

Thèse de L'Université de Lyon
Délivrée par l'École Centrale de Lyon

Spécialité : Acoustique

Soutenue publiquement
le 3 Juillet 2013
par
Jérémy ROUCH

Préparée conjointement entre
Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
et
Le Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, UMR CNRS 5509

Modélisations des systèmes d'assistance à la réverbération régénératifs

École doctorale MEGA

Composition du jury :

M. Michel Roger - *Professeur à l'École Centrale de Lyon*
M. Jean-Jacques Embrechts - *Professeur à l'Université de Liège,*
M. Judicaël Picaut - *Directeur de recherche à l'IFSTTAR,*
M. Jean-Dominique Polack - *Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie*
M. Hervé Lissek - *Directeur de recherche au LEMA, EPFL*
Mme Marie-Annick Galland - *Professeur à l'École Centrale de Lyon,*

président du jury
rapporteur
rapporteur
examineur
examineur
directrice de thèse

*N'oublions pas que ces orgies d'informations devront être
abondamment arrosées par le sang et le bruit de fortes doses
d'opéras, d'irrationalité concrète, de musique concrétissime
et de décors abstraits mathieusiens et millarésiens [...]*

Salvador Dali

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à adresser ma reconnaissance à messieurs Jean-Jacques Embrechts et Judicaël Picaut pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce manuscrit, ainsi qu'à messieurs Jean-Dominique Polack, Hervé Lissek et Michel Roger pour leur participation au jury de cette thèse.

Je tiens également à remercier madame Isabelle Schmich-Yamane pour m'avoir accueilli au sein du pôle d'acoustique des salles du CSTB, m'avoir proposé une problématique de thèse fort intéressante et pour avoir su me laisser une grande liberté quant la réponse à y apporter. Je la remercie aussi de m'avoir fait travailler en parallèle, ou plutôt en complément, sur d'autres projets dont elle fut la responsable. Je tiens aussi à remercier madame Marie-Annick Galland d'avoir dirigé ce travail et m'avoir parfois recadré, parfois encouragé, quand cela fut nécessaire.

Un grand merci à monsieur Christophe Rougier, ancien ingénieur de recherche au CSTB, et à monsieur Jan Jagla, ancien doctorant au CSTB, pour leurs aides en traitement du signal et en acoustique des salles, ainsi que pour leurs amitiés et leurs discussions parfois scientifiques, mais toujours intéressantes. Je tiens aussi à inclure dans ces remerciements monsieur Nicolas Noé, ingénieur d'étude au CSTB et responsable du développement du logiciel Icare utilisé lors de cette thèse, pour son assistance souvent nécessaire et son intérêt à mon travail. J'adresse aussi ma gratitude à messieurs Dirk Van Maercke et Thomas Leissing pour avoir consacré un peu de leur précieux temps à réfléchir avec moi à quelques problèmes soulevés lors du déroulement de cette thèse.

Je voudrais aussi exprimer ici ma gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de manière moins directe mais toute aussi essentielle au bon déroulement de cette thèse ou de ces années passées à la préparer. Je pense en particulier à mesdames Béatrice Gauthier, Catherine Mandon et Ghislaine Capouret secrétaires du département éclairage et acoustique du CSTB, madame Patricia Planel correspondante des ressources humaines au CSTB de Grenoble, madame Marie-Gabrielle Perriaux secrétaire du centre acoustique de l'ECL, ainsi qu'à mes collègues au CSTB : Paul Chervin, Xavier Vuylsteke, Delphine Devallez, Nicolas Hermant, Mathieu Labat, Simon Bailhache, Alexandre Jolibois, Pierre Ropars, Audrey Soule, Thomas Drouet, Raphaël Loyer et tous les autres.

Enfin, un merci tout spécial à madame Catherine Guigou-Carter, ingénieur au CSTB, pour m'avoir soutenu et encouragé, et ce alors qu'elle n'avait pas de relation avec mon travail ; je la remercie donc pour son sens de l'humain qui n'est pas chose si commune.

Modélisations des systèmes d'assistance à la réverbération régénératifs

Résumé :

Les systèmes d'assistance à la réverbération sont des dispositifs électroacoustiques installés dans les salles de spectacle pour moduler leur acoustique en fonction du type de représentation qui s'y déroule. Afin de pouvoir dimensionner ces systèmes en amont de leur installation, ce travail s'intéresse au développement, à la mise en œuvre et à la mise à l'épreuve de modèles prévisionnels de l'effet de ses systèmes sur les caractéristiques acoustiques d'une salle, en se concentrant sur les systèmes dits régénératifs diagonaux.

Le premier modèle présenté est basé sur une approche systémique exacte et sur l'utilisation de simulations numériques. Il s'agit d'un modèle dont le principe est déjà décrit dans la littérature spécialisée, mais auquel est intégré ici un algorithme de détermination automatique des paramètres de réglage d'un système d'assistance à la réverbération reproduisant la méthode manuelle. Parce que l'utilisation de simulations numériques impose une modélisation détaillée de la salle et un important temps de calcul, ce modèle n'est pas compatible avec la réactivité demandée lors d'une phase d'avant-projet. Dans cette optique, deux autres modèles basés sur les hypothèses de champ diffus et, par là même, plus rapides d'exécution, sont développés. L'un repose aussi sur une approche systémique exacte, mais utilise la théorie stochastique de l'acoustique géométrique des salles plutôt que des simulations numériques. L'autre repose sur une approche énergétique simple. Les confrontations de ces deux modèles avec celui reposant sur des simulations numériques sont exposées pour cinq salles, en considérant la prévision d'évolution de six indices acoustiques courants due à l'introduction d'un système d'assistance à la réverbération. Il en ressort que ces deux modèles aboutissent à des erreurs prévisionnelles comparables et que celles-ci sont équivalentes à celles des formules de Sabine ou d'Eyring ou de la théorie révisée des champs diffus de *Barron* et Lee appliquées dans une salle sans système.

Parallèlement, l'étude et la prévision de l'effet d'un système d'assistance à la réverbération régénératif en augmentation du couplage de deux espaces mal couplés au sein d'une même salle sont présentées. Il est montré que ce type d'utilisation permet effectivement une augmentation du couplage et que celle-ci peut être correctement abordée à partir d'un modèle énergétique développé ici. Il est aussi montré à partir de simulations numériques, que cette utilisation permet d'homogénéiser les caractéristiques acoustiques entre les deux espaces couplés.

Mot-clés :

Acoustique des salles, Électroacoustique, Système d'assistance à la réverbération, Modèles prévisionnels, Simulations numériques, Salles simples, Espaces couplés

Modelling of regenerative reverberation enhancement systems

Abstract :

Reverberation enhancement systems (RES) are electro-acoustic devices installed in auditoria to adapt the listening conditions according to the performances. In order to design these systems before their installation, this work deals with the development, the implementation and the testing of prediction tools of the effect of these systems on the acoustic characteristics of a room, by focusing on diagonal regenerative RES.

The first proposed tool is based on a systemic approach and numerical simulations. This tool, whose principle is already described in the literature, is here enhanced by the use of an algorithm that automatically fine-tunes the system parameters. As numerical simulations require detailed 3D models of rooms and high computation times, this tool is not compatible with the responsiveness needed for a preliminary design stage. With this in mind, two other models based on the diffuse field assumptions are also developed to predict the action of a RES. One of them is also based on a systemic approach but it uses the stochastic geometric theory of room acoustics instead of numerical simulations. The other model is based on a simple energetic approach. The confrontation of the results given by these two models with the results given by the model based on numerical simulations has been carried out in five rooms considering the effect of a RES on six common room acoustic criteria. It appeared that these two models lead to prediction errors similar to those obtained with the Sabine or Eyring's formula, or the *Barron* and *Lee*'s revised theory applied in a room without RES.

In the same time, the study of the effect of a RES used to enhance the coupling between two poor coupled room is presented. It is shown that this particular use of a RES actually increases the coupling effect, and that this effect can be correctly described and predicted by an energetic model developed here. It is also shown by numerical simulations that this system can balance the listening conditions between two coupled rooms.

