflection coef ^{fs} [FDTD]	0.92	0.95	0.85	0.30	0.992	0.990	0.982	0.960
Absorption coef ^{fs} [CATT]	0.30	0.35	0.36	0.43	0.030	0.0325	0.0425	0.075
Absorption coef ^{fs} [ODEON]	0.35	0.38	0.39	0.44	0.021	0.027	0.034	0.087

Measurements of impulse responses are performed in the uncoupled rooms first, then in a coupled configuration: 10% of the inner surface of the main room is open towards the chamber, linking the cavities acoustically.

Numerical simulations

Simulations with CATT-Acoustic and ODEON require different settings. As mentioned before, the coupled geometry induces the necessity of increasing the number of rays as compared to regular simulations in a single room. 10^5 rays are used in ODEON and 10^6 in CATT per octave band. Absorption coefficients are set (table 2) so that RT match the ones obtained from measurements and Lambert coefficients are all set to 0.5 to ensure a certain level of diffusion. Furthermore, since these coefficients are defined per octave band, the following impulse response analysis will be performed in octave bands, in spite of measurements and other simulation methods which will be analyzed in third-octave bands.

Table 2 also presents the reflection coefficients and admittance values used in FDTD and BEM methods respectively, defining the boundary conditions. Although these values are defined in the case of normal incidence reflection, one should keep in mind that oblique incidence is happening during the simulation and the effective values are slightly different.

One of the comparison criteria is the computation time. At first glance, geometrical methods seem to require less computation time for the same space configuration and source-receivers arrangement. However all methods behave differently relative to different simulation parameters. In the case of FDTD, calculation increases linearly with time and cubically with frequency. According to the discretization used in this work, 1 second of impulse response takes approximately 9 minutes. Furthermore calculations are made in third-octave bands so an X-sec impulse response with Y frequency bands would take about $9 \cdot X \cdot Y$ min. BEM part is implemented with approximately 18.000 surface elements for which computation took about 43 sec. per frequency unit. Impulse responses are generated up to 1250 Hz with 0.125 Hz step so the frequency content is greater and calculations are longer. In addition, computation time of BEM increases in $\mathcal{O}(M^3)$ where M is the number of elements. In both cases the number of receivers is independent of the total calculation time, in spite of geometrical methods which simulate impulse responses for each source-receiver couple. Thus comparison of all methods is tricky and must be carefully considered.

Another comparison criterion is the accuracy of simulated impulse responses as compared to the measured ones. An example of the obtained sound energy decays is presented in figure 1b in the 125 Hz third-octave band. It gives a visual impression of the existing discrepancies between the various methods for a specific low frequency band. Among other particularities, one can estimate the ability of each method to produce a double slope decay, as observed on measurements. Quantification of the differences is performed in terms of the acoustical parameters specific to double slope for each available frequency band, calculated as $\frac{|X_{sim} - X_{ref}|}{X_{ref}}$. Results are presented in figure 2 and show differences of estimated parameters between the various simulation methods and measurements taken as reference. This analysis can be seen as an estimation of distance

Luizard et al.

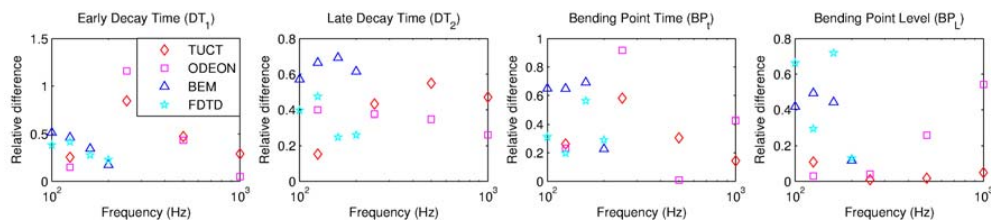


FIGURE 2: Acoustical parameter differences between simulated and measured impulse responses.

between the methods and thus is a useful tool for a comparison study.

While geometrical acoustics methods are set in octave bands (from 125 Hz to 1kHz), wave acoustics methods are expressed in third-octave bands (from 100 to 200 Hz) due to their greater frequency content but their sampling rate being 2.5 kHz and 625 Hz for FDTD and BEM respectively, the upper available frequency band is quite low.

In the 125 Hz third-octave band the relative difference is lower for geometrical methods. The latter show that ODEON predicts the late decay time more accurately whereas TUCT is better for the bending point level. Both the slope of late decay and the transition point are crucial elements of coupled volume acoustics. Thus it is hard to determine which software is more suitable to handle this kind of problem. Wave acoustics methods are very close for the early decay time but FDTD turns out to predict more accurately the late decay time and bending point time. Results are not so clear when dealing with bending point level.

DISCUSSION

This study provides results allowing for a first idea of acoustics prediction in coupled volumes with several simulation methods. However those results are obtained in a specific coupling configuration, for 1 source and 4 receiver positions. Thus one should be careful in generalizing the results and further studies might be useful to conduct deeper comparisons by varying the architectural parameters and source-receiver arrangements as well as implementing additional feature in the custom codes of wave-based methods. It is beyond the scope of this study to resolve all potential discrepancies between simulation and reality, but to improve the quality of the comparison, future work could address realistic air absorption, conformal grid generation or coordinate transformations, implementation of impedance on the irregular grid, design and implementation of efficient impedance filters, and more precise approaches to calibration.

Although the boundary conditions are designed to be frequency-independent in FDTD, approximation errors and the nature of locally-reacting impedance could result in discrepancies with other simulation methods and measurement. For instance, with specific impedance very close to unity, the reflection coefficient at oblique incidence can be relatively large, while the normal-incidence (intended) reflection coefficient is very small. Another issue is that the effective reflection coefficient varies with angle of incidence and frequency. The intended reflection coefficient will approach the true value at asymptotically low frequencies and normal incidence. It is also possible that the physical boundary interaction in the scale model is in some way non-locally-reacting. For these reasons, the expected Sabine absorption coefficients derived from measurements, will often not result in comparable finite difference results.

Although admittance values should be complex numbers for BEM, real numbers are used here, which is an important difference from the actual situation. The direct consequence is the absence of phase delay at each reflection which could lead to discrepancies as compared to results from measurements.

CONCLUSION

The present study has shown certain discrepancies between simulation methods in the particular case of coupled volume acoustics. The differences are quantified and geometrical acoustics software seem to predict more accurate time-energy decay curves than custom codes for FDTD and BEM methods. Considering the latter, FDTD seems to be globally closer to measurements than BEM. Although wave-based methods are theoretically more accurate because they use the wave equation without strong approximations, these results show that the current codes need further improvement to reach the ability of geometrical methods to predict accurate coupled room impulse responses.

REFERENCES

- [1] T. Terai and Y. Kawai, “The application of kirchhoff’s formula to the numerical calculation of transient response in an enclosure”, *Journal of the Acoustical Society of Japan* **11** (1990).
- [2] C. Webb and S. Bilbao, “Computing room acoustics with CUDA–3D FDTD schemes with boundary losses and viscosity”, in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 317–320 (IEEE) (2011).
- [3] K. Kowalczyk and M. van Walstijn, “Room acoustics simulation using 3-D compact explicit FDTD schemes”, *IEEE Trans. Audio Speech Language Process.* **19**, 34–46 (2011).
- [4] L. Savioja, “Real-time 3D finite-difference time-domain simulation of low-and mid-frequency room acoustics”, in *Proc. 13th Int. Conf. Digital Audio Effects* (2010).
- [5] A. Krokstad, S. Strøm, and S. Sørsdal, “Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique”, in *Journal of Sound and Vibration* (1968).
- [6] N. Dadoun, D. G. Kirkpartick, and J. P. Walsh, “The geometry of beam tracing”, in *SCG ’85 Proceedings of the first annual symposium on Computational geometry* (1985).
- [7] J. Amanatides, “Ray tracing with cones”, in *SIGGRAPH ’84 Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (1984).
- [8] J. B. Allen and D. A. Berkley, “Image method for efficiently simulating small-room acoustics”, *Journal of the Acoustical Society of America* **65** (1979).
- [9] B. I. Dalenbäck, “Room acoustic prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection”, *Journal of the Acoustical Society of America* **100** (1996).
- [10] J. E. Summers, R. R. Torres, Y. Shimizu, and B. I. Dalenbäck, “Adapting a randomized beam-axis-tracing algorithm to modeling of coupled rooms via late-part ray tracing”, *Journal of the Acoustical Society of America* **118** (2005).
- [11] C. F. Eyring, “Reverberation time measurements in coupled rooms”, *Journal of the Acoustical Society of America* **3** (1931).
- [12] N. Xiang and P. M. Goggans, “Evaluation of decay times in coupled spaces: Bayesian parameter estimation”, *Journal of the Acoustical Society of America* **110** (2001).
- [13] D. T. Bradley and L. M. Wang, “The effects of simple coupled volume geometry on the objective and subjective results from exponential decay”, *Journal of the Acoustical Society of America* **118** (2005).

Luizard et al.

- [14] P. Luizard and B. F. G. Katz, "Coupled volume multi-slope room impulse responses: a quantitative analysis method", in *Proc. Institute of Acoustics, 8th International Conference on Auditorium Acoustics, Dublin* (20-22 May, 2011).

3.2.2 Bilan

L'étude présentée dans cette Section a montré certaines limites de méthodes numériques dans le cas où elles sont appliquées à la simulation de l'acoustique d'une salle à volumes couplés. Les comparaisons de méthodes numériques (lancer de rayons, éléments frontières, différences finies) sont effectuées sur des cas particuliers de codage de ces méthodes et les conclusions sont donc propres à ces codes. La présente étude ne prétend pas généraliser les résultats aux méthodes elles-mêmes, il s'agit plutôt d'un aperçu des capacités de codes récents, dans le cadre d'une étude préliminaire. Par ailleurs, les comparaisons ne peuvent être effectuées que sur une bande fréquentielle étroite car les méthodes ondulatoires nécessitent des temps de calculs de plus en plus élevés lorsque la fréquence augmente et les délais n'ont pas permis d'effectuer des simulations au-delà de 200 Hz. Les logiciels de lancer de rayons donnent des résultats par bandes d'octaves, de 125 Hz à 4 kHz. Des bandes plus fines ne sont pas accessibles car la définition des coefficients d'absorption et de diffusion n'est possible que par bandes d'octaves.

Les mesures dans la maquette étant prises comme référence en tant que mesures physiques, les résultats concernant les méthodes numériques sont exprimés en termes de différences avec ces mesures. Ainsi, il apparaît que les logiciels de lancer de rayons sont les plus proches des mesures, avec des résultats moyennés similaires, excepté pour le niveau du point de courbure (BP_L) où CATT-Acoustic présente 2 dB d'écart avec les mesures alors qu'ODEON présente un écart moyen de 8 dB. L'origine de ces différences est difficile à évaluer, le fonctionnement précis de ces logiciels commerciaux n'étant pas divulgué. Les différences principales de fonctionnement de ces logiciels sont que CATT-Acoustic utilise des cônes d'énergie dans sa version récente (TUCT, The Universal Cone Tracer) qui se propagent dans l'espace les uns après les autres, alors qu'ODEON utilise des rayons dont les réflexions sur les parois sont proches de la technique de radiosité [Lewers, 1993; Nosal et al., 2004; Siltanen et al., 2007] au sens où un rayon incident va produire plusieurs rayons réfléchis simultanément dans plusieurs directions, plus ou moins éloignées selon le coefficient de diffusion associé à la paroi considérée.

Par ailleurs, les codes de calcul basés sur les méthodes ondulatoires sont globalement plus éloignés des mesures, dans la bande d'octave centrée sur 125 Hz autorisant la comparaison directe avec les logiciels de lancer de rayons. Des éléments de réponse pouvant expliquer ces écarts ainsi que des améliorations à apporter aux codes utilisés sont proposés :

- Le maillage (en surface pour la BEM, en volume pour FDTD) a été réalisé de manière régulière, avec une densité de points uniforme. Cela peut être source d'artefacts, principalement au niveau de la surface de couplage où le champ acoustique est particulièrement complexe dans un espace plus confiné que dans la majeure partie des deux volumes simplement parallélépipédiques. Par ailleurs, les murs opposés ne sont pas parallèles dans la maquette et présentent un angle d'inclinaison de 2° . Le maillage du code FDTD ne suit pas exactement cette géométrie, il est constitué de faces parallèles et progressivement décalées, à la manière d'un escalier. Les basses fréquences utilisées ne devraient pas être sensibles à cette échelle de détail mais cela peut éventuellement être une source supplémentaire d'artefacts.

Bande fréquentielle (Hz)	Salle principale				Chambre de réverbération			
	125	250	500	1000	125	250	500	1000
Coef ^{ts} d'absorption [Maquette]	0.27	0.31	0.32	0.41	0.03	0.04	0.05	0.09
Coef ^{ts} d'absorption [BEM]	0.36	0.43	0.50	0.50	0.04	0.07	0.10	0.14
Coef ^{ts} d'absorption [FDTD]	0.15	0.19	0.28	0.61	0.02	0.02	0.04	0.08
Coef ^{ts} d'absorption [CATT]	0.30	0.35	0.36	0.43	0.03	0.03	0.04	0.08
Coef ^{ts} d'absorption [ODEON]	0.35	0.38	0.39	0.44	0.02	0.03	0.03	0.09

TABLE 3.3 – Coefficients d'absorption moyens pour chaque salle liés à chaque méthode numérique

- La définition de l'absorption des parois se fait par l'impédance acoustique pour le code FDTD et par l'admittance pour le code BEM. Ces grandeurs sont définies dans ces codes comme des nombres réels alors qu'il s'agit de nombres complexes en réalité. Cette approximation entraîne l'annulation du retard de phase ayant lieu normalement pendant une réflexion. Ainsi cet élément rend la propagation des ondes sonores dans ces codes moins proche de la réalité. De plus, l'angle d'incidence n'est pas pris en compte lors d'une réflexion, alors que cela devrait entraîner une variation du coefficient d'absorption de la paroi. Enfin, le Tableau 3.2.2 propose un équivalent du Tableau 2 de l'article précédent dans lequel les valeurs d'impédance et d'admittance de parois sont exprimées en termes de coefficients d'absorption.
- L'observation des courbes de décroissance de l'énergie sonore montre qu'en partie précoce, les différences sont faibles, puis elles augmentent progressivement. Cela permet de formuler l'hypothèse de l'existence d'une erreur numérique systématique dans le calcul, qui serait répétée à chaque itération et donc amplifiée au cours du temps, menant à des écarts de plus en plus importants.
- L'atténuation due à l'air, importante aux fréquences élevées, n'est pas prise en compte dans ces codes de méthodes ondulatoires.
- Enfin, il est possible que la calibration des différents modèles n'ait pas été réalisée avec une précision suffisante. Cette étape a consisté en l'envoi aux codeurs des méthodes ondulatoires des temps de réverbération dans les salles découplées, mesurés dans la maquette, par bandes de tiers d'octaves. Ainsi l'idée était d'avoir initialement des modèles de salles à volume unique ayant les même temps de réverbération, avec une répartition uniforme de l'absorption dans chaque salle. Une fois le couplage réalisé selon la même géométrie, le comportement de chaque modèle était comparé aux autres. Ainsi, si la première étape de calibration n'est pas effectuée avec une précision suffisante, les écarts entre modèles augmentent rapidement.

3.3 Approche analytique

La modélisation du champ acoustique peut être réalisée selon une approche analytique. D'une part, la théorie modale peut être utilisée pour décrire les phénomènes acoustiques mis en jeu. Les travaux de Meissner [Meissner, 2010; 2011; 2012] ont particulièrement utilisé cette approche, efficace aux basses fréquences et pour les locaux dont les dimensions sont modestes, ce qui exclut les grandes salles de concert. En effet dans le cas de volumes de grandes dimensions, le recouvrement modal est important et cette méthode nécessite des temps de calcul très longs. D'autre part, il est possible d'assimiler le phénomène de réverbération à un processus stochastique, prenant en compte l'ensemble des réflexions sur les parois comme un phénomène aléatoire. Cette approche est valable aux plus hautes fréquences et s'avère plus adaptée aux salles de grandes dimensions.

L'acoustique des salles a débuté avec les travaux de Sabine [Sabine, 1922] qui a utilisé cette approche en considérant une salle comme un système physique isolé, contenant une quantité d'énergie donnée, répartie statistiquement, de manière homogène dans l'espace disponible et dont les directions de propagation sont équiprobables, formant ce qu'il a appelé le *champ acoustique diffus*. Les quantités mises en jeu sont exprimées de manière globale sur l'ensemble de la salle : le volume V de la salle, sa surface totale S l'aire d'absorption équivalente qui est la somme des contributions de chaque surface S_i selon son coefficient d'absorption propre α_i telle que $A = \sum_{i=1}^N \alpha_i S_i$, la puissance acoustique $P_a(t) = \frac{cA}{4} E(t)$ absorbée par les parois de la salle, la puissance acoustique P_s de la source sonore. La modélisation de l'énergie acoustique dans la salle vue comme un système fermé en régime stationnaire est soumise à la conservation de l'énergie :

$$V \frac{dE(t)}{dt} = P_s - P_a = 0, \quad (3.7)$$

avec c la célérité du son dans l'air. Le régime stationnaire correspond à une source sonore émettant en continu un son donné. L'arrêt de cette source représente la passage en régime transitoire pouvant être décrit par l'équation différentielle du premier ordre suivante :

$$V \frac{dE(t)}{dt} = 0 - \frac{cA}{4} E(t) \quad \iff \quad \frac{dE(t)}{dt} + \frac{cA}{4V} E(t) = 0, \quad (3.8)$$

dont la solution s'exprime comme une exponentielle décroissante :

$$E(t) = E_0 \exp\left(-\frac{cA}{4V} t\right). \quad (3.9)$$

Représentée sur une échelle logarithmique (en décibels), cette décroissance temporelle de l'énergie est une droite, caractéristique des salles à volume unique. Cette représentation simple du champ acoustique est utile en première approximation pour estimer rapidement le comportement de ce dernier. De plus, le temps de réverbération (T_R) étant défini comme le temps nécessaire à une décroissance de l'énergie sonore de 60 dB, l'expression précédente devient, pour $E_0 = 1$:

$$10 \log_{10}\left(E(t = T_R)\right) = -\frac{10}{\ln 10} \frac{cA}{4V} T_R = -60, \quad (3.10)$$

ce qui permet d'écrire la relation entre temps de réverbération, absorption moyenne et le volume de la salle, largement utilisée dans l'acoustique du bâtiment, en prenant la célérité du son telle

que $c = 344 \text{ m.s}^{-1}$:

$$T_R = 0.161 \frac{V}{A}. \quad (3.11)$$

Par ailleurs une forme de l'expression (3.9) faisant intervenir le temps de réverbération est souvent rencontrée. Elle s'écrit de la manière suivante :

$$E(t) = E_0 \exp\left(-\delta \frac{t}{T_R}\right), \quad (3.12)$$

où la valeur de δ est obtenue pour $t = T_R$ en exprimant l'énergie acoustique en décibels, avec l'énergie initiale $E_0 = 1$, telle que :

$$10 \log_{10}\left(E(t = T_R)\right) = 10 \log_{10}\left(\exp\left(-\delta \frac{t}{T_R}\right)\right) = -\frac{10}{\ln 10} \delta \frac{t}{T_R} = -60. \quad (3.13)$$

On obtient ainsi $\delta \approx 13.8$, d'où l'expression simplifiée de la densité d'énergie acoustique, ne dépendant que du temps de réverbération :

$$E(t) = E_0 \exp\left(-13.8 \frac{t}{T_R}\right). \quad (3.14)$$

Cependant l'hypothèse de champ diffus est très forte et n'est jamais strictement rencontrée en pratique. En effet, elle nécessite des parois qui tendraient vers un état totalement réfléchissant, ce qui est un concept théorique et n'existe pas dans la réalité. Certaines parois très lisses et rigides peuvent approcher asymptotiquement cette condition. De ce fait, l'absorption du son par les parois, même faible, induit une direction globale du champ acoustique de la source vers les parois, ce qui est contradictoire avec la condition d'équiprobabilité des directions de propagation. Ainsi l'expression (3.9) donnée par Sabine, bien que largement utilisée dans l'acoustique du bâtiment, reste une approximation. La Figure 3.10 montre une simulation en différences finies de l'évolution d'un front d'onde dans un espace fermé à partir d'une impulsion localisée. La densité de réflexions sur les parois augmente au cours du temps jusqu'à ce que l'approximation du champ diffus soit envisageable. Il s'agit toujours du front d'onde initial, dilaté et réparti dans l'espace.

Dans cette Section, la théorie statistique est d'abord envisagée pour deux salles couplées, puis généralisée à N salles, donnant des solutions analytiques décrivant les champs acoustiques sous l'hypothèse du champ diffus, selon une dépendance temporelle. Un modèle [Luizard et al., 2012] incluant une dépendance spatiale directement inspirée de la *Revised Theory* de Barron et Lee [Barron and Lee, 1988] a été développé. Cette dernière approche permet d'obtenir des résultats relativement proches des expériences mais il s'agit d'un modèle purement heuristique puisque l'addition du terme de dépendance à l'espace est artificielle. Un moyen d'arriver naturellement à une double dépendance en temps et en espace est l'utilisation de l'équation de diffusion. Cette théorie ayant été développée pour le transport de la chaleur, elle a ensuite été appliquée à l'acoustique des salles à volume unique [Ollendorff, 1969; Picaut et al., 1997]. Une application plus spécifique aux volumes couplés est proposée dans ce Chapitre.

3.3.1 Approche statistique pour deux salles couplées

Les travaux pionniers de Davis [Davis, 1925a] et Eyring [Eyring, 1931] ont mené à des modèles analytiques basés sur les hypothèses de Sabine, décrivant l'évolution temporelle d'un système

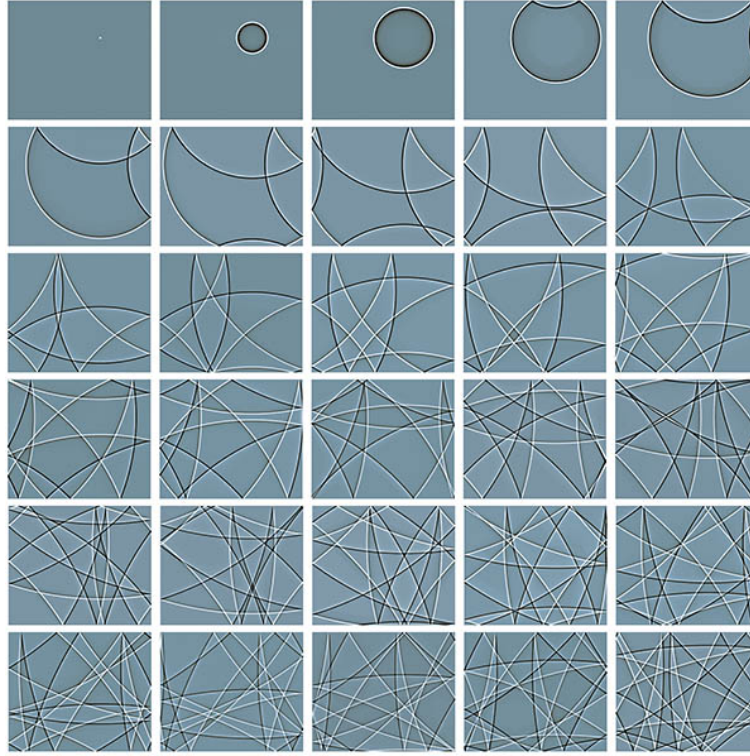


FIGURE 3.10 – De gauche à droite et de haut en bas : schémas de l'évolution temporelle d'un front d'onde à des instants successifs. D'après [Heller, 2013].

composé de deux salles couplées. Cette approche a été reprise par Cremer et Müller [Cremer et al., 1982] avec des développements en régimes stationnaire et transitoire. Les indices 1 et 2 représentent respectivement la salle principale et la chambre de réverbération. La surface de couplage est notée S_{12} , les aires d'absorption équivalentes sans prendre en compte la surface ouverte s'écrivent A_{10} et A_{20} , définies de la même manière que précédemment comme la somme pondérée de l'absorption de chaque élément de surface dans chaque salle.

Ainsi un bilan d'énergie effectué dans chaque salle considérée indépendamment, avec une source en régime stationnaire dans la salle principale émettant la puissance acoustique P_1 , mène à chaque ligne du système d'équations ci-dessous.

$$\begin{cases} P_1 + \frac{cS_{12}E_2}{4} - \frac{cS_{12}E_1}{4} - \frac{cA_{10}E_1}{4} = 0 \\ \frac{cS_{12}E_1}{4} - \frac{cS_{12}E_2}{4} - \frac{cA_{20}E_2}{4} = 0 \end{cases}, \quad (3.15)$$

où les termes positifs représentent un apport de puissance acoustique au système et les termes négatifs correspondent à des pertes.

- P_1 est la puissance fournie par la source sonore dans la salle principale.
- $+\frac{cS_{12}E_i}{4}$ représente la puissance sonore venant de l'autre salle.
- $-\frac{cS_{12}E_i}{4}$ représente la puissance sonore partant vers l'autre salle.

- $\frac{cA_{i0}E_i}{4}$ représente les pertes dues à l'absorption propre à chaque salle.

La prise en compte directe de la surface ouverte s'écrit $A_{ii} = A_{i0} + S_{12}$, ce qui revient à attribuer un coefficient d'absorption de 1 à la surface ouverte S_{12} totalement absorbante. Le système d'équations s'écrit alors :

$$\begin{cases} \frac{4P_1}{c} = A_{11}E_1 - S_{12}E_2 \\ 0 = A_{22}E_2 - S_{12}E_1 \end{cases} \quad (3.16)$$

Ce système donne les valeurs de densité d'énergie stationnaire dans chaque volume :

$$\begin{cases} E_1 = \frac{\frac{4P_1}{c}}{A_{11} - \frac{S_{12}^2}{A_{22}}} \\ E_2 = \frac{\frac{4P_1}{c}}{\frac{A_{11}A_{22}}{S_{12}} - S_{12}} \end{cases} \quad (3.17)$$

Considérer le régime transitoire revient à annuler le terme source $\frac{4}{P_1}$ et à écrire la variation de densité d'énergie. L'équation bilan Eq. (3.16) devient alors :

$$\begin{cases} \frac{c}{4}(A_{11}E_1(t) - S_{12}E_2(t)) = -V_1 \frac{dE_1(t)}{dt} \\ \frac{c}{4}(A_{22}E_2(t) - S_{12}E_1(t)) = -V_2 \frac{dE_2(t)}{dt} \end{cases} \quad (3.18)$$

La résolution d'un tel système d'équations différentielles mène à un résultat de la forme :

$$\begin{cases} E_1(t) = E_{I1}\exp(-2\delta_I t) + E_{II1}\exp(-2\delta_{II} t) \\ E_2(t) = E_{I2}\exp(-2\delta_I t) + E_{II2}\exp(-2\delta_{II} t) \end{cases}, \quad (3.19)$$

où les constantes d'amortissement s'écrivent :

$$\delta_{I,II} = \frac{1}{2}(\delta_1 + \delta_2) \pm \sqrt{\frac{1}{4}(\delta_1 - \delta_2)^2 + k_1 k_2 \delta_1 \delta_2}, \quad (3.20)$$

avec les amortissements, ou taux de décroissance, dans les salles découplées $\delta_i = \frac{cA_{ii}}{8V_i}$ et les facteurs de couplage $k_i = S_{12}/A_{ii}$ traduisant la proportion représentée par la surface de couplage par rapport à la surface de la salle considérée. Les facteurs E_{I1} , etc. sont les conditions initiales du système, autrement dit les densités d'énergie avant l'arrêt de la source sonore et le début de la décroissance. Du point de vue algébrique, les grandeurs $\delta_{I,II}$ sont les valeurs propres du système.

Les grandeurs $E_1(t)$ et $E_2(t)$ sont les réponses du système après l'arrêt de la source. Elles sont donc équivalentes à des réponses à un échelon du système. Or la relation qui lie la réponse à un échelon R_{ech} et la réponse à une impulsion R_{imp} est une dérivation temporelle telle que $R_{imp} = -dR_{ech}/dt$. Le signe négatif vient du fait que la source est arrêtée et non mise en route, ce qui correspond à un échelon négatif. Il est alors aisé d'obtenir l'expression analytique de la réponse en énergie de la salle suite à une excitation impulsionnelle (équivalente à l'intégration temporelle de la réponse en pression acoustique) :

$$\begin{cases} E_1(t) = E_{I1}\exp(-2\delta_I t) + \frac{\delta_{II}}{\delta_I} E_{II1}\exp(-2\delta_{II} t) \\ E_2(t) = E_{I2}\exp(-2\delta_I t) + \frac{\delta_{II}}{\delta_I} E_{II2}\exp(-2\delta_{II} t) \end{cases} \quad (3.21)$$

La Figure 3.11 illustre les différences entre les décroissances simulées à partir de ces équations dans la salle principale et dans la chambre de réverbération, couplées et découplées. Cette Figure 3.11 montre aussi les différences entre les réponses simulées après arrêt de la source et après une impulsion. On peut remarquer plusieurs points :

- Les courbes de décroissance dans la salle présentent un point de courbure alors que les décroissances dans la chambre de réverbération sont rectilignes après une légère courbure concave en début de réponse.
- Les pentes des décroissances courbes dans les salles couplées sont comprises dans les limites fixées par les décroissances des salles découplées
- La première pente dans la salle principale couplée est très proche de celle de la salle découplée. Par contre la différence est visible dans le cas de la chambre de réverbération car la surface de couplage représente une absence de paroi réfléchissante et donc une absorption plus forte que lorsque la salle est découplée. La seconde pente dans la salle principale est quasiment identique à celle de la chambre de réverbération puisque le taux de décroissance est alors piloté par la chambre.
- Le niveau sonore dans la chambre de réverbération et le niveau d'apparition de la seconde pente dans la salle principale sont plus faibles pour une excitation par impulsion. Le temps de charge de la chambre de réverbération est visible lorsque la source située dans la salle principale émet une impulsion : un retard existe pour arriver au maximum d'énergie avant la décroissance. En effet, dans ce cas l'énergie émise doit "charger" la salle, alors que dans le cas de l'échelon, la salle est déjà totalement chargée au moment de la coupure de source et l'énergie décroît depuis son niveau maximal.

Cette approche permet d'estimer la décroissance temporelle de l'énergie acoustique dans des salles couplées mais il a été montré que la densité d'énergie n'est pas homogène dans une salle et varie avec la distance entre source et récepteur. Un modèle analytique a été proposé pour décrire la décroissance spatiale dans une salle à volume unique. La *Revised Theory* [Barron and Lee, 1988] propose une quantification de l'affaiblissement du niveau sonore lié à la distance dans une salle en prenant en compte séparément le son direct et le son réfléchi. La densité d'énergie obtenue ne dépend que de la distance source-récepteur r et prend en compte les caractéristiques statistiques de la salle. L'expression classique de la densité d'énergie en régime stationnaire s'écrit :

$$E(r) = \frac{\rho_0 c}{p_{\text{ref}}^2} \left(\frac{W}{4\pi r^2} + \frac{4W}{A} \right), \quad (3.22)$$

où W est la puissance acoustique de la source, ρ_0 est la densité volumique de l'air et $p_{\text{ref}}^2 = 2.10^{-5}$ Pa. Considérer une distance de référence $r_0 = 10$ m en champ libre mène à $E(r_0) = (\rho_0 c / p_{\text{ref}}^2) (W / 4\pi r_0^2)$. Finalement le modèle classique peut s'écrire comme l'expression :

$$\begin{aligned} \frac{E(r)}{E(r_0)} &= \left(\frac{W}{4\pi r^2} + \frac{4W}{A} \right) \frac{4\pi r_0^2}{W}, & \text{avec } A &= \frac{0.161V}{T_R}, \\ &= \left(\frac{100}{r^2} + 31200 \frac{T_R}{V} \right), & & \end{aligned} \quad (3.23)$$

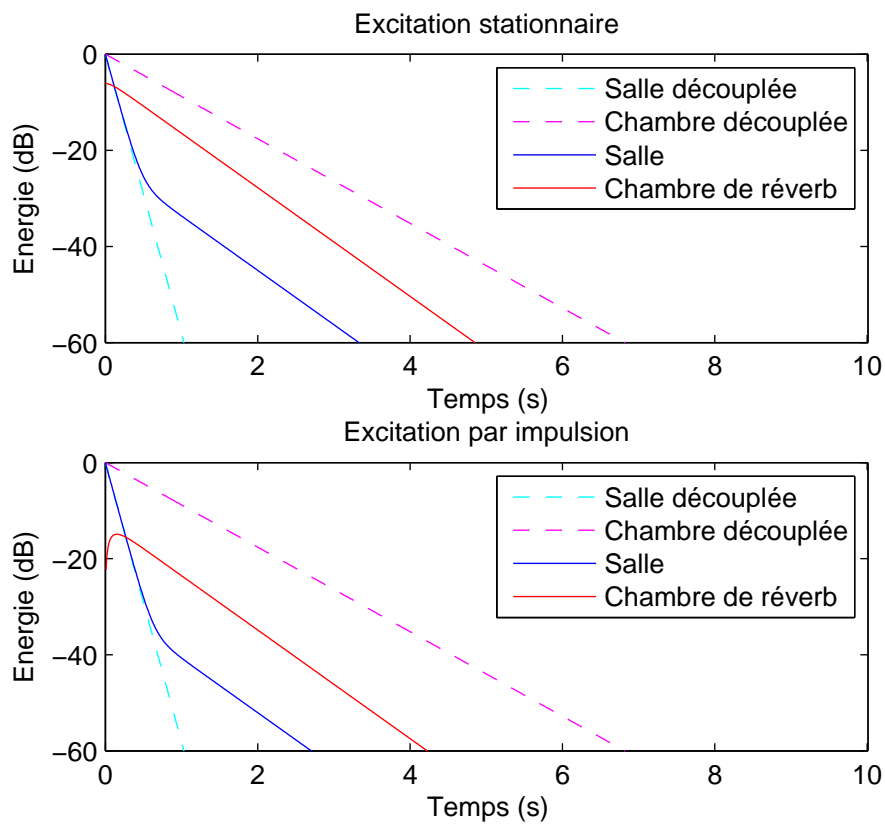


FIGURE 3.11 – Courbes de décroissance de l'énergie acoustique dans la salle principale et dans la chambre de réverbération, pour les salles couplées et découplées, pour une excitation impulsionnelle et une excitation stationnaire suivie d'une coupure de source (échelon inversé).

où T_R est le temps de réverbération de la salle. De plus, en régime transitoire, *i.e.* lorsque la source sonore est coupée, l'énergie intégrée entre le temps t et l'infini est donnée par une exponentielle décroissante exprimée, sans le son direct, selon l'Equation (3.14) :

$$E(t) = 31200 \frac{T_R}{V} \exp\left(-13.8 \frac{t}{T_R}\right). \quad (3.24)$$

Or la *Revised Theory* considère que la décroissance commence au temps où le son direct arrive au récepteur, *i.e.* $t = r/c$. On obtient alors, toujours sans le son direct :

$$E(r) = 31200 \frac{T_R}{V} \exp\left(\frac{-13.8}{c} \frac{r}{T_R}\right) = 31200 \frac{T_R}{V} \exp\left(-0.04 \frac{r}{T_R}\right). \quad (3.25)$$

Finalement, en considérant l'énergie totale reçue à partir du début de la décroissance à la distance source-récepteur r , ce modèle exprimé en décibels prend la forme suivante :

$$L - L_0 = 10 \log \left[\frac{E(r)}{E(r_0)} \right] = 10 \log \left[\left(\frac{100}{r^2} + 31200 \frac{T_R}{V} \exp\left(-0.04 \frac{r}{T_R}\right) \right) \right]. \quad (3.26)$$

Cette expression estime le niveau sonore en champ stationnaire à différents points de l'espace. Ainsi il est possible d'associer les expressions estimant la décroissance temporelle de l'énergie sonore dans un système de deux salles couplées et cette dernière qui donne le niveau sonore initial des contributions de chaque salle, en champ stationnaire avant l'arrêt de la source. Martellotta [Martellotta, 2009a] a proposé un modèle heuristique de décroissance issu d'un précédent modèle développé pour la prévision de champ acoustique dans des églises [Cirillo and Martellotta, 2005]. Il dépend à la fois du temps et de l'espace pour deux salles couplées :

$$E_i(r, t) = A_1(r) \exp\left(-13.8 \frac{t}{T_R}\right) + A_2(r) \exp\left(-2 \frac{t}{\rho r}\right), \quad (3.27)$$

où les facteurs $A_i(r)$ dépendent des positions de la source et du récepteur tels que :

$$\begin{cases} A_1(r) = \left(13.8 \times \frac{31200}{V}\right) \exp\left(-0.04 \frac{r}{T_R}\right) \\ A_2(r) = 100 \frac{\gamma}{r^2} - A_1(r) \end{cases}. \quad (3.28)$$

Le coefficient γ est défini tel que $\gamma = (1 - \alpha)(1 - s) \frac{1}{\Delta\tau}$ où α et s sont les coefficients d'absorption et de diffusion moyens, $\Delta\tau$ est le temps nécessaire pour parcourir le libre parcours moyen, ce qui représente, selon Vorländer [Vorländer, 1995], une approximation de l'intervalle de temps entre l'arrivée du son direct et celle de la première réflexion. Ainsi γ , dans l'expression du facteur A_2 , transforme l'énergie du son direct en l'énergie de la première réflexion spéculaire répartie sur le temps $\Delta\tau$. En effet, la quantité γ correspond à l'énergie réfléchie $(1 - \alpha)$ de manière non diffuse $(1 - s)$ pendant la durée $(\Delta\tau)$, ce qui permet de prendre en compte la géométrie et la nature des parois de la salle de manière plus précise qu'avec la *Revised Theory*. Le coefficient ρ est défini tel que $t_R = \rho r$ où t_R est le retard temporel nécessaire à l'établissement d'un champ diffus au niveau du récepteur placé à la distance r de la source. C'est un coefficient de proportionnalité menant à un temps supérieur au temps d'arrivée du son direct pour qu'un certain nombre de réflexions puissent arriver au récepteur.

3.3.2 Généralisation à N salles couplées

La généralisation de la modélisation précédente à plus de deux salles couplées a été développée par plusieurs auteurs [Kuttruff, 1973; Jouhaneau, 1997; Summers et al., 2004] afin de prendre en compte un plus grand nombre de configurations spatiales possibles. Toujours basés sur la théorie statistique, ces modèles peuvent s'écrire sous forme matricielle :

$$\dot{\mathbf{E}} = \mathbf{K}\mathbf{E}, \quad (3.29)$$

où \mathbf{E} est la matrice des fonctions de décroissance dans chaque salle et \mathbf{K} les coefficients correspondants. Une notation utilisant des indices peut également être adoptée. La conservation de l'énergie acoustique dans le système comprenant N salles couplées s'écrit alors :

$$\frac{dE_i(t)}{dt} = - \left(2\delta_{i0} + \frac{c \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N S_{ij}}{4V_i} \right) E_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{cS_{ij}}{4V_i} E_j(t), \quad i = 1, \dots, N, \quad (3.30)$$

où δ est la constante d'amortissement dans chaque salle isolée. Le second terme entre parenthèses représente la quantité d'énergie qui quitte la salle i et le terme somme représente l'énergie provenant des autres salles. La solution générale d'un tel système d'équations s'écrit comme la superposition des solutions particulières :

$$E_i(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij} \exp(-2\delta'_j t), \quad i = 1, \dots, N, \quad (3.31)$$

où les coefficients a_{ij} représentent les conditions initiales dans chaque salle. Les taux de décroissance δ'_j ne sont pas les mêmes que dans les salles isolées et peuvent être calculés comme les valeurs propres du système. Pour ce faire, considérons la grandeur k telle que

$$k_{ii} = - \left(2\delta_{i0} + \frac{c \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N S_{ij}}{4V_i} \right) \quad \text{et pour } i \neq j, \quad k_{ij} = \frac{cS_{ij}}{4V_i}, \quad (3.32)$$

ce qui permet d'écrire l'expression (3.30) comme :

$$\frac{dE_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^N k_{ij} E_j(t), \quad i = 1, \dots, N. \quad (3.33)$$

Comme la forme des solutions est une somme d'exponentielles amorties, il est possible d'écrire les échanges d'énergie dans le système comme $dE_i(t)/dt = -2\delta' E_i(t)$. Insérer cette forme dans l'équation précédente mène à N équations linéaires de la forme :

$$k_{i1}E_1 + \dots + (k_{ii}E_i + 2\delta') + \dots + k_{iN}E_N = 0, \quad i = 1, \dots, N, \quad (3.34)$$

dont les solutions sont les racines en δ' . Ainsi les N coefficients d'amortissement δ'_j sont obtenus, permettant l'estimation des fonctions de décroissance $E_i(t)$ dans chaque salle du système couplé.

Un modèle de décroissance de l'énergie sonore prenant en compte le temps et l'espace a été développé récemment [Luizard, P.; Xiang, N.; Polack, J.D.; Katz, B.F.G. "Coupled volumes

and statistical acoustics : preliminary results of an improved analytical model”, Acoustics 2012, Hong Kong, China, 13-18 May, 2012]. Une partie de ce travail a été réalisée durant un séjour de trois mois dans l’équipe *Architectural Acoustics* au *Rensselaer Polytechnic Institute - RPI* - à Troy, NY, aux États-Unis, en collaboration avec Prof. Ning Xiang. Les entretiens qui ont eu lieu avec Dr. Jason Summers ont fortement contribué au développement de ce modèle. Il est inspiré des modèles de Summers (temporel) et Barron (spatial) et combine ces deux approches, prenant comme base le modèle temporel en pondérant chaque terme exponentiel par un coefficient spatial dépendant de la distance r_j entre le récepteur et la source sonore, cette dernière pouvant être la source principale sur scène ou les surfaces de couplage considérées comme sources secondaires. Ce modèle s’écrit de la façon suivante :

$$E_i(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij} \exp(-2\delta'_j t) \exp(-2\delta'_j \frac{r_j}{c}), \quad i = 1, \dots, N \quad (3.35)$$

La Figure 3.12 permet une comparaison avec la *Revised Theory* qui lui fournit le terme de décroissance spatiale. La partie précoce des décroissances est équivalente car elle fonctionne sur le principe du retard temporel lié au temps d’arrivée du son direct, autrement dit de la distance source-récepteur. En effet, bien que basée sur l’hypothèse du champ diffus, ce qui entraîne que le niveau sonore est le même en tout point de l’espace à un instant donné, cette théorie prend en compte l’éloignement du récepteur par rapport à la source en adaptant le niveau sonore en régime stationnaire. Tout se passe comme s’il existait une courbe de décroissance temporelle unique pour la salle et chaque récepteur la parcourt à partir d’un niveau initial différent, selon sa distance à la source. Plus le récepteur est éloigné, moins le niveau sonore initial est élevé. La partie de droite de la Figure 3.12 montre l’adaptation aux volumes couplés dans le cas de deux salles. La forme des décroissances dont le niveau initial diminue avec la distance et possédant un comportement similaire est retrouvée avec le codage du modèle proposé. La Figure 3.13 montre une série de courbes de décroissance dont les niveaux initiaux varient (image de gauche), ce qui permet de comprendre pourquoi une fois normalisées ces courbes présentent une seconde pente dont le niveau d’apparition augmente avec la distance source-récepteur.

Le modèle proposé a été comparé à des mesures dans la maquette du LIMSI, présentée dans la Section 3.1, dans sa configuration comportant des balcons, ainsi qu’à des simulations par lancer de rayons dans la même géométrie. Une série de 25 récepteurs alignés avec la source et la surface de couplage (Figure 3.14) permettent d’estimer des réponses impulsionnelles à différentes distances de la source et de l’ouverture.

Les comparaisons sont menées à partir de l’énergie totale mesurée à chaque position de récepteur ainsi que sur des caractéristiques des décroissances temporelles comme le niveau d’apparition du point de double pente (indice acoustique BP_L défini dans la Section 2.2), visibles sur la Figure 3.15. L’énergie totale est calculée comme suit :

$$E_{\text{tot}}(r) = 10 \log_{10} \left(\int_0^{\infty} RIC(r, t) dt \right), \quad (3.36)$$

où *RIC* (*Reverse Integrated Curve*) est la courbe de Schroeder, l’intégration rétrograde de la réponse impulsionnelle dont la définition est donnée dans l’Equation (7) de l’article présenté

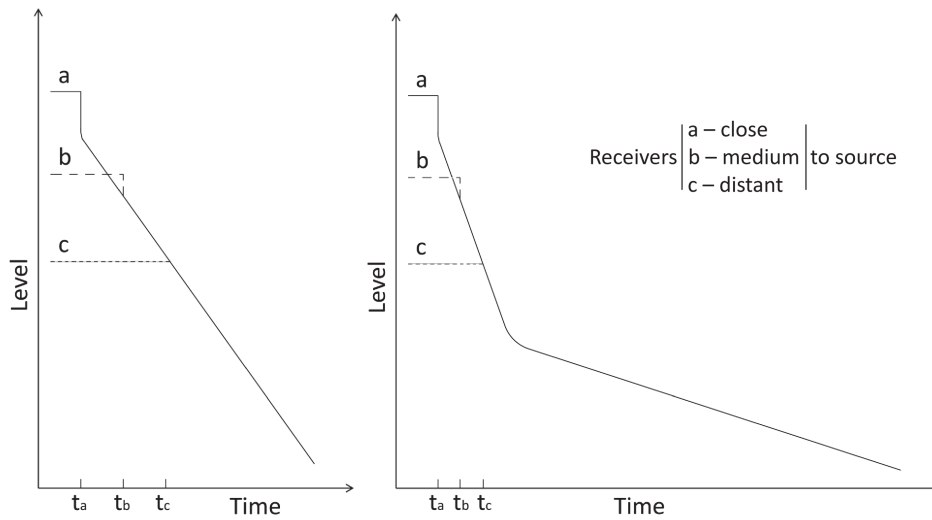


FIGURE 3.12 – Schémas représentant la *Revised Theory* (gauche) et l’adaptation aux volumes couplés dans le cas de deux salles (droite). Le récepteur *a* est proche de la source, le *b* un peu plus éloigné et le *c* est le plus éloigné.

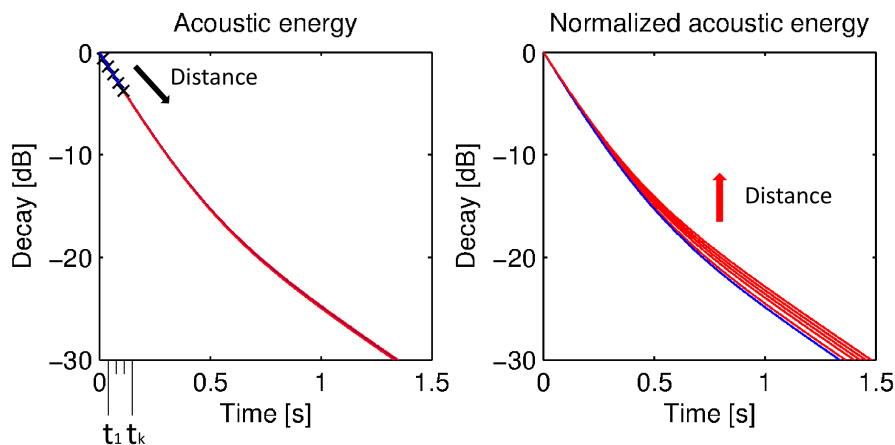


FIGURE 3.13 – Courbes de décroissance de l’énergie simulées selon le modèle proposé à l’Equation (3.35) normalisées par rapport au récepteur le plus proche de la source (gauche) et normalisées par rapport à elles-mêmes (droite). Les croix (x) indiquent le début des décroissances.

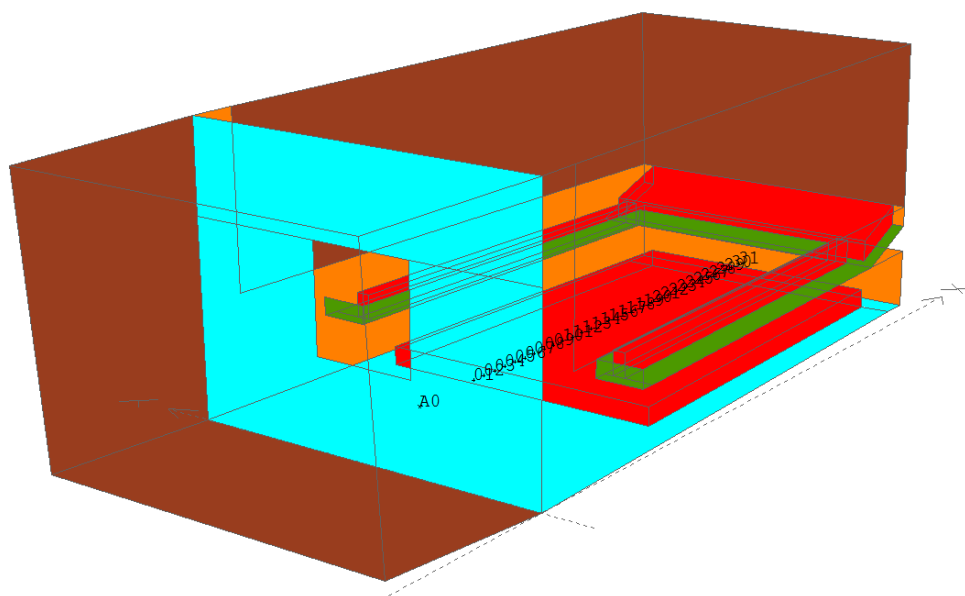


FIGURE 3.14 – Schéma du modèle numérique utilisé pour les simulations, représentant la configuration mise en place dans la maquette avec les 25 récepteurs.

dans la Section 2.2. Ainsi une valeur d'énergie totale peut être obtenue pour les mesures, les simulations et le modèle qui fournit directement cette courbe de décroissance temporelle de l'énergie acoustique, équivalente à la *RIC*. La comparaison montre que les valeurs obtenues sont assez proches, pour des distances entre source et récepteur variant de 7 m à 30 m. Les récepteurs les plus éloignés étant proches du balcon arrière de la maquette, il est possible que l'écart constaté tel que le modèle donne des niveaux plus bas que les mesures et simulations numériques soit dû à des réflexions sur ce balcon ou le mur arrière. Cet écart a été quantifié en calculant l'écart quadratique moyen (*root mean square, rms*) des séries de mesures et simulations numériques par rapport à la série issue du modèle analytique proposé. L'écart *rms* avec les mesures est de 0,7 dB et l'écart *rms* avec les simulations est de 0,4 dB pour l'ensemble des récepteurs. Par ailleurs, la comparaison du niveau du point de double pente sur la même Figure 3.15 montre également un bon accord avec des écarts *rms* par rapport au modèle de 0,9 dB pour les mesures et de 1,1 dB pour les simulations numériques. Les écarts au modèle les plus importants sont constatés pour les récepteurs les plus proches de la source pour les simulations et les plus éloignés pour les mesures. Cela peut être expliqué par un niveau sonore élevé des premières réflexions dans le code de lancer de rayons pour les récepteurs proches de la source. En ce qui concerne les mesures, la même explication que pour le niveau sonore peut être évoquée, à savoir la présence du balcon à l'arrière qui modifie le comportement du champ sonore pour les récepteurs les plus éloignés de la source. Il apparaît ainsi que ce modèle est globalement fidèle aux mesures et simulations jusqu'à une limite raisonnable, inférieure au seuil de perception du niveau sonore (environ 1 dB) [ISO3382-1, 2009], bien qu'il n'ait pas de fondement théorique avéré en tant que modèle heuristique. Il permet notamment d'effectuer des estimations de comportement du champ acoustique dans des espaces couplés en un temps plus court que les simulations par lancer

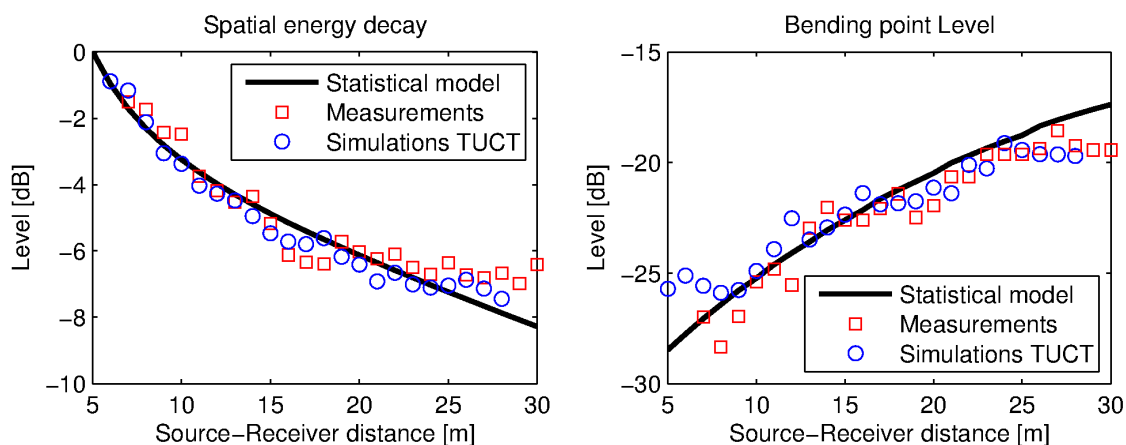


FIGURE 3.15 – Représentation de l'énergie totale (gauche) et du niveau du point de double pente (droite) pour le modèle proposé, les mesures et les simulations en fonction de la distance source-récepteur.

de rayons et les mesures en maquette acoustique.

3.3.3 Approche par une équation de diffusion

Une approche différente a été envisagée pour élaborer un modèle analytique de comportement de champs acoustiques dans des volumes couplés. Il s'agit de la théorie de la diffusion, développée à l'origine pour décrire l'évolution de flux thermiques, applicable à l'acoustique selon une approche particulière. En considérant le son comme des corpuscules sonores se déplaçant dans un milieu diffusant, il est possible d'utiliser l'équation de diffusion pour prévoir l'évolution de l'énergie acoustique dans le temps et dans l'espace. Il s'agit en fait de la théorie statistique discutée précédemment, considérée à l'ordre immédiatement supérieur faisant apparaître un terme dépendant de l'espace.

Ce travail a été proposé pour publication au *Journal of the Acoustical Society of America* dont l'article intitulé *Sound energy decay in coupled spaces using a parametric analytical solution of a diffusion equation* est reproduit dans cette Section². Une solution analytique est proposée, qui vérifie l'équation de diffusion en régime stationnaire. Un programme de simulation est réalisé à partir de ce modèle de diffusion. Il est ensuite comparé à des mesures sur maquette acoustique et des simulations numériques par lancer de rayons de la même façon que pour le modèle statistique précédent, dans des configurations de mesures différentes. Les comparaisons sont effectuées à l'aide des indices acoustiques adaptés aux courbes de décroissance énergétique à plusieurs pentes et il apparaît que les résultats de ce modèle se situent entre ceux des mesures et des simulations. Ainsi cette méthode semble donner des résultats plus précis que le logiciel de lancer de rayons, à confirmer par d'autres expériences.

2. Luizard P.; Polack J.D.; Katz B.F.G. "Sound energy decay in coupled spaces using a parametric analytical solution of a diffusion equation", *Journal of the Acoustical Society of America*. Article soumis le 1^{er} juillet 2013.

Abstract

Sound field behavior in performance spaces is a complex phenomenon. Issues regarding coupled spaces present additional concerns due to sound energy exchanges. Coupled volume concert halls have been of increasing interest in recent decades because this architectural principle offers the possibility to modify the hall's acoustical environment in a passive way by modifying the coupling area. Under specific conditions, the reverberation chambers can provide non-exponential sound energy decay in the main room, resulting in both high clarity and long reverberation which are antagonistic parameters in a single volume room. Previous studies have proposed various sound energy decay models based on statistical acoustics and diffusion theory. Statistical acoustics assumes a perfectly uniform sound field within a given room whereas measurements show an attenuation of energy with increasing source-receiver distance. While previously proposed models based on diffusion theory use numerical solvers, the present study proposes a heuristic model of sound energy behavior based on an analytical solution of the commonly used diffusion equation and physically justified approximations. This model is validated by means of comparisons to scale model measurements and numerical geometrical acoustics simulations, both applied to the same simple concert hall geometry.

3.3.3.1 Introduction

Prediction of sound field behavior in coupled volumes is of primary importance since this architectural feature is often met in everyday life: large corridors linking smaller rooms, various connected rooms in factories, naves and side galleries in churches, stage house and main room in theaters, even a few concert halls with acoustic control chambers. These situations raise different issues concerning acoustics, from noise control to speech or music quality, depending on the function of the venue. In each case a fine knowledge of sound field behavior is required for adapting the acoustical design to the functions of the venue. Therefore, prediction tools adapted to coupled volumes are necessary and various methods have been developed leading to more or less accurate results.

Among the available means for predicting the sound field behavior in coupled volumes one can use numerical methods based on geometrical or wave approach, scale model measurements, or analytical expressions, each giving various levels of detail. This paper focuses on theoretical models either based on statistical acoustics or on diffusion theory, with experimental validation and comparison with simulation using geometrical acoustics software.

3.3.3.1.a Previous research

Among previous studies two main model types are commonly used to describe sound energy decay in closed coupled spaces.

Statistical models are based on the diffuse sound field hypothesis developed by Sabine [Sabine, 1922]. Pioneer studies by Davis [Davis, 1925a] and Eyring [Eyring, 1931] have proposed analytical models which describe the sound energy decay in a system of two coupled rooms. These results have been generalized for N coupled rooms and refined successively [Kuttruff, 1973; Cre-

mer et al., 1982; Lyle, 1981a; Jouhaneau, 1997; Summers et al., 2004]. A model of energy density with spatial dependence without temporal component in the context of coupled rooms was introduced by Summers et al. [Summers et al., 2004] based on Barron's Revised Theory [Barron and Lee, 1988]. More recently, Summers [Summers, 2012] proposed another statistical model, accounting for time delay of energy transfer between coupled rooms, which tends to include a spatial component in the statistical model through consideration of travel time between rooms. Furthermore, a model describing sound energy decay in churches has been proposed by Martellotta [Martellotta, 2009a], using a sum of decaying exponential functions whose arguments are both time and space. Finally, a similar model combining spatial and temporal statistical decays in coupled volume concert halls with reverberation chamber has been recently presented [Luizard et al., 2012].

Diffusion theory was introduced in room acoustics by Ollendorff [Ollendorff, 1969] and later continued by Picaut et al. [Picaut et al., 1997] based on the idea that sound particles behave as fluid particles which collide into scattering objects within a propagation medium [Morse and Feshbach, 1953]. This model can be developed under the assumption that spatial and temporal scales relative to the investigated acoustic phenomena allow for considering diffusion on boundaries as continuous and non-localized. Hence, this phenomenon is similar to diffusion within the entire volume. Another model based on the diffusion equation has been developed for single rooms in the case of cubic-like, long, or flat spaces [Valeau et al., 2006]. Each approach proposes a solution to the diffusion partial differential equation. Sound field modeling in coupled rooms with the diffusion equation has been proposed [Billon et al., 2006] with various absorption conditions [Jing and Xiang, 2007; 2008] and coupling through partition walls [Billon et al., 2008]. A recent paper [Xiang et al., 2013] investigated the effect of aperture size and receiver position in coupled spaces, which are both used in the present paper as means of validation of the proposed analytical model. Contrary to the present study, these studies [Valeau et al., 2006; Jing and Xiang, 2007; Billon et al., 2008; Xiang et al., 2013] consider separate equations to describe sound behavior in the considered domain and on its surface. Results are obtained using numerical solvers e.g. finite element software.

3.3.3.1.b The present study

The present study proposes a heuristic model of sound energy variation based on a parametric analytical solution of the diffusion equation for single volume rooms and a hybrid numerical implementation for coupled volume rooms. This approach allows for a simple and fast representation of sound fields in single or coupled volume rooms. The proposed model estimates spatial sound energy decay in rooms based on source-receiver distance in steady state conditions and this sound energy level can then be considered as the initial level of temporal sound energy decay at each receiving position. Furthermore, the proposed analytical solution and its implementation require only one expression since the boundary conditions are embodied in a spatial diffusion term and a temporal damping term. As a consequence, simple calculation means can be used and performed in reduced time. Finally, this model is validated through comparisons with scale model measurements and numerical geometric methods, namely ray-tracing simula-

tions, for various source-receiver arrangements and coupling area conditions. Results match the ones presented in a previous study [Xiang et al., 2013] and additional configurations are tested, leading to new considerations on sound field in coupled spaces.

This paper is organized as follows: Sec. 3.3.3.2 presents the proposed analytical model based on the diffusion equation as well as the implementation adapted to coupled spaces. Section 3.3.3.3 describes the acoustical parameters used to quantify coupled impulse responses. Section 3.3.3.4 presents the comparisons performed between the proposed model, measurements in a scale model and ray-tracing simulations regarding two different issues: distance variation between source, receiver, and coupling area, as well as coupling area variation. Section 3.3.3.5 is a general discussion of the results and Sec. 3.3.3.6 concludes the paper.

3.3.3.2 Proposed model

The proposed model is derived from the diffusion equation adapted to room acoustics. This theoretical context is based on the hypothesis of uniformity of scattering by objects within the volume under study, namely the walls of the room, which are supposed to be diffusely reflecting. This is a parametric model of energy density $w(\mathbf{r}, t)$ which can be adapted to a large variety of room morphologies, absorption conditions, and source-receiver arrangements.

3.3.3.2.a Diffusion equation

The diffusion equation adapted to room acoustics describes energy flow from higher to lower density areas and can be written as follows [Picaut et al., 1997; Valeau et al., 2006]:

$$\frac{\partial}{\partial t}w(\mathbf{r}, t) - D\nabla^2w(\mathbf{r}, t) + \sigma w(\mathbf{r}, t) = F(\mathbf{r}, t), \quad (3.37)$$

where D is the diffusion coefficient, linked to the spatial variation term, and the coefficient σ is related to the mean absorption $\bar{\alpha}$ as shown in Eq. (3.39). Introducing the mean free path between two collisions $\lambda = \frac{4V}{S}$ makes it possible to express coefficients D and σ which are related to the room volume and total surface area. $F(\mathbf{r}, t)$ is an arbitrary acoustic source term.

$$D = \frac{\lambda c}{3} = \frac{4Vc}{3S}, \quad (3.38)$$

$$\sigma = \frac{c\bar{\alpha}}{\lambda} = \frac{c\bar{\alpha}S}{4V}. \quad (3.39)$$

Previous studies have shown that the absorption term σ can take alternative expressions that lead to more accurate results, especially for high boundary absorption. These expressions are obtained by replacing the Sabine absorption coefficient of Eq. (3.40a) by the Eyring coefficient [Jing and Xiang, 2007] of Eq. (3.40b), or even by the recently proposed [Jing and Xiang, 2008] coefficient of Eq. (3.40c) which is reported as being particularly accurate for high

absorption condition.

$$\sigma_S = \bar{\alpha} \frac{cS}{4V}, \quad (3.40a)$$

$$\sigma_E = -\ln(1 - \bar{\alpha}) \frac{cS}{4V}, \quad (3.40b)$$

$$\sigma_M = \frac{2\bar{\alpha}}{2 - \bar{\alpha}} \frac{cS}{4V}. \quad (3.40c)$$

3.3.3.2.b Proposed solution

The proposed model of spatial and temporal sound energy decay can be written as:

$$w(\mathbf{r}, t) = \left(\frac{a}{r} e^{-\varepsilon r} + b \right) e^{-\gamma t} H(t), \quad t > \frac{r}{c}, \quad (3.41)$$

where $r = \|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s\|$ is the source-receiver distance, ε is the spatial decay constant, γ is the temporal decay constant relative to sound absorption, c is the speed of sound, and a and b are positive real constant numbers to be adapted to each situation. The ratio $\frac{a}{b}$ expresses the importance of the spatial decay as compared to the purely temporal statistical decay which can be referred to as the diffuse-to-statistical ratio. This point will be discussed in section 3.3.3.2.c. For $t < \frac{r}{c}$, the sound energy density has its local maximum value such that $w(\mathbf{r}, t) = W_0(\mathbf{r}, t)$ corresponding to a steady state excitation. Function H is the Heaviside step function, standing for the fact that sound propagation requires a certain time to cover the source-receiver distance and reach the receiver position. Therefore, the temporal energy decay begins for each receiver with a time delay $\Delta t = \frac{r}{c}$ after the cutoff of sound emission.

Furthermore, in classical statistical theory, as no spatial variation is considered, the power density balance equation is equivalent to the diffusion equation without the Laplace term, as written in Eq. (3.42) for a steady state cutoff excitation. The solution of such an ordinary differential equation is a simple decaying exponential as in Eq. (3.43).

$$\frac{\partial}{\partial t} w(t) + \sigma w(t) = 0, \quad (3.42)$$

$$w(t) = w_0 e^{-\sigma t}. \quad (3.43)$$

This simple analogy between diffusion and classical statistical theories shows that the absorption term is the same in both cases which means that $\gamma = \sigma$. Hence, the diffusion equation can be considered as a higher order statistical model of sound field behavior in an enclosure.

Considering steady state conditions, the energy density no longer depends on time. If the sound source is considered as a point source, then the source term can be written as the product of the source power and a spatial delta Dirac function $F(\mathbf{r}, t) = P(t)\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s)$. Thus, the stationary diffusion equation becomes Eq. (3.44) and the proposed energy density can be expressed as in Eq. (3.45).

$$-D\nabla^2 w(\mathbf{r}) + \sigma w(\mathbf{r}) = P\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s), \quad (3.44)$$

$$w(\mathbf{r}) = \left(\frac{a}{r} e^{-\varepsilon r} + b \right) \int_0^\infty e^{-\sigma t} dt = \left(\frac{a}{r} e^{-\varepsilon r} + b \right) \frac{1}{\sigma}. \quad (3.45)$$

The Laplace operator in spherical coordinates applied to steady state energy density is expressed as Eq. (3.46).

$$\nabla^2 w(\mathbf{r}) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} w(r) \right) = \varepsilon^2 \frac{a}{\sigma r} e^{-\varepsilon r}. \quad (3.46)$$

Eq. (3.44) can then be integrated over the room's volume using spherical coordinates such as $dV = dr^3 = r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi$. As a result, Eq. (3.44) becomes Eq. (3.47).

$$\left(\frac{D}{\sigma} \varepsilon r + \frac{D}{\sigma} - \frac{r}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon^2} \right) a e^{-\varepsilon r} + b = P, \quad (3.47)$$

which is verified for specific values of parameters ε and b . In fact, the quantity between brackets must vanish so that the exponential term disappears when $r \rightarrow 0$, which leads to $\varepsilon^2 = \frac{\sigma}{D}$ and $b = P$. The spatial decay parameter ε is then expressed in terms of the absorption and diffusion coefficients, and the magnitude parameter b depends only on the source power density.

Hence, the diffusion model proposed here can be written as Eq. (3.48), depending on the diffusion and absorption coefficients defined in Eqs (3.38) and (3.39).

$$w(\mathbf{r}, t) = \left(\frac{a}{r} \exp \left(-\sqrt{\frac{\sigma}{D}} r \right) + b \right) \exp(-\sigma t) H(t), \quad t > \frac{r}{c}. \quad (3.48)$$

3.3.3.2.c Asymptotic cases

Near field case

The proposed model is a sum of two terms whose relative weights are given by parameters a and b . As previously mentioned, these parameters represent the spatially dependent term and the Sabine term respectively. Previous studies have proposed analytical models for which the sound energy density depends on space, particularly the source-receiver distance [Barron and Lee, 1988]. Measurements in concert halls [Barron, 1995], churches [Cirillo and Martellotta, 2005], and scale models [Chiles and Barron, 2004] have confirmed that sound field energy density decays with increasing distance from the sound source. This phenomenon is particularly observable within a radius such that $\frac{a}{r} \exp \left(-\sqrt{\frac{\sigma}{D}} r \right) \gg b$. Within this perimeter where r is relatively small, the term governed by parameter a is predominant and the sound energy density can be approximated as:

$$w(\mathbf{r}, t) \sim \frac{a}{r} \exp \left(-\sqrt{\frac{\sigma}{D}} r \right) \exp(-\sigma t) H(t), \quad t > \frac{r}{c}. \quad (3.49)$$

Far field case

In special cases, the diffuse sound field hypothesis can be asymptotically met, typically requiring highly reverberant environments where absorption is very low [Sabine, 1922], such as reverberant chambers built to measure material absorption characteristics or some churches [Anderson and Bratos-Anderson, 2000]. The application domain can be extended to various venues considering only the late part of the sound energy decay and large source-receiver distances, i.e. assuming the condition $b \gg \frac{a}{r} \exp \left(-\sqrt{\frac{\sigma}{D}} r \right)$. The proposed model becomes Eq. (3.50) for which the spatial component only appears through the delay term, making it the only difference relative to the traditional Sabinian sound decay model.

$$w(\mathbf{r}, t) \sim b \exp(-\sigma t) H(t), \quad t > \frac{r}{c}. \quad (3.50)$$

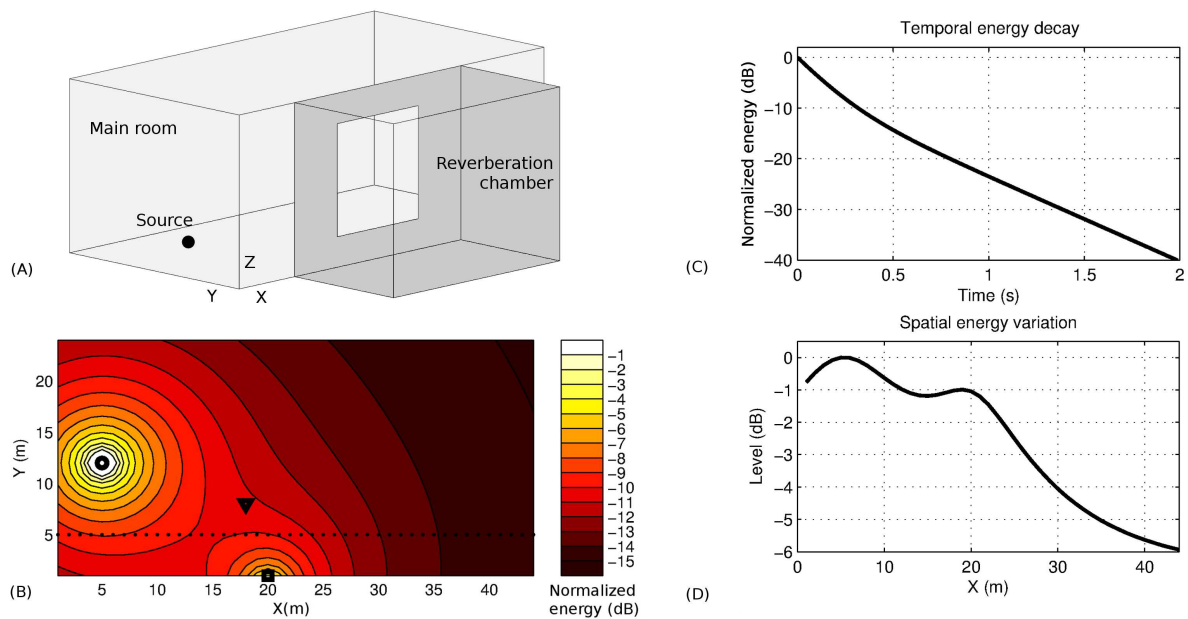


Figure 3.16: (Color online) (A): Perspective of the coupled volume hall’s geometry. Corresponding specifications are in Tab. 3.3.3.2.d. (B): Map of normalized sound energy level on a horizontal plan in the rectangular main room. The surface coupling the main room to a reverberation chamber is the square ($X=20;Y=0$). Sound source is represented by a circle ($X=5;Y=12$). (C): Temporal energy decay at the triangle position ($X=18;Y=8$). (D): Spatial energy variation along the dotted line ($Y=5$).

3.3.3.2.d Implementation for coupled spaces

The intention of this numerical implementation is to use the proposed model in combination with classical statistical theory. Initial energy levels are estimated in each room for steady state excitation conditions and temporal decays are further calculated at each receiver position. Acoustical coupling is taken into account through the initial sound level of each slope within a curved decay, estimated with respect to the coupling factor from statistical theory. Calculation of sound decay is performed in several steps:

- Estimation of uniform sound energy density in each room with respect to the approach proposed by Cremer et al. [Cremer et al., 1982], governed by parameter b of the proposed model.
- Addition of sound energy density depending on source-receiver distance in the main room, according to parameter a .
- Addition of sound energy density relative to the energy returned from the adjoining volumes, depending on aperture-receiver distance.

An example is performed for a rectangular main room whose architectural and acoustical specifications are listed in Tab. 3.3.3.2.d and illustrated in Fig. 3.16. The area of coupling area

Scale	L (m)	W (m)	H (m)	V (m ³)	S (m ²)	$\bar{\alpha}$	RT (s)
Main room							
1:1	44	24	18	19000	4560	0.38	1.53
1:20	2.2	1.2	0.9	2.38	11.4	0.38	0.08
Reverberation chamber							
1:1	14	24	18	6050	2040	0.10	8.39
1:20	0.7	1.2	0.9	0.76	5.1	0.10	0.42

Table 3.4: Architectural specifications of the main room and reverberation chamber for the numerical simulation (full scale [1:1]) and the scale model (scale 1:20): length L, width W, height H, volume V, surface area S, mean absorption coefficient $\bar{\alpha}$, and reverberation time RT in the 500 Hz octave band.

is $S_c = 137 \text{ m}^2$ which is 3% of the total surface of the main room ($S_1 = 4560 \text{ m}^2$) and 32% of the area of the wall ($S_w = 432 \text{ m}^2$) separating the main room and the chamber. This configuration results in a clearly curved temporal energy decay and a noticeable sound level variation throughout the considered space. Figure 3.16 shows results of this example. A map of sound energy level as well as the temporal sound energy decay at a chosen point and spatial sound energy decay along a line of receivers can be determined. The same calculation can be repeated for various aperture sizes or for additional secondary volumes in order to obtain sound energy decays with more than two slopes.