Keywords :

Room acoustics, Electroacoustics, Reverberation enhancement system, Predicting models, Numerical simulations, Simple rooms, Coupled rooms

Table des matières

Introduction	1
1 Acoustique des salles et systèmes d'assistance à la réverbération (SAR)	3
1.1 Acoustique des salles	4
1.1.1 La réponse impulsionnelle	4
1.1.2 Les indices acoustiques	4
1.2 Présentation des SAR	9
1.2.1 Les différents types de SAR	10
1.2.2 Stabilité des SAR	11
1.3 Approches analytiques de l'effet d'un SAR	18
1.3.1 L'approche énergétique	18
1.3.2 L'approche systémique simplifiée d'un SAR à partir de réponses impulsionnelles construites sur un modèle énergétique	21
1.3.3 L'approche d'un SAR par impédance équivalente	22
1.4 Précision du gain moyen en boucle ouverte d'un SAR	23
1.4.1 Retour sur l'instabilité théorique d'un SAR multicanal	24
1.4.2 Retour sur l'efficacité théorique d'un SAR multicanal	25
1.5 Synthèse du chapitre 1	26
2 Approche systémique de l'action d'un SAR à partir de simulations numériques	29
2.1 Les modèles fréquentiel et temporel de l'approche systémique d'un SAR	30
2.2 Simulation numérique des transferts acoustiques	32
2.2.1 Présentation des différentes approches numériques de détermination des contributions acoustiques constitutives d'une fonction de réponse en fréquence ou d'une réponse impulsionnelle	32
2.2.2 Combinaison des différentes approches numériques	36
2.3 Détermination des fonctions de réponse en fréquence électroniques du SAR	41
2.3.1 Égalisation automatique d'un canal	41
2.3.2 Égalisation automatique du système dans son ensemble	47
2.4 Exemple de l'approche systémique d'un SAR basée sur des simulations numériques	48
2.4.1 Présentation de la salle active et simulations numériques des transferts acoustiques	48
2.4.2 Procédure d'égalisation automatique	50
2.4.3 Exemple de réponse impulsionnelle passive et active au niveau de l'auditoire	53
2.5 Synthèse du chapitre 2	54
3 Développement et mise à l'épreuve de modèles théoriques de l'action d'un SAR régénératif dans une salle simple	55
3.1 Approche énergétique de l'action d'un SAR régénératif dans une salle simple	56
3.1.1 Développement analytique de la fonction de gain d'un SAR	56
3.1.2 Retour sur l'approximation de l'action des retards électroniques	57
3.2 Approche systémique de l'action d'un SAR régénératif dans une salle simple avec utilisation de réponses impulsionnelles stochastiques	59

3.2.1	Reconstruction de réponses impulsionnelles à partir de l'approche stochastique de l'acoustique géométrique	60
3.2.2	Génération automatique des distances entre les transducteurs d'un SAR . . .	65
3.2.3	Synthèse de l'approche systémique d'un SAR régénératif avec utilisation de réponses impulsionnelles stochastiques	68
3.3	Confrontation des modèles théoriques proposés à la mesure et à l'approche systémique de l'action d'un SAR basée sur des simulations numériques	70
3.3.1	Présentation des salles tests	71
3.3.2	Présentation des résultats	81
3.3.3	Discussion des résultats	93
3.3.4	Synthèse des résultats	98
3.4	Synthèse du chapitre 3	98
4	Modèle théorique et étude de l'effet d'un SAR dans une salle couplée	101
4.1	Approche énergétique de l'action d'un SAR dans les espaces couplés	103
4.1.1	Rappels sur l'approche énergétique des salles couplées	103
4.1.2	Salles couplées équipées d'un SAR	105
4.2	Étude du système d'augmentation de couplage à partir d'une approche systémique basée sur des simulations numériques	109
4.2.1	Présentation de la salle couplée virtuelle et du système électroacoustique d'augmentation de couplage	110
4.2.2	Effet du couplage sur l'énergie tardive des réponses impulsionnelles	112
4.2.3	Effet du système électroacoustique d'augmentation de couplage sur l'énergie tardive des réponses impulsionnelles	115
4.2.4	Retour sur les limites d'utilisation du système électroacoustique d'augmentation de couplage	116
4.2.5	Effet du système électroacoustique d'augmentation de couplage sur quatre indices classiques d'acoustique des salles	118
4.3	Synthèse du chapitre 4	121
	Conclusion	123
	Annexes	127
A	La théorie révisée de <i>Barron et Lee</i>	127
B	Gain moyen en boucle ouverte des canaux d'un SAR installé dans une salle couplée .	129
	Bibliographie	133

Introduction

En mettant en relation l’acoustique des grottes peintes et l’art pariétal qui les orne, certains auteurs affirment que la prise en considération par l’homme de l’influence de l’architecture sur le son et la dimension subjective qu’elle lui rajoute remonte à avant même « l’invention » de l’architecture [Dauvois 1994, Reznikoff 2008]. Plus récemment, de nombreuses œuvres musicales qui nous sont parvenues depuis le haut moyen âge témoignent d’un lien entre leur écriture et les lieux dans lesquels elles étaient destinées à être exécutées. Ainsi, d’après le musicologue *Thurston Dart* [Dart 1954], Purcell, Mozart ou encore Haydn adaptaient délibérément le style ou le rythme de leurs compositions suivant qu’elles étaient destinées à être exécutées dans une salle à l’acoustique plutôt sèche comme un théâtre, ou à un lieu plus réverbérant comme une église. Aujourd’hui, la diversité des compositions musicales disponibles et des goûts musicaux du public, la « démocratisation » de la musique ou du théâtre, et la nécessaire pérennité financière des salles de spectacle imposent bien souvent le retournement de la situation telle qu’elle l’était dans le passé. Ce n’est plus la musique qui s’adapte à la salle, mais la salle qui doit s’adapter à l’œuvre.

Les caractéristiques acoustiques d’une salle étant fortement liées à son architecture, une méthode évidente pour en faire varier la sonorité consiste à en modifier la géométrie interne ou les matériaux, en ajoutant, supprimant, déplaçant ou modifiant certains éléments constructifs (parois et plafond mobiles, rideaux coulissants, etc.). Cependant, ces modifications mécaniques demandent souvent l’utilisation d’une machinerie lourde, et donc onéreuse à l’achat et en termes de durée d’immobilisation de la salle nécessaire à son installation. De plus, lorsqu’une salle est classée au patrimoine, on ne peut que très difficilement toucher à son architecture. L’alternative à cette méthode, et qui la concurrence aussi bien en terme de coût, de discrétion, de facilité d’utilisation et d’installation, ou de capacité à faire varier le champ sonore d’une salle, réside dans l’utilisation de systèmes électroacoustiques dits systèmes d’assistances à la réverbération (SAR) [De Vries 2001]. Une salle équipée d’un de ces systèmes devient alors une salle active (par opposition, une salle sans SAR pourra être qualifiée de salle passive).

Comme les systèmes de sonorisation « traditionnels », les SAR sont typiquement composés de microphones, de haut-parleurs et d’unités électroniques de traitement du signal, mais ils s’en distinguent principalement en ceci qu’ils modifient l’acoustique d’une salle tout conservant à cette acoustique son aspect naturel. Le lien fort qui existe entre les caractéristiques acoustiques de la salle et l’effet d’un SAR rend leur dimensionnement délicat, particulièrement en phase de pré-projet, de consultance, ou de manière générale lorsqu’une estimation du nombre de leurs transducteurs est nécessaire sans connaissances approfondies sur la salle et dans un court laps de temps. L’objectif de cette thèse est de fournir une méthode de dimensionnement rapide et fiable d’un SAR et, dans un cadre plus large, de mettre au point des méthodes permettant de prévoir l’effet d’un SAR dans une salle donnée. Compte tenu de la diversité des types de SAR existants, nous nous sommes ici concentrés sur les SAR régénératifs en général et, du fait de l’accès privilégié que nous avons eu aux détails technologiques du système Carmen développé par CSTB, sur celui-ci en particulier.

Le premier chapitre de ce mémoire fixe le cadre et les bases de cette étude. Sa première partie s’attache à donner quelques bases d’acoustique des salles, notamment les définitions des indices objectifs utilisées pour quantifier la qualité d’une salle. Sa deuxième partie présente les différents types de SAR existants et le problème de leur stabilité ; problème constituant la principale contrainte sur l’utilisation d’un SAR régénératif et définissant par là même le paramètre physique (Gain moyen en boucle ouverte) limitant l’action d’un tel système. Enfin, les approches prévisionnelles simples de

l'effet des SAR régénératifs déjà présentes dans la littérature seront exposées en mettant en avant leurs avantages et leurs limites.

Le second chapitre présente une première méthode de prévision de l'effet d'un SAR, reposant sur une approche systémique basée sur des simulations numériques. Cette méthode, demandant une modélisation détaillée de la salle et du système, ne répond pas directement à l'objectif premier de cette thèse. Elle demeure cependant une approche prévisionnelle et, parce qu'elle repose sur des méthodes de simulations numériques fiables et n'effectue pas d'approximation sur l'action du système, elle donne probablement des résultats très proches de la mesure. Or, n'ayant eu accès dans le cadre de ce travail, qu'à une seule salle réelle équipée d'un SAR, cette approche nous a permis d'obtenir un nombre plus important de cas de référence auxquels confronter des approches plus simples. Ce chapitre se structure en quatre parties. Dans la première, le principe général de l'approche systémique d'un SAR et l'expression mathématique sur laquelle il repose seront présentés. Nous verrons alors que le calcul de cette expression nécessite deux types de fonction de réponse en fréquence : celles d'origine acoustique, entre les différents transducteurs d'un SAR, la source et les récepteurs dans la salle, et celles d'origine électronique correspondant aux unités de traitement du signal du SAR. Les méthodes numériques d'obtention des fonctions de réponse en fréquence acoustiques utilisées seront décrites dans la deuxième partie de ce chapitre. Elles le seront de manière rapide, car il s'agit de méthodes asymptotiques couramment utilisées en acoustique des salles et abondamment décrites dans la littérature. La description de la méthode utilisée pour le calcul des fonctions de réponse en fréquence électroniques sera quant à elle plus approfondie dans la troisième partie de ce chapitre qui lui sera dédiée. Il s'agit de l'incorporation dans le cadre d'une simulation automatisée, d'une méthode reproduisant l'approche manuelle de réglage du SAR Carmen telle qu'elle est effectuée dans la réalité. Dans la dernière partie, nous présentons une réalisation complète de l'approche systémique d'un SAR basée sur des simulations numériques, ce qui, outre une illustration de cette approche, nous servira à vérifier l'efficacité du calcul des fonctions de réponse en fréquence électroniques par la méthode proposée.

Le troisième chapitre s'intéresse à la mise au point et à la mise à l'épreuve de deux modèles théoriques pour la prévision de l'effet d'un SAR régénératif dans une salle simple. Nous y présentons d'abord successivement ces deux modèles. Le premier est basé sur une approche énergétique des champs diffus, et aboutit à une relation analytique simple de l'effet du système. Le second repose à la fois sur une approche systémique et sur l'approche stochastique de l'acoustique géométrique. Il est plus complexe que le premier, et bien que reposant aussi en partie sur l'hypothèse des champs diffus, il fait moins d'approximations, notamment sur l'action du système. Après leurs présentations, ces deux modèles seront confrontés à la mesure et aux simulations issues de l'approche systémique basée sur des simulations numériques. Cela dans le but de vérifier leur validité quant à la prévision de six indices objectifs d'acoustique des salles couramment utilisés.

Le dernier chapitre se concentrera sur l'utilisation d'un SAR régénératif dans une salle couplée. Il s'agit d'une utilisation particulière d'un SAR pour, par exemple, améliorer les conditions acoustiques d'un espace situé sous un balcon mal conçu. Dans une première partie, nous proposons un modèle théorique d'augmentation du couplage par un SAR basé sur une approche énergétique. Une simulation issue de l'approche systémique basée sur des simulations numériques d'une salle couplée avec SAR sera ensuite présentée. Les résultats de celle-ci seront alors exploités, d'une part pour vérifier la validité de l'approche théorique proposée et, d'autre part pour décrire et analyser l'effet d'un SAR utilisé en augmentation de couplage sur quatre indices acoustiques.

Acoustique des salles et systèmes d'assistance à la réverbération (SAR)

Sommaire

1.1 Acoustique des salles	4
1.1.1 La réponse impulsionnelle	4
1.1.2 Les indices acoustiques	4
1.1.2.1 Les indices liés à la réverbérance	6
1.1.2.2 L'indice lié à l'intensité sonore	7
1.1.2.3 Les indices liés à la précision	7
1.1.2.4 Autres indices	8
1.2 Présentation des SAR	9
1.2.1 Les différents types de SAR	10
1.2.1.1 Les SAR « in-line »	10
1.2.1.2 Les SAR régénératifs	10
1.2.1.3 Les SAR hybrides	11
1.2.2 Stabilité des SAR	11
1.2.2.1 Stabilité d'un système à un canal	12
1.2.2.2 Stabilité d'un système multicanal	15
1.2.2.3 Les filtres variant dans le temps	17
1.3 Approches analytiques de l'effet d'un SAR	18
1.3.1 L'approche énergétique	18
1.3.1.1 L'approche énergétique appliquée à une salle passive	18
1.3.1.2 L'approche énergétique appliquée à une salle active	19
1.3.2 L'approche systémique simplifiée d'un SAR à partir de réponses impulsionnelles construites sur un modèle énergétique	21
1.3.3 L'approche d'un SAR par impédance équivalente	22
1.4 Précision du gain moyen en boucle ouverte d'un SAR	23
1.4.1 Retour sur l'instabilité théorique d'un SAR multicanal	24
1.4.2 Retour sur l'efficacité théorique d'un SAR multicanal	25
1.5 Synthèse du chapitre 1	26

Dans ce travail sur la recherche de méthodes modélisant l'effet objectif d'un SAR sur les caractéristiques acoustique d'une salle, il est au préalable nécessaire de définir ce qu'est la qualité acoustique, comment la quantifier et à partir de quelles données physiques mesurables. Il convient ensuite de décrire ce qu'est un SAR, quels en sont les différents types, leurs principes de fonctionnement et leurs limites. Enfin, il faut aussi faire état des méthodes de modélisation d'un SAR déjà décrites dans la littérature afin d'en cerner les avantages et les limites, et d'éventuellement s'en

inspirer pour établir de nouvelles approches. C'est dans cette optique de définition du cadre de notre recherche que chacun de ces trois grands points vont être respectivement abordés dans les trois premières parties de ce chapitre. La quatrième et dernière partie sera quant à elle consacrée à préciser l'un des principaux paramètres d'entrée des modèles prévisionnels issu de la littérature, et dont l'intérêt est qu'il peut être lié à la fois à la principale limite d'utilisation d'un SAR, à savoir sa limite de stabilité, et à son action sur l'effet de salle. Nous reprendrons et clarifierons ainsi la définition du gain moyen en boucle ouverte des canaux d'un SAR, puis nous nous intéresserons aux conséquences de cette précision sur l'interprétation de certains résultats théoriques qui auront été présentés précédemment vis à vis de la stabilité et de l'efficacité d'un SAR régénératif.

1.1 Acoustique des salles

1.1.1 La réponse impulsionnelle

Dans une salle, les différentes composantes du front d'onde émis par une source sonore subissent de multiples modifications avant d'atteindre l'auditeur. Celles-ci sont dues aux interactions de l'onde acoustique avec le milieu de propagation et les parois (voir figure 1.1). Ainsi, après son émission, le signal sonore originel est modulé par la salle. Sous certaines hypothèses, comme celle d'un milieu propagatif à l'équilibre, et pour des positions de source et de récepteur données, cet effet de salle peut être considéré comme un effet linéaire invariant dans le temps. Il peut donc être entièrement décrit à partir d'une réponse impulsionnelle. Concrètement, celle-ci est une mesure de la pression acoustique au point de réception lorsque le signal source est une impulsion de Dirac ; cette pression étant induite par l'arrivée de contributions du front d'onde. La réponse impulsionnelle d'une salle peut se diviser en trois zones temporelles suivant la nature et le nombre de ces contributions (voir figure 1.2). Lorsque la source et le récepteur sont en visibilité l'un de l'autre, la première contribution de la réponse impulsionnelle est celle directement issue de la source. Elle n'a subi aucune réflexion et son énergie décroît avec la distance source-récepteur du fait de la dispersion géométrique de l'intensité produite par une source sphérique en champ libre. On parle alors de champ direct. Viennent ensuite les réflexions dites précoces qui n'ont subi qu'un nombre faible de réflexions et qui par conséquent sont très influencées par la position et la nature individuelle des différents matériaux dans la salle et vis-à-vis des positions de la source et du récepteur. Ainsi, l'architecture « fine » de la salle joue un rôle important sur cette partie de la réponse impulsionnelle. Après un temps appelé « temps de transition » [Polack 1993], la densité temporelle des contributions du front d'onde de la réponse impulsionnelle est trop élevée pour pouvoir les distinguer et les analyser séparément. Ces contributions tardives sont alors suffisamment nombreuses et ont subi un nombre suffisant de réflexions pour pouvoir être décrites par des modèles statistiques ne prenant en compte que des grandeurs architecturales et acoustiques macroscopiques comme le volume de la salle et le coefficient moyen d'absorption des parois en incidence aléatoire. On se situe alors dans une zone temporelle appelée celle du champ diffus¹.

1.1.2 Les indices acoustiques

Puisque la réponse impulsionnelle est une mesure de l'effet de salle, l'analyse perceptive de celui-ci cherche à établir des correspondances entre des critères subjectifs et des indices objectifs physiques

1. L'approche statistique du champ diffus possède aussi une limite fréquentielle en dessous de laquelle les hypothèses d'homogénéité et d'isotropie du champ sonore sur lesquelles elle repose ne peuvent être considérées comme valables. Cette limite est théoriquement définie par la fréquence de *Schroeder* [Jouhaneau 2003].

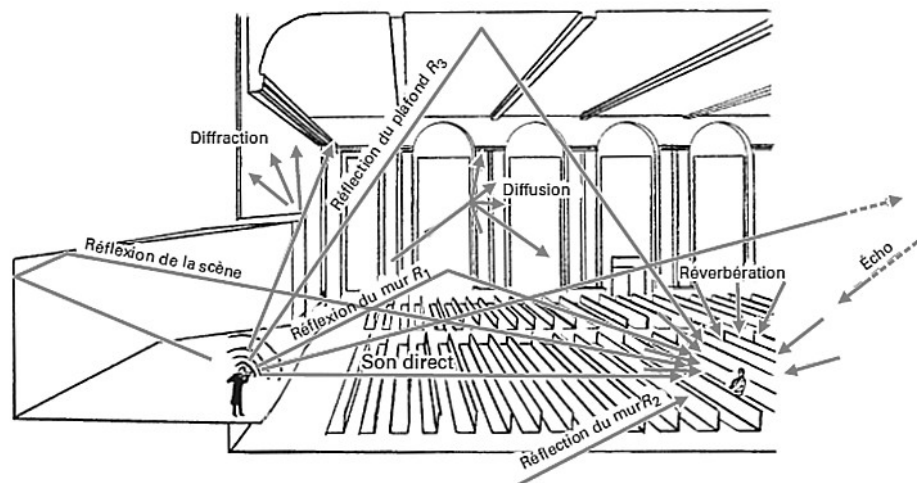


FIGURE 1.1 - Les différentes composantes d'un front d'onde atteignant un auditeur dans une salle (d'après [Beraneck 2002]).