3.3.3.3 Quantification of non-exponential impulse responses

Precise quantification of non-exponential impulse responses is necessary for their characterization and in order to compare various cases. This study employs the Marching Line method [Luizard and Katz, 2011] to estimate appropriate acoustical parameters. These quantifiers are the decay time (DT_i) of each slope within the curved decay, evaluated to -60 dB, and the time and level ($BP_{t_i}; BP_{L_i}$) of the point on the decay curve between consecutive slopes, called the bending point, as illustrated in Fig. 3.17. The method is based on a recursive algorithm which calculates root-mean-square (rms) deviations between Schroeder's backward integration [Schroeder, 1965] (or reverse integrated curve - RIC, Eq. (3.51)) of impulse responses expressed in decibels and step-wise linear regressions. The RIC is calculated as follows:

$$RIC(\mathbf{r}, t) = \int_t^\infty p^2(\mathbf{r}, \tau) d\tau, \quad (3.51)$$

where p is the sound pressure of an impulse response. The first point of the RIC is defined as the point at -0.1 dB below the maximum of the normalized RIC. Linear regressions are successively estimated between this point and a progressively descending point at each iteration, increasing the length of the linear regression. The *rms* deviation between the RIC and the linear regression also increases until a threshold is reached and iterations are stopped. The linear regression is then stored as a detected straight portion of the RIC. The same process is then performed at

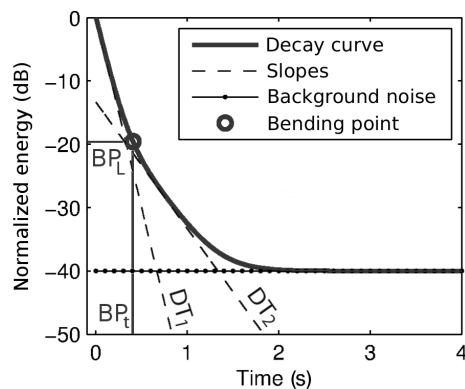


Figure 3.17: Acoustical parameters describing a multi-slope energy decay curve presented in the case of 2 slopes.

a lower decay level on the RIC to estimate the next slope until the background noise is met, possibly leading to several estimated slopes. Bending points are estimated as the closest point on the decay curve to the intersection point of two successive linear regressions. Thus, if N slopes are detected, the coordinates of $N - 1$ bending points are used to characterize the sound energy decay, in addition to the decay rate of each slope.

3.3.3.4 Comparison of the model to measurements and simulations

Predictions from the proposed model have been compared to measurements in an acoustical scale model and simulations achieved with CATT-Acoustic software (version v9.0a, TUCT v1.0g release). Various configurations of source-receiver arrangement and coupling area have been investigated. Special attention was paid to temporal energy decays at various receiving points, including near and far positions relative to the sound source as well as total energy variation through the space. Comparisons are quantified using *rms* deviation for various quantities according to the following equation:

$$D_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(X(\mathbf{r}_i) - X_{\text{ref}}(\mathbf{r}_i) \right)^2}, \quad (3.52)$$

with N the number of receivers, X the compared value and X_{ref} the reference, or standard value. In the following, X is either one of the acoustical parameters or the total energy value, as presented in Tab. 3.3.3.4.b.

3.3.3.4.a Physical and digital models

The architectural model has dimensions and acoustical characteristics (Table 3.3.3.2.d) of a typical large concert hall, although the reverberation time is quite high in the chamber, as compared to generally encountered values in coupled volume concert halls [Beranek, 2004]. It is a simple shoebox geometry, at full scale and scale 1:20 for the numerical and physical models respectively. The plans in Fig. 3.18 show that most opposing walls are not parallel but slightly

angled (5°) in order to avoid flutter echoes. While the floor and ceiling in the main room are parallel, large curved rigid reflectors have been installed close to the ceiling in the scale model, as shown in Fig. 3.19, to increase sound diffusion within the room. No additional features such as balconies were included so that the model represented a general coupled space.

For the scale model, the sound source was a miniature dodecahedral loudspeaker array built by Dr-Three, the receivers were DPA 4060 microphones, and the audio interface was a RME Fireface 800. While this data acquisition system was designed to work within the audible frequency range, it provided a usable signal up to 50 kHz, corresponding to the frequency band centered on 2 kHz at full scale. This equipment has been used in previous acoustical studies, including measurements in the scale model of the future Philharmonie de Paris concert hall [Kahle Acoustics and Altia, 2006]. The obtained signal-to-noise ratio was greater than typically achievable by classical scale model measurement equipment, which is extremely important when studying coupled spaces acoustics and to detect late slopes at low energy levels.

The numerical model reproduced the scale model specifications. The wall absorption was defined per octave band so that reverberation times matched those estimated from measurements in the uncoupled rooms. The assumption was made that the scale model was globally highly diffusive and Lambert coefficients were set accordingly, to 70% as the maximum value recommended by Rindel [Rindel, 2000]. The number of rays is an important issue when dealing with coupled spaces because a sufficient number must enter the secondary chamber to provide a second slope in the energy decay. However, a preliminary comparison conducted between impulse responses from measurements and simulations using 10^5 , $5 \cdot 10^5$, and 10^6 rays per octave bands, all other conditions remaining unchanged, has shown that results are closer to measurements when using 10^5 rays. This number was chosen for the present study. CATT-Acoustic v8.0k, TUCT v1.0f:2 release, proposes three different algorithms to handle acoustic simulations in various venues. Results presented here focus on the octave band centered on 500 Hz which is a compromise between mid- and low-frequencies where coupling effect is stronger, providing clear observations of the encountered phenomena.

3.3.3.4.b Source-receiver arrangements

The sound source has been placed at one end of the main room, which represents the stage location. Two configurations have been tested: the source has been placed next to the coupling area (referred to as configuration Src. 1), 5 m away from it, and at the opposite side (Src. 2), 5 m away from the rear wall, as illustrated in Fig. 3.18. These configurations allowed for testing various relative proportions of time delay and sound energy level between the direct sound and late reverberation from the chamber, depending on the receiver location. A total of 30 receivers were placed with 1 m step along the line represented in Fig. 3.18, allowing for measurements with source-receiver distances from 7 m to 36 m in order to observe the effect of distance between the triplet of source, coupling area, and receiver since the proposed analytical model includes distance variation. The coupling area was set to $S_c/S_1 = 1\%$ in order to provide energy decay curves with two distinct slopes.

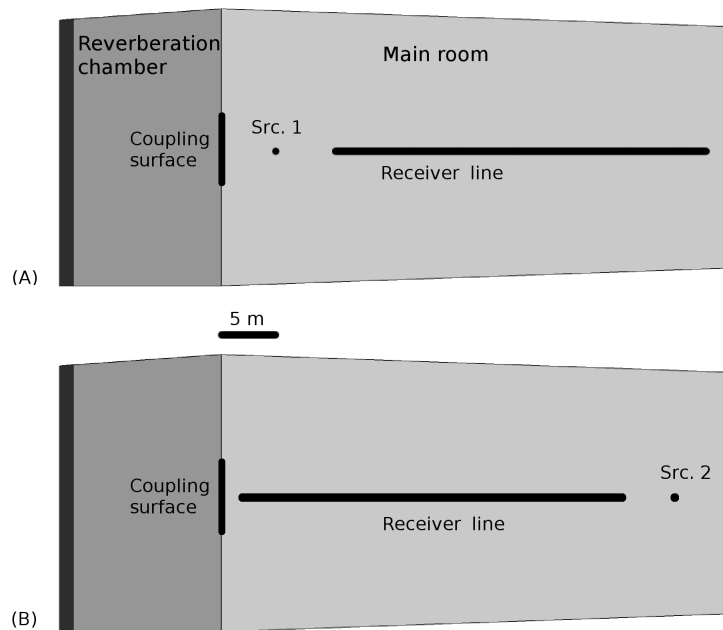


Figure 3.18: Floor plan of the geometry used for ray-tracing simulation and measurements in the 1:20 scale model. Src. 1 & Src. 2 are presented in plans (A) & (B) respectively. Coupling area is represented by a thick line on the separating wall. The large dark lines at the end of each room represent the tilted walls which are not exactly vertical in order to avoid flutter echoes. Opposite boundaries present an angle of 2° .

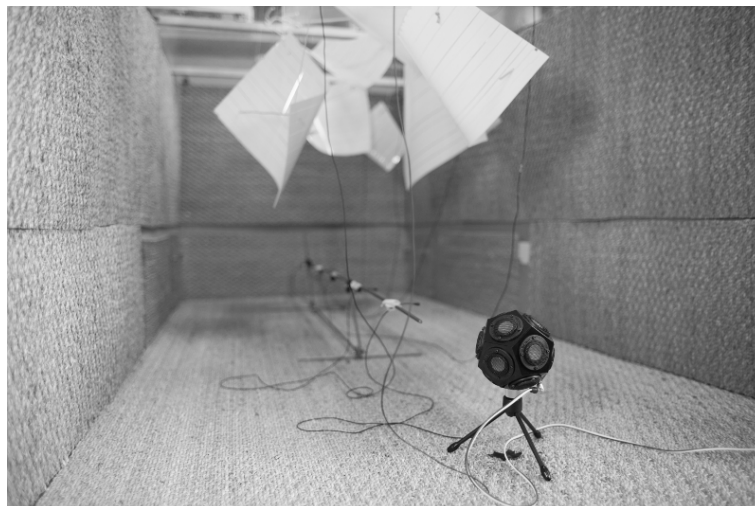


Figure 3.19: Photograph of the main room of the scale model with the miniature dodecahedron source at Src. 1 and the microphone alignment.

Sound energy decays

Figure 3.20 shows the temporal energy decay curves estimated by the proposed analytical model as well as those from measurements and numerical simulations for the two sound source positions, individually normalized. In both cases, the second slope increases in level with increasing source-receiver distance (from darker to lighter curves). Furthermore, the main difference observed by the change of source position is the variation in late energy decay levels. If the source is placed near the coupling area (upper row in Fig. 3.20), the second slope of the energy decay curves obtained along the line of receivers lie within a range of 10 dB of dynamics. This range of levels is much greater if the source is placed at the opposite side of the room (lower row in Fig. 3.20). This difference of dynamics can be explained by the time required for sound energy to reach the chamber from source position 1 or 2 and then to reach receivers from the chamber. As previously observed, the time and level at which the second slope appears depends on the relative positions of the source, the receiver, and the coupling area. Thus at Src. 1, the sound enters the chamber after a short duration and then reaches the receivers with a certain time delay, according to source-receiver distance. The direction and time delay of arrival of the sound corresponding to early and late reverberation is the same for each receiver, making the decays similar as in the upper row of Fig. 3.20. In contrast, at Src. 2, the closest receiver from the source is the furthest from the coupling area. Thus, time delay between arrivals of the direct sound and the late reverberation is long for this receiver, providing more time to the first decay before the arrival of the second longer decay rate. For the opposite receiver, the direct sound arrives later and the late reverberation relatively earlier, making its first slope much shorter, as observed in the lower row of Fig.3.20. In addition, one can observe that the direct sound is stronger in ray-tracing simulations than in the analytical model and measurements, by 5 to 8 dB, whereas all series of decays were treated in the same manner.

Acoustical parameters

These energy decay curves have been analyzed using the previously mentioned Marching Line method which estimates acoustical parameters adapted to multi-slope decays. Figure 3.21 shows the results for early and late decay times (DT_1 and DT_2) as well as the bending point time and level (BP_t and BP_L) for each receiver. Decay times are difficult to analyze precisely on the jagged energy decays obtained from measurements and simulations. Results present a degree of variability between successive receivers while no particular tendency is found. Table 3.3.3.4.b shows the standard deviation for the series of acoustical parameters and the numerical simulations appear to be more variable than measurements, particularly for DT_1 and DT_2 . Standard deviation for the analytical model is lower, as compared to measurements and ray-tracing simulations. The analytical model presents almost constant decay times over all receivers because its temporal decay rates, governed by the argument of the temporal decaying exponential in Eq. (3.41), are based on the classical statistical theory for which the temporal decay rate is homogeneous throughout the volume and depends on architectural parameters only.

Bending point results show different trends depending on source position. While the bending point does not vary much in the time-level space when the sound source is near the coupling area

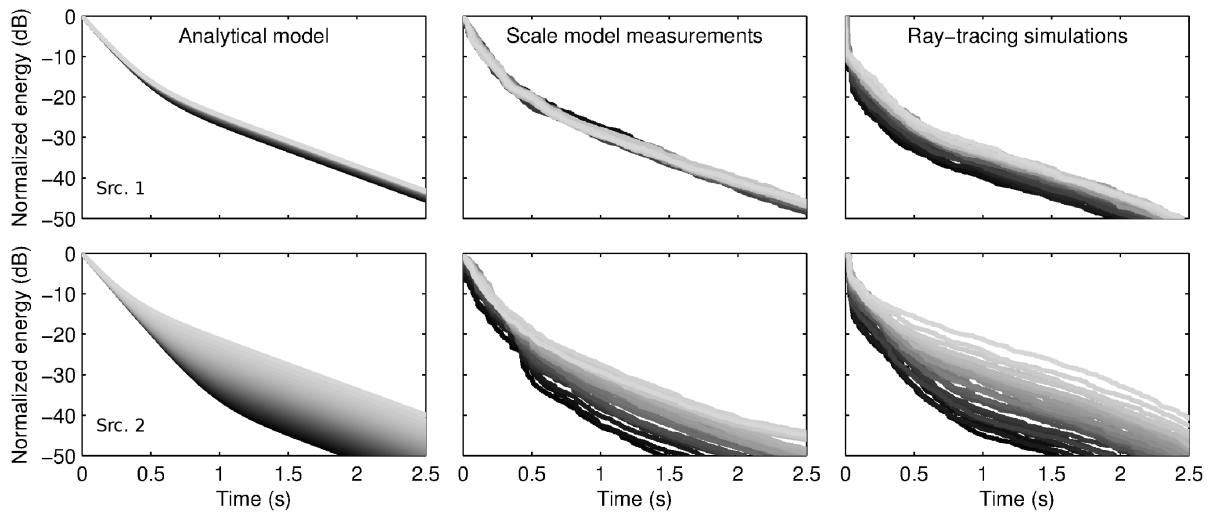


Figure 3.20: Time-energy decay curves in the 500 Hz octave band from the analytical model, measurements in the scale model, and ray-tracing simulations. Darker curves represent receivers near the sound source and the lighter the curve, the greater the source-receiver distance. Top row: source near the coupling area (Src. 1). Bottom row: source on the side opposite to the coupling area (Src. 2).

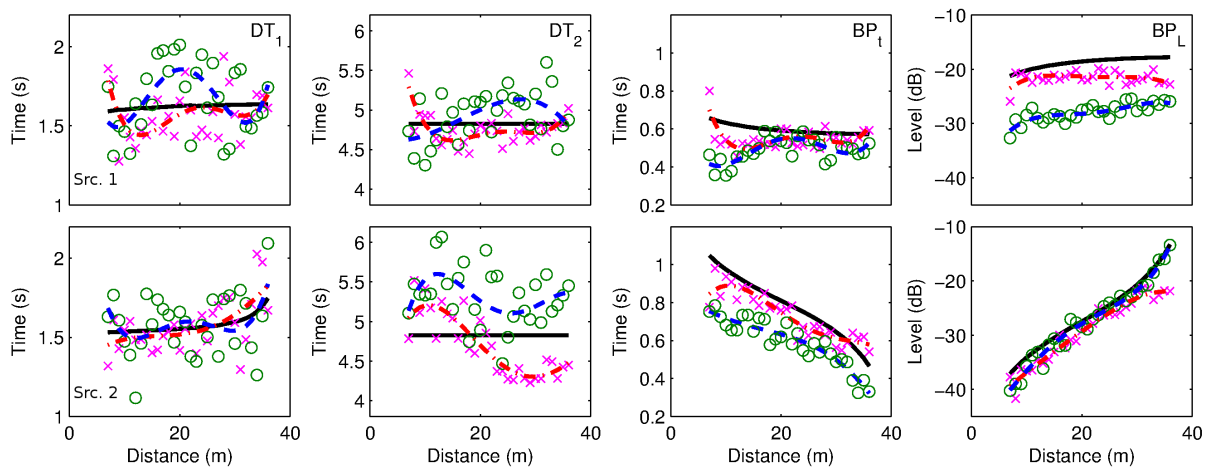


Figure 3.21: (Color online) Acoustical parameters in the 500 Hz octave band at each receiver position from the analytical model (solid line), measurements in the scale model (\times), and ray-tracing simulations (\circ). Fourth order polynomial fits are presented as dash-dot lines for measurements and as dashed lines for simulations. DT_1 and DT_2 are the decay times of the early and late slopes of curved sound decays, BP_t and BP_L are the bending point time and level respectively. Top row: source near the coupling area (Src. 1). Bottom row: source on the opposite side to the coupling area (Src. 2).

	DT ₁ (s)	DT ₂ (s)	BP _t (s)	BP _L (dB)
Src. 1 - Source near coupling area				
Model	0.01	0.00	0.02	0.96
Measurements	0.16	0.19	0.06	1.18
Simulations	0.22	0.31	0.06	1.63
Src. 2 - Source opposite to coupling area				
Model	0.05	0.00	0.15	6.31
Measurements	0.16	0.39	0.12	5.69
Simulations	0.19	0.38	0.12	6.96

Table 3.5: Standard deviation of acoustical parameters over all 30 receivers for Src. 1 and Src. 2 (Fig. 3.21) from the analytical model, measurements, and ray-tracing simulations.

(Src. 1), strong variations have been observed when the source is placed at the opposite end of the room (Src. 2). The trend observed in Fig. 3.20 is confirmed by acoustical parameters in Fig. 3.21 and a certain agreement is found between the proposed model, measurements, and ray-tracing simulations, especially for estimation of the bending point level, as shown in Tab. 3.3.3.4.b, where *rms* deviations for the acoustical parameters are presented. BP_t of the analytical model is generally above values of measurements and simulations, except at the furthest receivers in the scale model, and follows the same decreasing tendency at Src. 2. This means that the second slope appears later for the analytical model. The arrival time of second slope is determined by its initial level, the decay rate being estimated by Sabine’s theory. Hence the observed time delay might be due to the initial level estimation in each room which is based on distances between the source, receiver, and coupling area. The latter is considered as a point source, placed at the center of the modeled coupling area. The observed discrepancies for BP_t might be due to a slight overestimation of spatial decrease of sound energy. In addition, BP_L results are in good agreement, especially for the analytical model and ray-tracing simulations in configuration Src. 2. In configuration Src. 1, the bending point is found at lower level for simulations than measurements and the analytical model because of the stronger direct sound, observable in Fig. 3.20, which lowers the decay curves by about 10 dB. This level corresponds to the difference observed in BP_L values. The *rms* deviation values in Tab. 3.3.3.4.b show that the closest couple within the triplet analytical model / measurements / numerical simulations is “Mod./Meas.” for Src. 1 and “Sim./Mod.” or “Mod./Meas.” for Src. 2 depending on the parameter. This confirms the visual information in Fig. 3.21: results from the analytical model lie between the ones from measurements and numerical simulations, which tends to validate the use of this model in coupled volume geometry.

Total energy

Total sound energy can be calculated at each receiver position as the sum of squared sound pressure of the whole impulse response. In order to compare impulse responses from measurements

	DT ₁ (s)	DT ₂ (s)	BP _t (s)	BP _L (dB)	E (dB)
Src. 1 - Source near coupling area					
Mod./Meas.	0.17	0.20	0.08	3.19	0.8
Sim./Meas.	0.31	0.42	0.11	6.55	0.9
Sim./Mod.	0.22	0.32	0.13	9.23	0.5
Src. 2 - Source opposite to coupling area					
Mod./Meas.	0.14	0.41	0.09	3.40	1.3
Sim./Meas.	0.26	0.74	0.16	3.02	1.7
Sim./Mod.	0.18	0.61	0.20	1.73	0.7

Table 3.6: *rms* deviation of acoustical parameters (Fig. 3.21) and total energy (Fig. 3.22) between couples of the triplet analytical model (Mod.) / measurements (Meas.) / ray-tracing simulations (Sim.) over all receivers.

and ray-tracing simulations with the analytical model which does not provide impulse responses but energy decay curves, the total sound energy is estimated as follows, based on the reverse integrated curve (RIC):

$$E(\mathbf{r}) = 10 \log_{10} \left(\int_0^{\infty} RIC(\mathbf{r}, t) dt \right), \quad (3.53)$$

where the *RIC* can be either energy density from the model or backward integration of squared sound pressure of impulse responses from measurements and ray-tracing simulations. The *rms* deviations presented in Tab. 3.3.3.4.b for comparison of two elements of the triplet analytical model / measurements / ray-tracing simulations are on the order of 1 dB. The lowest differences are found in configuration Src. 1 where *rms* deviation values are inferior to 1 dB. For both Src. 1 and Src. 2, the analytical model is closer to numerical simulations in terms of *rms* deviation. The spatial energy decay is presented in Fig. 3.22 for both sound source positions. Results cannot be compared to Barron's Revised Theory [Barron and Lee, 1988] because the latter is only valid for single uncoupled enclosures as it does not account for the amount of energy returned from the chamber back to the main room. The energy evolution as a function of distance is similar between the analytical model and numerical simulations with curved profiles while measurements present a linear evolution in configuration Src. 1. The behavior of sound energy is also different for receivers distant from the source in configuration Src. 2, which are close to the chamber. Energy returned back from the chamber in this area, where energy fluxes cross [Pu et al., 2011] and diffraction phenomenon is likely to happen near the coupling area edges, is modeled by different methods and leads to different results.

3.3.3.4.c Coupling area variation

Several sizes of aperture have been tested in order to compare the analytical model with measured and simulated data. The coupling area can be expressed in terms of percent of the inner surface of the main room as well as in percent of the separating wall between the main

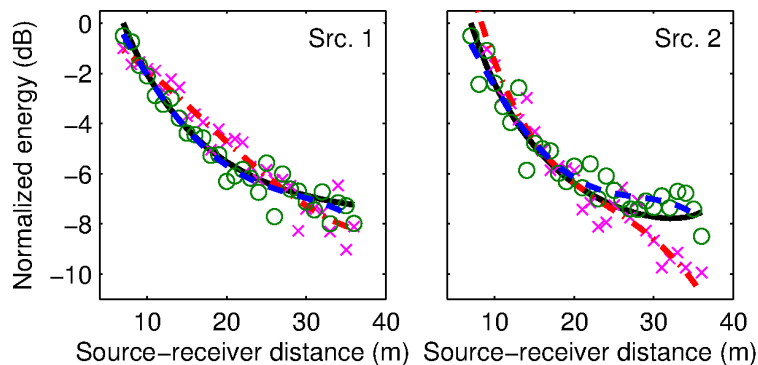


Figure 3.22: (Color online) Total energy at each receiver position for the analytical model (solid line), measurements in the scale model (\times), and ray-tracing simulations (\circ). Fourth order polynomial fits are presented as dash-dot lines for measurements and as dashed lines for simulations. Src. 1 stands for the source position near the coupling area and Src. 2 for the source being on the opposite side to coupling area.

room and the reverberation chamber. Two sizes of aperture were tested in the scale model, such that $S_c = 0.5\%$ and 1% of the main room surface area S_1 . Larger coupling areas have been implemented with the proposed model as well as with ray-tracing to extend the tested range up to $S_c/S_1 = 4\%$. The source was 5 m from the coupling area and 5 m to the side of the central axis of the room, at coordinates ($X = 5; Y = 17$). A total of six receivers were placed along the line shown in Fig. 3.18 at 6 m steps, the first receiver being 7 m from the sound source. Source-receiver distances varied from 7 m to 37 m.

Figure 3.23 shows that smaller coupling areas lead to temporal energy decay curves (darker curves) with two distinct slopes of different decay rates, the second slope appearing at lower level, between -20 dB and -30 dB in this example. In contrast, larger coupling areas induce decay curves (lighter curves) with slopes similar to each other, having bending points at higher levels. Increasing the coupling area asymptotically would lead to a large single volume, providing a straight energy decay curve, with a possible slight double slope because of the inhomogeneity of absorbing material distribution throughout space [Barron, 2011]. Decreasing the coupling area asymptotically would create a smaller single volume room.

Quantification of those decay curves is presented in Fig. 3.24 and in Tab. 3.3.3.4.c, showing the range of variation of acoustical parameters as a function of coupling area, essentially for the model and ray-tracing simulations since measurements were performed for only two of the coupling areas. The early and late decay times (DT_1 and DT_2), averaged over the six receiver positions in Tab. 3.3.3.4.c, show various tendencies. While coupling area is increasing, DT_1 increases and DT_2 decreases. A total amplitude of variation of 0.8 s and 2.1 s for the analytical model, and 0.7 s and 2.8 s for ray-tracing simulations respectively, while coupling area is changed. Considering the smallest values, relative variations of 50% and 39% are obtained for DT_1 ; 64% and 86% for DT_2 , for the analytical model and ray-tracing simulations respectively. These relative variations are much higher than the perceptual threshold for reverberation time above 1 s reported by Seraphim [Seraphim, 1958] for single slope reverberation, which is 5% of a given

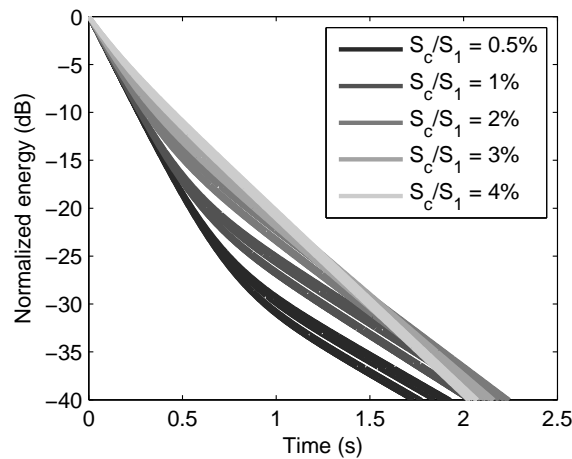


Figure 3.23: Temporal energy decays for various coupling area conditions from 0.5% to 4% of the main room surface, from the analytical model.

RT value. Hence the change in the sound field induced by such modifications of coupling area is certainly audible and can be used to change the audible environment. In Fig. 3.24 the analytical model, measurements, and numerical simulations generally follow the same trends. However, certain discrepancies are found, as for DT_1 with smaller coupling area. The analytical model and measurements increase but the simulations decrease before increasing and joining the model. Measurements increase slightly in DT_2 whereas simulations and the model decrease. Concerning measurements, some of these discrepancies might be due to the small number of tested coupling areas. The smallest coupling area can be an issue regarding modeling methods, for example ray-tracing simulations which rely on a finite number of rays to enter such a small aperture.

Bending point time and level are also modified by the coupling area changes. Increasing the coupling area causes the bending point time to arrive earlier and the bending point level to be higher (Fig. 3.24). This variation pattern has been observed with the source-receiver distance variations in Fig. 3.21 while decay times did not vary much since global absorption was unchanged in the rooms. In fact, changing the coupling area modifies the wall surface in each room and thus alters inner absorption. Therefore, decay times for each receiver are more varied by changing the coupling area than modifying the source-receiver distance. BP_t shows particularly good agreement, both in terms of low *rms* deviations and evolution tendency. The latter is also true for BP_L , although measurements are found at lower levels. In addition, it has been noticed that parameter values at $S_c/S_1 = 1\%$ might correspond to those presented in the previous section, where this coupling area was used. However, the observed parameter values are not exactly similar. The differences might be due to the change of source position, which modifies the distance between source and coupling area and more generally alters the distribution of sound reflections within the space.

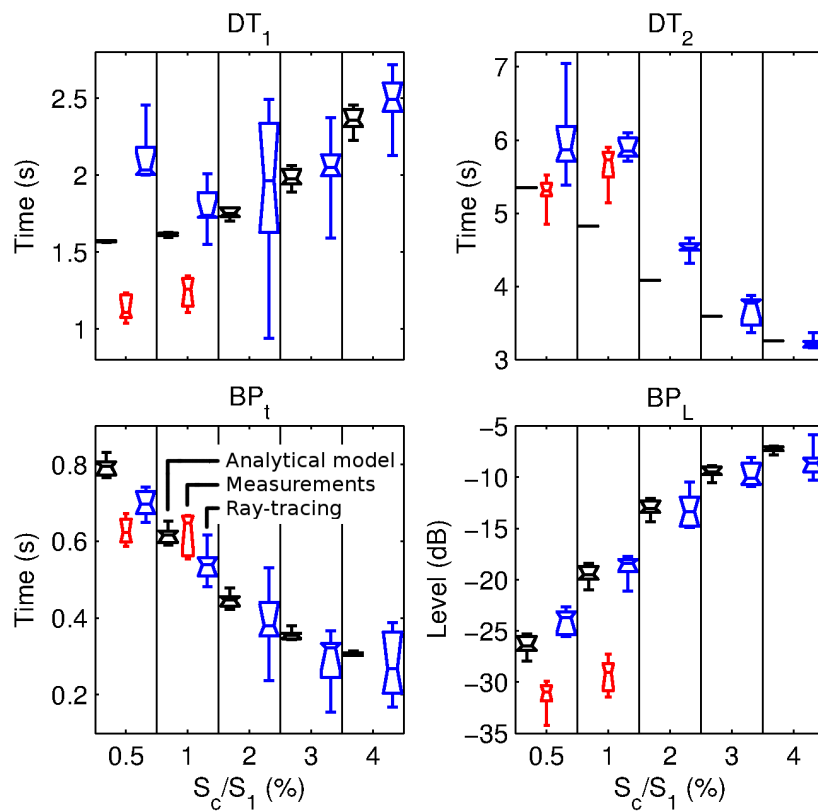


Figure 3.24: (Color online) Boxplots of acoustical parameters in various coupling area cases from 0.5% to 4% of the main room surface, i.e. each column, from the analytical model (left), scale model measurements (center), and ray-tracing simulations (right), calculated from the energy decay curves in Fig. 3.23. Measurements were performed only for $S_c/S_1 = 0.5\%$ and 1% .

S_c (m ²)	22.8	45.6	91.2	136.8	182.4
S_c/S_1 (%)	0.5	1	2	3	4
S_c/S_w (%)	5	11	21	32	42
Analytical model					
DT ₁ (s)	1.6	1.6	1.8	2.0	2.4
DT ₂ (s)	5.4	4.8	4.1	3.6	3.3
BP _t (s)	0.79	0.62	0.45	0.36	0.31
BP _L (dB)	-26.4	-19.5	-13.1	-9.5	-7.3
Measurements					
DT ₁ (s)	1.1	1.2			
DT ₂ (s)	5.3	5.6			
BP _t (s)	0.63	0.63			
BP _L (dB)	-31.4	-29.3			
Ray-tracing simulations					
DT ₁ (s)	2.1	1.8	1.9	2.0	2.5
DT ₂ (s)	6.0	5.9	4.5	3.7	3.2
BP _t (s)	0.70	0.54	0.39	0.29	0.28
BP _L (dB)	-24.1	-18.8	-13.2	-9.8	-8.5

Table 3.7: Acoustical parameters averaged over the six receiver positions, for various coupling areas. $S_1 = 4560$ m² is the total surface area of the main room, $S_w = 432$ m² is the area of the separating wall between the main room and the reverberation chamber.

3.3.3.5 Discussion

The comparison between configurations Src. 1 and Src. 2, a symmetric permutation of source and receivers, have more significant effects than possibly obtained in the same room with no opened coupling area, where both configurations would be almost symmetric. Hence, the variation of acoustical quality can be important depending on the relative position of source, receiver, and coupling area. It is possible to adjust the degree of sound field homogeneity throughout the space by opening a coupling area near (Src. 1) or far (Src. 2) from the source. In addition, changing the coupling area modifies the sound field behavior: decay rates and bending points are changed. As a general tendency, the larger the coupling area, the less the coupling effect with energy decays becoming less curved. While small apertures provide two distinct slopes with low early decay time and low bending point level, corresponding to high clarity and low reverberance, large apertures provide early and late decay times close to each other, producing lower clarity and higher reverberance. Investigations focused on two configurations Src. 1 and Src. 2 and it would be interesting to test a situation where the source, the receivers, and the coupling area are not aligned, e.g. with the coupling area placed on a side wall, as often encountered in real concert halls. This might lead to other patterns of acoustical parameter variation over the series of receivers.

Comparing the proposed analytical model with other methods for estimating coupled sound fields characteristics, e.g. ray-tracing used in this study or finite element method used in previous research [Valeau et al., 2006], leads to several advantages and drawbacks. The room's geometry is taken into account through the diffusion coefficient which depends on the mean free path. This description of the space is less accurate than ray-tracing but contributes to the fact that the proposed method requires much shorter calculation times. Frequency dependence is found in the definition of absorption coefficients, in the same manner as for ray-tracing method, but contrary to wave-based methods where complex wall impedance has to be implemented. Calculation of impulse responses at every position in the space is not required since a solution equation is used as opposed to a differential equation and concerns relative to mesh setup encountered in wave-based methods are avoided. Certain physical details can be missed since the method is based on statistical acoustics, which considers global absorption, and diffraction does not appear in the proximity of edges. Although distance between source, receiver, and coupling area is taken into account, distance from a receiver to the walls does not influence the results, which can be an issue in certain cases. However, the comparisons performed here show that the proposed model provides a level of reliability comparable to the ray-tracing method for $S_c/S_1 > 2\%$ and it would be interesting to conduct further comparisons with wave-based methods. The range of available coupling area in real halls being up to 10% of the main room surface area or more, the average used coupling area is larger than 2% in order to let a sufficient amount of sound energy enter the chamber. Hence, the range of coupling area where comparisons are in agreement in this study meets the used range in real coupled volume concert halls.

In the proposed model, a coupling area is represented as a point, alternatively receiver and secondary source. This representation can be an issue when the coupling area is large as compared to the distance to the primary source or to the receivers. An alternative modeling

would consist in discretizing the surface by a number of distributed points which receive and return sound energy from a room to the other. This coupling area modeling would be closer to reality in coupled volume concert halls, where the coupling area is composed of several doors, opened next to the other.

Possible applications of the proposed analytical model are mainly prediction tools for acoustical designers who build spaces as well as people who use the spaces, e.g. concert hall managers. These can consist in quantifying sound fields in coupled volume concert halls or sound levels in large factories with noisy engines in several connected rooms. However, since statistical acoustics is used, the proposed analytical model can be applied to large volumes only, where the Schroeder frequency [Schroeder and Kuttruff, 1962] is low, and does not allow for considering modal behavior in smaller volumes, such as recording studios. One can also imagine using this model to generate room impulse responses with varying position and coupling details, and performing auralizations in virtual coupled spaces, which could be used in architectural design and virtual reality applications for providing realistic real-time behavior at a low computational cost.

3.3.3.6 Conclusion

The proposed model of sound energy behavior adapted to coupled spaces allows for estimating both temporal and spatial components of sound fields. Accounting for architectural data, this model based on the diffusion equation enables estimation of sound energy levels under steady state excitation at any point within the considered space as well as temporal sound energy decays corresponding to stopped source excitation. This model has been compared to scale model measurements and ray-tracing simulations for validation. Comparisons were performed on acoustical parameters which describe multi-slope energy decays as well as total energy level. Several acoustical issues are tested with the three different methods: the influence of distance between sound source, receiver, and coupling area as well as coupling area variations. Through *rms* deviation analysis, the analytical model was generally found to lie between measurements and ray-tracing simulations in the generally used range of coupling area, showing a sufficient level of reliability and accuracy to handle the general prediction of sound field behavior in coupled spaces.

Further research includes testing various conditions of sound absorption in each room in order to study the influence of initial individual reverberation time on the coupled impulse response. Furthermore, an implementation of more general cases could be performed, with several coupling areas between the main room and different reverberation chambers.

Acknowledgments

The authors would like to thank Renaud Leblanc-Guindon for the scale model measurements and Philippe Néméh for the photograph of the scale model.

3.3.4 Bilan

Les différents modèles utilisés pendant ce travail de thèse ont permis de mettre en évidence certains aspects du comportement acoustique des salles à volumes couplés, liant l'architecture de la salle aux indices acoustiques des réponses impulsionnelles. Il apparaît généralement qu'une modification de l'architecture entraîne un changement de plusieurs indices acoustiques permettant de décrire la réponse impulsionnelle : temps de décroissance DT_i et les coordonnées du point de double pente BP_t et BP_L . Une liste non exhaustive des liens identifiés entre modifications architecturales et conséquences sur l'acoustique de la salle est proposée dans le Tableau 3.3.4. Généralement, l'absorption globale de la salle principale et de la chambre de réverbération pilotent le taux de décroissance des pentes précoce et tardive respectivement. La géométrie de la salle, la taille de surface de couplage, ainsi que les positions relatives de la source, des récepteurs et de la surface de couplage commandent la proportion d'énergie tardive par rapport à l'énergie précoce, autrement dit la position du point de double pente dans l'espace temps-énergie. D'autre part, la Figure 3.20 de l'article précédant ce bilan montre que la position relative de la source et de la surface de couplage influence l'homogénéité du champ acoustique dans la salle. En effet, lorsque la source sonore est proche de la surface de couplage, le champ acoustique est plus homogène que lorsque la source et la surface de couplage sont éloignées.

Modification de l'architecture	Conséquence(s) sur l'acoustique
Absorption globale de la salle principale.	La pente précoce (liée à DT_1) est modifiée en conséquence. Lorsque l'absorption augmente dans la salle principale, DT_1 diminue. Cela implique un changement du point de courbure (BP_t et BP_L).
Absorption globale de la chambre de réverbération.	La pente tardive (liée à DT_2) est modifiée en conséquence. Lorsque l'absorption augmente dans la chambre de réverbération, DT_2 diminue. <i>A priori</i> cela ne change pas les autres indices acoustiques.
Géométrie de la salle, à absorption globale constante pour chaque salle.	Les pentes précoce et tardive ne sont <i>a priori</i> pas modifiées. Par contre, la modification éventuelle du volume et des surfaces de la salle peut en changer la valeur de libre parcours moyen et des durées nécessaires au transfert d'énergie entre les salles. Plus le libre parcours moyen est long, plus cette durée augmente. Cela peut impliquer un déplacement du point de courbure (BP_t et BP_L).
Surface de couplage.	Cela modifie les surfaces absorbantes de chaque salle, donc ce changement induit une modification des taux de décroissance (DT_1 et DT_2). Lorsque la surface de couplage augmente, le volume double tend à devenir un volume unique, donc la décroissance tend vers une droite, ce qui implique une augmentation de DT_1 et une diminution de DT_2 . Par ailleurs, les proportions d'énergie précoce et tardive étant modifiées, cela change aussi la position du point de courbure (BP_t et BP_L) qui a tendance à "remonter" lorsque la taille de la surface de couplage augmente, autrement dit BP_L augmente alors que BP_t diminue. Cette évolution est visible sur la Figure 9 de l'article précédant ce bilan.

TABLE 3.8 – Tentative d'établissement de liens entre modification de l'architecture de la salle et conséquences sur l'acoustique.

3.4 Auralisation

L'auralisation est une méthode qui permet de placer un auditeur dans un espace virtuel en lui restituant les caractéristiques acoustiques du lieu. Utilisée principalement dans les applications de réalité virtuelle et dans le design architectural, l'auralisation peut être mise en œuvre par différents moyens. Le principe de base est de synthétiser une réponse impulsionnelle du lieu considéré afin de convoluer cette dernière avec un son anéchoïque. La difficulté réside essentiellement dans la synthèse des réponses impulsionnelles et leur utilisation en temps réel pour arriver à une restitution fluide permettant des déplacements dans l'espace en question. Cette opération a pour finalité l'immersion subjective d'un auditeur dans un espace acoustique virtuel. Cette partie du travail, basée sur le modèle de décroissance sonore présenté dans l'article précédent a pour objectif d'y contribuer dans le cadre des espaces couplés.

3.4.1 Auralisation par le modèle de diffusion

Le travail présenté dans cette Section se place comme une transition entre le modèle analytique de décroissance de l'énergie sonore permettant de décrire un champ acoustique dans des espaces couplés et la question de la perception de ces champs acoustiques. En effet, la partie de ce travail de thèse qui se concentre sur la perception de la réverbération couplée est présentée dans le Chapitre suivant. Un outil adapté à ces études perceptives est l'auralisation qui permet de créer des environnements acoustiques contrôlés, de façon à ne faire varier qu'un paramètre parmi d'autres et pouvoir tirer des conclusions. Les études perceptives présentées dans le Chapitre suivant utilisent une méthode d'auralisation dont le principe a été appliqué lors d'études précédentes [Moorer, 1979; Frissen et al., 2009; Picard, 2003], qui consiste à appliquer une décroissance temporelle sur du bruit filtré, ce qui a inspiré le modèle d'auralisation présenté dans cette Section, élaboré plus tardivement.

Le modèle basé sur l'équation de diffusion décrit dans la Section précédente qui prend en compte la position de l'auditeur dans des espaces couplés a été utilisé pour synthétiser des réponses impulsionnelles afin de réaliser l'auralisation de ces espaces couplés virtuels. La méthode envisagée est décrite dans l'article intitulé *Auralization of coupled spaces based on a diffusion equation model*, présenté à la conférence *Sound and Music Computing Conference*³.

3. Luizard P.; Polack J.D.; Katz B.F.G. "Auralization of coupled spaces based on a diffusion equation model", Proc. of the Sound and Music Conference, Stockholm, Sweden, 29 July - 3 August, 2013

AURALIZATION OF COUPLED SPACES BASED ON A DIFFUSION EQUATION MODEL

Paul Luizard

LIMSI-CNRS,
Orsay, France &
LAM-D'Alembert,
UPMC Univ Paris 06,
UMR CNRS 7190,
Paris, France
paul.luizard@limsi.fr

Jean-Dominique Polack

LAM-D'Alembert,
UPMC Univ Paris 06,
UMR CNRS 7190,
Paris, France
jean-dominique.polack@upmc.fr

Brian F.G. Katz

LIMSI-CNRS
Orsay, France
brian.katz@limsi.fr

ABSTRACT

Auralization of room acoustics consists in audio rendering based on the sound characteristics of a virtual space. It is defined by Vorländer [1] as “the creation of audible acoustic sceneries from computer-generated data”, as the auditory equivalent of visualization techniques. Auralization is obtained by convolving a room impulse response with an anechoic recording, adding room presence to the reverberation-free excitation signal, providing subjective immersion in the considered space. Since acoustically coupled spaces are encountered in various venues such as large stairways distributing corridors or rooms, naves and side galleries in churches, even crossing streets in dense cities, it becomes interesting to produce accurate auralization in these types of venues. Such coupled room impulse responses can be synthesized using a recently proposed sound energy decay model based on a diffusion equation and adapted to coupled spaces. This paper presents the parametric model of sound energy decay and describes the impulse response synthesis process leading to auralization of coupled spaces.

1. INTRODUCTION

The term auralization has been used since the early twentieth century in the musical community in the sense of “pre-hearing” according to Summers [2]. It was later defined for the room acoustics community by Kleiner et al. [3] as “the process of rendering audible, by physical or mathematical modeling, the sound field of a source in a space”. Thus the process of auralization is artificial and different than real reverberation experienced by a listener in an acoustical space. However it is interesting to create new acoustical environments or even to recreate lost ones, e.g. based on maps and descriptions of buildings which do not exist anymore. According to Lokki et al. [4], auralization process,

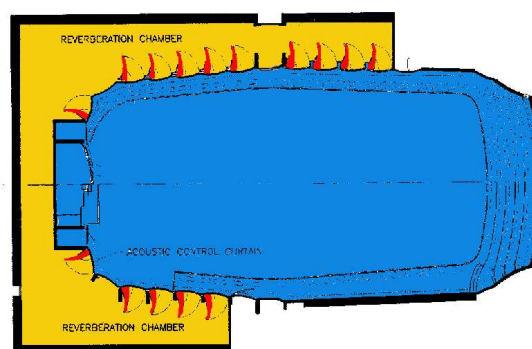


Figure 1. Example of coupled volume concert hall: KKL Lucerne, Switzerland (Top & bottom of the map: 4th and 3rd floors). Blue room: main room with stage and audience; yellow surrounding room: reverberation chamber; red doors: coupling surface. Picture from Beranek [5].

to be indistinguishable from the real auditory environment, requires simulation or reproduction of three issues: directivity of sound sources, sound propagation in a 3-D space, and reproduction of spatial sound. The present study focuses on sound propagation to obtain monaural impulse responses, possibly further adapted for spatialized rendering.

Pioneer studies used sound recording in scale models, played back at lower speeds with respect to the scale factor, as performed by Spandöck [6]. Nowadays computer modeling is often used to generate room impulse responses to be further convolved with anechoic recordings. These operations can be either pre-calculated for a given space or real-time convolution can be performed [7, 8], e.g. using the “waveguide” method [9]. A number of different means to generate impulse responses are available with various advantages and drawbacks in terms of sound quality and computation time. Those methods are either based on wave approach (e.g. BEM or FDTD) for small volumes whose acoustics have modal behavior, geometrical acoustics (e.g. ray-tracing, radiosity), or statistical acoustics for larger volumes. However, results can present important variations from one method to another when ap-

plied to coupled spaces, as shown by Luizard et al. [10]. Therefore, the choice of the employed simulation method is determinant and depends on characteristics of the venue.

Coupled spaces have particular acoustical characteristics due to the energy exchange between several architectural volumes (Fig. 1). A signature of this sort of system is the curved sound energy decay which can present several decay rates as opposed to most single volume rooms. The early decay, presenting a steeper slope than the late part, contributes to give an important sense of sound clarity while the lower late decay rate induces an impression of reverberation, although these concepts are usually antagonistic in single volume rooms. Therefore, coupled volume acoustics is worth being exploited, particularly for theater and music purpose, and auralization is a relevant means to virtually explore acoustically coupled spaces with various goals, e.g. design or entertainment.

This study first presents the proposed analytical model of sound energy decay and its application to coupled spaces, then the auralization process is described from room impulse response synthesis to final audible rendering. Furthermore, suggestions are proposed to improve auralization quality and listener engagement in the virtual room.

2. PARAMETRIC MODEL OF SOUND ENERGY DECAY

Previous research [11, 12] has been conducted in room acoustics to develop analytical models of sound energy decay in order to predict sound field behavior in various spaces. The present model is based on a diffusion equation under the hypothesis that sound behaves as moving particles in a uniformly scattering medium, as proposed by Ollendorff [13] who introduced the use of diffusion equation to model acoustic phenomena. The diffusion equation (eq. (1)) is expressed in terms of sound energy density $w(\mathbf{r}, t)$ and is composed of four terms: a temporal derivative, a spatial derivative (Laplace term), an absorption term, and a source term with acoustical power F . Considering source-receiver distance \mathbf{r} allows for estimating energy variation throughout the reverberant space.

$$\frac{\partial}{\partial t} w(\mathbf{r}, t) - D \nabla^2 w(\mathbf{r}, t) + \sigma w(\mathbf{r}, t) = F(\mathbf{r}, t) \quad (1)$$

Introducing the mean free path between two successive collisions $\lambda = \frac{4V}{S}$ makes it possible to express statistical quantities which influence the behavior of sound field, depending on architectural parameters such as the room volume and surface. Coefficients D (eq. (2)) and σ (eq. (3)) are related to sound diffusion and absorption, respectively:

$$D = \frac{\lambda c}{3} = \frac{4Vc}{3S}, \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{c\bar{\alpha}}{\lambda} = \frac{c\bar{\alpha}S}{4V}, \quad (3)$$

where c is the speed of sound, $\bar{\alpha}$ is the mean absorption coefficient, V and S are the volume and surface of the room.

The proposed solution to eq. (1) is a heuristic approximation which accounts for two different regions

defined within the considered space, namely the near and far fields, with a continuous transition from one another. In the neighborhood of the source, the sound energy decays with source-receiver distance (first term of the sum) until being less spatially dependent and becoming homogeneous enough to be associated to the concept of diffuse sound field as defined by Sabine [14] in the classical statistical theory (constant term of the sum). Coefficients defined in eqs (2 & 3) are part of this statistical model. Nevertheless, this expression is exact in steady state condition and for homogeneous energy decay as described by Sabine, asymptotically far from the sound source.

$$w(\mathbf{r}, t) = \left(\frac{a}{r} e^{-\sqrt{\frac{\sigma}{D}} r} + b \right) e^{-\sigma t} H(t), \quad t > \frac{r}{c}. \quad (4)$$

Function H is the Heaviside step function representing the fact that sound decay is described from the instant the direct sound reaches the receiver position at distance r from the source.

This model (eq. (4)) can be calibrated with respect to room characteristics by adapting its parameters a and b . The latter express the relative importance of spatially decaying sound energy as compared to homogeneous energy through space, governed by a and b respectively.

3. APPLICATION TO COUPLED SPACES

This sound energy decay model can be adapted to coupled spaces in combination with classical statistical theory [15, 16], allowing for simulation of various source-receiver configurations and coupling surface settings, whereas the classical theory does not consider sound level variations within a given subspace. Hence using this model provides finer estimation of sound fields in coupled spaces. First, initial uniform sound levels are estimated in each room for steady state conditions, governed by parameter b . The concept of coupling factor k_i is used to estimate the initial sound level in the reverberation chamber such that

$$\begin{cases} w_{1_0} = \frac{4P}{c\bar{\alpha}_1(S_1 + S_c)}, \\ w_{2_0} = k_2 w_{1_0} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\text{with } k_2 = \frac{S_c}{\bar{\alpha}_2(S_2 + S_c)}, \quad (6)$$

where P is the sound power, S_c is the coupling surface area, and subscripts 1 & 2 refer to the main room and chamber respectively. Then the spatially dependent energy is added, governed by parameter a . Finally, the sound energy emitted from the chamber is introduced with respect to the distance between the coupling surface and the receiver, considering the coupling surface as a secondary sound source. This process allows for estimating sound energy density and creating curved energy decays at any receiver position in the main room, according to the characteristics of the rooms.

An example, whose geometry is shown in Fig. 2 and specifics are detailed in Table 1, is performed in quasi-rectangular coupled spaces, the main room being larger but more damped than the reverberation chamber

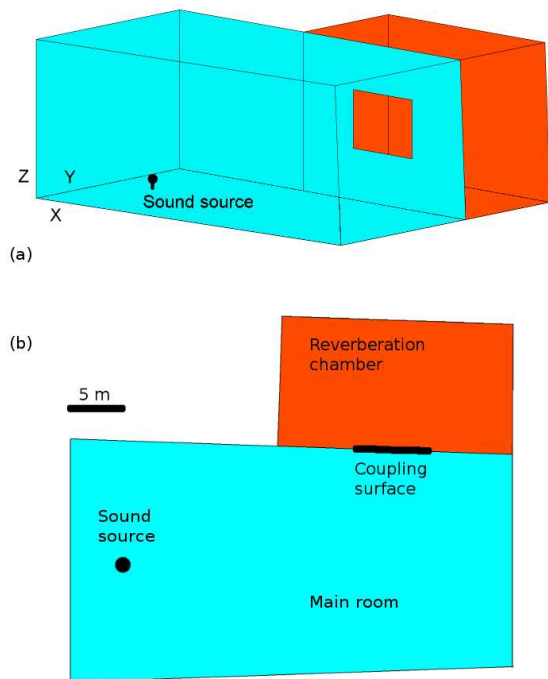


Figure 2. (a) View of the coupled room simple geometry used as example. The large blue room on the left is the main room and the orange room behind it is the reverberation chamber. (b) Floor plan of the same geometry.

such that reverberation time (RT) at mid-frequencies is larger in the latter. Opposite walls are slightly angled in order to avoid flutter echoes. Fig. 3 represents the sound energy density estimated on the ground floor in the main room of coupled volumes. Spatial variations are in the range of 15 dB between the source peak and the lowest energy in the room. The second peak next to a wall corresponds to the energy emitted from the chamber back in the main room.

Considering receivers along a line through the room length, on the axis such that $Y = 12$ m on Fig. 3 with 1 m-step from one another, Fig. 4 shows the temporal energy decays with increasing source-receiver distance. Darker decays stand for receivers nearer the sound source

	Main room	Reverberation chamber
Length (m)	44	14
Width (m)	24	24
Height (m)	18	18
Surface (m ²)	4560	2040
Volume (m ³)	19000	6050
$\bar{\alpha}$	0.55	0.1
RT (s)	1.2	5.0

Table 1. Architectural and acoustical specifics of the geometry shown in Fig. 2 for each separate room, i.e. without the coupling surface.

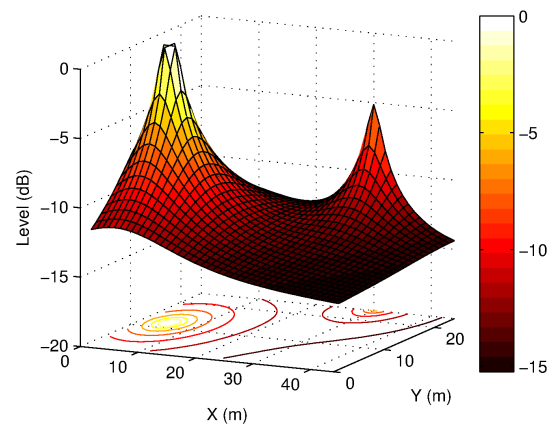


Figure 3. Illustration of the output of the model in the case of 2 coupled rooms shown in Fig. 2: sound energy density in the main room. The highest peak corresponds to the sound source on stage, the other one is due to the sound emitted back from the reverberation chamber. Lines on the horizontal plane represent equal energy levels as vertical projections.

while lighter ones represent distant receivers. The curvature point appears at different levels under the initial level for various receiver positions, such that the further the receiver, the higher the decay curve. This means that the second slope, or late reverberation, appearing earlier and louder, has stronger effects on distant receivers than on ones nearer the sound source. The energy decay given by classical statistical theory, which is the same at every receiver position since no spatial variation is considered, appears as the blue dotted line. Fig. 4 represents normalized decays and distant receivers can provide decay curves with late decay levels above the reference one.

A line of receivers different than the one considered above would lead to different results both in terms of total energy variation, as can be imagined from Fig. 3, and in terms of temporal decays because the room configuration is not symmetrical, with the coupling surface on one lateral side. This observation underlines the fact that sound energy decays, and thus impulse responses, generally vary throughout a given space, making it interesting to be able to generate auralization accounting for those differences. Hence using this proposed statistical model which is distance dependent leads to more precise results than the classical statistical model.

4. FROM SOUND ENERGY DECAYS TO IMPULSE RESPONSES

Auralization is based on an anechoic sound convolved with an impulse response. The present study deals more specifically with room impulse responses which add reverberation to the dry signal to give it a certain room presence. A room impulse response is the temporal equivalent of a transfer function of the room. It is composed of sound reflected on the walls and received at a specific position.

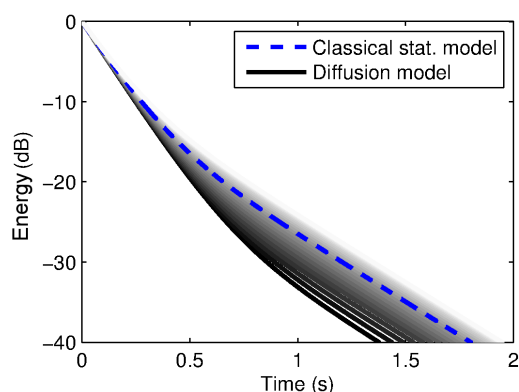


Figure 4. Normalized sound energy decays along the line such that $Y = 12$ m in Fig. 3, i.e. the center line of the main room, for various source-receiver distances $5 < r < 25$ m. Darker decays (below) correspond to small r while lighter decays (above) correspond to more distant receivers. The dotted line represents the classical model by Cremer et al. [16].

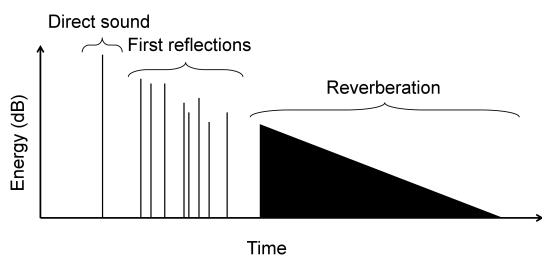


Figure 5. Schematic representation of a room impulse response in single volume.

An illustration of such a signal is shown in Fig. 5. The previously proposed model of sound energy decay can be used to synthesize room impulse responses using various processes. The idea is to apply the given energy decay to pre-filtered noise in order to obtain the reverberation part of impulse response (top of Fig. 6). An inverse Fourier transform of this decaying noise produces the temporal impulse response (bottom of Fig. 6). This sort of process has been used in previous research for perceptual experiments whose purpose was to estimate Just Noticeable Differences (JND) of single and double-slope reverberation from single and coupled spaces, allowing to change decay rates easily while keeping temporal distribution and frequency content unchanged. Frissen et al. [17] applied energy decays to a normally distributed random number sequence and Picard et al. [18] applied energy decays to pink noise.

Refinements can be performed along two different dimensions: the temporal or spectral distribution of energy. Measured room impulse responses show different trends along temporal segments. As can be seen in Fig. 5, the first part of received energy is the direct sound, then the first reflections from the walls and ceiling reach the listener before the density of reflection becomes too high

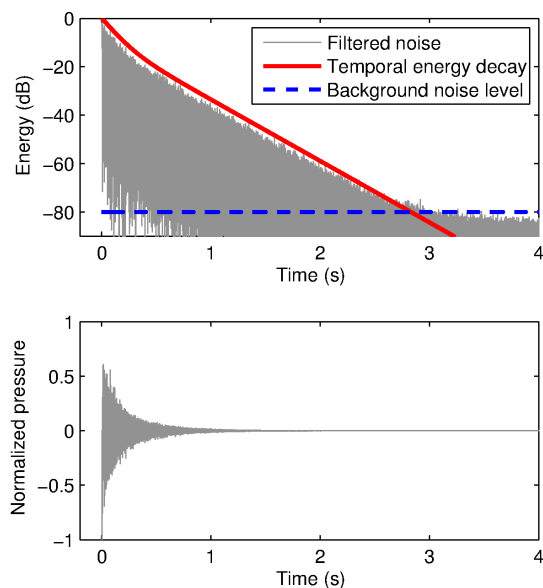


Figure 6. Impulse response synthesis process. Top: Decay curve applied to pre-filtered noise. Bottom: Resulting impulse response in linear amplitude scale.

to be considered as discrete, which is called reverberation. Hence simulated room impulse responses should include direct sound and possibly early reflections, which have been proved by Barron [19] to be perceptually influential, in order to sound more realistic. Fig. 7 shows the steps to construct impulse responses with reverberation only, added early reflections, and direct sound. While the room geometry is responsible for intensity and time of arrival of early reflections, intensity of direct sound relative to the rest of impulse response corresponds to the source-receiver distance. Therefore, adding the described steps can be seen as accounting for a type of room and a specific receiver position. Furthermore, the three decay curves presented in Fig. 7, which are backward integrations of the impulse responses as defined by Schroeder [20], are different in the sense that the early decay is steeper with the direct sound and early reflections. Depending on the proportion of change as compared to the case with reverberation only, the modification will be audible, possibly adding clarity to the sound.

Another refinement can be performed, in the frequency domain, consisting in setting different decay rates in the available octave bands. The proposed model of energy decay can be used with various absorption coefficient settings in order to obtain a collection of decay curves, as illustrated in Fig. 8. RT values in uncoupled rooms shown in Table 2 are set depending on the desired absorption in the main room and in the reverberation chamber. These decay curves can be applied successively to noise filtered in frequency bands. The obtained impulse response is closer to reality than before this process because measurements in actual concert halls always present a variation of decay rates, leading to total energy variations in the order

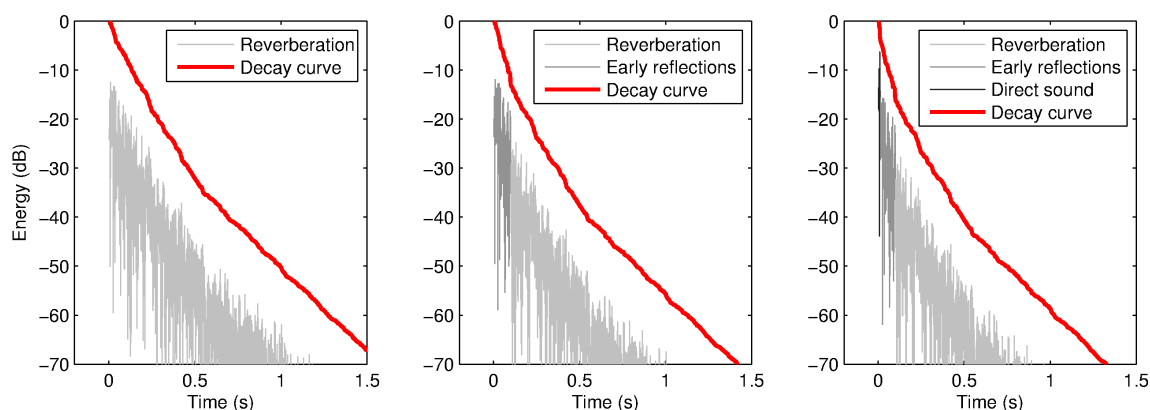


Figure 7. Possible refinements of room impulse response synthesis in temporal domain: addition of early reflections (center) and direct sound (right) to reverberation only (left).

	Main room						Reverberation chamber					
Center frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	1000	2000	4000
RT (s)	3.12	2.82	2.11	1.74	1.34	0.96	13.67	10.87	8.46	4.8	3.31	2.63
$\bar{\alpha}$	0.19	0.24	0.32	0.39	0.50	0.61	0.03	0.04	0.06	0.10	0.14	0.16

Table 2. Reverberation times (RT) and mean absorption coefficients ($\bar{\alpha}$) per octave bands in uncoupled configuration, from measurements in a scale model of coupled spaces. Energy decay curves presented in Fig. 8 are generated with these values.

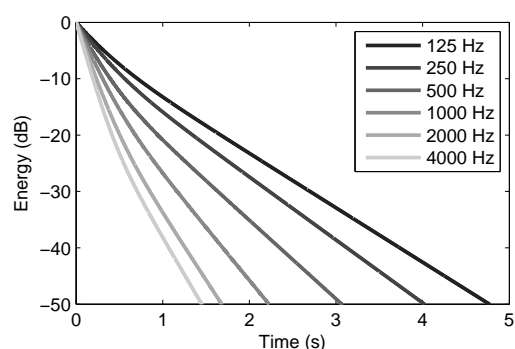


Figure 8. Example of double-slope decay curves per octave bands from a coupled volume system, at $r = 20$ m from the source.

of dozens of decibels over frequency bands.

5. CONCLUSION

A model of sound energy decay based on the diffusion equation in coupled spaces is proposed to perform auralization. The process which has been used in previous research consists in applying these sound decays to filtered noise with various possible refinements to produce realistic room impulse responses. Convolution of the latter with anechoic sounds allows for hearing sound sources within virtual spaces. This process can be useful in several domains, e.g. virtual reality or architectural acoustic design, where acoustical immersion might be required to experience particular sound environments, among which coupled spaces

are often encountered. Further research includes listening tests to estimate the level of sound quality which can be obtained with the proposed energy decay model, as compared to other auralization methods.

6. REFERENCES

- [1] M. Vorländer, *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modeling, Simulation, Algorithms, and Acoustic Virtual Reality*. Springer, Berlin, 335 p., 2008.
- [2] J. Summers, “What exactly is meant by the term “auralization”?” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 124, p. 697, 2008.
- [3] M. Kleiner, B. Dalenbäck, and P. Svensson, “Auralization - an overview,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 41, pp. 861–874, 1993.
- [4] T. Lokki and L. Savioja, “State-of-the-art in auralization of concert hall models - what is missing?” in *Proc. of Baltic-Nordic Acoustics Meeting, Reykjavik, Iceland, 17-19 August, 2008*.
- [5] L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics and Architecture, 2nd ed.* Springer-Verlag, New York, 667 p., 2004.
- [6] F. Spandöck, “Akustische modellversuche,” *Ann. Phys.*, vol. 20, pp. 345–360, 1934.
- [7] T. Smyth and A. Elmore, “Explorations in convolutional synthesis,” in *Proc. of the 6th Sound and Music Computing Conference, Porto, Portugal, 23-25 July, 2009*.

- [8] Huopaniemi, Karjalainen, Välimäki, and Huotilainen, “Virtual instruments in virtual rooms - a real-time binaural room simulation environment for physical models of musical instruments,” in *Proc. of International Computer Music Conference, Aarhus, Denmark, 12-17 Sept.*, 1994.
- [9] M. Karjalainen, “Digital waveguide networks for room modeling and auralization,” in *Proc. of Forum Acusticum, Aug. 29 - Sept. 2*, 2005.
- [10] P. Luizard, M. Otani, J. Botts, L. Savioja, and B. Katz, “Comparison of sound field measurements and predictions in coupled volumes between numerical methods and scale model measurements,” in *Proc. of the 21st International Congress on Acoustics, Montreal, Canada, 2-7 June*, 2013.
- [11] J. Picaut, L. Simon, and J. Polack, “A mathematical model of diffuse sound field based on a diffusion equation,” *Acta Acustica United with Acustica*, vol. 83, pp. 614–621, 1997.
- [12] V. Valeau, J. Picaut, and M. Hodgson, “On the use of a diffusion equation for room-acoustic prediction,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 119, pp. 1504–1513, 2006.
- [13] F. Ollendorff, “Statistical room-acoustics as a problem of diffusion: A proposal,” *Acustica*, vol. 21, p. 236245, 1969.
- [14] W. Sabine, *Collected papers on acoustics*. Harvard University Press, 1922.
- [15] H. Kuttruff, *Room Acoustics*. Elsevier Science Ltd, London, 452 p., 1973.
- [16] L. Cremer, H. Müller, and T. Schultz, *Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik / Principle and Applications of Room Acoustics*. Hirzel Verlag / Applied Science, New York, 651 p., 1978 / 1982.
- [17] I. Frissen, B. Katz, and C. Guastavino, *Auditory Display*. Springer, New York, 493 p., 2010, ch. Effect of sound source stimuli on the perception of reverberation in large volumes.
- [18] D. Picard, “Audibility of non-exponential reverberation decays,” Master’s thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, 2003.
- [19] M. Barron, “The subjective effects of first reflections in concert halls - the need for lateral reflections,” *J. Sound Vib.*, vol. 15(4), pp. 475–494, 1971.
- [20] M. Schroeder, “New method of measuring reverberation time,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 37, pp. 409–412, 1965.

3.4.2 Bilan

La méthode d'auralisation proposée dans cette Section est basée sur le modèle de décroissance par équation de diffusion présenté dans la Section 3.3. Ce modèle donnant des résultats proches des mesures physiques et des simulations numériques pour une géométrie commune de salle couplée, il est apparu comme une base intéressante pour construire un moteur d'auralisation. La méthode suivie, qui consiste à appliquer les décroissances du modèle sur du bruit filtré, a été utilisée lors d'études précédentes [Moorer, 1979; Frissen et al., 2009; Picard, 2003] et offre une qualité sonore raisonnable, malgré sa simplicité apparente.

Des techniques visant à affiner la qualité sonore et rendre les sons plus réalistes sont envisagées. Elles consistent à ajouter le son direct avant la partie réverbérée de la réponse impulsionnelle, dans des proportions qui définissent l'impression de distance à la source sonore. En effet, plus le son direct a un niveau sonore élevé comparé au son réverbéré, plus la source paraît proche. Au contraire un son direct faible donne l'impression d'être situé en fond de salle, à l'opposé de la source sonore. Par ailleurs, un détail supplémentaire consiste à introduire de l'énergie sonore entre le son direct et le son réverbéré dans la réponse impulsionnelle, imitant les premières réflexions généralement reçues dans une salle. Le niveau de ces réflexions comparé aux niveaux du son direct et du son réverbéré permet de simuler la présence de parois latérales ou d'un plafond plus ou moins proches. Pour des raisons de manque de temps, ces différentes propositions n'ont pas pu être évaluées par un test d'écoute avec différents auditeurs. Ainsi, cette méthode d'auralisation repose sur des considérations hypothétiques basées sur l'expérience des auteurs et n'a pas encore été validée.

Perception de la réverbération couplée

Les moyens développés au cours de cette thèse présentés dans le Chapitre précédent offrent la possibilité d'observer l'influence de certains paramètres sur le comportement du champ acoustique. L'étape suivant naturellement la modélisation dans un contexte global d'étude de salle de spectacle est celle de la perception qu'a un auditeur du champ acoustique dans lequel il est plongé, afin de tenter d'établir des liens entre grandeurs physiques et sensations perceptives. Ce Chapitre se penche donc sur la perception de la réverbération dans les espaces couplés. En effet, compte tenu des particularités des décroissances spatiotemporelles observées dans des espaces couplés, notamment la courbure des décroissances temporelles de l'énergie acoustique, cette partie du travail se propose d'explorer différentes implications au niveau de la perception sonore selon deux approches. La première est purement sensitive avec une tâche de discrimination, la seconde plus liée à la cognition avec un jugement subjectif de qualité sonore. Dans cette optique, deux études sont menées au moyen de tests d'écoute. La première porte sur la capacité de discrimination vis-à-vis de différentes réverbérations couplées gouvernées par la variation d'un paramètre architectural. Il s'agit de la recherche d'un seuil de perception (*Just Noticeable Difference*, JND) lié à la variation de la taille de surface de couplage entre deux salles. La seconde étude est plus qualitative au sens où il est demandé aux auditeurs de juger selon leur propre goût si différents types de réverbération, couplée ou non, sont appropriés à la musique jouée par différentes formations musicales.

Ces deux études ont été menées au CIRMMT (*Centre for Interdisciplinary Research in Music Media and Technology*), à l'université McGill de Montréal au Canada, en collaboration avec Dr. Catherine Guastavino. Vincent Roggerone et Daniel Steele ont activement participé à la première et seconde étude respectivement, notamment pour le design de l'interface graphique d'un des deux tests et pour faire passer ces tests aux participants. Concernant les recherches précédentes sur la perception sonore dans les volumes couplés, seules quelques études ont été identifiées. La majorité d'entre elles traite de seuils de perception de la réverbération, en modifiant principalement des paramètres de la réponse impulsionnelle, comme le taux de décroissance des pentes ou le niveau d'apparition de la seconde pente. Aucune valeur de JND n'avait été formulée. En effet il n'est pas aisé d'obtenir de tels résultats en gardant un point de vue global sur l'acoustique d'une salle à volumes couplés car les différents paramètres d'une réponse impulsionnelle couplée sont liés les uns aux autres. Si l'un est modifié (par un réglage architectural de la salle), d'autres vont varier. Pour cette raison, l'étude de seuil de perception proposée est basée sur la modification d'un paramètre architectural, la taille de la surface de couplage, afin

de comparer des situations potentiellement réalisables, pas totalement artificielles. En ce qui concerne la partie relative au jugement subjectif qui consiste à évaluer si une réverbération correspondant à un réglage est “adaptée” à un type de formation musicale dans un espace à volumes couplés, les principales références viennent des travaux de Kuhl puis ceux d’Ando qui ont étudié la préférence des auditeurs pour la réverbération dans des salles à volume unique. L’équipe de Tapio Lokki, qui a récemment travaillé sur l’aspect subjectif de la perception sonore dans les grandes salles de concert, s’est essentiellement concentrée sur la comparaison de salles au moyen des descriptions verbales des sujets. Il s’agit donc plutôt de comparaisons qualitatives de certaines caractéristiques sonores des salles que de préférence de certaines salles pour écouter certains types de musiques.

4.1 Discrimination

Ce travail sur la discrimination de la réverbération couplée a donné lieu à un article proposé pour publication au *Journal of the Acoustical Society of America*, intitulé *Discrimination thresholds for double-slope decay reverberation in large coupled spaces*. Il est reproduit dans cette Section¹.

4.1.1 Expérience de discrimination

Cette étude consiste à estimer un seuil de perception directement lié à la surface de couplage et non uniquement à un indice acoustique, bien que les résultats puissent être aussi exprimés en termes d'indices acoustiques. Pour réaliser cette étude, une collection de réponses impulsionnelles a été synthétisée à l'aide de bruit filtré et égalisé par bandes de tiers d'octave auquel ont été appliquées des courbes de décroissance temporelle de l'énergie acoustique, générées selon un modèle [Cremer et al., 1982] basé sur la théorie statistique (la méthode d'auralisation proposée dans la Section 3.4, basée sur le modèle de diffusion présenté dans la Section 3.3, a été développée plus tard), la seule grandeur variable étant la taille de surface de couplage entre salle principale et chambre de réverbération. Les 7 réponses impulsionnelles synthétisées ont été convoluées avec 3 enregistrements anéchoïques musicaux pour obtenir un total de 21 stimuli. Un test de type ABX a été utilisé où A et B sont deux stimuli différents et X est l'un d'entre eux. Le participant doit déterminer si $X=A$ ou $X=B$. Pour une série de stimuli, une réponse impulsionnelle de référence est choisie et apparaît à chaque essai du test comme stimulus A ou B. Cette référence a été successivement le stimulus correspondant à la plus grande surface de couplage et à la plus petite. Cette procédure permet d'obtenir des courbes psychométriques et d'en déduire des valeurs de seuil de perception. Les résultats sont proches pour les 3 enregistrements anéchoïques et des analyses de variance ANOVA n'ont pas montré de différences significatives. Une valeur similaire de seuil de perception est obtenue quel que soit le stimulus de référence, ce qui permet d'envisager l'hypothèse selon laquelle ce résultat est généralisable.

1. Luizard P.; Katz B.F.G.; Guastavino C. "Discrimination thresholds for double-slope decay reverberation in large coupled spaces", *Journal of the Acoustical Society of America*. Article soumis le 18 mars 2013, en phase de révision.

Abstract

Sound perception in enclosed spaces is highly influenced by reverberation. The reverberation time (RT), used to measure reverberation in single volumes, is inappropriate for coupled spaces characterized by non-exponential double-slope reverberation energy decays. Furthermore previous research on reverberation in coupled volumes used impulse response characteristics such as the decay time corresponding to the reverberation time of each of the two coupled volumes. This study relies instead on an architectural parameter, the area of the coupling aperture which acoustically connects the spaces, to generate the sound stimuli. Two listening tests were conducted to determine perceptual thresholds using an ABX discrimination task. In experiment 1, 21 participants compared 7 different room impulse responses on 3 different musical excerpts. In experiment 2, 19 participants compared the same 7 room impulse responses on a musical excerpt with a different standard. The range of tested values corresponds to physically valid variations and the corresponding values of coupling surfaces and acoustical parameters are specified. Just Noticeable Differences were derived from the discrimination results with an average JND of approximately 10% of the given coupling surface value and no significant differences were found between different musical excerpts.