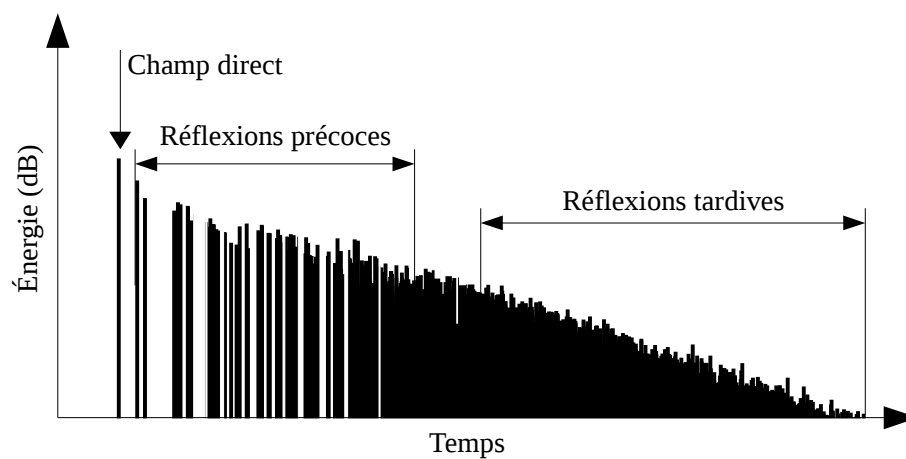


FIGURE 1.2 - Les différentes composantes d'une réponse impulsionnelle de salle.

issus de cette réponse impulsionnelle. Bien que les recherches sur ce sujet soient toujours d'actualité, une norme [ISO :3382-1 2009] définissant certains indices objectifs et le protocole expérimental de mesure de la réponse impulsionnelle a déjà été publiée. Les indices qui y sont présentés font ainsi souvent référence lors de l'établissement d'un cahier des charges. Dans la suite de ce mémoire de thèse, nous nous focaliserons sur six d'entre eux qui sont parmi les plus utilisés ; à savoir la durée de réverbération (T_r), la réverbération précoce (EDT), la force sonore ($\mathcal{G}$), la clarté (C80), la définition (D50) et le temps central (T_s).

1.1.2.1 Les indices liés à la réverbérance

La durée de réverbération

La durée de réverbération est une mesure physique de la vitesse de décroissance de l'énergie sonore après l'arrêt du signal source. Cette décroissance progressive du niveau sonore est liée à la dissipation de l'énergie sonore suite aux phénomènes d'absorption par les parois et le milieu propagatif. En toute rigueur, la durée de réverbération est définie par la durée mise par (la régression linéaire sur) le niveau sonore pour décroître de 60 dB après extinction d'une source large bande entretenue. Cependant, il est possible d'obtenir une courbe de décroissance équivalente à cette mesure à partir de la réponse impulsionnelle grâce à l'utilisation d'une intégration rétrograde [Schroeder 1965] :

$$E_s(t) = \frac{\int_t^{+\infty} p^2(t)dt}{\int_0^{+\infty} p^2(t)dt} \quad (1.1)$$

où $p(t)$ est la mesure de la réponse impulsionnelle.

D'un point de vue subjectif, la durée de réverbération est liée à la réverbérance à la fin du message sonore, ce qui justifie sa mesure à partir d'un niveau de décroissance initial de 5 dB². Le champ direct n'est ainsi pas pris en compte et l'influence des réflexions précoces est minimisée. La durée de réverbération est donc une mesure principalement liée aux réflexions tardives. Or, celles-ci étant peu influencées par les positions de la source et des récepteurs, la durée de réverbération est une quantité relativement stable suivant les points de mesure. Cette faible dispersion spatiale à l'intérieur d'une même salle [Pelorson 1991] en comparaison avec un seuil de discrimination auditif, établi à 5% [Cremer 1982], fait que l'utilisation d'une valeur moyenne de durées de réverbération sur un ensemble de récepteurs est pertinente pour la qualification de la réverbération tardive d'une salle.

La durée de réverbération précoce

Lors du déroulement d'un message sonore musical, le court espace de temps entre deux notes successives ne permet pas d'apprécier la réverbérance selon la durée de réverbération définie plus haut (ou « classique »). Cette impression est alors à mettre en relation avec le début de la réponse impulsionnelle de la salle [Atal 1965]. Jordan [Jordan 1970] proposa ainsi de définir une durée de réverbération dite précoce ou EDT (Early Decay Time) dont la mesure est calquée sur celle de la durée de réverbération classique à ceci près que la régression linéaire de la courbe de décroissance

2. En théorie, la mesure de la durée de réverbération devrait s'effectuer en faisant une régression linéaire de la courbe de décroissance obtenue à partir de l'équation (1.1) de -5 dB à -65 dB. Dans la pratique, le bruit de fond présent lors de la mesure de la réponse impulsionnelle ne permet souvent pas d'obtenir une dynamique de mesure suffisante. Pour pallier cette difficulté, la norme 3382-1 propose de se limiter à une régression linéaire de la courbe de décroissance de -5 dB à -25 dB ou de -5 à -35 dB puis d'extrapoler cette régression sur 60 dB. Ces différentes mesures de la durée de réverbération sont respectivement nommées T_{r20} et T_{r30} .

donnée par l'équation (1.1) se fait de 0 dB à -10 dB. Cette régression est ensuite extrapolée sur -60 dB pour permettre une comparaison avec la mesure de la durée de réverbération classique.

En prenant en compte le début de la réponse impulsionnelle, la durée de réverbération précoce est fortement influencée par le champ direct et les premières réflexions. Ainsi, les détails architecturaux de la salle et les positions des points mesure jouent un rôle important sur les valeurs prises par cet indice [Barron 1995] et leur dispersion à l'intérieur d'une même salle. Dispersion qui, du fait qu'elle est souvent supérieure au seuil de discrimination de 5% donnée par la norme (et déduit de celui de la durée de réverbération classique), entraîne qu'une analyse pertinente de l'EDT ne peut être faite qu'en considérant individuellement chaque point de mesure.

1.1.2.2 L'indice lié à l'intensité sonore

La force sonore

L'impression subjective de volume ou d'amplitude sonores est reliée à l'indice de force sonore [Lehman 1980]. Celui-ci est simplement une mesure de la totalité de l'énergie acoustique présente dans la réponse impulsionnelle obtenue par une source omnidirectionnelle. Afin de pouvoir comparer cet indice d'intensité obtenu par différents systèmes de mesure, produisant des niveaux de puissance de source différents et composés de microphones avec des sensibilités différentes, la mesure de l'intensité sonore de la totalité de la réponse impulsionnelle est normalisée par rapport au niveau obtenu par le même système de mesure en champ libre à 10 m de la source. La force sonore s'exprime donc ainsi :

$$\mathcal{G} = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{+\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{+\infty} p_{10}^2(t) dt} \right) \quad (1.2)$$

où $p_{10}(t)$ est la mesure de la réponse impulsionnelle à 10 m en champ libre.

La force sonore n'est pas un indice stable sur toutes les positions de réception. Celle-ci varie sensiblement avec la distance source-récepteur notamment parce qu'elle intègre le champ direct, mais aussi parce que l'énergie du champ réverbéré diminue avec cette distance [Barron 1988]. Dans une même salle, ces variations sont souvent supérieures à 1 dB ce qui, d'après les études sur la sonie [Zwicker 1999], correspond au seuil différentiel de discrimination de la force sonore. L'utilisation d'une valeur moyenne de force sonore n'est donc pas toujours judicieuse. Une analyse de cet indice par point, ou tout du moins en relation avec la distance source-récepteur, semble plus appropriée.

1.1.2.3 Les indices liés à la précision

La clarté

Lors de l'écoute d'un message musical, la précision, qui est à mettre en relation avec la capacité de l'oreille humaine à distinguer deux sons musicaux proches [Beraneck 2002], peut être reliée à la valeur de l'indice de clarté [Miśkiewicz 2012]. Celui-ci est un rapport entre l'énergie contenue au début de la réponse impulsionnelle et celle contenue à la fin de la réponse impulsionnelle. La limite temporelle entre ces deux parties est fixée à 80 ms après l'arrivée du champ direct. Cette limite plus ou moins arbitraire repose sur la délimitation des contributions de la réponse impulsionnelle jugées utiles à l'appréciation d'un son musical (situées dans les 80 premières millisecondes) de celles jugées nuisibles à l'appréciation de ce même son (situées après les 80 premières millisecondes) [Reichardt 1974] :

$$C80 = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{0,08} p^2(t) dt}{\int_{0,08}^{+\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (1.3)$$

Du fait de l'importance que la clarté accorde à la partie précoce de la réponse impulsionnelle, elle est fortement influencée par les premières réflexions et le champ direct. Ce qui, comme l'EDT ou la force sonore, implique une variation significative des valeurs prises par cet indice à l'intérieur d'une salle, même entre deux points de mesures très proches [Pelorson 1991]. Là encore, ces variations comparées à un seuil de discrimination entre 0,5 dB et 1 dB [Cox 1993] (la norme 3382-1 la fixant à 1 dB) impliquent la nécessité d'une étude de cet indice de manière localisée.