4.1.1.1 Introduction

Listeners' experience in a concert venue is influenced by various factors Beranek [1996]; Barron [1993]; Kahle [1995] such as reverberance, clarity, sound strength, and spatial impression. These factors can be related to physical and acoustic parameters of the room Schroeder et al. [1974]. However small variations of physical parameters are not always perceived by listeners. Studying perceptual thresholds relative to room acoustics is of primary importance to determine how sensitive listeners are to variations of physical parameters. The present study focuses on reverberation, the collection of reflected sounds in an enclosed space. The reverberation time (RT) is defined as the time required for sound reflections to decay by 60 dB below the level of the direct sound. This estimation is appropriate for large single volumes in which reverberation profiles decay exponentially and discrimination thresholds, or just noticeable differences (JND) have been reported for reverberation in single volumes Seraphim [1958]; Billon and Embrechts [2012]; Niaounakis and Davies [2002]; Meng and Zhao [2006]. In coupled spaces however, when an adjacent reverberant volume is connected to a less reverberant volume, energy exchanges between the two spaces can result in reverberation profiles with non-exponential decays. The present study aims at estimating just noticeable differences for reverberation in coupled volumes as a function of the coupling aperture connecting the two volumes and for different musical excerpts.

4.1.1.1.a Previous studies

Coupled volume reverberation has been studied using different types of stimuli. Most studies used synthesized room impulse responses (RIR) convolved with filtered noise, musical excerpts or speech. The RIR synthesis process can be achieved by different means. It can be done by

applying a curved decay or several linear decays to frequency band filtered noise or by using geometrical acoustics software which implies 3D modeling of a space.

Atal and Schroeder [Atal et al., 1965] constructed curved energy decays with two different methods. First the early part of the sound decay - the direct sound and the first reflections - was increased while the late part was maintained at its initial level. In a different manner two independent exponential decays were handled in order to create different curved sound decays. As a result, participants would identify the curved decays with single exponential decays which present the same decay time for the first 160 ms.

Bradley and Wang [Bradley and Wang, 2005] used the commercial geometrical acoustics modeling software ODEON to synthesize RIRs which were convolved to provide binaural rendering of running music. The modeled settings were different values of global absorption in the hall and the chamber which provide variations of the individual RTs, as well as different aperture opening sizes. As a result it appeared that perceived reverberation increases with greater coupled volume size and aperture size, without precise quantification of this phenomenon.

Ermann [Ermann, 2007] generated sound stimuli by convolving anechoic recordings with room impulse responses from CATT-Acoustic, another popular acoustics modeling software, to investigate both perceptibility and preference of coupled reverberation. Participants were divided in two population samples: college students and attendees at an audio conference, all of them having received previous explanation on the theory of coupled volume acoustics. They were presented with pairs of stimuli and asked if the sounds were the same or different, if one of them had a double slope decay, and which they preferred. Results did not show a clear tendency but subjects were more likely to differentiate the stimuli when the late parts of the decays were more varied from one another.

Frissen et al. [Frissen et al., 2009] used the combination of two exponential decays applied to a normally distributed random number sequence which produces noise. Those room impulse responses were convolved with a short speech excerpt composed of one 2-syllable word. The task of participants was to decide whether these sounds were the same or different than an exponentially decaying sound with the common value $RT=1.8$ s. Results showed that the sounds were perceived to be different if the RT of the second slope was at least 1.5 times greater than the one corresponding to the first exponential decay.

Picard [Picard, 2003] used a parametric model of temporal energy decay [Xiang and Goggans, 2001] which provides the ability to individually control the decay time and the relative initial level of each slope in order to build RIRs with pink noise. These RIRs were presented as such, without convolution, to work with ‘clinical’ stopped chord reverberation and avoid bias due to specific frequency content of musical excerpts. An ABX task was proposed to participants who had to compare single and double slope decays to obtain an equivalence point. Results showed that the second slope has to appear at higher levels when its RT is not much greater than the one of the single decay to provide an audible difference.

Early decay time	DT_1	Decay time of the first slope evaluated on 60 dB
Late decay time	DT_2	Decay time of the second slope evaluated on 60 dB
Bending point time	BP_t	Time at which the bending point appears
Bending point level	BP_L	Level at which the bending point appears

Table 4.1: Definition of acoustical parameters adapted to multi-slope energy decay curves.

4.1.1.1.b The present study

So far perception of coupled reverberation has been studied with considerations based on the impulse response itself and the associated metrics. Certain previous studies manipulate various slope values to build multi-slope impulse responses, which is not necessarily linked to a realistic and obtainable architecture. Others use impulse responses generated by ray-tracing software which requires strong confidence in the accuracy of calculation and auralization for coupled volume conditions.

The present study is based on architectural considerations. Instead of estimating a JND only out of metrics calculated from IRs, the idea is to link directly perceptual features to an architectural parameter. The open coupling surface between spaces is used as the variable element which differentiates the various proposed sounds. This architectural change provides variations in the resulting temporal energy decay of IRs and thus in the related reverberation because the different slopes and their relative level change with the size of coupling surfaces [Summers, 2003; Ermann and Johnson, 2005].

Therefore this study uses the average dimensions and absorption characteristics [Beranek, 2004] of coupled volume concert halls to define a realistic space. The theoretical link between size of coupling surface and energy decay curve used in this study is the model developed by Cremer and Müller [Cremer et al., 1982]. This simple statistical model is based on the transfer of acoustic energy through the coupling surface from a room to the adjacent one. An estimation of the temporal energy decay in the rooms is provided according to their volume, surface, average absorption coefficient, and the size of coupling surface. The obtained non-exponential energy decay curves can be described by several parameters [Luizard and Katz, 2011] such as the decay rate of each slope and the time and level coordinates of curvature points as represented in table 4.1.1.1.b and illustrated in figure 4.1.

4.1.1.2 Experiments

The aim of these perceptual experiments is to determine just noticeable differences (JND) for coupled reverberation as a function of the variation of the acoustical coupling surface. A range of physically valid coupling surface values was used to generate the room impulse responses and the results can be expressed either in terms of the size of the coupling surface and various acoustical parameters. Given the short duration of the stimuli used for the discrimination task, we assume that participants base their judgment primarily on the stop-chord reverberation, heard after

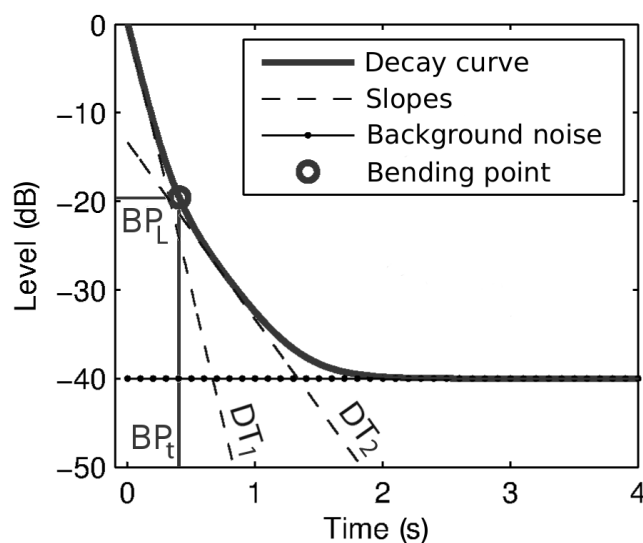


Figure 4.1: Illustration of acoustical parameters adapted to multi-slope energy decay curves.

the direct sound is emitted when reflections propagate throughout the space, as opposed to the running reverberation heard while the instrument is playing, which is different than stopped chord reverberation, when no direct sound is emitted and only reflections propagate within the space. This study was designed in two distinct experiments, each having a different standard sound based on the extreme sizes of coupling surface, in order to double-check the validity of results. In other words, each experiment can be seen as estimating how sensitive people are to the variation of coupling surface from a given initial - or standard - area. Thus the experiments are based on 2 different initial coupling surface areas and the consistency of JNDs over these two conditions is investigated. While the first experiment was 2 hours long, the second one was only 1 hour long because fewer stimuli were presented. Although a large number of repetitions were required, this time length is quite important and pauses were included in order for participants to maintain their concentration.

4.1.1.2.a Stimuli

The stimuli presented to the listeners consisted of impulse responses convolved with anechoic recordings. These three anechoic recordings were short musical excerpts: bongos from Bang & Olufsen, Music For Archimedes, a symphony orchestra and a solo soprano singer from Aalto university [Pätynen et al., 2008a]. The impulse responses were constructed with noise made of a normally distributed random number sequence. As tested in a previous study [Moorer, 1979], this noise was equalized in third octave bands from 63 Hz to 16 kHz to obtain the spectrum presented in figure 4.2. A collection of curved temporal decays generated with the statistical approach by Cremer and Müller [Cremer et al., 1982], presented in figure 4.3, was successively applied to this noise in order to obtain a series of impulse responses.

The characteristics of those decays depend on architectural parameters of the rooms, such as the volumes, the equivalent absorption areas and the size of coupling surface. Reverberation

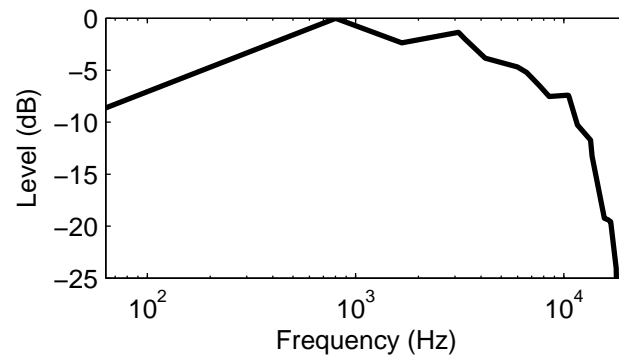


Figure 4.2: Spectrum of noise used to generate impulse responses.

Location	S_1 (m^2)	Max S_c (m^2)	Max S_c (%)
Lucerne, Switzerland	5050	910	18.0
Lahti, Finland	4160	615	14.8
Philadelphia, USA	5700	555	9.7
Dallas, USA	5750	521	9.1
Birmingham, UK	5990	195	3.3

Table 4.2: Surface specifications of various existing coupled volume concert halls, from Beranek [Beranek, 2004]. S_1 : inner surface of the main room; S_c coupling surface area expressed in terms of surface unit and in % of S_1

$S_c/S_1(\%)$	1	2	3	4	5	9	10
$S_c(m^2)$	45.6	91.2	136.8	182.4	228.0	410.4	456.0
$DT_1(s)$	1.24	1.25	1.26	1.27	1.29	1.40	1.43
$DT_2(s)$	4.03	3.50	3.12	2.84	2.63	2.22	2.17
$BP_t(s)$	0.71	0.56	0.48	0.42	0.37	0.25	0.23
$BP_L(dB)$	-30.2	-23.5	-19.8	-17.1	-15.1	-9.9	-9.1

Table 4.3: Double slope decay parameters for various coupling surface sizes. Those parameters are defined in table 4.1.1.1.b.

times of uncoupled rooms were set to 1.22 s. for the main room and 4.77 s. for the adjacent chamber. Those values are slightly exaggerated as compared to typical ones [Beranek, 2004] in order to obtain two distinct slopes within the curved decays. While absorption and room morphology remain constant, the only variable element between the synthesized RIRs is the size of coupling surface, set to 1, 2, 3, 4, 5, 9, and 10% of the inner surface of the main room (4560 m²), which represents an interval from 45.6 m² to 456 m². This range of values covers coupling surfaces which can be found in actual coupled volume concert halls [Beranek, 2004] (see table 4.1.1.2.a). The non-regular steps between 1% and 10% are chosen considering the non-linear relationship between the coupling surface variation and the corresponding acoustical parameters (see figure 4.4). The actual difference in decay level is greater between 1% and 2% than between 9% and 10% (see table 4.1.1.2.a and figure 4.3).

To make sure that the only differences in loudness are due to the differences between energy decays, the sounds are normalized to 90% of their maximum value after convolution. An analysis of this set of IRs, according to the previously defined quantifiers adapted to multi-slope energy decays leads to the values presented in figure 4.4 and table 4.1.1.2.a.

4.1.1.2.b Participants

A total of 21 participants, including one of the authors, completed the first experiment and 19 new participants completed the second one. They were 16 males and 24 females, aged 18 to 51, the mean age being 27. All of them had more than ten years of practice on a musical instrument or in sound engineering. They were tested for normal hearing using a standard audiometric test from 250 Hz to 8 kHz. Participants received \$20 (CAD) for their participation.

4.1.1.2.c Procedure

Stimuli were presented over headphones (Sennheiser HD650) in an acoustically treated laboratory using a Matlab graphical user interface on a Mac Pro computer connected to an audio interface (Grace Designs m904) at a sampling rate of 44.1 kHz with a bit-depth of 16 bits.

The experiments employed a standard method of constant stimuli paradigm, with a 2-interval, forced-choice task. The ABX form was chosen with a standard sound corresponding to the largest coupling surface set to 10% of the inner surface of the main room for the first

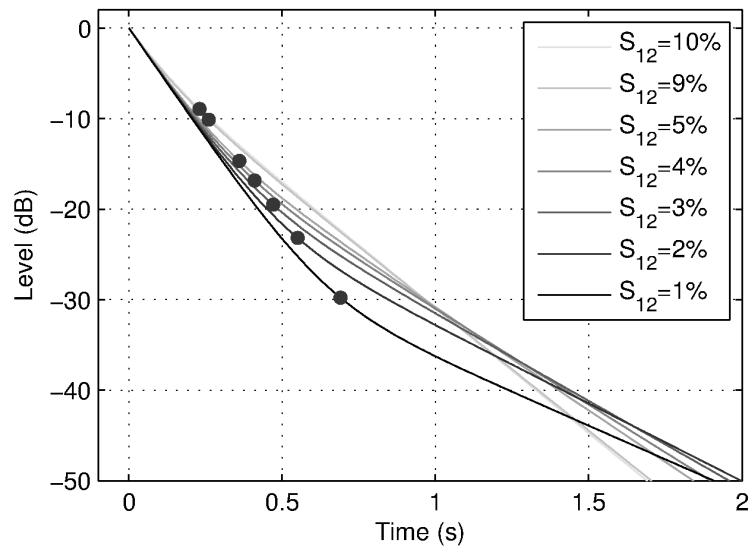


Figure 4.3: Temporal energy decays from Cremer and Müller statistical theory for different aperture sizes expressed in percent of total inner surface of the main room. Lower decays (darker) correspond to small coupling surfaces while higher decays (lighter) stand for large coupling surfaces. Dots show the bending point for each curve.

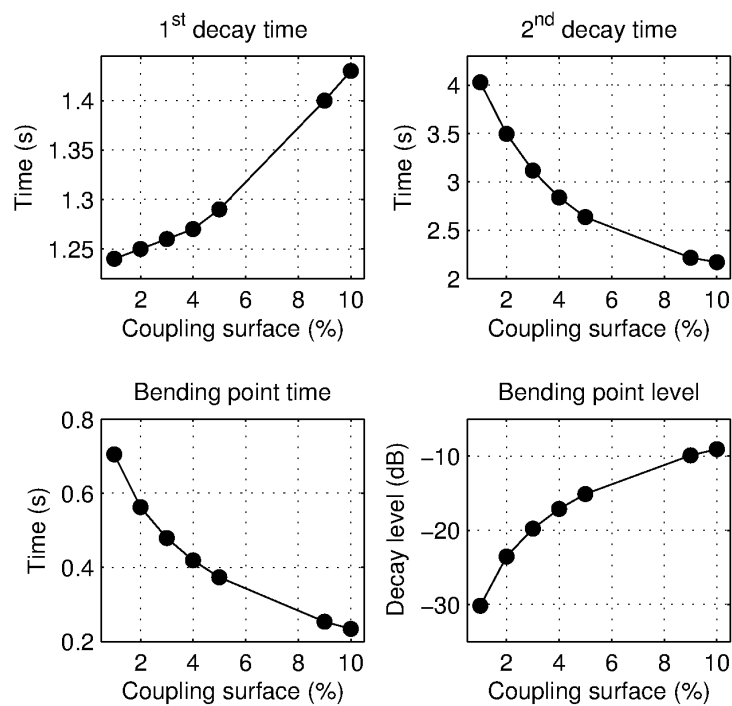


Figure 4.4: Acoustical parameters from the impulse responses corresponding to 7 aperture sizes.

experiment. The standard sound for the second one was the smallest coupling surface set to 1% of the inner surface of the main room. At each trial, two different sounds A & B were presented to the participant. A or B were randomly the standard sound or one of the six other sounds. The third presented sound, called X, was pseudo-randomly A or B. The participants could listen to the three sounds as many times as necessary. The task was to choose whether sound X was sound A or sound B. A practice session of ten trials allowed participants to become familiar with the task and the sounds of the real test. As the participants had different habits and tolerance thresholds in terms of sound intensity regarding critical listening situation, they were told to set the sound level as they thought it was loud enough to hear subtle differences, just beneath a level that would hurt, within a possible range of 4 dB, at 88 ± 2 dB SPL ref. $20 \mu Pa$, in order to keep the results comparable. This level adjustment was made during the practice session and would remain unchanged during the test.

The first experiment was organized in 3 blocks corresponding to the 3 anechoic sounds. In each block, the 6 pairs of sounds (standard RIR + 1 out of the 6 others) were presented 10 times in random order for a total of 60 trials per block so that the duration of the first experiment was about 2 hours (including an audiogram) with pauses. The second experiment was slightly different and focused on one block corresponding to the anechoic recording of orchestra, composed of 90 trials with the same 6 pairs of sound stimuli for a total duration of 1 hour. The task can be seen as looking for a difference between the sound corresponding to a standard coupling surface and the sounds corresponding to different coupling surfaces, even if the participants were not told that the standard was present at each trial.

The study was presented as dealing with reverberation in coupled spaces, without any further explanation of the coupled volume acoustic specificity. Thus participants passed the test with their own previous knowledge of acoustics and critical listening. Furthermore participants filled out a questionnaire at the end of the test. They were asked to rate the perceived difficulty of the task and to describe in their own words the strategy they used to discriminate the sounds. They were also asked about how often they attended live concerts and in which venues.

4.1.1.3 Results

Results are expressed in terms of proportion of right answers as a function of the various sizes of coupling surface or the corresponding analysis parameters. To obtain psychometric functions, the data were fitted with cumulative Gaussians free to vary in position and slope using the software package *psignifit* (<http://bootstrapsoftware.org/psignifit/>). An example can be seen in figure 4.5. Since the ABX form is used, the theoretical minimum performance is a proportion of 0.5 which corresponds to random answers or chance, when discrimination is impossible due to the strong similarity of stimuli. The maximum performance lies within the interval $[1-\lambda ; 1]$ where λ is a psychometric function parameter and depends on the participant's results, with a maximum value of 0.06, as advised by Whichmann and Hill [Whichmann and Hill, 2001].

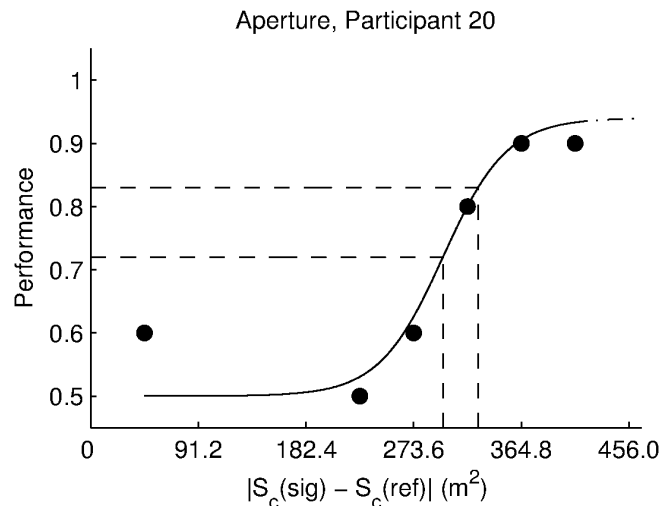


Figure 4.5: Example of psychometric curve (cumulative Gaussian) fitting the experimental data. Dotted lines show the stimulus value for performances of 75% and 87.5%, i.e. the percentage of stimulus identification.

4.1.1.3.a Outlier detection

Among the 21 participants in the first experiment, 3 obtained random-like distributed results which means that they did not succeed in hearing the differences. 5 to 8 of them, depending on the original sound (orchestra, soprano, or bongos), had results which lead to poor values of goodness-of-fit. The latter is estimated using statistical deviance (see Eq. (1)) or log-likelihood ratio which quantifies the difference between the psychometric function and the experimental points [Wichmann and Hill, 2001]. Finally 9 to 12 psychometric functions per original sound have been used so that the mean value of statistical deviance is inferior to 4. In the second experiment, 7 participants had satisfactory results with respect to goodness-of-fit, among the 19 initial participants. Two of them were dismissed because of the poor goodness-of-fit value and the others obtained random-like answers suggesting that the task was too demanding for them.

$$D = 2 \sum_{i=1}^K \left\{ n_i y_i \log_{10} \left(\frac{y_i}{p_i} \right) + n_i (1 - y_i) \log_{10} \left(\frac{1 - y_i}{1 - p_i} \right) \right\}, \quad (4.1)$$

where y_i stands for the experimental data and p_i refers to the predicted model of psychometric function.

4.1.1.3.b JND estimation

The discrimination threshold (or just-noticeable-difference, JND) is determined from the slope of the psychometric function. It is defined, as per convention, as the difference between the abscissa values that correspond to the second and third quarters of the performance scores, which are approximately 75% (Point of Subjective Equality, PSE) and 87.5% (see figure 4.5). As widely used in psychophysics, Weber's law can be written as follows:

$$\frac{JND}{PSE} = JND_{rel}, \quad (4.2)$$

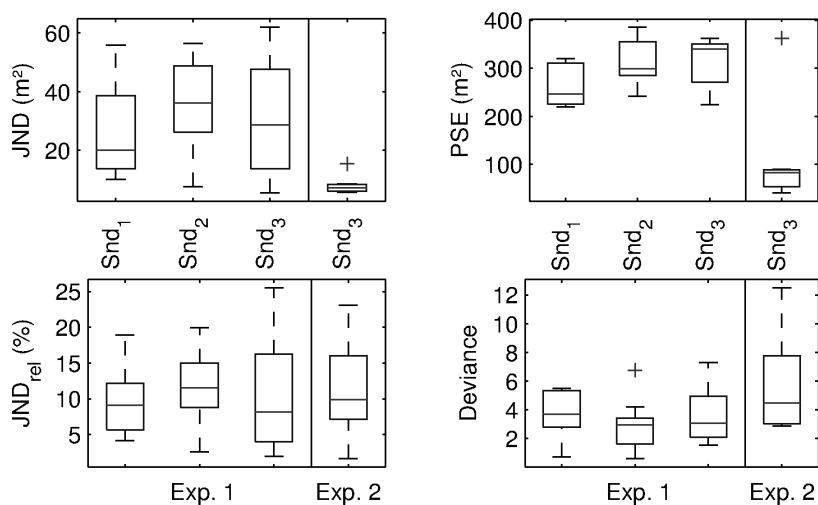


Figure 4.6: Results of the discrimination experiment in terms of JND, PSE, and deviance for the aperture parameter, presented as boxplots. For each sound, large rectangles represent lower and upper quartiles, the line in the middle is the median, and extreme small lines show the smallest and largest observation. Snd_1 stands for the bongos sounds, Snd_2 for the soprano singer, and Snd_3 for the orchestra.

where JND is the value of absolute JND, PSE is the corresponding point of subjective equality and JND_{rel} is the relative value of JND, expressed in percent and assumed to be a constant quantity.

An average relative JND of 10% of the coupling surface is found in the first experiment (see figure 4.6). It means that for a given size of coupling surface the audience will perceive a change in reverberation if the coupling surface is modified by at least 10% of its actual size. The average value of JND for the current study conditions is around 30 m^2 , depending on the type of musical ensemble. The corresponding mean PSE value is approximately 300 m^2 . This is a relatively high value considering a concert hall and would be smaller if the standard sound is chosen as corresponding to a smaller coupling surface, as shown with the comparison of the first and second experiments in figure 4.6. However the PSE itself should not influence the relative JND value since the absolute JND is directly proportional to the PSE, according to Eq. (4.2) derived from Weber's law. Again, the second experiment shows that the relative JND, expressed in percent, keeps a similar value while PSE is strongly reduced.

Furthermore, the deviance, or log-likelihood ratio (see Eq. (1)), is estimated by the `psignifit` package and its average value is inferior to 5 for every type of sound, as can be seen in figure 4.6.

While JND based on the aperture parameter has now been investigated, JND can still be expressed in terms of the related acoustical parameters. Since decay times and bending point coordinates are defined for each sound energy decay, i.e. for each sound stimulus, JND values are also available. Figure 4.7 shows the relative JNDs estimated for each acoustical parameter. Mean JNDs for DT_1 vary from 4% to 7% depending on the stimulus which is in accordance with previously estimated values for single slope sound decay by Seraphim [Seraphim, 1958]. In large

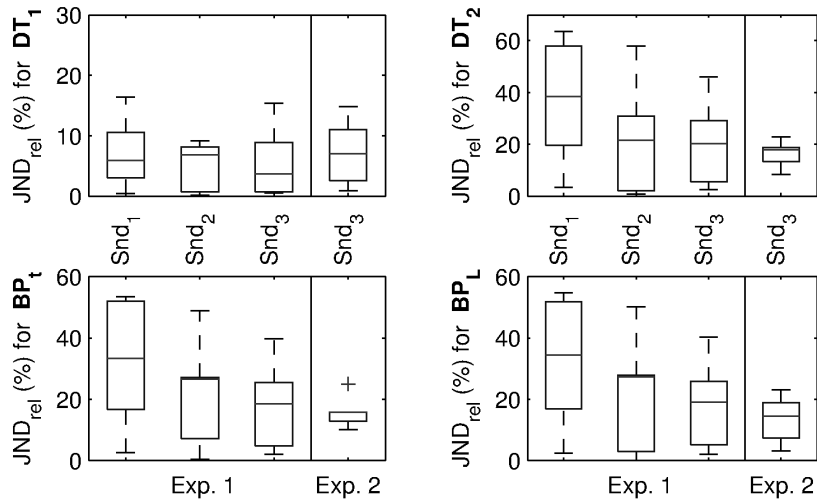


Figure 4.7: Results of the discrimination experiment in terms of relative JND for the acoustic parameters, presented as boxplots. Snd_1 stands for the bongos sounds, Snd_2 for the soprano singer, and Snd_3 for the orchestra.

Standard $S_c/S_1 = 10\%$							
$S_c/S_1(\%)$	1	2	3	4	5	9	10
$\Delta(S_c/S_1)(\%)$	9	8	7	6	5	1	0
$\Delta(S_c/S_1)(m^2)$	410.4	364.8	319.2	273.6	228	45.6	0
$\Delta(DT_1)(s)$	0.19	0.18	0.17	0.16	0.14	0.03	0
$\Delta(DT_2)(s)$	1.86	1.33	0.95	0.67	0.47	0.05	0
$\Delta(BP_t)(s)$	0.470	0.328	0.245	0.185	0.139	0.019	0
$\Delta(BP_L)(dB)$	21.1	14.5	10.7	8.1	6.0	0.8	0
Standard $S_c/S_1 = 1\%$							
$S_c/S_1(\%)$	1	2	3	4	5	9	10
$\Delta(S_c/S_1)(\%)$	0	1	2	3	4	8	9
$\Delta(S_c/S_1)(m^2)$	0	45.6	91.2	136.8	182.4	364.8	410.4
$\Delta(DT_1)(s)$	0	0.01	0.02	0.03	0.05	0.16	0.19
$\Delta(DT_2)(s)$	0	0.53	0.91	1.19	1.39	1.81	1.86
$\Delta(BP_t)(s)$	0	0.142	0.225	0.286	0.331	0.451	0.470
$\Delta(BP_L)(dB)$	0	6.6	10.4	13.1	15.1	20.3	21.1

Table 4.4: Differences between double slope decay parameters for various coupling surface areas and the standard areas of 10% (Experiment 1) and 1% (Experiment 2) of the audience room surface.

volumes [Billon and Embrechts, 2012] as well as in small rooms [Niaounakis and Davies, 2002], slightly higher values are also found, around 10%, with noise, speech, or Western music stimuli. Another study [Meng and Zhao, 2006] has found even higher reverberation threshold values above 25% in single rooms, using Chinese music motifs as stimuli, the latter being responsible for the greater JND values according to the authors.

Furthermore, the JND for DT_2 is much greater and varies from 20% to 40% in this experiment. These high JND values may be due to the low level at which the second slope is found under the IR maximum which makes the change of slope difficult to hear. Moreover, the same results are found for the other parameters, the time and level of bending point. This similarity appears as an expected result since these parameters are all strongly linked to the late decay time through the second slope. Nevertheless, these considerations must be handled with care because all the parameters are calculated from the same impulse responses and this point is discussed below.

Table 4.1.1.3.b summarizes the actual differences between each parameter and the standard one, the latter being relative to the coupling surface areas of 10% and 1% of the audience room surface, respectively used in the first and second experiment. It shows objective differences between the sounds which participants had to compare. One can notice that in both experiments the extreme sounds have the same difference values as compared to the standard sounds. Although the progression is not linear and differences between sounds are not the same in both cases, results are still consistent, which confirms the JND value.

An analysis of variance (one-way ANOVA) was performed on the means of JNDs obtained in the first experiment with the different types of sounds. The differences did not reach statistical significance since the probability of the test is too high ($0.3 < F < 2$; $0.1 < p < 0.8$) in all cases. This is consistent with the idea developed in previous studies showing that the discrimination of stopped chord reverberant stimuli does not seem to be strongly affected by the nature of the sound stimulus [Frissen et al., 2010].

The second experiment, which used the orchestra sample only and whose standard sound was the one based on the coupling surface of 1% of the audience room surface instead of 10% in the first experiment, lead to similar JNDs, the mean value based on an aperture of 13% of coupling surface variation. Figures 4.6 and 4.7 show the results of JND, PSE, and deviance for the second experiment in comparison with the results from the first experiment. Relative JNDs are consistent in both experiment, particularly with those obtained with the orchestra sound in the first experiment, suggesting that the sound sample plays an important role in JND estimation, even between musical stimuli. One can notice in figure 4.6 that the absolute JND and PSE values are much lower in the second experiment while the relative JND remains similar to the ones in the first experiment. This suggests that Eq. 4.2 is verified for 2 extreme open areas, i.e. the relative JND is a constant value over a wide range of coupling surface sizes among those generally used in concert halls (see table 4.1.1.2.a).

4.1.1.3.c Post-questionnaire analysis

Participants were asked to rate the perceived difficulty of the task, on a scale ranging from 0 (very easy) to 10 (very difficult). The means over all participants in the first part of experiment were 6 for the orchestra, 7 for the bongos, and 8 for the soprano singer. The orchestra as the only proposed sound in the second part received a subjective difficulty rate from 2 to 8 with average 5 by the selected participants while the average rate was 6 among the 19 participants. So, even if no significant difference was observed for the JNDs between the different musical excerpts, the soprano was judged to be harder to discriminate than the orchestra or the bongos, possibly because of its narrower frequency bandwidth and its temporal softness, without strong attacks. The bongos instead presented strong temporal peaks because of the percussive nature of the instrument and the orchestra sample had a very rich and large frequency spectrum which might make it easier to discriminate when only a slight difference existed between two stimuli. Although the sound engineering population is supposed to be more used to dealing with various kind of reverberation, participants having such a background interestingly rated this test as more difficult than other participants.

Participants reported using various strategies in order to compare the different sounds presented in a trial. Twelve of them mentioned focusing on the temporal aspects - attacks and mostly decay of sound, while 9 of them paid more attention to the frequency content of the various sounds, e.g. comparing the difference of decay rate of high vs. low frequencies or listening to the spectral content. Finally, 8 participants stated clearly paying attention to both temporal and spectral aspects of the sound stimuli. The other participants did not explicitly mention any comparison strategy.

All participants reported attending concerts regularly, with an average number of 4 concerts a month with a majority of live acoustic instruments in a variety of reverberant environments. The venues mentioned include large concert halls, theaters, churches, and to a lesser extent jazz clubs and other small venues.

4.1.1.4 Discussion

It should be noted that all participants had a minimum of 10 years of musical training and their results may not be generalized to less experienced listeners. In addition, the proposed sounds were monophonic signals with no specific direction of sound incidence and the synthesized impulse responses did not provide distinct early reflections with lower density than purely reverberated sound. Thus on the one hand stimuli were less ecologically valid than what would have been generated with impulse responses having more distinct direct sound and early reflections, synthesized in stereophonic or even binaural signals, but on the other hand they were not restricted to a specific room geometry and configuration (e.g. the general room shape, the source and receiver location relative to the open coupling surface from which the late reverberation is introduced in the main room). In that sense, the results are not specific to a given configuration and are more likely to apply generally.

Furthermore, the results should be considered carefully since comparing JNDs for DT_1 and

DT_2 in figure 4.7 shows that the values are much lower for DT_1 and one could conclude that listeners are more sensitive to the early part of decay as compared to the late part represented by DT_2 . However, this interpretation may be biased since those JNDs are estimated out of the same series of IRs and the difference of obtained values is exclusively due to the early and late slope variation within the initial collection of energy decays presented in figures 4.3 and 4.4. The same explanation can be used to justify the values obtained for the bending point time and level. The four acoustical parameters and the architectural parameter (area of coupling surface) are connected and can not be considered separately because they describe the same room impulse responses. Studying the influence of independent parameters would require a different protocol for stimuli synthesis. The different slopes should be handled independently in order to sculpt the decay curve as desired as was made by Frissen et al. [Frissen et al., 2009], e.g. maintaining the first slope as constant while varying the second one. This procedure would lead to a JND estimation for the second slope, linked to the late reverberation. However this test should be performed at various levels of curvature point to describe a number of situations which would be a very long experiment. In the same manner, this curvature level could be the only variable element of a test, with constant slopes. Hence various procedures are possible but do not fit with the present study's intention to focus on realistic situations through the interdependency of the parameters, governed by the coupling surface area.

Finally, further directions include replicating similar listening tests with variations of individual RTs in each room by means of changing the relative rooms volume or inner absorption before varying the coupling surface area, as can be made in actual concert halls with movable ceiling and absorptive banners. This would change the slope ratio when the rooms are coupled and could affect perceptual thresholds. Since the late reverberation is more audible when the slope ratio is high, i.e. the chamber is much more reverberant than the main room, then smaller changes in the area of coupling surface could lead to an audible difference, making the JND lower than the one found here.

4.1.1.5 Conclusion

This perceptual study determined JNDs for double-slope reverberation typically found in coupled-volume venues as a function of an architectural parameter, namely the coupling surface. The perceptual thresholds obtained were 10% of variation of a given coupling surface area. The stimuli used for this study were generated using short anechoic sounds of soprano, bongos, and symphony orchestra convolved with various room impulse responses whose differences are only due to the coupling surface variation, according to a simple model of statistical energy decay. The obtained JND value is scarcely comparable with previous work since other JND values are determined for single slope reverberation only. However, other perceptive studies [Bradley and Wang, 2005; Ermann, 2007; Frissen et al., 2009; Picard, 2003] on coupled reverberation have shown results which are consistent with the ones obtained in the present study in the sense that differences are heard for large variations of slopes and bending point location in the time-energy space, with those variations depending physically on the area of coupling surface.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the Center for Interdisciplinary Research in Music Media and Technology (CIRMMT) for providing the test room and funding the participants, Dr. Ilja Frissen for the useful discussions on data analysis, and Vincent Roggerone for running participants in the second experiment. The research was supported by a McGill University William Dawson Award to C. Guastavino.

4.1.2 Bilan

Cette expérience perceptive de discrimination de la réverbération couplée a mené à l'estimation d'un seuil de perception de 10% de variation de la taille d'une surface de couplage donnée, pour des temps de réverbération fixes dans chaque salle découplée. Cette valeur a été obtenue avec deux surfaces de référence différentes, l'une correspondant à une grande surface de couplage (10% de la surface de la salle principale) et l'autre à une très petite surface de couplage (1% de la surface de la salle principale) en comparaison avec ce qui peut être trouvé dans les salles de concert à volumes couplés construites, comme le montre le Tableau en annexe A.2. Ainsi, cette valeur de seuil de perception semble être valable au moins dans l'intervalle entre ces tailles de surface de couplage. Notons que cet intervalle est large et couvre quasiment les capacités offertes par la majorité des salles construites, la surface de couplage ne pouvant que rarement être ouverte au-delà de 10%.

D'autre part, les stimuli de ce test ont été synthétisés de façon à obtenir un compromis entre réalisme du son proposé et application à un grand nombre de salles. En effet, la méthode n'employant ni son direct ni premières réflexions dans la synthèse des réponses impulsionnelles, le stimulus produit peut paraître peu naturel. Toutefois, seulement deux participants se sont plaints d'une faible qualité sonore. Aucune remarque dans ce sens n'a été formulée par les dix-neuf autres participants. D'autre part, le son direct et les premières réflexions étant liés à une certaine position du récepteur dans une salle à la géométrie particulière, leur absence permet de considérer un cas plus général en n'utilisant que le son réverbéré. Autrement dit, cette méthode de synthèse de réponses impulsionnelles permet de considérer une configuration de couplage sans se restreindre à une géométrie de salle particulière ni à une position spécifique dans la salle.

Par ailleurs, parmi les 21 participants, seulement 12 ont produit des résultats menant à des courbes psychométriques exploitables. Ce taux relativement faible de participants retenus peut être expliqué par le fait que le test était difficile, les différences entre stimuli étant très subtiles. En effet, le questionnaire proposé aux participants après le test les invitait à noter la difficulté de chaque session sur une échelle de 1 à 10. Les résultats moyens pour les 21 participants sont les suivants. Bongos : 7/10. Soprano : 8/10. Orchestre : 6/10. Il apparaît donc que ce test a été perçu comme difficile. De plus, la durée du test était variable et dépendait, pour chaque participant, du nombre d'écoutes des paires de stimuli avant de prendre une décision. La durée du test variait entre 1 heure 15 minutes et 2 heures. Ainsi l'effet de fatigue aurait pu être constaté, entraînant une baisse de l'attention. Au contraire, la majorité des résultats retenus ont été réalisés pendant le troisième bloc, le test étant organisé en 3 blocs correspondant aux 3 sons anéchoïques, présentés dans un ordre aléatoire. Notons que des pauses de 5 minutes étaient imposées entre chaque bloc et au milieu de ces derniers afin de limiter la fatigue des participants.

Enfin, des valeurs de seuil ont été déterminées pour les indices acoustiques adaptés aux réponses impulsionnelles à plusieurs taux de décroissance (DT_1 , DT_2 , BP_t , BP_L) définis dans la Section 2.2, en correspondance avec les différentes surfaces de couplage utilisées. On obtient, par exemple, des JND (*Just Noticeable Differences*) de l'ordre de 5% de variation d'une valeur donnée pour DT_1 et de l'ordre de 30% pour DT_2 . Il est donc tentant de conclure que l'auditeur est plus sensible à des variations de DT_1 qu'à celles de DT_2 . Or, les variations de ces indices

acoustiques sont totalement corrélées entre elles puisqu'elles correspondent aux mêmes réponses impulsionnelles, gouvernées par les tailles de surface de couplage. Donc les valeurs de seuil obtenues sont également liées entre elles et l'auditeur entend ces variations en même temps, pas indépendamment. Pour obtenir des seuils de perception de chaque indice acoustique, il faudrait établir un protocole expérimental différent, avec une synthèse de stimuli comprenant des variations de l'une des pentes en maintenant l'autre constante.

4.2 Quelle réverbération pour quelle formation musicale ?

Cette Section a pour objectif de tenter de déterminer à quel degré les réverbérations présentant une seule ou plusieurs pentes sont appropriées pour l'écoute de différentes formations musicales, selon l'avis subjectif de l'auditeur. Elle reproduit l'article intitulé *Perception of reverberation in large coupled volumes : discrimination and suitability*, paru à l'occasion de la conférence *International Symposium on Room Acoustics*².

4.2.1 Expérience sur la notion de réverbération appropriée à certaines formations musicales

La première partie de cet article reprend succinctement l'étude présentée à la Section précédente. La seconde partie développe l'expérience des jugements subjectifs des participants. A nouveau, un test d'écoute est organisé avec la même méthode de synthèse de réponses impulsionnelles que pour l'étude précédente, à partir de décroissances temporelles issues de la théorie statistique [Cremer et al., 1982]. Quatre tailles de surface de couplage différentes sont utilisées, couvrant la même gamme que précédemment, de 1% à 10% de la surface totale de la salle principale. Les enregistrements anéchoïques sont cette fois au nombre de 4 et durent plus longtemps, entre 15 et 20 secondes. Il ne s'agit plus seulement de réverbération sur accord final comme dans l'étude précédente, mais aussi au long d'une phrase musicale ("running reverberation"). Le test est organisé en 4 blocs regroupant les 4 enregistrements anéchoïques. Chaque enregistrement est convolué avec les 5 réponses impulsionnelles afin d'obtenir 5 stimuli dont le seul élément variable est la réverbération. Ces 5 stimuli sont présentés simultanément au participant qui peut passer d'une piste à l'autre en continuant de jouer l'extrait musical, comme s'il changeait instantanément de configuration de couplage. Il peut aussi jouer en boucle un passage de l'extrait musical afin de comparer les pistes proposées. L'interface graphique permettant de jouer les stimuli a été adaptée pour ce test à partir d'une version développée par Antti Kuusinen du Département Media Technology de l'université Aalto en Finlande.

2. Luizard, P. ; Katz, B.F.G. "Perception of reverberation in large coupled volumes: discrimination and suitability", Proc. International Symposium on Room Acoustics, Toronto, 9-11 June, 2013.

Toronto, Canada
International Symposium on Room Acoustics
2013 June 9-11



Perception of reverberation in large coupled volumes: discrimination and suitability

Paul Luizard (paul.luizard@limsi.fr)
LIMSI-CNRS, Orsay, France
LAM team, D'Alembert Institute, UPMC, Paris, France

Brian F.G. Katz (brian.katz@limsi.fr)
LIMSI-CNRS, Orsay, France

Catherine Guastavino (catherine.guastavino@mcgill.ca)
McGill University, School of Information Studies, Montreal, Canada
CIRMMT (Centre for Interdisciplinary Research on Music Media & Technology)

ABSTRACT

Reverberation in coupled volume concert halls can be modified by changing the coupling surface connecting the main hall and the control chamber(s). This study aims at investigating how sensitive trained listeners are to subtle changes in reverberation in coupled spaces. Previous research has focused on acoustical parameters in coupled volumes. The present study relies on an architectural parameter describing the sound field behaviour before relating it to acoustical parameters. In a first listening test, we measured the perceptual threshold (Just Noticeable Difference) for the size of coupling surface using an ABX discrimination task with 21 participants. The stimuli were generated by convolving anechoic recordings of bongos, soprano, and symphony orchestra with impulse responses based on the statistical model of energy decay by Cremer-Müller, with the only variable element being the coupling surface area. Thresholds are expressed in terms of coupling surface area (around 10% for all musical samples) and relevant acoustical parameters, namely the decay time of each slope and the coordinates of each bending point within the temporal energy decay curve. In a second listening test, 20 participants were asked to rate the suitability of different reverberation decays for various musical samples (solo cello and timpani, choir and symphonic orchestra). Linear reverberation (exponential decays) was rated as more suitable for the symphony orchestra while coupled reverberation (double-slope decays) was rated as more suitable for the solo instruments and choir.

1 INTRODUCTION

Large coupled volumes can be found in a variety of places such as churches, factories, train stations, and concert halls, where sound reverberation occurs. In recent decades, coupled volume concert halls have garnered increasing attention¹ as the use of reverberation chambers can provide both sound clarity and reverberance due to the non-exponential temporal sound energy decay. Furthermore variations of this particular acoustical feature are essentially controlled by the coupling surface area between the adjacent volumes. The present study focuses on the perception of changes in reverberation in terms of both discrimination thresholds (Exp. 1) and perceived suitability (Exp. 2) for different instruments or ensembles. Although perceptual thresholds can be studied in terms of reverberation time (RT), defined as the time

required for sound energy to decay by 60 dB after an impulsive excitation, this metric does not provide a sufficiently unique description of the decay behaviour and is therefore not appropriate to non-exponential decays. To limit the study to physically possible variations in a given architectural space, the present study relies on variations of an architectural feature, the coupling surface area, instead of acoustical parameters estimated from room impulse responses. While the first experiment used an ABX discrimination task to investigate coupled reverberation thresholds, the second experiment proposed various musical ensembles playing in several virtual reverberant environments to participants who rated the reverberation's suitability. Sound stimuli synthesis was involved in both experiments and an auralization method was chosen, allowing for differences between stimuli, which depended only on the coupling surface area.

2 PREVIOUS RESEARCH

Single volume concert halls have been widely studied while in comparison little research has been conducted on perceptual aspects of coupled volume concert halls. Perceptual thresholds, or just noticeable differences (JND), based on reverberation time have been estimated in large single volume rooms²⁻⁴ and were found to lie between 5% and 10% of a given RT value (for $RT < 1.0$ sec).

Since reverberation time does not provide meaningful results when applied to non-exponential decays, previous studies on coupled volume acoustics perception were not based on JND estimation. Atal and Schroeder⁵ based their research on comparison of linear (exponential) with curved (non-exponential) sound energy decays by varying the different decay rates. Results show that linear and curved decays are identified as equivalent if they present the same decay time for the first 160 ms. Frissen et al.⁶ also combined single decay rates to build double slope impulse responses and compared them to a single slope decay of common standard value $RT = 1.8$ sec. Results show that the sounds were perceived to be different if the decay time of the second slope represented a decay rate at least 1.5 times greater than the decay rate of the first exponential decay. Picard⁷ used a parametric model of curved energy decay to construct impulse responses. According to this study, to provide an audible difference the second slope has to appear at higher levels when its RT was not much greater than the one of the single decay. Ermann⁸ generated sound stimuli using the acoustic modelling software CATT-Acoustic. Participants were presented with pairs of stimuli and asked if the sounds were the same or different, if one of them had a double slope decay, and which they preferred. Subjects were more likely to differentiate the stimuli when the late parts of the decays were more varied from one another but did not exhibit a clear preference tendency.

Preference of reverberation regarding the design of a concert hall has been previously studied by Ando et al.⁹ with the definition of 4 subjective criteria: sound level, initial time delay gap (ITDG), reverberance, and interaural cross correlation (IACC), these acoustical parameters being defined in the ISO 3382-1 standard¹⁰. Another study by Ando et al.¹¹ has shown that long reverberation times (around 2.7 sec.) were preferred for baroque music played with an orchestra, slow classical music required lower RTs (around 1.2 sec.) and preferred RTs for speech were 0.3 sec. However, Schroeder et al.¹² have tested one of these classical music pieces using 11 concert halls characteristics and listeners preferred the stimuli corresponding to an $RT = 2.0$ sec. This discrepancy can be explained by stimuli parameters other than RT, such as ITDG or IACC, which are linked to spatial aspects and depend on the room geometry. More recently, Lokki et al.¹³ conducted a survey on concert hall assessment where they constructed sensory profiles made of various perceptual attributes among which reverberance appeared as the subjective size of the space as well as the listener envelopment. These attributes were

considered as separated from most of the others, such as definition, openness, loudness, or even width of sound, which were found to have more correlations with each other.

3 EXPERIMENT 1

The first experiment aims at estimating a perceptual threshold of reverberation based on the coupling surface area. Sound stimuli were generated using a model of sound energy decay in coupled spaces where the only variable was the size of the aperture. This experiment used an ABX task which requires a reference stimulus, chosen here as the condition with the largest coupling surface available.

3.1 Stimuli

The stimuli used throughout this study consisted of anechoic musical recordings convolved with monophonic impulse responses. The latter were generated by applying a temporal decay to noise, equalized in third octave bands from 63 Hz to 16 kHz. The temporal sound energy decays were calculated with the statistical theory of coupled volume acoustics by Cremer and Müller¹⁴, based on room volumes of 19,000 m³ and 6000 m³ and mean absorption coefficients of 0.40 and 0.08 for the audience room and reverberation chamber respectively. Figure 1 shows the temporal energy decays used to build the impulse responses. The coupling surface area was then varied from 1% to 10% of the inner surface of the audience room, which is a reasonable range considering existing coupled volume concert halls¹. These decays can be described by a few parameters, namely the decay time of each slope and the relative coordinates (time;level) of crossing points of consecutive slopes, as shown in Figure 2. These parameters are estimated using the Marching Line method¹⁵ which enables quantifying multi-slope decays and are presented in Table 1.

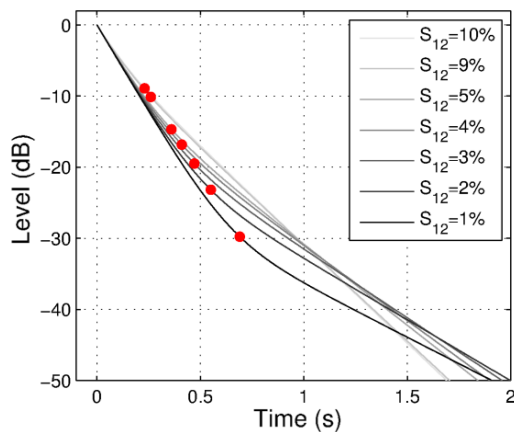


Figure 1: Temporal energy decay envelopes used to build the impulse responses. Lower decays (darker) correspond to small coupling surfaces while higher decays (lighter) represent larger coupling surfaces. Dots show the bending point for each curve.

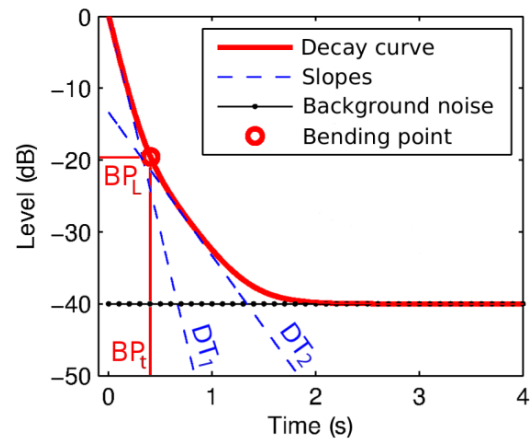


Figure 2: Acoustical parameters used for characterising multi-slope energy decays: decay time of each slope (DT_1 , DT_2) and coordinates of their crossing point in terms of time and level (BP_t , BP_L).

Anechoic recordings used to create the stimuli were short musical excerpts: bongos (Bang & Olufsen, track 26 of Music For Archimedes), a symphony orchestra playing Mahler's *Symphony n°1* and a solo soprano singer from Mozart's *Don Giovanni* (Aalto University anechoic database¹⁶). These musical excerpts present a variety of rhythms and spectral content, allowing for various critical listening strategies.

Table 1: Double slope decay parameters for various tested coupling surface sizes S_c .

S_c/S_1 (%)	1	2	3	4	5	9	10
S_c (m ²)	45.6	91.2	136.8	182.4	228.0	410.4	456.0
DT_1 (s)	1.24	1.25	1.26	1.27	1.29	1.40	1.43
DT_2 (s)	4.03	3.50	3.12	2.84	2.63	2.22	2.17
BP_t (s)	0.71	0.56	0.48	0.42	0.37	0.25	0.23
BP_L (dB)	-30.2	-23.5	-19.8	-17.1	-15.1	-9.9	-9.1

3.2 Participants

A total of 21 participants, including the last author, completed this experiment. They were 11 females and 10 males, aged 20 to 42, the mean age being 27. All participants had more than ten years of practice on a musical instrument or in sound engineering. They were tested for normal hearing using a standard audiometric test from 250 Hz to 8 kHz. Listeners received \$20 (CAD) for their participation.

3.3 Procedure

The experiments employed a standard method of constant stimuli paradigm, with a 2-interval, forced-choice task. The ABX form was chosen with a reference sound corresponding to the largest coupling surface set to 10% of the inner surface of the main room. At each trial, two different sounds, A & B, were presented to the participant over headphones. A or B were randomly the reference sound or one of the six other sounds. The third presented sound, X, was pseudo-randomly A or B. Participants could listen to the three sounds as many times as necessary. The task was to select whether sound X was sound A or sound B. A practice session of ten trials allowed participants to become familiar with the task and the sounds employed. This experiment was organized in 3 blocks corresponding to the 3 anechoic sounds. In each block, the 6 pairs of sounds (reference RIR + 1 of the 6 others) were presented 10 times in random order for a total of 60 trials per block. The duration of the experiment was about 2 hours (including the audiogram) including pauses.

3.4 Results

Results of this ABX test are expressed in terms of the proportion of right answers which depend on the ability of participants to identify the proposed sound stimuli. As can be expected, stimuli whose characteristics are very similar are more difficult to discriminate than stimuli presenting large differences. Thus after 10 trials and for the selected subjects, the most distant stimuli are correctly discriminated at a rate of approximately 100% while the closest ones obtain an average result of 50% which is chance level, as can be seen in Figure 3. This allows for analysing experimental data by finding the best fitting psychometric function which is chosen to be a parametric cumulative Gaussian free to vary in position and slope, using the software package *psignifit*¹⁷ (<http://bootstrapsoftware.org/psignifit/>), and expressed as follows:

$$\Psi(x) = \gamma + (1 - \gamma - \lambda)F(x, \alpha, \beta), \text{ with } F(x) = \frac{1}{\beta\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left[-\frac{z - \alpha}{\beta^2}\right] dz \quad (1)$$

where $\gamma=0.5$ is the lowest value of the function, $\lambda = 0.06$ is such that the maximum value of the function is $1-\lambda$, α is the point of subjective equivalence (PSE), and β^2 is the variance of the Gaussian distribution, relative to the slope of the function at $x = \alpha$, i.e. the absolute JND. The latter is also defined as the difference between the abscissa values which correspond to the second and third quarter of the possible performance. Furthermore, JND and PSE are linked by a derived form of Weber's law defining the relative JND level:

$$JND_{rel} = \frac{JND}{PSE} \quad (2)$$

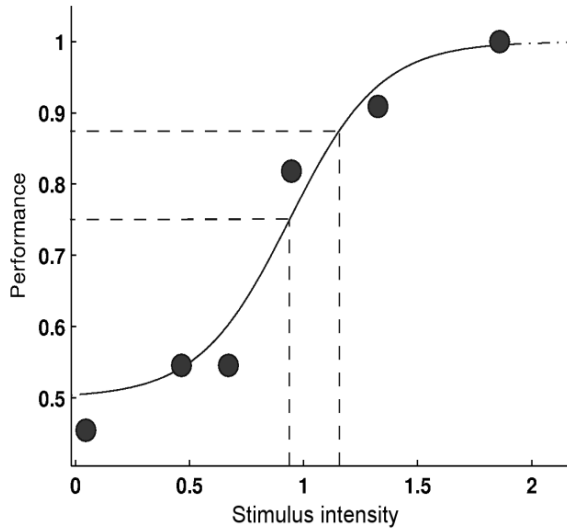


Figure 3: Example on one trial of psychometric function (curve) fitting the experimental data (dots). Dotted lines show the stimulus values relative to performances of 75% and 87.5%.

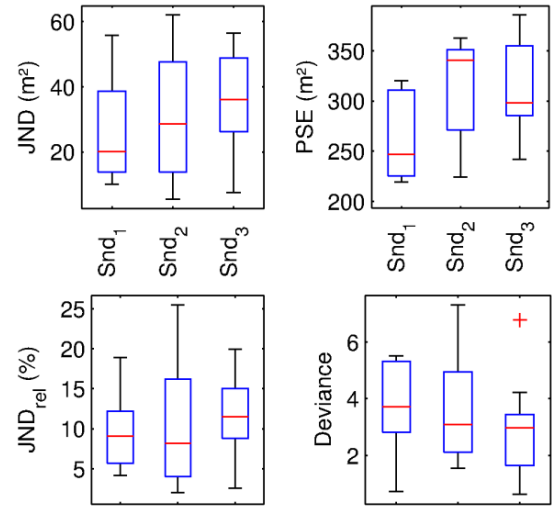


Figure 4: Results of the discrimination experiment, presented as boxplots. For each sound, rectangles represent lower and upper quartiles, the red line is the median, and whiskers show the smallest and largest observation. Snd₁ stands for the bongos sound stimuli, Snd₂ the soprano singer, and Snd₃ the orchestra.

Among participants, possible outliers had to be detected so that this listening test produces reliable results. The first step was identifying participants who could not discriminate any sound and produced random-like results. Then goodness-of-fit was estimated for the other listeners and can be expressed as a statistical deviance:

$$D = 2 \sum_{i=1}^K \left[n_i y_i \log_{10} \left(\frac{y_i}{p_i} \right) + n_i (1 - y_i) \log_{10} \left(\frac{1 - y_i}{1 - p_i} \right) \right] \quad (3)$$

where y_i stands for the experimental data and p_i refers to the predicted model of the psychometric function. Finally 54% of data was considered as outliers. The present study found an average value $JND_{rel} = 10\%$ over the 3 stimuli types, as shown in Figure 4, meaning that the coupling surface area has to be modified by at least 10% of its actual size to induce a perceptible variation in reverberation. The mean value of absolute JND is 30 m^2 for a PSE of 300 m^2 . These quantities are estimated with a reference stimulus relative to a large coupling area leading to a large PSE. Smaller coupling area would lead to a reduced PSE and thus the absolute JND would also be lower according to Eq. (2).

4 EXPERIMENT 2

The second experiment investigates the perceived suitability of reverberation for various types of musical instruments or ensembles. In this experiment, a new set of participants were asked to rate how appropriate different reverberation settings were on a continuous scale.

4.1 Stimuli

The sound stimuli were generated following the same process as in the first experiment, with 4 musical excerpts, 15 to 20 sec. long, of anechoic recordings: a solo cello, a choir (S^t Olaf Ensemble¹⁸, timpani, and the same piece of symphony orchestra as in Exp.1 (Aalto University¹⁶). Each reverberation-free recording was convolved with 5 different impulse responses: 1 linear decay and 4 coupled decays, producing a total of 20 stimuli. From the configurations presented in Table 1, the select coupling areas were 1%, 3%, 5%, and 10% of the surface of audience room. The linear energy decay was constructed in order to obtain RT = 1.8 sec. which is a common value in concert halls¹.

4.2 Participants

As in the previous experiment, participants were all expert listeners with a minimum of 10 years of practice as musician or sound engineers. A total of 23 participants completed the experiment, including 9 females and 14 males, aged 23 to 39 with mean age 29. They received \$10 (CAD) for their participation.

4.3 Procedure

Before the main experiment, participants were instructed that the sounds presented differed only in their reverberation. A training session of 1 block was proposed to give participants the opportunity to become familiar with the task and differences between sound stimuli. During this training session participants were told to set the sound level "loud enough to hear subtle details without being hurt". This level was noted and remained unchanged until the end of the test. Participants were instructed to rate in each trial how appropriate each reverberation setting was for the musical excerpt using a continuous slider. The monophonic stimuli were played over a series of 6 loudspeakers (B&W 800 Diamond), surrounding the participant in an acoustically treated room designed for critical listening. Each trial was composed of the 5 versions of a convolved anechoic recording presented at the same time on a graphical interface in random order. Participants could switch back and forth between versions while the sound was playing and had to rate each version on a slider. The 4 anechoic recordings were presented randomly to nullify any order effect and composed 1 block. The experiment comprised 4 blocks, i.e. 4 repetitions, and lasted approximately one hour.

4.4 Results

Results are expressed on a scale of “suitability” from 0 to 1. Output from each trial was normalized to the extreme values 0 and 1 to make judgments comparable across blocks and participants. Considering a given listener, repeatability of judgment was controlled using standard deviation over the 4 blocks. A threshold was set so that any judgment which exceeded standard deviation of 0.25 was removed from the analysis, resulting in 312 comparisons being retained out of the initial 460, which is 68%. Figure 5 shows the perceived suitability as a function of each reverberation condition.

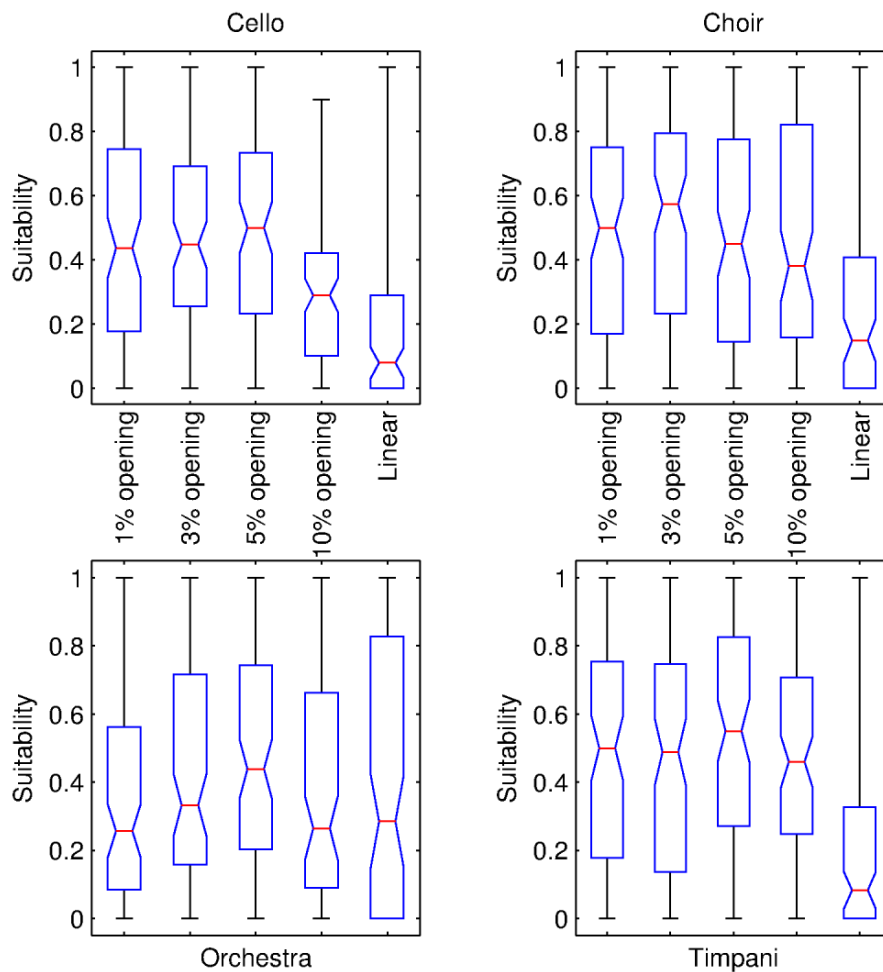


Figure 5: Results of the suitability experiment, presented as the perceived suitability of reverberation conditions against the musical ensembles. Opening percentages indicate the coupling area relative to the surface of the audience room.

For the statistical analysis, the ratings were submitted to a 4 (musical experts) x 5 (reverberation settings) 2-way ANOVA completely within subjects, repeated measures (RM) ANOVA. All effects were significant (all p-values < 0.003) including the interaction between both factors.

Given this interaction, the analysis was simplified by running separate ANOVAs for the 4 different musical excerpts. While it did not show any clear tendency for the orchestra ($F = 1.62$, $p < 0.17$), participants rated linear reverberation as less suitable than coupled reverberation for solo instrument stimuli (cello: $F = 12.85$, $p < 10^{-9}$ and timpani: $F = 5.46$, $p < 3 \cdot 10^{-4}$) as well as for the choir ($F = 6.22$, $p < 8 \cdot 10^{-5}$). Among coupled reverberation conditions, the intermediate coupling area was found to be more suitable for the solo instruments while the vocals of the choir seem to require less early reverberation. Furthermore, these results could have been expected considering the acoustical characteristics of actual concert halls relative to the type of musical ensembles they host. Although most participants were trained in critical listening, only basic spectral and temporal differences were cited as the most precise descriptions of the differences between stimuli. Interestingly, participants did not mention strong late reverberation or multiple decay rates when describing the differences heard and on which they based their judgments.

5 CONCLUSIONS

This study conducted listening tests to investigate both discrimination ability and perceived suitability of reverberation in coupled spaces with different musical stimuli. The latter were generated by convolving anechoic recordings with impulse responses corresponding to different sizes of the coupling surface. Results lead to an estimation of perceptual thresholds (JND) of 10% of the coupling area between the volumes. Furthermore, ratings of perceived suitability for various musical ensembles indicate that coupled reverberation seems to be better suited to solo instruments than large orchestral ensembles. Although these results are promising, further investigation is needed to compare various exponential reverberation conditions.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank CIRMMT for hosting the study, Antti Kuusinen & the Department of Media Technology of Aalto University for providing a template of the graphical interface for the suitability listening test, Daniel Steele for finishing the interface design and running participants for the suitability experiment, and Vincent Roggerone for running participants in the discrimination experiment.

REFERENCES

- 1 L.L. Beranek. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics and Architecture*, 2nd ed. Springer-Verlag New York, 2004.
- 2 H.P. Seraphim. Untersuchungen über die unterschiedsschwelle exponentiellen abklingens von raushbandimpulsen. *Acustica*, 8:280–284, 1958.
- 3 A. Billon and J.J. Embrechts. Discrimination thresholds of the reverberation in large volumes by naïve listeners. In *Proc. Acoustics 2012, Nantes, France*, 2012.
- 4 B.F.G. Katz. International round robin on room acoustical impulse response analysis software 2004. *Applied Research Letters Online*, 5:158–164, 2004.
- 5 B.S. Atal, M.R. Schroeder, and G.M. Sessler. Subjective reverberation time and its relation to sound decay. In *Proc. Fifth International Congress on Acoustics*, 1965.
- 6 I. Frissen, B.F.G. Katz, and C. Guastavino. Perception of reverberation in large single and coupled volumes. In *International Conference on Auditory Display*, 2009.

- 7 D. Picard. Audibility of non-exponential reverberation decays. Master's thesis, Rensselaer Polytechnical Institute, 2003.
- 8 M. Ermann. Double sloped decay: subjective listening test to determine perceptibility and preference. *Build. Ac.*, 14:91–108, 2007.
- 9 Y. Ando, S. Sato, T. Nakajima, and M. Sakurai. Acoustic design of a concert hall applying the theory of subjective preference, and the acoustic measurement after construction. *Acta Acust. Acust.*, 83:635–643, 1997.
- 10 ISO 3382-1. Acoustics - measurement of room acoustic parameters - part 1: Performance spaces, 2009.
- 11 Y. Ando, M. Okura, and K. Yuasa. On the preferred reverberation in auditoriums. *Acustica*, 50:134–141, 1982.
- 12 M.R. Schroeder, D. Gottlob, and K.F. Siebrasse. Comparative study of european concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters. *J. Acoust. Soc. Am.*, 56:1195–1201, 1974.
- 13 T. Lokki, J. Pätinen, A. Kuusinen, H. Vertanen, and S. Tervo. Concert hall acoustics assessment with individually elicited attributes. *J. Acoust. Soc. Am.*, 130(2):835–849, 2011.
- 14 L. Cremer, H.A. Müller, and T.J. Schultz. *Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik / Principle and Applications of Room Acoustics*. Hirzel Verlag / Applied Science Publisher, 1978 / 1982.
- 15 P. Luizard and B.F.G. Katz. Coupled volume multi-slope room impulse responses: a quantitative analysis method. In *Proc. Institute of Acoustics, 8th International Conference on Auditorium Acoustics, Dublin, 20-22 May, 2011*.
- 16 J. Pätinen, V. Pulkki, and T. Lokki. Anechoic recording system for symphony orchestra. *Acta Acust. Acust.*, 94:856–865, 2008.
- 17 F.A. Wichmann and N.J. Hill. The psychometric function: I. fitting, sampling and goodness of fit. *Perception & Psychophysics*, 63:1293–1313, 2001.
- 18 R. Freiheit. Creating an anechoic choral recording. In *Proc. International Symposium on Room Acoustics, Melbourne, 2010*.

4.2.2 Bilan

L'expérience portant sur la question de savoir si un type de réverbération est adaptée à l'écoute d'une formation musicale particulière a montré qu'une réverbération couplée correspondant à une surface de couplage de taille moyenne (3% à 5% de la surface de la salle principale), comparée à une réverbération linéaire, est jugée plus appropriée pour un instrument seul ou une chorale, alors qu'aucune tendance claire n'émerge pour un orchestre symphonique. Cependant, il faut prendre en considération un certain nombre d'éléments avant de généraliser un tel résultat. La méthode de synthèse sonore étant la même que dans l'expérience de discrimination présentée dans la Section 4.1, une partie de la discussion de la Section 4.1 s'applique à la présente expérience.

Parmi les différentes réverbérations comparées, une seule est une réverbération linéaire susceptible d'être rencontrée dans une salle à volume unique. Cela ne permet pas d'établir une conclusion généralisant l'aspect approprié des salles couplées par rapport aux salles à volume unique pour l'écoute des formations musicales proposées. De plus, ces dernières comprennent deux formations très réduites que sont les instruments seuls, un ensemble vocal avec la chorale et une formation très grande avec l'orchestre symphonique. L'échantillonnage des formations musicales pourrait être étendu à un orchestre de taille intermédiaire comme un orchestre de musique de chambre et à un petit groupe d'instruments, comme un trio ou un quatuor.

La majorité des participants étaient des ingénieurs du son, habitués à manipuler et écouter différentes réverbérations artificielles. Les autres participants étaient musiciens avec au moins dix années de pratique. Ainsi l'ensemble des participants, ayant déclaré assister à plusieurs concerts par mois en moyenne, peuvent être considérés comme des experts de l'écoute musicale en environnement réverbérant, ce qui limite la validité des résultats obtenus à une certaine population.

Par ailleurs, la sélection des réponses retenues a été faite selon un critère de répétabilité des jugements. En effet, les groupes de stimuli étaient répétés 4 fois dans un ordre aléatoire et un écart-type a été calculé afin d'estimer la répétabilité des jugements. Les jugements étant normalisés entre 0 ("réverbération très peu appropriée") et 1 ("réverbération très appropriée"), un seuil de 0,25 a été établi arbitrairement, aucun seuil standardisé n'ayant été trouvé dans la littérature. Avec ce critère, 68% des jugements ont été écartés sur les 460 recueillis, ce qui est une proportion importante. La faible proportion de résultats retenus peut être due à la difficulté du test, bien que les différences entre stimuli tiennent compte du seuil de discrimination obtenu dans l'expérience décrite dans la Section 4.1 de sorte que les différences soient audibles. Une autre raison pourrait être l'effet d'apprentissage au sens où les participants peuvent s'habituer progressivement à l'environnement sonore et aux sons proposés, malgré la phase d'entraînement prévue au début du test. Ainsi il faut trouver un compromis entre temps d'adaptation à la tâche demandée et longueur trop importante du test qui entraîne une fatigue et une baisse d'attention du participant.

Enfin, les stimuli étaient des signaux monophoniques diffusés sur six enceintes entourant le participant afin de créer un effet d'enveloppement. Cette méthode de rendu sonore n'inclut pas de notion de directivité, comme par exemple une direction d'arrivée du son direct ou un rendu

sonore en trois dimensions. Cela peut être considéré comme un manque de réalisme susceptible de perturber le participant dans son jugement. Par contre, un autre point de vue pourrait considérer que les comparaisons entre stimuli restent possibles puisque ces derniers sont synthétisés selon la même méthode. Comme lors de l'expérience de discrimination, sur les 23 participants, seulement 2 se sont plaints de la faible qualité sonore des stimuli, ce qui indique que le manque de réalisme potentiel des stimuli n'était pas un élément majeur du jugement.

Conclusion générale

Ce travail de thèse ayant pour objectif de mieux comprendre l'acoustique des espaces couplés dans son ensemble, il adopte un point de vue transversal comprenant différents aspects mis en jeu. Nous avons mené des études sur le comportement du champ acoustique dans une géométrie simple avec des outils de modélisation tels qu'une maquette acoustique, des modèles analytiques et des simulations numériques. Les comparaisons entre méthodes sont effectuées grâce à des indices acoustiques estimés à l'aide d'un algorithme adapté aux spécificités des volumes couplés. Finalement, la perception de la réverbération est étudiée par rapport aux caractéristiques architecturales de ces espaces, notamment la surface de couplage. Les contributions de cette thèse à l'acoustique des salles couplées sont exposées dans la Section 5.1 et des perspectives de recherche ouvertes par ce travail sont proposées dans la Section 5.2.

5.1 Contributions de la thèse

Les contributions de ce travail de thèse sont présentées dans cette Section selon les trois axes qui ont guidé les recherches effectuées. La plupart d’entre elles ont donné lieu à des publications reproduites dans les Chapitres de ce manuscrit.

5.1.1 Analyse de réponses impulsionnelles couplées

Suite à la constatation que la norme dédiée à l’acoustique des salles [ISO3382-1, 2009] ne définit pas d’estimateurs capables de décrire totalement des décroissances à plusieurs pentes, il est apparu nécessaire de proposer une série d’indices acoustiques adaptés aux espaces couplés. Ceci a été réalisé au début de la thèse, inspiré d’une part par les idées de Brian Katz, et d’autre part, par les recherches de Xiang et al. [Xiang and Goggans, 2001; 2003] qui utilisent des modèles paramétriques de décroissances couplées, dont les paramètres servent à quantifier ces décroissances. Les indices définis dans la Section 2.2 sont les temps de décroissance DT_i de chaque pente détectée ainsi que le temps et le niveau des points de courbure BP_t et BP_L . De cette manière, les réponses impulsionnelles de salles couplées peuvent être décrites précisément et de manière unique, ce qui permet de les comparer et de juger l’influence de paramètres architecturaux ou de différentes méthodes de modélisation.

Par ailleurs un algorithme semi-automatique a été développé afin d’analyser les réponses impulsionnelles couplées, simulées ou mesurées, en estimant ces indices acoustiques. Cet algorithme récursif présenté dans la Section 2.2 est basé sur le fait que les courbes de décroissance de l’énergie acoustique propres aux salles couplées présentent une succession de parties droites et courbes. L’algorithme repère les pentes des parties droites à l’aide de régressions linéaires ainsi que les coordonnées (temps; niveau) des points de courbure (“bending points”) d’après des paramètres d’entrée spécifiés par l’utilisateur, notamment l’écart *rms* maximal entre la courbe de décroissance et une régression linéaire.