La définition

L'indice de définition D50 s'utilise pour qualifier la compréhension de la parole [Bradley 1986] en quantifiant la capacité à distinguer deux syllabes successives. Elle repose elle aussi sur le principe de séparation de la réponse impulsionnelle en une partie utile et une partie nuisible. Pour un message parlé, la limite entre ces deux parties est fixée à 50 millisecondes après l'arrivée du champ direct. La définition est un rapport entre l'énergie précoce de la réponse impulsionnelle et l'énergie totale de la réponse :

$$D50 = \frac{\int_0^{0,05} p^2(t)dt}{\int_0^{+\infty} p^2(t)dt} \quad (1.4)$$

La définition de cet indice étant très proche de celle de la clarté, son comportement vis-à-vis de la variabilité des mesures en différents points d'une salle en est aussi très similaire. Ainsi, compte tenu d'un seuil de discrimination de 0,05 [Bradley 1999] qui s'avère faible relativement à la disparité des mesures observées, l'utilisation d'une valeur moyenne de la définition sur un ensemble de points de mesure n'est que peu pertinente.

Le temps central

Comme les deux indices décrits précédemment et avec lesquels il est fortement corrélié [Pelorson 1991], le temps central est à mettre en relation avec l'impression subjective de précision [Cremer 1982]. Bien que moins utilisé que la clarté ou la définition, cet indice présente l'avantage d'être moins sensible à une légère variation spatiale de la position des points de mesure. Ceci est dû à la définition même du temps central qui est celle d'un barycentre, et n'inclut donc pas de valeur de temps fixe. Ainsi, contrairement à la clarté, le temps central ne varie que très peu selon qu'une réflexion importante en énergie arrive légèrement après ou avant 80 ms.

$$Ts = \frac{\int_0^{+\infty} tp^2(t)dt}{\int_0^{+\infty} p^2(t)dt} \quad (1.5)$$

Cependant, il existe bien une variation du temps central avec la distance source-récepteur [Zamarreno 2007] pouvant dépasser à l'intérieur d'une même salle le seuil de discrimination de cet indice qui est d'environ 10 ms [Cox 1993]. Une étude du temps central point par point est donc nécessaire.

1.1.2.4 Autres indices

La norme définit deux indices objectifs liés à l'impression d'espace : la fraction d'énergie latérale précoce et le niveau sonore latéral tardif liés respectivement à la largeur de source apparente et l'effet d'enveloppement. Bien que de plus en plus considérés par les acousticiens, ces indices ne seront pas traités dans la suite de ce mémoire de thèse. Ceci du fait que les approches théoriques développées au chapitre 3 reposent sur la notion de champ diffus sous-entendant une omnidirectionnalité de

l'incidence des ondes acoustiques, alors que ces indices sont justement une quantification de l'aspect directionnel de l'énergie contenue dans la réponse impulsionnelle.

Pour quantifier la balance tonale (ou timbre) d'une salle, plusieurs indices objectifs sont proposés dans la littérature [Bradley 2011]. Il s'agit dans la plupart des cas de combinaisons arithmétiques des valeurs à différentes bandes de fréquence de l'un des indices acoustiques présentés aux paragraphes précédents, notamment ceux en lien avec la réverbérance et le niveau sonore global. Nous ne ferons pas d'étude spécifique sur la prévision de ces indices de balance tonale, mais du fait de leurs définitions, les conclusions qui seront portées sur les prévisions de durée de réverbération classique et précoce ou de force sonore peuvent leur être extrapolées.

1.2 Présentation des SAR

L'utilisation de moyens électroniques pour modifier les caractéristiques du champ sonore d'une salle se divise en deux principales catégories. Les systèmes dits « Public Address » sont utilisés pour améliorer la transmission d'un message sonore en renforçant le signal issu de la source de manière à s'affranchir au maximum de l'effet de salle, alors que les systèmes dits d'assistance à la réverbération (SAR) sont, eux, conçus pour modifier l'effet de salle. Ces deux types de systèmes sont composés de systèmes de prise de son (microphone), d'un traitement électronique du signal et de systèmes d'émission électroacoustiques (haut-parleurs), comme représenté sur le schéma 1.3.

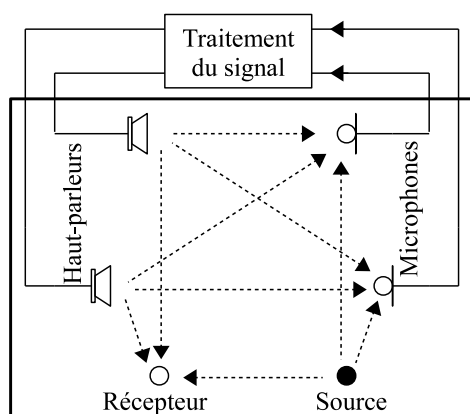


FIGURE 1.3 - Système électroacoustique dans une salle.

Les SAR, contrairement aux systèmes « Public Address », doivent prioritairement garantir l'aspect « naturel » du son résultant de leur interaction avec l'acoustique originelle de la salle. Ils se divisent eux-mêmes en deux principales sous-catégories : les systèmes dits « in-line » et les systèmes dits régénératifs. Certains systèmes existent aussi sous la forme d'une combinaison de ces deux types, on parle alors de systèmes hybrides. Dans la suite de ce chapitre, nous ne présenterons que quelques-uns de ces systèmes (pour une liste plus exhaustive, nous renvoyons le lecteur intéressé vers les références bibliographiques [Svensson 1995b, Warusfel 2002, Kaiser 2009, Poletti 2011]). Nous nous pencherons ensuite sur le phénomène de rebouclage acoustique qu'il est important de détailler, car il est à l'origine des problèmes d'instabilité des systèmes électroacoustiques et constitue ainsi leur principale limite physique.

1.2.1 Les différents types de SAR

1.2.1.1 Les SAR « in-line »

Les SAR « in-line » sont ceux qui, dans leur principe, se rapprochent le plus des systèmes « Public Address ». Ils superposent à l'acoustique naturelle d'une salle des contributions sonores issues d'un signal prélevé le plus proche possible de la source pour que celui-ci soit le moins possible affecté par l'effet de salle. Les premiers systèmes de ce type ajoutaient un effet de réverbération au son prélevé sur scène par l'utilisation de bandes magnétiques montées en boucle avant de le réinjecter au niveau de l'auditoire [Vermeulen 1956]. Cette méthode de réverbération artificielle créait cependant plusieurs artéfacts audibles, notamment une coloration audible prononcée [Jones 1972]. Plus tard, sur des systèmes comme SIAP [Prinssen 1994], RODS [Barnett 1989] ou VIVACE [Müller-BBM 2013], l'utilisation de réverbérateurs électroniques permit un meilleur contrôle de la réverbération artificielle en limitant les problèmes de coloration tout en maîtrisant plus finement la répartition temporelle de l'énergie acoustique ajoutée. Le système RODS est aujourd'hui utilisé en combinaison avec le système « in-line » ERES [Jaffe 1992] qui, lui, ne contient pas de réverbérateurs, mais cherche à introduire ponctuellement des réflexions dans la partie précoce de la réponse impulsionnelle. La combinaison de ces deux systèmes permet ainsi de contrôler presque indépendamment les différentes contributions ajoutées à la réponse impulsionnelle. Poussée à l'extrême, cette idée d'un contrôle total de la réponse impulsionnelle amène à l'holographie sonore ou synthèse de champ sonore [Berkhout 1993], principe sur lequel est construit un autre SAR « in-line », le système ACS [Berkhout 1988].

De manière générale, les systèmes « in-line » sont délicats à mettre en œuvre, car il n'est pas toujours aisé de prélever un signal sonore ne contenant au préalable aucun effet de salle et de capter une source sonore de façon neutre lorsque celle-ci présente une directivité complexe comme dans le cas d'un orchestre ou même d'un instrument seul. De plus, lors de la conception ou de l'installation de ces systèmes, il convient de faire particulièrement attention aux artéfacts audibles qu'ils peuvent entraîner comme une sonorité artificielle de la réverbération ou une délocalisation de source due, par exemple, à la création de réflexions trop importantes en niveaux par rapport au son issu de la source.

1.2.1.2 Les SAR régénératifs

Plutôt que de capter le son directement issu de la source, les SAR régénératifs captent un signal sonore déjà affecté par l'effet de salle. Les microphones de ces systèmes, positionnés loin de la scène, permettent de s'affranchir partiellement du problème d'une prise de son délicate. Le signal avant traitement contenant déjà la réverbération naturelle de la salle, il n'est pas nécessaire d'introduire une réverbération électronique pour modifier la partie tardive de la réponse impulsionnelle. Une sonorité « naturelle » est ainsi plus facilement atteinte qu'avec les systèmes « in-line ». Cependant, ces systèmes sont surtout préconisés pour le contrôle de la réverbération tardive, car ils ne permettent pas un contrôle indépendant de toutes les contributions qu'ils ajoutent à la réponse impulsionnelle.