5.1.2 Modélisation de champs acoustiques dans des espaces couplés

Les premières modélisations ont permis de comparer les mesures dans la maquette dans sa forme la plus simple, deux pavés partiellement garnis de matériaux absorbants, avec des simulations numériques par lancer de rayons et la théorie statistique de Cremer et al. [Cremer et al., 1982]. Les résultats ont montré que cette théorie statistique était trop éloignée des mesures et simulations numériques, beaucoup plus proches entre elles, pour être considérée comme fiable et être utilisée par la suite. Les principales différences observées étaient liées à des niveaux sonores trop élevés dans les prévisions de cette théorie. Étant donné que cette dernière ne considère aucune décroissance spatiale du champ acoustique, une piste pour la suite du travail de modélisation a été d’inclure une dépendance à l’espace dans un modèle analytique.

La première tentative a été d’associer cette théorie de décroissance temporelle à celle de Barron et al. [Barron and Lee, 1988] qui prévoit une décroissance spatiale dans les salles à volume unique. Le modèle ainsi obtenu est décrit dans la Section 3.3. Les comparaisons effectuées avec des mesures et simulations dans les mêmes configurations ont mené à des résultats plus proches

que précédemment malgré des différences persistantes. Par ailleurs, ce modèle analytique est purement heuristique et ne trouve aucun fondement théorique valide. Les recherches se sont alors tournées vers l'équation de diffusion qui associe naturellement des variations dans le temps et dans l'espace, et qui a été utilisée précédemment pour décrire l'évolution spatiotemporelle de champs acoustiques. Une solution analytique approchée de cette équation a été proposée. Elle vérifie l'équation de diffusion en régime stationnaire. Le terme de décroissance temporelle est artificiellement ajouté, ce qui constitue l'approximation et fait de ce modèle un modèle heuristique. Les résultats obtenus en comparaison des mesures et simulations numériques montrent que ce modèle décrit correctement le comportement de champs acoustiques dans des volumes couplés pour différentes tailles de surface de couplage et positions de sources et récepteurs. En effet, les résultats du modèle analytique se trouvent généralement entre ceux des mesures et des simulations numériques. Ainsi un modèle analytique peut être utilisé pour prévoir le comportement de champs acoustiques dans des volumes couplés avec un temps de calcul faible, comme il a été montré dans la Section 3.3.

Enfin, une étude comparative considérant différentes méthodes numériques de prévision de champs acoustiques dans des volumes couplés a été menée en prenant comme référence les mesures dans la maquette acoustique. Elle est présentée dans la Section 3.2. Ainsi, une même géométrie et des positions de source et récepteurs ont été entrées dans deux logiciels de lancer de rayons, un code utilisant la méthode des éléments frontière (BEM) et un code basé sur les différences finies en domaine temporel (FDTD). Les résultats ont montré que les réponses impulsionnelles générées par le lancer de rayons étaient plus proches des mesures que celles des autres méthodes. Pourtant ces dernières résolvent numériquement l'équation des ondes dans le milieu donné, ce qui mène théoriquement à des résultats plus proches de la réalité que l'approche purement géométrique de la méthode de lancer de rayons. Les écarts observés sont certainement dûs, entre autre, à la façon dont sont définies les conditions aux limites, par exemple l'impédance complexe des parois à réaction locale pour le code de différences finies, ou le retard de phase à chaque réflexion qui n'est pas pris en compte dans le code d'éléments frontière, ou encore au maillage réalisé qui n'est pas forcément identique à la géométrie de la maquette. Enfin, l'absorption de l'air n'est pas prise en compte, ce qui pose des problèmes aux fréquences élevées. Ainsi les codes mis en œuvre dans cette étude semblent devoir être perfectionnés pour concurrencer les logiciels de lancer de rayons utilisés, en termes de précision des résultats.

5.1.3 Perception de la réverbération dans des espaces couplés

La première expérience perceptive menée au cours de cette thèse a porté sur la discrimination de la réverbération couplée. Cette expérience est décrite dans la Section 4.1. Les stimuli synthétisés à partir de l'application de décroissances couplées sur du bruit filtré présentent des différences dues à différentes tailles de surface de couplage. Ainsi la recherche de seuil de perception est basée sur ce paramètre architectural. Les résultats ont montré qu'un auditeur situé dans la salle la moins réverbérante d'une salle de concert à volumes couplés par une surface de couplage de taille donnée est sensible à une variation de cette surface ouverte d'au moins 10%. Deux tests ont été menés à l'aide d'un protocole ABX, pour deux stimuli de référence différents,

correspondant aux ouvertures maximale et minimale. Les résultats donnent la même valeur de seuil de perception à $10 \pm 1\%$.

La seconde expérience consistait à demander à des auditeurs quelle réverbération est la plus appropriée à l'extrait musical qui leur était proposé. Les stimuli étaient faits à nouveau à partir de décroissances couplées et d'une décroissance linéaire correspondant à une salle à volume unique. Les extraits musicaux choisis étaient des instruments seuls, une chorale et un orchestre symphonique. Pour un extrait musical donné, les différentes versions obtenues en appliquant les réverbérations étaient présentées au participant qui devait les noter simultanément entre "pas du tout approprié" et "tout à fait approprié". Les résultats exprimés sur une échelle normalisée montrent que les réverbérations couplées ont tendance à être mieux notées pour les instruments seuls et la chorale alors qu'aucune tendance franche n'apparaît pour l'orchestre symphonique. Une hypothèse a été formulée pour expliquer ces résultats, basée sur le fait que les réverbérations couplées présentent généralement une clarté, ou précision, plus importante que la réverbération linéaire grâce à leur pente précoce plus forte, ce qui est peut-être plus adapté à l'écoute d'une formation musicale réduite. L'orchestre symphonique au contraire semble nécessiter une réverbération précoce plus importante du fait de l'effectif des musiciens impliqués.

5.2 Perspectives

Cette Section propose diverses perspectives en regard des points que nous avons abordés et développés pendant ce travail de thèse.

5.2.1 Améliorations de l'algorithme Marching Line

L'algorithme Marching Line qui a été développé pour l'analyse de réponses impulsionnelles à plusieurs pentes (Section 2.2) demande plusieurs paramètres en entrée dont certains doivent être réglés finement afin d'obtenir les valeurs optimales des indices acoustiques. Une amélioration est possible et consisterait à définir automatiquement un seuil d'écart toléré entre une partie droite de la décroissance et la régression linéaire correspondante, représentées sur la Figure 1 de l'article [Luizard and Katz, 2011] reproduit dans la Section 2.2. Ce seuil peut être défini de manière itérative en observant les taux de variation de l'écart et en repérant l'augmentation brutale qui correspond au point de courbure. En effet la valeur absolue de cet écart dépend du degré d'irrégularité de la décroissance à analyser : une décroissance très lisse comme celles issues de modèles analytiques produira un écart absolu faible entre sa portion droite et la régression linéaire associée, alors que les décroissances issues des mesures sont beaucoup moins lisses et produisent rapidement des écarts plus importants. Ainsi le seuil de cet écart correspondant à la limite de la partie droite de la décroissance dépend de la variation de l'écart et non de sa valeur absolue. D'autre part, il pourrait être intéressant d'introduire un critère venant de la perception pour déterminer si deux temps de décroissance consécutifs (ou temps de réverbération équivalent pour chaque pente) sont suffisamment différents pour être audibles. Pour cela, il faudrait prolonger les investigations perceptives liées aux réverbérations à plusieurs pentes.

5.2.2 Éléments de comparaison du modèle de diffusion

Plusieurs comparaisons ont été menées afin de valider le second modèle analytique décrit dans la Section 3.3 telles que la position de la surface de couplage, celles des sources et récepteurs ainsi que la taille de la surface de couplage. Cependant il pourrait être intéressant de faire varier l'absorption dans chaque salle afin d'observer le comportement des décroissances correspondantes, notamment les niveau et temps du point de courbure. Par ailleurs, la surface de couplage était alignée avec la source et les récepteurs lors de ces comparaisons. On peut imaginer placer la surface de couplage sur une paroi latérale comme c'est souvent le cas dans les salles existantes, afin de vérifier la robustesse du modèle pour différentes configurations spatiales.

5.2.3 Développement du modèle de diffusion

La version du modèle de diffusion a été codée pour être comparée à la maquette qui ne possède qu'une ouverture donnant sur une chambre de réverbération unique. Il serait possible de coder une version comprenant plusieurs chambres de réverbération ainsi que plusieurs ouvertures transmettant l'énergie sonore d'un volume à l'autre, ce qui permettrait de généraliser le modèle et de l'adapter à davantage de cas réels. D'autre part, la version actuelle du codage pour les

volumes couplés basé sur la solution proposée de l'équation de diffusion fonctionne dans un plan. Il est possible de réaliser une version qui superpose ces plans afin d'obtenir la prévision de champs acoustiques dans l'espace. Puisque l'estimation du niveau sonore initial dépend de la distance du récepteur considéré à la source et à la surface de couplage, cette modification serait relativement facile à réaliser. Cela pose la question de la modélisation de la surface de couplage qui est actuellement vue comme une source ponctuelle et la distance au récepteur est calculée à partir de son centre. En effet, si une modélisation en trois dimensions est envisagée, il semble important de répartir l'énergie transmise par l'ouverture comme les contributions de plusieurs éléments de surface.

5.2.4 Élargissement de l'investigation perceptive

Les tests d'écoute pratiqués lors de ce travail de thèse, rapportés dans le Chapitre 4, ont mis en jeu un nombre relativement restreint d'extraits musicaux. Il serait intéressant d'effectuer des tests équivalents avec d'autres types de formations musicales ou même de la voix parlée. Le tout est d'avoir accès à des enregistrements anéchoïques de qualité, avec un niveau de bruit de fond suffisamment bas pour obtenir un stimulus réaliste. Enfin, les stimuli proposés lors de ces tests étant des sons monophoniques du fait du processus de synthèse des réponses impulsionnelles employé, l'immersion engendrée pourrait être fortement augmentée en utilisant un rendu sonore spatialisé. Cela permettrait éventuellement à l'auditeur d'avoir une impression plus réaliste de se trouver dans une salle, ce qui pourrait influencer son jugement. En effet, si le participant a l'impression que les stimuli sont trop artificiels, ce qui n'a été relevé que rarement au cours des tests d'écoute présentés dans ce travail mais reste envisageable, il est possible que le participant se focalise sur la qualité du rendu sonore au détriment de la tâche demandée. Une sensation d'immersion plus importante le mettrait plus facilement en situation de spectateur dans une salle, ce qui contribuerait à sa concentration sur l'écoute.

5.2.5 Mesures réalisées, pas encore exploitées

Durant l'été 2012, nous avons réalisé des séries de mesures dans la salle de concert à volumes couplées Sibeliustalo à Lahti en Finlande. L'objectif principal de ces mesures était de confronter les modèles physiques et numériques à la réalité d'une salle à pleine échelle. Malheureusement, les chambres de réverbération de cette salle, une de chaque côté de la salle principale, n'ont pas un temps de réverbération suffisamment élevé et l'effet attendu, à savoir la présence de plusieurs taux de décroissance dans les réponses impulsionnelles, n'a pas été observé. Ainsi ces mesures seront exploitées plus tard, notamment parce qu'elles présentent la particularité d'avoir été réalisées avec un microphone ambisonique d'ordre 1, une tête artificielle et plusieurs microphones omnidirectionnels. Un nombre important de configurations d'ouvertures des portes réparties sur trois niveaux entre la salle principale et les chambres de réverbération ont été testées, faisant varier de différentes manières l'absorption globale du lieu ainsi que les flux d'énergie acoustique.

Enfin, de nombreuses séries de mesures dans la maquette du LIMSI ainsi que des simulations numériques par lancer de rayons dans les mêmes configurations ont été effectuées à l'occasion

d'un stage réalisé au début de l'année 2013 par Renaud Leblanc-Guindon. Une partie des configurations testées consistaient en une même surface de couplage égale à 1% de la surface de la salle principale, distribuée différemment : une seule ouverture carrée, 4 puis 16 ouvertures carrées, une ouverture étroite et longue positionnée en partie basse de la paroi séparant les salles, la même ouverture en position haute. Ces mesures et simulations numériques ont pour objectif d'évaluer l'influence de la géométrie de la surface de couplage sur le comportement du champ acoustique. Cela peut être utile pour obtenir une précision supplémentaire par rapport à certains modèles statistiques comme celui de Cremer et al. [Cremer et al., 1982] qui ne considèrent que la surface totale de couplage sans considérer sa distribution spatiale. De plus, il serait intéressant d'observer un filtrage éventuel dû à la taille des unités de surface de couplage distribuées. D'autres comparaisons ont été effectuées, impliquant une ouverture pivotante faisant un angle avec la paroi et une ouverture coulissante restant parallèle à la paroi. L'idée de ces comparaisons était de trouver une série de points d'équivalence entre des ouvertures en rotation et en translation. Ces mesures et simulations numériques ont été partiellement analysées et montrent des résultats prometteurs qui nécessitent cependant des analyses plus approfondies avant d'être publiées.

5.3 Publications liées à la thèse

Cette Section établit une liste des publications produites pendant cette thèse.

Articles de journaux soumis

Luizard, P. ; Polack, J.-D. ; Katz, B.F.G. “Sound energy decay in coupled spaces based on a parametric analytical solution of a diffusion equation”, *J. Acoust. Soc. Am.* (soumis le 1^{er} juillet 2013)

Luizard, P. ; Katz, B.F.G. ; Guastavino, C. “Perceptual thresholds for double-slope decay reverberation in large coupled spaces”, *J. Acoust. Soc. Am.* (soumis le 18 mars 2013, en phase de révision)

Actes de conférences internationales

Luizard, P. ; Polack, J.-D. ; Katz, B.F.G. “Auralization of coupled spaces based on a diffusion equation model”, *Proc. Sound and Music Computing Conference*, Stockholm, Sweden, 30 July - 3 August, 2013.

Luizard, P. ; Katz, B.F.G. ; Guastavino, C. “Perception of reverberation in large coupled volumes : discrimination and suitability”, *Proc. International Symposium on Room Acoustics*, Toronto, Canada, 9-11 June, 2013.

Luizard, P. ; Otani, M. ; Botts, J. ; Savioja, L. ; Katz, B.F.G. “Comparison of sound field measurements and predictions in coupled volumes between numerical methods and scale model measurements”, *Proc. 21st International Congress on Acoustics*, Montreal, Canada, 2-7 June, 2013.

Luizard, P. ; Katz, B.F.G. “Coupled volume multi-slope room impulse responses : a quantitative analysis method”, *Proc. Institute of Acoustics, 8th International Conference on Auditorium Acoustics*, Dublin, 20-22 May, 2011. Vol. 33. Pt.2, pp. 169-176.

Katz, B.F.G. ; Delarozière, O. ; Luizard, P. “A ceiling case study inspired by an historical scale model”, *Proc. Institute of Acoustics, 8th International Conference on Auditorium Acoustics*, Dublin, 20-22 May, 2011. Vol. 33. Pt.2, pp. 314-321.

Conférence internationale sans actes

Luizard, P. ; Xiang, N. ; Polack, J.D. ; Katz, B.F.G. “Coupled volumes and statistical acoustics : preliminary results of an improved analytical model”, *Proc. Acoustics 2012 Conference*, Hong Kong, 13-18 May, 2012.

Conférences nationales sans actes

Luizard, P. ; Guastavino C. ; Polack J.D. ; Katz, B.F.G. “Perception sonore dans les volumes couplés”, *Journées de Perception Sonore*, Marseille, 10-11 December, 2012.

Luizard, P. ; Guastavino C. ; Polack J.D. ; Katz, B.F.G. “Perception sonore dans les volumes couplés”, Journées des Jeunes Chercheurs en Audition, Acoustique musicale et Signal audio, Marseille, 5-7 December, 2012.

Luizard, P. “Les volumes couplés en acoustique des salles”, Journées des Jeunes Chercheurs en Audition, Acoustique musicale et Signal audio, Rennes, 7-9 December, 2011.

Luizard, P. ; Katz, B.F.G. “Etude des volumes couplés en acoustique des salles”, Journées des Jeunes Chercheurs en Audition, Acoustique musicale et Signal audio, Paris, 17-19 November, 2010.

Article de magazine

Katz, B.F.G. ; Delarozière, O. ; Luizard, P. “A ceiling case study, inspired by an historical scale model.” *Acoustics Bulletin*, Vol 36, n. 6, pp. 38-43, 2011.

Bibliographie

- J.B. Allen and D.A. Berkley. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 65:943–950, 1979.
- J. Amanatides. Ray tracing with cones. In *SIGGRAPH '84 Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, Mineapolis, MN, USA, 23-27 July*, 1984.
- J.S. Anderson and M. Bratos-Anderson. Acoustic coupling effects in S^t Paul's Cathedral, london. *Journal of Sound and Vibration*, 236(2):209–225, 2000.
- Y. Ando, M. Okura, and K. Yuasa. On the preferred reverberation in auditoriums. *Acustica*, 50:134–141, 1982.
- Y. Ando, S. Sato, T. Nakajima, and M. Sakurai. Acoustic design of a concert hall applying the theory of subjective preference, and the acoustic measurement after construction. *Acta Acustica united with Acustica*, 83:635–643, 1997.
- M. Arana, A. Vela, and L.S. Martin. Calculating the impulse response in rooms using pseudo-impulsive acoustic sources. *Acta Acustica United with Acustica*, 89:377–380, 2003.
- B.S. Atal, M.R. Schroeder, and G.M. Sessler. Subjective reverberation time and its relation to sound decay. In *Proc. 5th International Congress on Acoustics, Liege, Belgium*, 1965.
- P.W. Barnett. A review of reverberation enhancement systems. In *Proc. 16th conference of the Audio Engineering Society, Sound Reinforcement, pp.518-533, 5-8 May*, 1998.
- M. Barron. The subjective effects of first reflections in concert halls - the need for lateral reflections. *J. Sound Vib.*, 15(4):475–494, 1971.
- M. Barron. Auditorium acoustic modelling now. *Applied Acoustics*, 16:279–290, 1983.
- M. Barron. *Auditorium acoustics and architectural design*. Spon/Chapman & Hall, London, 443 p., 1993.
- M. Barron. Interpretation of early decay times in concert auditoria. *Acustica*, 81:320–331, 1995.
- M. Barron. Non-linear decays in simple spaces and their possible exploitation. In *Proc. Institute of Acoustics, 8th International Conference on Auditorium Acoustics, Dublin, 20-22 May*, 2011.
- M. Barron and C.B. Chinoy. 1:50 scale acoustic models for objective testing of auditoria. *Applied Acoustics*, 12 (5):361–375, 1979.
- M. Barron and L.J. Lee. Energy relations in concert auditoriums. *Journal of the Acoustical Society of America*, 84, 1988.

- H.E. Bass and F. Douglas Shields. Absorption of sound in air: High-frequency measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 62 (3):571–576, 1977.
- A. Bassuet. Acoustics of a selection of famous 18th century opera houses: Versailles, markgräfliches, drottningholm, schweitzingen. In *Acoustics 08, Paris, France, June 29 - July 4*, 2008.
- A. Bassuet. New acoustical parameters and visualization techniques to analyze the spatial distribution of sound in music spaces. In *ISRA 2010, Melbourne, Australia, 29-31 August*, 2010.
- L.L. Beranek. Audience and chair absorption in large halls. II. *Journal of the Acoustical Society of America*, 45 (1):13–19, 1969.
- L.L. Beranek. *Concert and opera halls: How they sound*. American Institute of Physics, New York, 643 p., 1996.
- L.L. Beranek. Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces. *Journal of the Acoustical Society of America*, 104 (6):3169–3177, 1998.
- L.L. Beranek. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics and Architecture*, 2nd ed. Springer-Verlag, New York, 667 p., 2004.
- A.J. Berkhout, D. de Vries, and M.M. Boone. A new method to acquire impulse responses in concert halls. *Journal of the Acoustical Society of America*, 68 (1):179–183, 1980.
- A.J. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel. Acoustic control by wave field synthesis. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93 (5):2764–2778, 1993.
- A. Billon. On the spatial variations of double-sloped decay in coupled-volume concert halls. In *ISRA 2007, Seville, Spain*, 10-12 September 2007.
- A. Billon and J.J. Embrechts. Discrimination thresholds of the reverberation in large volumes by naïve listeners. In *Proc. Acoustics 2012, Nantes, France*, pp. 23-27, 2012.
- A. Billon, V. Valeau, and A. Sakout. On the use of a diffusion model for acoustically coupled rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 120, 2006.
- A. Billon, C. Foy, J. Picaut, V. Valeau, and A. Sakout. Modeling the sound transmission between rooms coupled through partition walls by using a diffusion model. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123:4261–4271, 2008.
- J. Botts and N. Xiang. Bayesian inference for acoustic impedance boundaries in room-acoustic finite difference time-domain modeling. In *Proc. 31st International Workshop on Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering, Waterloo, Ontario, Canada, 9-16 July*, 2011.

-
- D.T. Bradley and L.M. Wang. The effects of simple coupled volume geometry on the objective and subjective results from exponential decay. *Journal of the Acoustical Society of America*, 118:1480–1490, 2005.
- D.T. Bradley and L.M. Wang. Quantifying the double slope effect in coupled volume room systems. *Building Acoustics*, 16:105–123, 2009.
- D.T. Bradley and L.M. Wang. Optimum absorption and aperture parameters for realistic coupled volume spaces determined from computational analysis and subjective testing results. *Journal of the Acoustical Society of America*, 127:223–232, 2010.
- J.S. Bradley. Auditorium acoustics measures from pistol shots. *Journal of the Acoustical Society of America*, 80 (1):199–205, 1986.
- F. Canac. *L'acoustique des théâtres antiques - Ses enseignements*. Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 181 p., 1967.
- A.P.O. Carvalho. Objective acoustical analysis of room acoustic measurements in Portuguese catholic churches. In *Proc. Noise-Con, Ft. Lauderdale, Florida, USA, 1-4 May, pp. 805-810*, 1994.
- S. Chiles and M. Barron. Sound level distribution and scatter in proportionate spaces. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116(3):1585–1595, 2004.
- W.T. Chu. Impulse-response and reverberation-decay measurements made by using a periodic pseudorandom sequence. *Applied Acoustics*, 29:193–205, 1990.
- E. Cirillo and F. Martellotta. An improved model to predict energy-based acoustic parameters in apulian-romanesque churches. *Applied Acoustics*, 64:1–23, 2003.
- E. Cirillo and F. Martellotta. Sound propagation and energy relations in churches. *Journal of the Acoustical Society of America*, 118 (1):232–248, 2005.
- A. Cocchi, L. Tronchin, A. Farina, and M. Cesare. A comparison between some measurement techniques in the foligno auditorium. In *Proc. Institute of Acoustics, 24 (4), London, UK, 19-21 July*, 2002.
- T. Cox and P. D'Antonio. *Acoustic absorbers and diffusers - Theory, design and application*. Taylor & Francis, New York, 476 p., 2nd ed., 2009.
- L. Cremer, H.A. Müller, and T.J. Schultz. *Principle and Applications of Room Acoustics*. Applied Science, New York, 651 p., 1982.
- N. Dadoun, D.G. Kirkpartick, and J.P. Walsh. The geometry of beam tracing. In *SCG '85 Proceedings of the first annual symposium on Computational Geometry, Baltimore, MD, USA, 5-7 June*, 1985.

- B.I. Dalenbäck. Room acoustic prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection. *Journal of the Acoustical Society of America*, 100, 1996.
- B.I. Dalenbäck. Engineering principles and techniques in room acoustics prediction. In *Proc. of Baltic Nordic Acoustics Meeting, Bergen, Norway, 10-12 May*, 2010.
- W.D.T. Davies. Generation and properties of maximum-length sequences. *Control*, pages 302–433, 1966.
- A.H. Davis. Reverberation equations for two adjacent rooms connected by an incompletely sound-proof partition. *Philosophical Magazine*, 50:75–80, 1925a.
- A.H. Davis. The analogy between ripples and acoustical wave phenomena. *Proc. of the Physical Society of London*, 38:234–246, 1925b.
- C. Dunn and M. Hawksford. Distortion immunity of MLS-derived impulse response measurements. *Journal of the Audio Engineering Society*, 41 (5):314–335, 1993.
- J. Engl. *Raum-und Bauakustik. Ein Leitfadens für Architekten und Ingenieure*. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 370 p., 1939.
- M. Ermann. Coupled volumes: aperture size and the double-sloped decay of concert halls. *Building Acoustics*, 12 (1):1–14, 2005.
- M. Ermann. Double sloped decay: subjective listening test to determine perceptibility and preference. *Building acoustics*, 14:91–108, 2007.
- M. Ermann and M. Johnson. Exposure and materiality of the secondary room and its impact on the impulse response of coupled-volume concert halls. *Journal of Sound and Vibration*, 284:915–931, 2005.
- J. Escolano, J.M. Navarro, and J.J. Lopez. On the limitation of a diffusion equation model for acoustic predictions of rooms with homogeneous dimensions (L). *Journal of the Acoustical Society of America*, 128 (4):1586–1589, 2010.
- R. Essert. Conception des salles de concert. sensibilisation à l’espace sonore et sa maîtrise. *UER - Revue Technique*, Hiver:31–39, 1997.
- L.B. Evans, H.E. Bass, and L.C. Sutherland. Atmospheric absorption of sound: theoretical predictions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 51 (5):1565–1575, 1972.
- C.F. Eyring. Reverberation time measurements in coupled rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 3:181–206, 1931.
- C.F. Eyring. Methods of calculating the average coefficient of sound absorption. *Journal of the Acoustical Society of America*, 4:178–192, 1933.

-
- A. Farina. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. In *Proc. 118nd Audio Engineering Society Convention, Paris, France, 18-22 February, 2000*.
- A. Farina. Acoustic quality of theatres: correlations between experimental measures and subjective evaluations. *Applied Acoustics*, 62:889–916, 2001.
- A. Farina. Advancements in impulse response measurements by sine sweeps. In *Proc. 122nd Audio Engineering Society Convention, Vienna, Austria, 5-8 May, 2007*.
- P. Fausti and A. Farina. Acoustic measurements in opera houses: comparison between different techniques and equipment. *Journal of Sound and Vibration*, 232 (1):241–250, 2000.
- R. Freiheit. Creating an anechoic choral recording. In *Proc. International Symposium on Room Acoustics, Melbourne, 29-31 August, 2010*.
- I. Frissen, B.F.G. Katz, and C. Guastavino. Perception of reverberation in large single and coupled volumes. In *Proc. International Conference on Auditory Display, Copenhagen, Denmark, May 18-22, 2009*.
- I. Frissen, B.F.G. Katz, and C. Guastavino. *Auditory Display*, chapter Effect of sound source stimuli on the perception of reverberation in large volumes, pages 358–376. Springer, New York, 493 p., 2010.
- T. Funkhouser, N. Tsingos, I. Carlbom, G. Elko, M. Sondhi, J.E. West, G. Pingali, P. Min, and A. Ngan. A beam tracing method for interactive architectural acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 115 (2):739–756, 2003.
- E. Green. Systematic spatial variations of objective measures in a 1:25 scale model rectangular concert hall with variable scattering. In *Proc. International Symposium on Room Acoustics, Toronto, Canada, 9-11 June, 2013*.
- D. Griesinger. Beyond MLS - Occupied hall measurement with FFT techniques. In *Proc. 101st Audio Engineering Society Convention, Los Angeles, USA, 8-11 November, 1996*.
- V. Grillon. *Auralisation dans les maquettes: traitement des réponses impulsionnelles*. PhD thesis, Université du Maine, Le Mans, 1995.
- D. Havelock, S. Kuwano, and M. Vorländer. *Signal processing in acoustics*. Springer, New York, 1908 p., 2008.
- P.S. Heckbert and P. Hanrahan. Beam tracing polygonal objects. In *SIGGRAPH '84 Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1984.
- E.J. Heller. *Why you hear what you hear: an experimental approach to sound, music and psychoacoustics*. Princeton University Press, Princeton, 624 p., 2013.

- R.C. Heyser. Acoustical measurements by time delay spectrometry. *Journal of the Audio Engineering Society*, 15 (4):370–382, 1967.
- M. Hornikx and J. Forssén. A scale model study of parallel urban canyons. *Acta Acustica united with Acustica*, 94:265–281, 2008.
- J. Huopaniemi, M. Karjalainen, V. Välimäki, and T. Huotilainen. Virtual instruments in virtual rooms - A real-time binaural room simulation environment for physical models of musical instruments. In *Proc. of International Computer Music Conference, Aarhus, Denmark, 12-17 Sept.*, 1994.
- ISO3382-1. Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces, 2009.
- ISO5725-1. Accuracy (trueness and precision) of measurements methods and results - Part 1: General principles and definitions, 1990.
- Y. Jing and N. Xiang. A modified diffusion equation for room-acoustic predication (L). *Journal of the Acoustical Society of America*, 121:3284–3287, 2007.
- Y. Jing and N. Xiang. On boundary conditions for the diffusion equation in roomacoustic prediction: Theory, simulations, and experiments. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123:145–153, 2008.
- R. Johnson and R. Essert. Broadening the range of variable reverberance (a). *Journal of the Acoustical Society of America*, 90 (4):2279:2279, 1991.
- R. Johnson, E. Kahle, and R. Essert. Variable coupled cubage for music performance. In *Proc. Music and Concert Hall Acoustics Conference, Kirishima, Japan, 15-18 May*, 1995.
- J. Jouhaneau. *Acoustique des salles et sonorisation*. Collection CNAM, Lavoisier, Paris, 610 p., 1997.
- E. Kahle. *Validation d'un modèle objectif de la perception de la qualité acoustique dans un ensemble de salles de concerts et d'opéras / Validation of an objective model of acoustics quality in a number of concert halls and opera houses*. PhD thesis, Université du Maine, 1995.
- E. Kahle, R. Johnson, and B.F.G. Katz. The new konzertsaal of the KKL Center, Lucerne, Switzerland. II Preliminary acoustical measurements. *Acta Acustica*, 85, 1999.
- E. Kahle, Y. Jurkiewicz, N. Faille, T. Wulfrank, and B.F.G. Katz. La Philharmonie de Paris concert hall competition. In *Proc. International Symposium on Room Acoustics (ISRA), Sevilla, Spain, 10-12 September*, 2007.
- Kahle Acoustics and Altia. Philharmonie de Paris - acoustic brief. Technical report, 2006.
- F. Kaiser. Acoustic enhancement systems. Master's thesis, Graz University of Technology - Institute of Broadband Communications, 2009.

-
- M. Karjalainen. Digital waveguide networks for room modeling and auralization. In *Proc. of Forum Acusticum, Aug. 29 - Sept. 2, 2005*.
- B.F.G. Katz. International round robin on room acoustical impulse response analysis software 2004. *Applied Research Letters Online*, 5:158–164, 2004.
- B.F.G. Katz and E. Kahle. Design of the new opera house in Souzhou Science & Arts Cultural Center. In *Proc. 9th Western Pacific Acoustics Conference (WESPAC), Seoul, Korea, 26-28 June, 2006*.
- B.F.G. Katz, O. Delarozière, and P. Luizard. A ceiling case study inspired by an historical scale model. In *Proc. Institute of Acoustics, 8th International Conference on Auditorium Acoustics, Dublin, 20-22 May, pp. 314-321, 2011*.
- O. Kirkeby, P.A. Nelson, and H. Hamada. The “stereo dipole” - a virtual source imaging system using two closely spaced loudspeakers. *Journal of the Audio Engineering Society*, 46 (5): 387–395, 1998.
- M. Kleiner and P. Svensson. Review of active systems in room acoustics and electroacoustics. In *Proc. International symposium on active control of sound and vibration, pp. 39-54, Newport Beach 6-8 July, 1995*.
- M. Kleiner, B.I. Dalenbäck, and P. Svensson. Auralization - an overview. *Journal of the Audio Engineering Society*, 41:861–874, 1993.
- V.O. Knudsen. The absorption of sound in air, in oxygen, and in nitrogen - effects of humidity and temperature. *Journal of the Acoustical Society of America*, 5:112–121, 1933.
- V.O. Knudsen. Model testing of auditoriums. *Journal of the Acoustical Society of America*, 47 (2):401–407, 1970.
- C.W. Kosten and P.A. de Lange. The new Rotterdam concert hall - Some aspects of the acoustic design. In *Proc. 5th International Congress on Acoustics, Liege, Belgium, 1965*.
- K. Kowalczyk. *Boundary and medium modelling using compact finite difference schemes in simulations of room acoustics for audio and architectural design applications*. PhD thesis, Sonic Arts research center, Queen’s University Belfast, 2008.
- A. Krokstad, S. Ström, and S. Sörnsdal. Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. *Journal of Sound and Vibration*, 8 (1):118–125, 1968.
- W.K. Kuhl. über Versuche zur Ermittlung der günstigsten Nachhallzeit grosser Musikstudios. *Acustica*, 4:618–634, 1954.
- H. Kuttruff. *Room Acoustics*. Elsevier Science Ltd, London, 452 p., 1973.
- Y. Kwon and G.M.W. Siebein. Chronological analysis of architectural and acoustical indices in music performance hall. *Journal of the Acoustical Society of America*, 121 (5):2691–2699, 2007.

- M.R. Lamothe and J.S. Bradley. Acoustical characteristics of guns as impulse sources. *Canadian Acoustics*, 13 (2):16–24, 1985.
- R.W. Leonard. Simplified optical modeling for auditoriums (a). *Journal of the Acoustical Society of America*, 26 (937):937, 1954.
- T. Lewers. A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics. *Applied Acoustics*, 38:161–178, 1993.
- T. Lokki. Throw away that standard and listen: your two ears work better. In *Proc. International Symposium on Room Acoustics, Toronto, Canada, 9-11 June, 2013*.
- T. Lokki and L. Savioja. State-of-the-art in auralization of concert hall models - what is missing? In *Proc. of Baltic-Nordic Acoustics Meeting, Reykjavik, Iceland, 17-19 August, 2008*.
- T. Lokki, J. Pätinen, A. Kuusinen, H. Vertanen, and S. Tervo. Concert hall acoustics assessment with individually elicited attributes. *Journal of the Acoustical Society of America*, 130(2):835–849, 2011.
- P. Luizard. Etude des volumes couplés en acoustique des salles. Master's thesis, Université Pierre & Marie Curie (UPMC), 2010.
- P. Luizard and B.F.G. Katz. Coupled volume multi-slope room impulse responses: a quantitative analysis method. In *Proc. Institute of Acoustics, 8th International Conference on Auditorium Acoustics, Dublin, 20-22 May, pp. 169-176, 2011*.
- P. Luizard, N. Xiang, J.D. Polack, and B.F.G. Katz. Coupled volumes and statistical acoustics: Preliminary results of an improved analytical model (a). *Journal of the Acoustical Society of America*, 131:3245, 2012.
- P. Luizard, B.F.G. Katz, and C. Guastavino. Perception of reverberation in large coupled volumes: discrimination and suitability. In *Proc. International Symposium on Room Acoustics, Toronto, Canada, 9-11 June, 2013a*.
- P. Luizard, M. Otani, J. Botts, L. Savioja, and B.F.G. Katz. Comparison of sound field measurements and predictions in coupled volumes between numerical methods and scale model measurements. In *Proc. of the 21st International Congress on Acoustics, Montreal, Canada, 2-7 June, 2013b*.
- C.D. Lyle. The prediction of the steady state sound levels in naturally coupled enclosures. *Acoustical Letters*, 5:16–21, 1981a.
- C.D. Lyle. Recommendation for estimating reverberation time in coupled spaces. *Acoustical Letters*, 5:35–38, 1981b.
- A. H. Marshall. Aspects of the acoustical design and properties of Christchurch Town Hall, New Zealand. *Journal of Sound and Vibration*, 62 (2):181–194, 1979a.

-
- A.H. Marshall. Acoustical design and evaluation of the Christchurch Town Hall, New Zealand. *Journal of the Acoustical Society of America*, 65 (4):951–957, 1979b.
- F. Martellotta. A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches (L). *Journal of the Acoustical Society of America*, 125:1281–1284, 2009a.
- F. Martellotta. Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for *S^textt*. Peters Basilica in Rome. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126:1175–1186, 2009b.
- R.J. Maus. Application of a ripple tank to architectural acoustics. Master's thesis, The Ohio State University, 1976.
- M. Meissner. Simulation of acoustical properties of coupled rooms using numerical technique based on modal expansion. *Acta Physica Polonica*, 118:123–127, 2010.
- M. Meissner. Numerical modelling of coupled rooms: Evaluation of decay times via method employing hilbert transform. *Acta Physica Polonica*, 119:1031–1034, 2011.
- M. Meissner. Acoustic energy density distribution and sound intensity vector field inside coupled spaces. *Journal of the Acoustical Society of America*, 132 (1):228–238, 2012.
- Z. Meng and F. Zhao. Measurement of reverberation discrimination threshold for chinese subjects with chinese music motifs. In *Proc. Audio Engineering Society 120th Convention, Paris, France, 20-23 May, 2006*.
- X. Meynial, J.D. Polack, and G. Dodd. Comparison between full-scale and 1:50 scale model measurements in Théâtre Municipal, Le Mans. *Acta Acustica*, October/December:199–212, 1993.
- H. Möller, A. Ruusuvuori, O. Salmensaari, and O. Lindfors. Designing halls with variable acoustics. In *Proc. Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting, Reykjavik, Iceland, 17-19 August, 2008*.
- J. Moorer. About this reverberation business. *Computer Music Journal*, 3:13–28, 1979.
- P. Morse and H. Feshbach. *Methods of Theoretical Physics*. Mc Graw - Hill, New York, 1978 p., 1953.
- S. Müller and P. Massarani. Transfer-function measurement with sweeps. *Journal of the Audio Engineering Society*, 49:443–471, 2001.
- G.M. Naylor. Odeon - Another hybrid room acoustical model. *Applied Acoustics*, 38:131–143, 1993.
- S. Nezan. *Etude de la propagation d'une impulsion sonore en atmosphère visco-thermique relaxante*. PhD thesis, Université du Maine, Le Mans, 1993.

- T.I. Niaounakis and W.J. Davies. Perception of reverberation time in small listening rooms. *Journal of the Audio Engineering Society*, 50(5):343–350, 2002.
- N. Nishihara and T. Hidaka. Mechanism of sound absorption by seated audience in halls. *Journal of the Acoustical Society of America*, 110 (5):2398–2411, 2001.
- E.M. Nosal, M. Hodgson, and I. Ashdown. A combined beam tracing and radiatn exchange computer model of room acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116 (2): 970–980, 2004.
- F. Ollendorff. Statistical room-acoustics as a problem of diffusion: A proposal. *Acustica*, 21: 236–245, 1969.
- M. Otani and S. Ise. Fast calculation system specialized for head-related transfer function based on boundary element method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 119 (5): 2589–2598, 2006.
- J. Pätynen, V. Pulkki, and T. Lokki. Anechoic recording system for symphony orchestra. *Acta Acustica united with Acustica*, 94:856–865, 2008a.
- J. Pätynen, S. Tervo, and T. Lokki. A loudspeaker orchestra for concert hall studies. In *Proc. Institute of Acoustics, 7th International conference on Auditorium Acoustics, Oslo, Norway, 3-5 October*, 2008b.
- J. Pätynen, B.F.G. Katz, and T. Lokki. Investigations on the balloon as an impulse source. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129 (1):EL27–EL33, 2011.
- D. Picard. Audibility of non-exponential reverberation decays. Master’s thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, 2003.
- J. Picaut. *Modélisation des champs diffus par une équation de diffusion. Application à l’acoustique des salles et à l’acoustique urbaine*. PhD thesis, Université du Maine, 1998.
- J. Picaut and L. Simon. A scale model experiment for the study of sound propagation in urban areas. *Applied Acoustics*, 62:327–340, 2001.
- J. Picaut, L. Simon, and J.D. Polack. A mathematical model of diffuse sound field based on a diffusion equation. *Acta Acustica United with Acustica*, 83:614–621, 1997.
- J.D. Polack. Modifying chambers to play billiards: the foundations of reverberation theory. *Acustica*, 76, 1992.
- J.D. Polack, A.H. Marshall, and G. Dodd. Digital evaluation of the acoustics of small models: The MIDAS package. *Journal of the Acoustical Society of America*, 85 (1):185–193, 1988.
- J.D. Polack, X. Meynial, G. Dodd, and A.H. Marshall. Acoustics, architecture and auditoria. In *Proc. International Institute of Acoustics, Birmingham, UK, May*, 1992.

-
- M.A. Poletti. Active acoustic systems for the control of room acoustics. In *Proc. of the International Symposium on Room Acoustics, Melbourne, Australia, 29-31 August, 2010*.
- F. Policardi. MLS and sine-sweep technique comparison in room-acoustic measurements. *Elektrotehniski Vestnik*, 78 (3):91–95, 2011.
- H. Pu, X. Qiu, and J. Wang. Different sound decay patterns and energy feedback in coupled volumes. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129 (4):1972–1980, 2011.
- J.W. Strutt Baron Rayleigh. *The theory of sound, Volume II*. MacMillan and Co., London, 317 p., 1878.
- D.D. Rife and J. Vanderkooy. Transfer-function measurement with maximum-length sequences. *Journal of the Audio Engineering Society*, 37 (6):419–444, 1989.
- J.H. Rindel. The use of computer modeling in room acoustics. *Journal of Vibroengineering*, 3 (4):219–224, 2000.
- J.H. Rindel. Modelling in auditorium acoustics - From ripple tank and scale models to computer simulations. In *Keynote lecture, Forum Acusticum, Sevilla, Spain, 16-20 September, 2002*.
- W.C. Sabine. Theatre acoustics. *The American Architect*, 104:257, 1913.
- W.C. Sabine. *Collected papers on acoustics*. Harvard University Press, Cambridge, 279 p., 1922.
- R. San Martin, I.B. Witew, M. Arana, and M. Vorländer. Influence of source orientation on the measurement of acoustic parameters. *Acta Acustica. United with Acustica.*, 93:387–397, 2007.
- I. Schmich and J.P. Vian. CARMEN: a physical approach for Room Acoustics Enhancement System. In *Proc. 7th CAF DAGA, Strasbourg, 22-25 March, 2004*.
- I. Schmich, H. Butcher, and C. Rougier. The benefit of a CARMEN electroacoustic system in the Aylesbury theatre. In *Proc. Institute of Acoustics, 8th International Conference on Auditorium Acoustics, Dublin, 20-22 May, pp. 177-184, 2011*.
- V. Schoeffter. Coefficient d'absorption acoustique à échelle réduite. Rapport de stage de master 1, 2010.
- M.R. Schroeder. New method of measuring reverberation time. *Journal of the Acoustical Society of America*, 37:409–412, 1965.
- M.R. Schroeder. Integrated-impulse method measuring sound decay without using impulses. *Journal of the Acoustical Society of America*, 66 (2):497–500, 1979.
- M.R. Schroeder and K.H. Kuttruff. On frequency response curves in rooms. comparison of experimental, theoretical, and monte carlo results for the average frequency spacing between maxima. *Journal of the Acoustical Society of America*, 34:76–80, 1962.

- M.R. Schroeder, D. Gottlob, and K.F. Siebrasse. Comparative study of european concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters. *Journal of the Acoustical Society of America*, 56:1195–1201, 1974.
- H.P. Seraphim. Investigations on the difference limen of exponential decay for broadband impulse. *Acustica*, 8:280–284, 1958.
- S. Siltanen. *Efficient physics-based room-acoustics modeling and auralization*. PhD thesis, Aalto University, 2010.
- S. Siltanen, T. Lokki, S. Kiminki, and L. Savioja. The room acoustic rendering equation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 122 (3):1624–1635, 2007.
- T. Smyth and A.R. Elmore. Explorations in convolutional synthesis. In *Proc. of the 6th Sound and Music Computing Conference, Porto, Portugal, 23-25 July, 2009*.
- F. Spandöck. Akustische modellversuche. *Annalen der Physik*, 20:345–360, 1934.
- G.B. Stan, J.J. Embrechts, and D. Archambeau. Comparison of different impulse response measurement techniques. *Journal of the Audio Engineering Society*, 50 (4):249–262, 2002.
- K.S. Sum and J. Pan. Subjective evaluation of reverberations times of sound fields with non-exponential decays. *Acta Acustica United with Acustica*, 92:583–592, 2006.
- D. Sumarac-Pavlovic, M. Mijic, and H. Kurtovic. A simple impulse sound source for measurements in room acoustics. *Applied Acoustics*, 69:378–383, 2008.
- J.E. Summers. *Reverberant acoustic energy in auditoria that comprise systems of coupled rooms*. PhD thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, 2003.
- J.E. Summers. What exactly is meant by the term “auralization”? *Journal of the Acoustical Society of America*, 124:697, 2008.
- J.E. Summers. Accounting for delay of energy transfer between coupled rooms in statistical-acoustics models of reverberant-energy decay. *Journal of the Acoustical Society of America*, 132 (2):EL129–EL134, 2012.
- J.E. Summers, R.R. Torres, and Y. Shimizu. Statistical-acoustics models of energy decay in systems of coupled rooms and their relation to geometrical acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 118:958–969, 2004.
- J.E. Summers, R.R. Torres, Y. Shimizu, and B.I. Dalenbäck. Adapting a randomized beam-axis-tracing algorithm to modeling of coupled rooms via late-part ray tracing. *Journal of the Acoustical Society of America*, 118:1491–1502, 2005.
- Y. Tahara, K. Ishikawa, H. Kawamura, S. Sasaki, and M. Nakamura. Small dodecahedral speaker system using piezoelectric ceramics units - Development of high frequency transducer for acoustic scale model experiments. *Journal of the Institute of Electrical Installation Engineers of Japan*, 23 (12):980–987, 2003.

-
- T. Terai and Y. Kawai. The application of Kirchhoff's formula to the numerical calculation of transient response in an enclosure. *Journal of the Acoustical Society of Japan*, 11, 1990.
- V. Valeau, J. Picaut, and M. Hogdson. On the use of a diffusion equation for room-acoustic prediction. *Journal of the Acoustical Society of America*, 119:1504–1513, 2006.
- R. Vermeulen. Stereo-reverberation. *Journal of the Audio Engineering Society*, 6 (2):124–130, 1958.
- M. Vorländer. Revised relation between the sound power and the average sound pressure level in rooms and consequences for acoustic measurements. *Acustica*, 81:332–343, 1995.
- M. Vorländer. *Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modeling, Simulation, Algorithms, and Acoustic Virtual Reality*. Springer, London, 335 p., 2008.
- M. Vorländer and H. Bietz. Comparison of methods for measuring reverberation time. *Acustica*, 80:205–215, 1994.
- M. Vorländer and M. Kob. Practical aspects of MLS measurements in building acoustics. *Applied Acoustics*, 52 (3/4):239–258, 1997.
- F.A. Wichmann and N.J. Hill. The psychometric function: I. fitting, sampling and goodness of fit. *Perception & Psychophysics*, 63:1293–1313, 2001.
- N. Xiang. An ultrasonic electroacoustic transducer in cylindrical form using piezoelectric polyvinylidene fluoride films. In *Proc. of Ultrasonic International, Cambridge University Press*, pp. 501-506, 1989.
- N. Xiang. Evaluation of reverberation times using a nonlinear regression approach. *Journal of the Acoustical Society of America*, 98 (4):2112–2121, 1995.
- N. Xiang and P.M. Goggans. Evaluation of decay times in coupled spaces: Bayesian parameter estimation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 110 (3):1415–1424, 2001.
- N. Xiang and P.M. Goggans. Evaluation of decay times in coupled spaces: Bayesian decay model selection. *Journal of the Acoustical Society of America*, 113 (5):2685–2697, 2003.
- N. Xiang and T. Jasa. Evaluation of decay times in coupled spaces: An efficient search algorithm within the bayesian framework. *Journal of the Acoustical Society of America*, 120 (6):3744–3749, 2006.
- N. Xiang and M.R. Schroeder. Reciprocal maximum-length sequence pairs for acoustical dual source measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 113 (5):2754–2761, 2003.
- N. Xiang, P.M. Goggans, T. Jasa, and M. Kleiner. Evaluation of decay times in coupled spaces: Reliability analysis of bayesian decay time estimation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 117 (6):3707–3715, 2005.

- N. Xiang, Y. Jing, and A. Bockman. Investigation of acoustically coupled enclosures using a diffusion-equation model. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126 (3):1187–1198, 2009.
- N. Xiang, P. Robinson, and J. Botts. Comment on “optimum absorption and aperture parameters for realistic coupled volume spaces determined from computational analysis and subjective testing results” [journal of the acoustical society of america 127, 223–232 (2010)]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 128 (5):2539–2542, 2010.
- N. Xiang, P. Goggans, T. Jasa, and P. Robinson. Bayesian characterization of multiple-slope sound energy decays in coupled-volume systems. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129 (2):741–752, 2011.
- N. Xiang, J. Escolano, J.M. Navarro, and Y. Jing. Investigation on the effect of aperture sizes and receiver positions in coupled rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 133 (6):3975–3985, 2013.

Annexes

Ces annexes contiennent :

- Les définitions d'indices acoustiques
- Une liste de salles de concert à volumes couplés existantes
- Une liste du matériel de mesure utilisé et ses caractéristiques

A.1 Définition de quelques indices acoustiques classiques

Cette Section est un rappel de la définition des indices acoustiques classiques mentionnés dans le manuscrit, notamment préconisés par la norme ISO 3382 [ISO3382-1, 2009] relative aux mesures d'indices acoustiques dans les salles.

- Temps de réverbération **TR**

Le temps de réverbération est défini comme le temps nécessaire à une décroissance de 60 décibels de l'énergie sonore moyennée dans un espace fermé après arrêt de l'émission sonore. En pratique, la norme ISO 3382 [ISO3382-1, 2009] préconise le calcul du temps de réverbération à partir de l'enregistrement direct d'une coupure de source ou à partir du traitement d'une réponse impulsionnelle. La fonction de décroissance est calculée d'après cette dernière selon la méthode proposée par Schroeder [Schroeder, 1965] qui consiste en l'intégration rétrograde de la réponse impulsionnelle élevée au carré, de la manière suivante :

$$E(t) = \int_t^\infty p^2(\tau) d\tau = \int_\infty^t p^2(\tau) d(-\tau), \quad (\text{A.1.1})$$

où E est l'énergie décroissante en fonction du temps et p est la pression acoustique de la réponse impulsionnelle. Le temps de réverbération est alors estimé grâce à une régression linéaire appliquée à cette courbe, généralement entre -5 dB et -35 dB. La durée correspondante est alors multipliée par deux.

- Early decay time **EDT**, ou temps de décroissance précoce

Le temps de décroissance précoce est défini de manière similaire au temps de réverbération. Il s'agit du temps nécessaire à la décroissance de l'énergie sonore normalisée entre 0 dB et -10 dB, multipliée par 6 afin d'obtenir l'équivalent d'une décroissance de 60 dB. Ainsi seule la partie précoce de la décroissance énergétique est prise en compte et la différence avec la valeur de temps de réverbération pour une même courbe de décroissance peut donner lieu à diverses interprétations sur l'évolution temporelle de la décroissance de l'énergie sonore.

- Précision, ou Clarté **C₈₀** ou **C₅₀**

L'indice acoustique de clarté est donné comme représentant la clarté de l'information perçue, liée à son intelligibilité. Il s'agit du rapport d'énergie précoce sur l'énergie tardive, l'essentiel de l'information étant délivré dans la partie précoce et la partie tardive étant considérée comme nuisible à l'intelligibilité de l'information. Le temps de transition entre partie "précoce" et "tardive" est défini à $t_c = 50$ ms pour un signal de parole et à $t_c = 80$ ms pour un signal musical. Cet indice acoustique est calculé de la manière suivante :

$$C_{t_c} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{t_c} p^2(t) dt}{\int_{t_c}^\infty p^2(t) dt}, \quad (\text{A.1.2})$$

où p est la pression acoustique de la réponse impulsionnelle.

- Force sonore **G**

La force sonore représente le niveau sonore perçu par un auditeur. Il est calculé comme de rapport de l'énergie reçue dans la salle sur l'énergie reçue à 10 m de la même source sonore en champ libre (énergie du son direct, sans réflexions).

$$G = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt}, \quad (\text{A.1.3})$$

où p est la pression acoustique de la réponse impulsionnelle et p_{10} est la pression acoustique de la réponse impulsionnelle mesurée en champ libre à 10 m de la source sonore.

A.2 Salles de concert à volumes couplés existantes

Cet annexe propose une liste de salles de concert construites sur le principe des volumes couplés. Cette liste n'est pas exhaustive puisque le terme d'utilisation des volumes couplés est ambigu au sens où la cage de scène d'un théâtre peut être considérée comme un volume couplé au volume contenant le public. Ce volume secondaire peut produire une réverbération tardive dont le taux de décroissance est moins élevé que la réverbération précoce sans qu'il n'ait été conçu pour ses qualités acoustiques mais plutôt pour son aspect pratique, en l'occurrence pour la manipulation et le stockage de décors. Ainsi, la liste suivante se concentre sur les projets de grandes salles de concert conçues pour utiliser les caractéristiques acoustiques des volumes couplés.

Nom	Lieu	Architecte	Acousticien	Année d'inauguration	Jauge (sièges)	Volume de la salle principale V_1 (m ³)	Volume de la chambre de réverbération V_2 (m ³)	Volume total par auditeur (m ³ /siège)	$\frac{V_1}{V_2}$	Surface de couplage maximale (m ² , soit % de S_1^*)
Mc Dermott Concert Hall	Dallas, Texas, Etats-Unis	Pei Cobb Freed & Partners	Artec Consultants	1989	2065	23900	7200	15	3.32	521 m ² , soit 9.1%
Symphony Hall	Birmingham, Angleterre	Percy Thomas Partnership	Artec Consultants	1991	2211	25000	10300	16	2.43	195 m ² , soit 3.3%
Bass Performance Hall	Fort Worth, Texas, Etats-Unis	David M. Schwarz Architects	Jaffe Holden Acoustics	1998	2072	18470	8830	13	2.09	N/A
Culture and Congress Center [Kahle et al., 1999]	Lucerne, Suisse	Architectures Jean Nouvel	Artec Consultants	1999	1892	17823	6190	13	2.88	910 m ² , soit 18.0%
Sibelius Hall	Lahti, Finlande	Hannu Tikka and Kimmo Lintula, Arkkitehtiyöhuone	Artec Consultants	2000	1250	15500	7000	18	2.21	615 m ² , soit 14.8%
Verizon Hall	Philadelphie, Pennsylvanie, Etats-Unis	Rafael Viñoly Architects	Artec Consultants	2001	2298	23520	7420	13	3.17	555 m ² , soit 9.7%
Béla Bartók Concert Hall	Budapest, Hongrie	Zoboki, Demeter and Partners	Artec Consultants	2006	1699	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Opera of the Science an Cultural Arts Centre [Katz and Kahle, 2006]	Suzhou, Chine	Eastern China Architectural Design & research Institute (ECADI)	Kahle Acoustics	2007	1200	12660	2700	13	4.69	300 m ²
Philharmonie de Paris [Kahle et al., 2007]	Paris, France	Ateliers Jean Nouvel	Kahle Acoustics, Marshall Day Acoustics, Nagata Acoustics	En construction	2400	30000	7200	15	4.17	630 m ² (surface fixe)

* S_1 est la surface totale de la salle principale

TABLE A.2.1 – Projets architecturaux de salles de concert à volumes couplés. Années d'inauguration, jauges et volumes des 6 premières salles d'après [Beranek, 2004]. Valeurs pour les salles de Suzhou et Paris fournies par E. Kahle.

A.3 Caractéristiques du matériel de mesure

Cette partie des annexes présente certaines caractéristiques du matériel de mesure utilisé lors de cette thèse, notamment pour les mesures sur maquette acoustique.

- Carte d'acquisition - RME Fireface 800 (Figure A.3.1)
- Amplificateur de puissance - Samson Servo 120a (Figure A.3.2)
- Source sonore tétraédrique conçue au LIMSI par Gaëtan Parseihian (Figures A.3.3 à A.3.6)
- Microphone - DPA 4060 (Figure A.3.7)

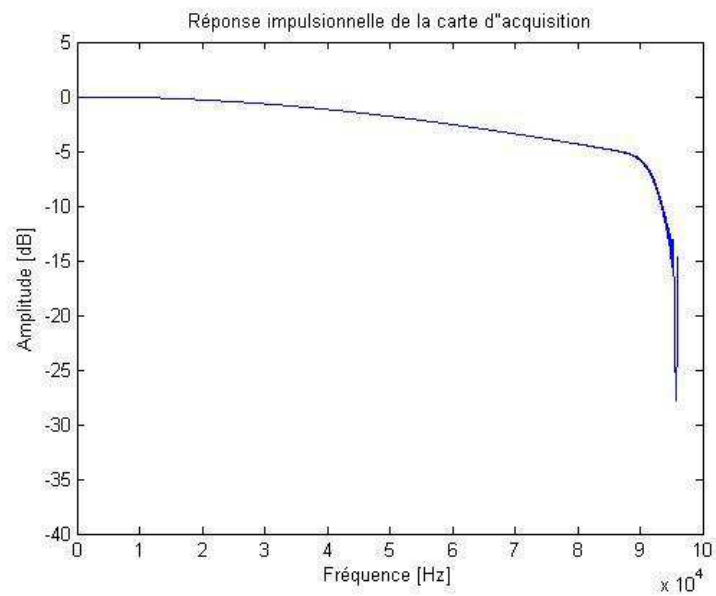


FIGURE A.3.1 – Réponse en fréquence de la carte d'acuiqition, RME Fireface 800.

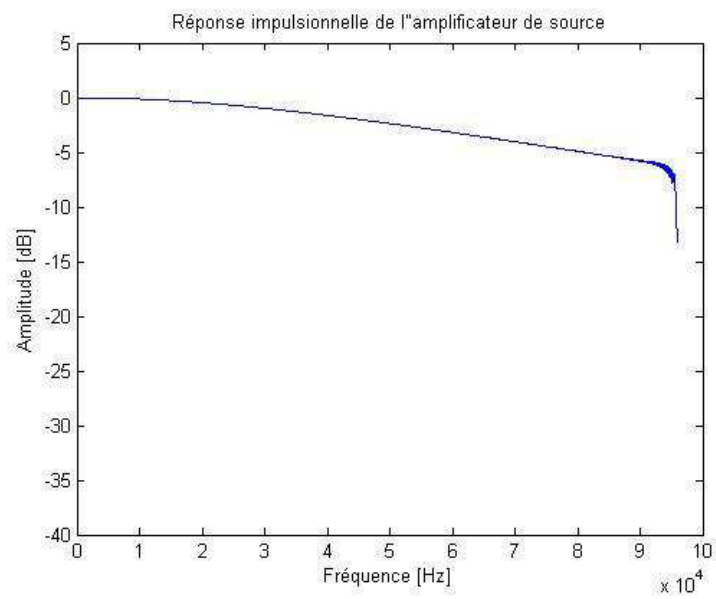


FIGURE A.3.2 – Réponse en fréquence de l'Amplificateur de puissance, Samson Servo 120a.



FIGURE A.3.3 – Photographie de la source sonore tétraédrique.

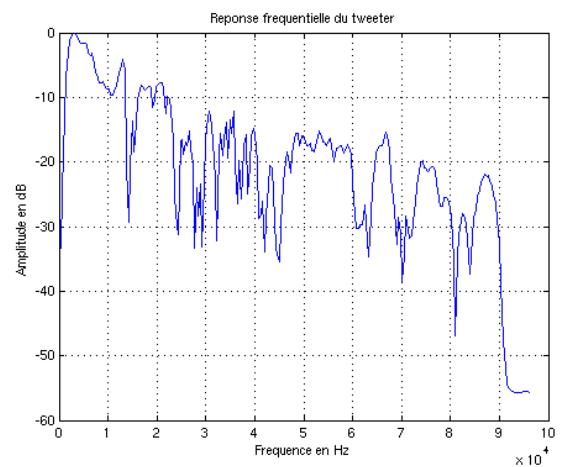


FIGURE A.3.4 – Réponse en fréquence de la source sonore tétraédrique.

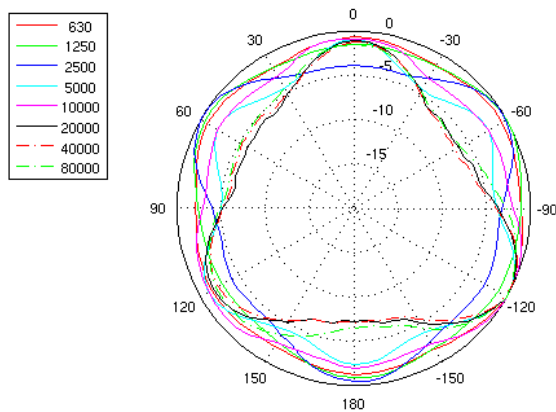


FIGURE A.3.5 – Diagramme de directivité dans le plan horizontal de la source sonore tétraédrique.

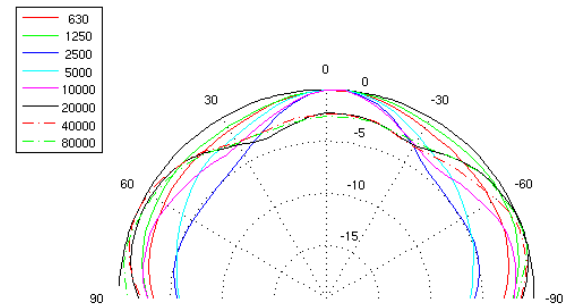


FIGURE A.3.6 – Diagramme de directivité dans le plan vertical de la source sonore tétraédrique.

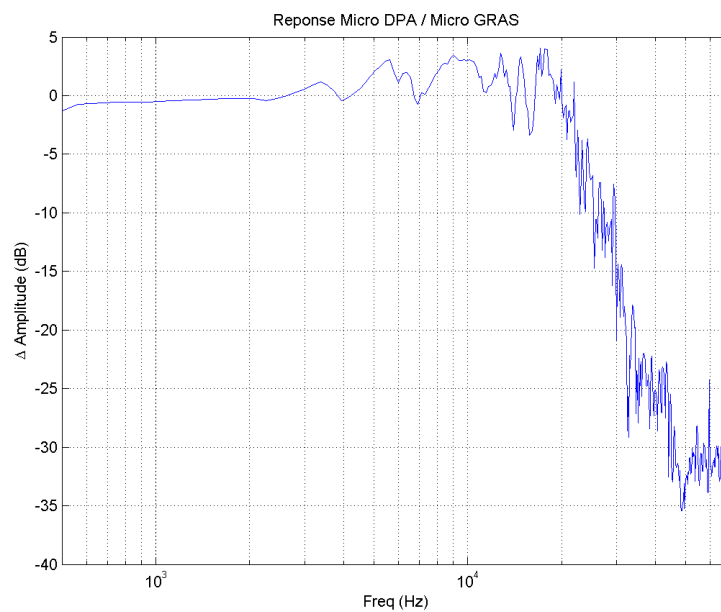


FIGURE A.3.7 – Réponse en fréquence de l'un des microphones utilisés, DPA 4060, par rapport à celle d'un microphone GRAS 40 DP dont la réponse en fréquence est plate ± 1 dB jusqu'à 100 kHz.

Liste des tableaux

2.1	Ecart de directivité maximal pour qu'une source soit considérée omnidirectionnelle selon la norme ISO 3382 [ISO3382-1, 2009]. Les écarts sont mesurés en décibels par bandes d'octave en champ libre. Le signal émis est un bruit rose. . .	16
2.2	Variation d'amplitude spectrale et de directivité pour plusieurs types de sources impulsionnelles.	18
3.1	Fréquences centrales des bandes d'octave selon l'échelle	41
3.2	Caractéristiques architecturales de la maquette	42
3.3	Coefficients d'absorption moyens pour chaque salle liés à chaque méthode numérique	61
3.4	Architectural specifications of the main room and reverberation chamber for the numerical simulation (full scale [1:1]) and the scale model (scale 1:20): length L, width W, height H, volume V, surface area S, mean absorption coefficient $\bar{\alpha}$, and reverberation time RT in the 500 Hz octave band.	80
3.5	Standard deviation of acoustical parameters over all 30 receivers for Src. 1 and Src. 2 (Fig. 3.21) from the analytical model, measurements, and ray-tracing simulations.	86
3.6	<i>rms</i> deviation of acoustical parameters (Fig. 3.21) and total energy (Fig. 3.22) between couples of the triplet analytical model (Mod.) / measurements (Meas.) / ray-tracing simulations (Sim.) over all receivers.	87
3.7	Acoustical parameters averaged over the six receiver positions, for various coupling areas. $S_1 = 4560 \text{ m}^2$ is the total surface area of the main room, $S_w = 432 \text{ m}^2$ is the area of the separating wall between the main room and the reverberation chamber.	91
3.8	Tentative d'établissement de liens entre modification de l'architecture de la salle et conséquences sur l'acoustique.	95
4.1	Definition of acoustical parameters adapted to multi-slope energy decay curves. .	110
4.2	Surface specifications of various existing coupled volume concert halls, from Beranek [Beranek, 2004]. S_1 : inner surface of the main room; S_c coupling surface area expressed in terms of surface unit and in % of S_1	112
4.3	Double slope decay parameters for various coupling surface sizes. Those parameters are defined in table 4.1.1.1.b.	113
4.4	Differences between double slope decay parameters for various coupling surface areas and the standard areas of 10% (Experiment 1) and 1% (Experiment 2) of the audience room surface.	118
A.2.1	Projets architecturaux de salles de concert à volumes couplés. Années d'inauguration, jauges et volumes des 6 premières salles d'après [Beranek, 2004]. Valeurs pour les salles de Suzhou et Paris fournies par E. Kahle.	165

Liste des figures

1.1	Vue de l'Espace de Projection de l'IRCAM, Paris, France. Les murs sont faits de panneaux rotatifs constitués de trois faces. L'une est plate et rigide favorisant les réflexions spéculaires, une autre présente une surface irrégulière adaptée à la diffusion du son, la dernière est perforée et absorbante. Le temps de réverbération annoncé peut varier entre 0,4 s et 4 s. Inauguration : 1978 Acousticien : Peutz. . .	3
1.2	Vue de la Sala à São Paolo, Brésil. Les unités qui composent le plafond sont mobiles en hauteur. Inauguration : 1999. Acousticiens : Artec et Acoustica & Sonica.	3
1.3	Vue de la salle de concert du Kultur- und Kongresszentrum (KKL) à Lucerne, Suisse. Les parois latérales sont composées de portes donnant sur un grand volume vide, la chambre de réverbération. Inauguration : 1998. Acousticien : Artec. . . .	5
1.4	Détail de portes entre la salle principale et la chambre de réverbération au niveau d'un balcon, dans la salle du KKL à Lucerne en Suisse.	5
1.5	Plan des niveaux 3 et 4 de la salle de concert du KKL à Lucerne, Suisse [Kahle et al., 1999]. La salle principale (bleu) est partiellement entourée par la chambre de réverbération (jaune). La surface de couplage est constituée de portes (rouge) dont une photographie est proposée en Figure 1.4. Image tirée de l'ouvrage de Beranek [Beranek, 2004].	8
1.6	Courbes de décroissance temporelle de l'énergie sonore dans les volumes isolés (pointillés) et dans les volumes couplés (traits pleins), simulées grâce au modèle de Cremer et Müller [Cremer et al., 1982] dans le cas d'une excitation impulsionnelle.	9
2.1	Extrait d'une séquence MLS sur 50 échantillons.	19
2.2	Exemple de sinus glissant sur une durée de 5 secondes.	22
3.1	Strioscopie permettant de visualiser des fronts d'onde dans une coupe longitudinale du Gewandhausaal à Leipzig en Allemagne. D'après Engl [Engl, 1939] cité dans [Rindel, 2002].	38
3.2	Schéma de la première version de la maquette construite au LIMSI.	43
3.3	Photographie de la maquette construite au LIMSI.	43
3.4	Schéma de la maquette du LIMSI. La salle principale est aménagée avec des balcons.	44
3.5	Photographie de la salle principale, aménagée avec des balcons et des réflecteurs courbes diffusants.	45
3.6	Photographie de la maquette de chambre réverbérante servant à mesurer l'absorption des matériaux aux hautes fréquences.	45

3.7	Coefficients d'absorption (α_{Sabine}) du jonc de mer et du gazon synthétique, mesurés aux hautes fréquences, affichés à l'échelle 1. L'absorption du public assis dans des salles de concert a été moyennée, provenant de 20 livres différents [Nishihara and Hidaka, 2001].	46
3.8	Photographie de la salle principale couverte de jonc de mer, avec la source à 12 tweeters et un alignement de microphones.	46
3.9	Photographie de la configuration de mesure sur la maquette du Musée des Arts et Métiers.	48
3.10	De gauche à droite et de haut en bas : schémas de l'évolution temporelle d'un front d'onde à des instants successifs. D'après [Heller, 2013].	64
3.11	Courbes de décroissance de l'énergie acoustique dans la salle principale et dans la chambre de réverbération, pour les salles couplées et découplées, pour une excitation impulsionnelle et une excitation stationnaire suivie d'une coupure de source (échelon inversé).	67
3.12	Schémas représentant la <i>Revised Theory</i> (gauche) et l'adaptation aux volumes couplés dans le cas de deux salles (droite). Le récepteur a est proche de la source, le b un peu plus éloigné et le c est le plus éloigné.	71
3.13	Courbes de décroissance de l'énergie simulées selon le modèle proposé à l'Equation (3.35) normalisées par rapport au récepteur le plus proche de la source (gauche) et normalisées par rapport à elles-mêmes (droite). Les croix (x) indiquent le début des décroissances.	71
3.14	Schéma du modèle numérique utilisé pour les simulations, représentant la configuration mise en place dans la maquette avec les 25 récepteurs.	72
3.15	Représentation de l'énergie totale (gauche) et du niveau du point de double pente (droite) pour le modèle proposé, les mesures et les simulations en fonction de la distance source-récepteur.	73
3.16	(Color online) (A): Perspective of the coupled volume hall's geometry. Corresponding specifications are in Tab. 3.3.3.2.d. (B): Map of normalized sound energy level on a horizontal plan in the rectangular main room. The surface coupling the main room to a reverberation chamber is the square ($X=20;Y=0$). Sound source is represented by a circle ($X=5;Y=12$). (C): Temporal energy decay at the triangle position ($X=18;Y=8$). (D): Spatial energy variation along the dotted line ($Y=5$).	79
3.17	Acoustical parameters describing a multi-slope energy decay curve presented in the case of 2 slopes.	81
3.18	Floor plan of the geometry used for ray-tracing simulation and measurements in the 1:20 scale model. Src. 1 & Src. 2 are presented in plans (A) & (B) respectively. Coupling area is represented by a thick line on the separating wall. The large dark lines at the end of each room represent the tilted walls which are not exactly vertical in order to avoid flutter echoes. Opposite boundaries present an angle of 2°	83

3.19	Photograph of the main room of the scale model with the miniature dodecahedron source at Src. 1 and the microphone alignment.	83
3.20	Time-energy decay curves in the 500 Hz octave band from the analytical model, measurements in the scale model, and ray-tracing simulations. Darker curves represent receivers near the sound source and the lighter the curve, the greater the source-receiver distance. Top row: source near the coupling area (Src. 1). Bottom row: source on the side opposite to the coupling area (Src. 2).	85
3.21	(Color online) Acoustical parameters in the 500 Hz octave band at each receiver position from the analytical model (solid line), measurements in the scale model (\times), and ray-tracing simulations (\circ). Fourth order polynomial fits are presented as dash-dot lines for measurements and as dashed lines for simulations. DT_1 and DT_2 are the decay times of the early and late slopes of curved sound decays, BP_t and BP_L are the bending point time and level respectively. Top row: source near the coupling area (Src. 1). Bottom row: source on the opposite side to the coupling area (Src. 2).	85
3.22	(Color online) Total energy at each receiver position for the analytical model (solid line), measurements in the scale model (\times), and ray-tracing simulations (\circ). Fourth order polynomial fits are presented as dash-dot lines for measurements and as dashed lines for simulations. Src. 1 stands for the source position near the coupling area and Src. 2 for the source being on the opposite side to coupling area.	88
3.23	Temporal energy decays for various coupling area conditions from 0.5% to 4% of the main room surface, from the analytical model.	89
3.24	(Color online) Boxplots of acoustical parameters in various coupling area cases from 0.5% to 4% of the main room surface, i.e. each column, from the analytical model (left), scale model measurements (center), and ray-tracing simulations (right), calculated from the energy decay curves in Fig. 3.23. Measurements were performed only for $S_c/S_1 = 0.5\%$ and 1%	90
4.1	Illustration of acoustical parameters adapted to multi-slope energy decay curves.	111
4.2	Spectrum of noise used to generate impulse responses.	112
4.3	Temporal energy decays from Cremer and Müller statistical theory for different aperture sizes expressed in percent of total inner surface of the main room. Lower decays (darker) correspond to small coupling surfaces while higher decays (lighter) stand for large coupling surfaces. Dots show the bending point for each curve.	114
4.4	Acoustical parameters from the impulse responses corresponding to 7 aperture sizes.	114
4.5	Example of psychometric curve (cumulative Gaussian) fitting the experimental data. Dotted lines show the stimulus value for performances of 75% and 87.5%, i.e. the percentage of stimulus identification.	116

4.6	Results of the discrimination experiment in terms of JND, PSE, and deviance for the aperture parameter, presented as boxplots. For each sound, large rectangles represent lower and upper quartiles, the line in the middle is the median, and extreme small lines show the smallest and largest observation. <i>Snd</i> ₁ stands for the bongos sounds, <i>Snd</i> ₂ for the soprano singer, and <i>Snd</i> ₃ for the orchestra. . . .	117
4.7	Results of the discrimination experiment in terms of relative JND for the acoustic parameters, presented as boxplots. <i>Snd</i> ₁ stands for the bongos sounds, <i>Snd</i> ₂ for the soprano singer, and <i>Snd</i> ₃ for the orchestra.	118
A.3.1	Réponse en fréquence de la carte d'acquisition, RME Fireface 800.	166
A.3.2	Réponse en fréquence de l'Amplificateur de puissance, Samson Servo 120a.	167
A.3.3	Photographie de la source sonore tétraédrique.	167
A.3.4	Réponse en fréquence de la source sonore tétraédrique.	167
A.3.5	Diagramme de directivité dans le plan horizontal de la source sonore tétraédrique.	168
A.3.6	Diagramme de directivité dans le plan vertical de la source sonore tétraédrique.	168
A.3.7	Réponse en fréquence de l'un des microphones utilisés, DPA 4060, par rapport à celle d'un microphone GRAS 40 DP dont la réponse en fréquence est plate \pm 1 dB jusqu'à 100 kHz.	168
	Liste des figures	