Le système « Assisted Resonance » [Parkin 1970] fut l'un des premiers systèmes régénératifs installés. Les transducteurs de chaque canal électroacoustique de ce système étaient positionnés au niveau des ventres de vibration de l'un des modes propres de la salle pour n'augmenter la réverbération qu'à la fréquence correspondante. Cette sélection fréquentielle était renforcée par l'utilisation de filtres très sélectifs. Un tel système n'était ainsi valable qu'aux basses fréquences (domaine où les fréquences propres sont plus marquées) et demandait, pour atteindre une efficacité suffisante, l'utilisation d'un grand nombre de canaux (typiquement de 70 à 100 [Svensson 1995b]).

Ainsi, du fait d'une efficacité réduite à une petite plage de fréquence et d'une installation onéreuse et délicate, les systèmes régénératifs à bandes étroites en général, et le système « Assisted Resonance » en particulier, ne sont actuellement plus installés.

Les canaux électroacoustiques de la majorité des systèmes régénératifs installés aujourd'hui, sont effectifs sur presque tout le spectre audible. L'unité de traitement du signal de ces systèmes est typiquement composée d'un simple gain large bande et d'un éventuel retard, ce qui en rend la conception relativement simple. Comme nous le verrons par la suite, le dimensionnement du nombre de canaux d'un SAR large bande en fonction de l'efficacité souhaitée est principalement lié au problème de la stabilité. Cette nécessaire stabilité joue aussi sur la mise en œuvre en imposant d'une part, un éloignement suffisant des différents canaux entre eux [Meynial 2001] et d'autre part, une capture minimale du champ direct issu du haut-parleur d'un canal par le microphone de ce même canal. Dans le système MCR cette contrainte est abordée en éloignant les microphones et les haut-parleurs d'une distance supérieure au rayon de réverbération [Franssen 1968], qui correspond à la distance théorique à partir de laquelle le champ direct est inférieur en niveau au champ réverbéré [Jouhaneau 2003]. Le système Carmen développé par le CSTB utilise quant à lui des microphones bidirectionnels dont l'axe du minimum de directivité est orienté dans la direction du haut-parleur, ce qui permet de placer les deux transducteurs électroacoustiques d'un même canal à proximité l'un de l'autre [Vuichard 2000].

1.2.1.3 Les SAR hybrides

Les systèmes hybrides peuvent être composés de canaux électroacoustiques appartenant aux systèmes « in-line » et de canaux de systèmes régénératifs comme les systèmes Constellation [Poletti 2011] ou AFC3 [Bakker 2012], ou alors de canaux comportant simultanément des caractéristiques des deux types de système comme le système LARES [Griesinger 2000].

Le système Constellation est un développement commercial du système VRAS initialement conçu par Poletti [Poletti 1994]. Ce système est une mise en parallèle d'un système « in-line » comportant une réverbération électronique courte n'ajoutant de l'énergie que sur la partie précoce de la réponse impulsionnelle, et d'un système régénératif large bande contrôlant la réverbération tardive en utilisant éventuellement une réverbération électronique. Outre cet ajout de réverbération artificielle, la partie régénérative du système VRAS se distingue des systèmes MCR et Carmen par le fait qu'il s'agisse d'un système non diagonal puisque les microphones et les haut-parleurs ne sont plus reliés deux à deux, le signal d'un microphone est distribué à l'ensemble des haut-parleurs du système.

Le système LARES est à l'origine basé sur le principe des systèmes « in-line ». Cependant, pour éviter le problème d'une prise de son trop délicate de l'orchestre par des microphones directifs, ce système utilise des microphones omnidirectionnels. Ceux-ci reçoivent donc un signal légèrement affecté par l'effet de salle qui contribue en même temps que les réverbérateurs électroniques à l'augmentation de la réverbération tardive due au système.

1.2.2 Stabilité des SAR

L'instabilité des systèmes électroacoustiques provient du fait que ces systèmes sont des systèmes bouclés. Ce bouclage est dû au retour vers les microphones d'une quantité d'énergie sonore émise par les haut-parleurs. Si le gain de la boucle, appelé gain en boucle ouverte, est trop important, il se produit un phénomène d'auto-oscillation (effet Larsen) pouvant entraîner la destruction du matériel. Lorsque le système entre dans un comportement légèrement non linéaire, ces phénomènes d'auto-

oscillations commencent à se produire sur une quantité restreinte de composantes de la fonction de réponse en fréquence du système. Le gain en boucle ouverte n'est pas encore suffisant pour entraîner un effet Larsen proprement dit, mais l'amortissement de fréquences concernées est tout de même fortement diminué relativement aux autres composantes de la fonction de réponse en fréquence. Ce déséquilibre fréquentiel produit alors un phénomène de coloration du son particulièrement audible sur la partie tardive de la réponse impulsionnelle de la salle [Nielsen 1995].

1.2.2.1 Stabilité d'un système à un canal

Un système à un seul canal est composé d'une boucle directe correspondant au canal électroacoustique même, et d'une boucle de rétroaction correspondant au trajet acoustique du haut-parleur vers le microphone, comme montré sur le schéma 1.4. Le transfert G_{mh} est celui de la boucle directe

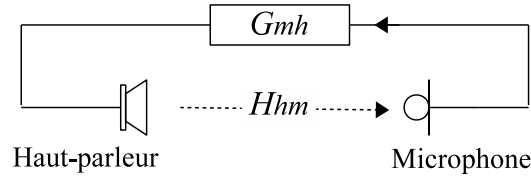


FIGURE 1.4 - Système électroacoustique à un canal.

du microphone au haut-parleur. Il est fonction de la sensibilité du microphone, du gain électronique apporté par l'unité de traitement du signal, de l'impédance électrique du haut-parleur et du rendement du haut-parleur. Le transfert acoustique H_{hm} est celui apporté par la boucle de rétroaction. Il est fonction de la directivité et de la position du haut-parleur et du microphone, ainsi que du trajet acoustique entre ces deux transducteurs.

Critère de stabilité

Dans le domaine temporel, la fonction de gain en boucle fermée de ce système est une somme infinie de produits de convolution qui, dans le domaine fréquentiel, se transforment en produits simples. Chaque terme de ces deux sommes (équations (1.6) et (1.7)) correspondant aux rebouclages successifs d'ordre n du système :

$$g_{bf}(t) = g_{mh}(t) + g_{mh}(t) * h_{hm}(t) * g_{mh}(t) + g_{mh}(t) * h_{hm}(t) * g_{mh}(t) * h_{hm}(t) * g_{mh}(t) + \dots \quad (1.6)$$

$$G_{bf}(f) = G_{mh}(f) \sum_{n=0}^{+\infty} (H_{hm}(f)G_{mh}(f))^n \quad (1.7)$$

ou, sous une autre forme

$$G_{bf}(f) = \frac{G_{mh}(f)}{1 - H_{hm}(f)G_{mh}(f)} \quad (1.8)$$

La stabilité de $G_{bf}(f)$ est assurée lorsque la partie réelle de la fonction de réponse en fréquence $H_{hm}(f)G_{mh}(f)$ est inférieure à³ 1. On cherche donc une condition suffisante qui permette

3. Bien que comme le souligne Poletti [Poletti 2000] il s'agisse là d'une transcription de condition de stabilité de l'espace de Laplace vers le domaine fréquentiel légèrement restrictive

de respecter cette contrainte, quelle que soit la fréquence. Compte tenu du caractère aléatoire de la phase de la fonction de réponse en fréquence acoustique supposée en champ diffus [Schroeder 1987], on ne peut se baser que sur un critère reposant sur le module de la boucle ouverte $H_{hm}(f)G_{mh}(f)$. Soit :

$$|H_{hm}(f)G_{mh}(f)| < 1 \quad \forall f \quad (1.9)$$

ou ⁴,

$$20 \log(|H_{hm}(f)G_{mh}(f)|) < 0 \text{ dB} \quad \forall f \quad (1.10)$$

La probabilité d'instabilité

Lorsque les SAR ne contiennent pas de réverbérateurs électroniques comme dans le cas des systèmes MCR et Carmen, la fonction de réponse en fréquence de la boucle directe est déterministe et ne présente pas de variations trop brusques puisqu'il s'agit idéalement d'un gain pur éventuellement retardé. En première approximation, elle peut donc être considérée comme uniforme en fréquence. La fonction de gain en fréquence de la boucle de rétroaction correspond à la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle entre le haut-parleur et le microphone. Comme écrit au paragraphe 1.1.1, cette réponse impulsionnelle est composée du champ direct et du champ réverbéré. En négligeant l'effet de l'air, le champ direct correspond à une impulsion de type Dirac qui, dans le domaine fréquentiel, est une fonction de gain lisse et déterministe dont l'amplitude dépend de la distance entre le microphone et le haut-parleur et de la directivité de chacun de ces transducteurs dans la direction de l'axe les reliant. Le champ réverbéré, s'il est assimilé dans sa totalité à un champ diffus, présente une réponse en fréquence stochastique due à la superposition des modes de la salle et dont les valeurs d'amplitude sont théoriquement réparties suivant une loi de Rayleigh [Schroeder 1987]. Dans le cas des systèmes régénératifs large bande, comme cela a déjà été présenté lors de leurs descriptions au paragraphe 1.2.1.2, le niveau du champ direct d'un haut-parleur vers le microphone du même canal est minimisé. En première approximation, le gain de la boucle de rétroaction acoustique $|H_{hm}|$ est donc une fonction de réponse en fréquence stochastique de type champ diffus. Dans ce type de réponse en fréquence, au-delà de la fréquence de *Schroeder* [Kuttruff 2009], de nombreux modes propres de la salle sont présents dans un intervalle de fréquence inférieur à la largeur de la résonance d'un seul mode. L'intervalle fréquentiel Δf entre deux valeurs indépendantes successives de l'amplitude de la fonction de réponse en fréquence n'est alors plus lié à la densité modale, mais au facteur d'amortissement des modes $\bar{\delta}$ par l'intermédiaire de la fonction d'autocorrélation C_{HH} de cette de réponse en fréquence en amplitude [Schroeder 1962, Schroeder 1964] :

$$C_{HH}(\Delta f) \simeq \frac{1}{1 + (\pi \Delta f \bar{\delta}^{-1})^2} \quad (1.11)$$

Or, en restant dans l'hypothèse de champ diffus, la valeur moyenne du facteur d'amortissement peut être mise en relation avec la durée de réverbération [Kuttruff 2009] :

$$\bar{\delta} = \frac{6 \ln 10}{2Tr} \quad (1.12)$$

4. Pour permettre au gain de la boucle directe $|G_{mh}(f)|$ d'être le plus important possible de façon à maximiser l'action du système tout en évitant l'instabilité, il faut, d'après l'inégalité (1.10), minimiser le gain de la boucle de rétroaction $|H_{hm}(f)|$. Pour les systèmes « in-line », l'utilisation de microphones directifs proches de la scène et loin des haut-parleurs permet de réduire considérablement l'énergie de la boucle de rétroaction. Dans le cas des systèmes régénératifs, l'énergie de la boucle de rétroaction acoustique ne peut être que partiellement réduite puisque le principe de ces systèmes est d'amplifier un signal affecté par un effet de salle et contenant alors nécessairement des contributions dues au haut-parleur du système même.

Ainsi, dans une salle présentant une durée de réverbération Tr et en considérant une bande de fréquence de largeur B , le nombre de valeurs de la fonction de réponse en fréquence en champ diffus pouvant être considérées comme indépendantes, se met sous la forme :

$$N_{fB} = \frac{B}{\Delta f} \simeq \frac{B Tr}{\frac{6 \ln(10)}{2\pi} \sqrt{\frac{1-C_{HH}}{C_{HH}}}} = \frac{B Tr}{C} \quad (1.13)$$

où C est une constante fixée de manière à assurer une indépendance effective entre deux valeurs successives de la réponse en fréquence. Elle est déterminée de sorte à minimiser la fonction d'autocorrélation de la fonction de réponse en fréquence en champ diffus donnée par l'équation (1.11), tout en évitant une valeur trop importante de Δf .

Comme la loi de probabilité des valeurs d'amplitude d'une fonction de réponse en fréquence en champ diffus est une loi de Rayleigh [Schroeder 1987], la probabilité qu'au moins une des N_{fB} valeurs du carré de son module (soit l'énergie) soit supérieure à $10 \log_{10}(X)$ décibels est donnée par le complément du produit de N_{fB} fonctions cumulatives de cette loi pour la valeur $\sqrt{X}$. Soit :

$$P(X) = 1 - \left[1 - e^{-\frac{X}{\mu_2}} \right]^{\frac{B Tr}{C}} \quad (1.14)$$

où μ_2 est le moment d'ordre 2 de la loi de probabilité de Rayleigh.

Or, puisque la fonction de réponse en fréquence en boucle ouverte du canal d'un système régénératif à un seul canal est de type champ diffus, puisque la moyenne de la fonction de gain correspondante (c.-à-d. gain en boucle ouverte d'un système à un seul canal) $\bar{\Gamma} = \|\overline{H_{hm} G_{mh}}\|^2$ est son moment d'ordre μ_2 et, puisque d'après l'équation (1.10), la stabilité est assurée lorsque toute valeur de cette fonction de gain est inférieure à 1, le risque d'instabilité de ce système correspond à la probabilité qu'au moins une des valeurs d'une fonction de réponse en fréquence de type champ diffus et de moyenne énergétique $\bar{\Gamma} = \mu_2$ dépasse $X = 1$. Soit :

$$P(\bar{\Gamma}) = 1 - \left[1 - e^{-\frac{1}{\bar{\Gamma}}} \right]^{\frac{B Tr}{C}} \quad (1.16)$$

La figure 1.5 montre que sur une grande largeur de bande et pour des durées de réverbération raisonnables (< 3 s), une valeur de $\bar{\Gamma}$ de -12 dB permet d'éviter un effet Larsen. Cette valeur limite, bien que théoriquement surestimée, car reposant un critère de stabilité restrictif par rapport à un critère absolu de stabilité d'un système bouclé, reste valable en pratique [Kuttruff 1976]. Ceci du fait des différentes hypothèses simplificatrices faites sur la fonction de réponse en fréquence en boucle ouverte du système, en particulier celle sur les variations d'amplitude autour de la moyenne qui ne seraient liées qu'au comportement théorique d'un champ diffus, alors qu'en réalité ses variations sont plus complexes et, probablement aussi, plus importantes, notamment à cause de la non-planéité de la fonction de réponse en fréquence des transducteurs⁷ ou de la variation d'absorption des matériaux de la salle avec la fréquence.

5. Schroeder fixa cette constante à 4,9 pour n'avoir une corrélation que de 0,2 [Schroeder 1964], mais Poletti montra à l'aide de simulations qu'une valeur de 1,4 semblait suffisante [Poletti 2000].

6. Le niveau moyen est ici défini comme un transfert efficace moyen au sens des moindres carrés. Soit, sur une bande de fréquence s'étendant de f_1 à f_2 :

$$\|\bar{H}\| = \sqrt{\frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} \|H(f)\|^2 df} \quad (1.15)$$

7. En particulier celles des haut-parleurs

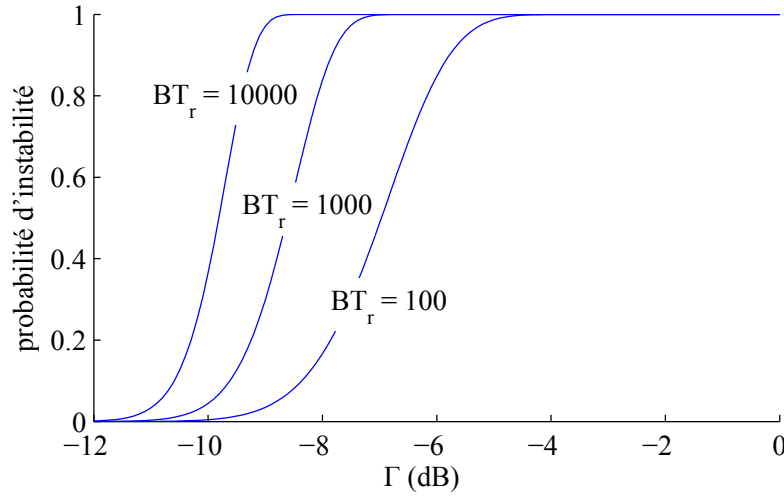


FIGURE 1.5 - Probabilité d'instabilité d'un système régénératif à un canal en fonction du paramètre $\bar{\Gamma}$ sous hypothèse d'une boucle de rétroaction en champ diffus en considérant une phase nulle pour toutes les valeurs de cette fonction de réponse en fréquence (la constante C de l'équation (1.16) étant fixée à 1,4).

1.2.2.2 Stabilité d'un système multicanal

Critère de stabilité

La fonction de gain en boucle fermée d'un système multicanal s'écrit :

$$G_{bf}(f) = \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh}(f) \underline{H}_{hm}(f) \right)^{-1} \underline{G}_{mh}(f) \quad (1.17)$$

avec $\underline{I}_d$ une matrice identité de dimension égale au nombre de canaux électroacoustiques ; $\underline{H}_{hm}(f)$ la matrice des transferts acoustiques inter ou intra canaux dans laquelle l'élément H_{ij} correspond à la valeur de la fonction de réponse en fréquence à la fréquence f entre le i ème microphone et j ème haut-parleur ; $\underline{G}_{mh}(f)$ la matrice des transferts électroacoustiques dans laquelle l'élément G_{ij} correspond à la valeur de la fonction de réponse en fréquence à la fréquence f entre le i ème haut-parleur et le j ème microphone. Dans le cas de systèmes diagonaux, cette matrice est diagonale puisqu'un microphone n'est relié électriquement qu'à un seul haut-parleur (voir figure 1.6).

La stabilité de la fonction de gain en boucle fermée donnée par l'équation (1.17) est conditionnée par la transformée de Laplace de la matrice du gain en boucle ouverte $\mathcal{L}[\underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm}]$. Celle-ci doit être telle que le polynôme $\Delta_T(s) \det \left[\underline{I}_d + \mathcal{L}[\underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm}] \right]$, ne doit avoir que des racines à partie réelle négative [Vuichard 1997], où $\Delta_T(s)$ est le polynôme caractéristique de $\mathcal{L}[\underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm}]$ ⁸. Comme dans le cas d'un système à un seul canal, cette condition dans l'espace de Laplace peut être ramenée dans

8. Le polynôme caractéristique d'une matrice carrée est celui dont les racines sont les valeurs propres de cette matrice

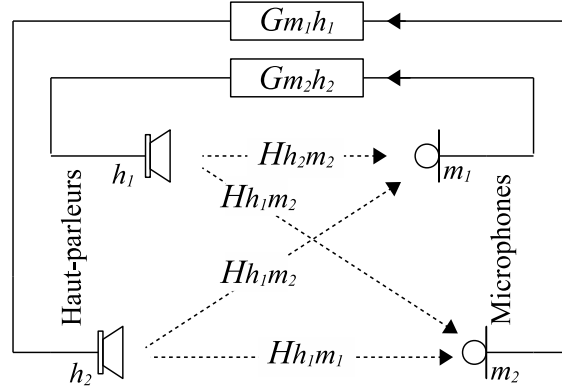


FIGURE 1.6 - Système électroacoustique diagonal à deux canaux.

celui de Fourier. Il s'agit d'assurer le critère de stabilité pour les valeurs propres de la matrice⁹ $\underline{G_{mh}}(f) \underline{H_{hm}}(f)$, ce qui peut être obtenu de manière restrictive, en assurant une amplitude de chacune d'elles inférieure à 1.

Probabilité d'instabilité

Comme précédemment, les seules variations considérées des valeurs de la matrice de gain en boucle ouverte sont dues aux transferts acoustiques H_{hm} présumés comme étant de type champ diffus. Les éléments de cette matrice sont alors des valeurs complexes aléatoires gaussiennes centrées en zéro pour leur partie réelle et imaginaire [Schroeder 1987]. La densité de probabilité de la norme de chacune des valeurs propres λ de cette matrice est donnée par [Ohsmann 1990] :

$$f_{N|\lambda|}(|\lambda|) = \frac{2|\lambda|}{N!\mu_2} \Gamma(N, |\lambda|/\mu_2) \quad (1.18)$$

où $\Gamma(N, |\lambda|/\mu_2)$ est la fonction Gamma incomplète :

$$\Gamma(N, |\lambda|/\mu_2) = \int_{|\lambda|/\mu_2}^{\infty} e^{-x} x^{N-1} dx \quad (1.19)$$

La probabilité que la norme d'au moins une des valeurs propres de la matrice de gain en boucle ouverte soit supérieure à 1 en fonction de $\bar{\Gamma}$ (qui correspond au moment d'ordre 2 des valeurs de cette matrice) est :

$$P_N(\bar{\Gamma}) = 1 - \left[1 - \frac{1}{N} e^{-\frac{1}{\bar{\Gamma}}} \sum_{k=0}^{N-1} \left(\frac{1}{\bar{\Gamma}} \right)^k \frac{(N-k)}{k!} \right]^{\frac{NBTr}{C}} \quad (1.20)$$

9. Si la matrice $\underline{G_{mh}}(f) \underline{H_{hm}}(f)$ est diagonalisable, alors elle peut se mettre sous la forme $Q\Lambda Q^{-1}$, où Q est la matrice des composantes des vecteurs propres et Λ la matrice diagonale des valeurs propres. Alors, le terme de l'équation (1.17) qui régit la stabilité du système peut se mettre sous la forme :

$$(\underline{I_d} - \underline{G_{mh}}(f) \underline{H_{hm}}(f))^{-1} = (\underline{I_d} - Q\Lambda Q^{-1})^{-1} = (Q Q^{-1} - Q\Lambda Q^{-1})^{-1} = Q(\underline{I_d} - \Lambda)^{-1} Q^{-1}$$

Le respect du critère de stabilité (pôle de la fonction de transfert avec une partie réelle strictement négative) sur $(\underline{I_d} - \underline{G_{mh}}(f) \underline{H_{hm}}(f))^{-1}$ est alors transposé au respect du critère de stabilité sur $(\underline{I_d} - \Lambda)^{-1}$

Comme dans le cas d'un système à un canal, dont la stabilité est obtenue à partir de l'équation (1.14), C est une constante dont la valeur optimale de 1,4 fut déterminée par *Poletti* à l'aide de simulations de Monte-Carlo [Poletti 2000]. Celui-ci remarqua aussi que plus le nombre de canaux augmente plus le risque de stabilité théorique établi à partir d'une condition sur l'amplitude des valeurs propres se rapproche de celui donné par la simulation. Ainsi, à partir d'un nombre de canaux moyennement important ($N > 16$) le risque d'instabilité calculé à partir de l'équation (1.20) est presque équivalent à celui qui serait obtenu directement à partir du respect de la condition stricte de stabilité.

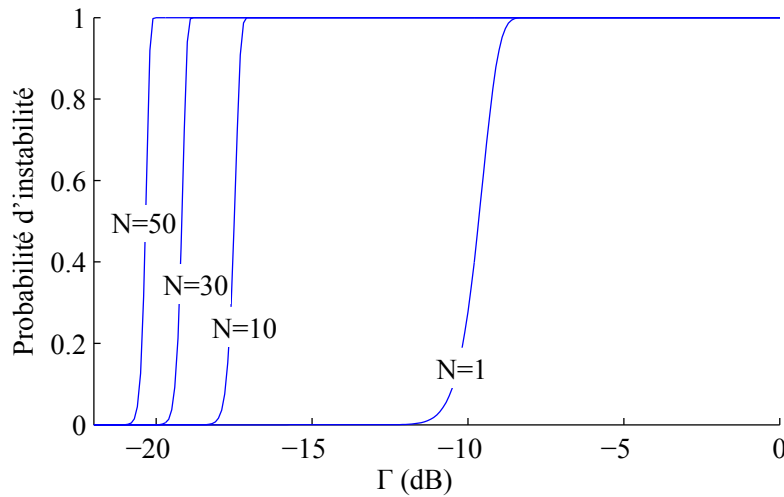


FIGURE 1.7 - Probabilité d'instabilité d'un système régénératif à plusieurs canaux en fonction du paramètre $\bar{\Gamma}$ et du nombre de canaux sous hypothèse d'une boucle de rétroaction en champ diffus (la constante C et la valeur de BTr de l'équation (1.20) étant respectivement de 1,4 et 10000).

La figure 1.7 qui est obtenue à partir de l'équation (1.20), montre que la valeur de $\bar{\Gamma}$ avant instabilité diminue avec le nombre de canaux. Ainsi, pour 30 canaux, la quantité $\bar{\Gamma}$ assurant la stabilité est située à -20 dB plutôt qu'à -12 dB comme c'est le cas d'un système à un seul canal. Ce qui implique que plus le nombre de canaux augmente plus le gain électronique assurant la stabilité est faible. L'énergie injectée dans la salle par chaque canal en est donc diminuée d'autant.

1.2.2.3 Les filtres variant dans le temps

Certains SAR utilisent des filtres électroniques incluant un procédé dit de « time-variance » permettant de repousser les limites de l'instabilité du système. Le principe est de faire varier dans le temps la phase ou l'amplitude du gain de la boucle directe (et donc du gain en boucle ouverte). La fonction de réponse en fréquence du système n'est plus uniquement dépendante de la fréquence, mais varie aussi avec le temps. Les rebouclages successifs du système sur lui-même ne sont alors plus totalement cohérents entre eux. L'effet d'auto-oscillation responsable de l'effet Larsen est alors fortement atténué, et la valeur du gain avant l'instabilité peut dépasser la limite théorique présentée au paragraphe précédent. Certains auteurs affirment que la valeur du paramètre $\bar{\Gamma}$ peut ainsi être ramenée à -4 dB [Griesinger 1991] sans constater instabilité. Cependant, ces filtres variants dans le temps peuvent générer des artefacts audibles dus à leur principe même de fonctionnement [Nielsen 1999]. Leur utilisation est donc délicate et ne permet en pratique d'augmenter $\bar{\Gamma}$ que de quelques décibels.

De plus, puisqu'ils suppriment à l'effet de salle son caractère invariant, ils rendent l'utilisation des indices classiques d'acoustique des salles fortement discutable. En effet, comme vu à la partie 1.1.2, ces indices sont basés sur la mesure de réponses impulsionnelles. Or celles-ci ne permettent de décrire entièrement un système physique que si celui-ci est linéaire et invariant.

1.3 Approches analytiques de l'effet d'un SAR

1.3.1 L'approche énergétique

Dans l'article où il introduisit pour la première fois le principe des systèmes régénératifs large bande, *Franssen* y développa un calcul simple pour en prévoir l'efficacité en terme d'augmentation de durée de réverbération et de niveau sonore [*Franssen 1968*]. Plus tard, *Poletti* reprit cette approche afin d'y introduire l'action d'éventuels retards électroniques [*Poletti 1993*]. Nous allons, ici, présenter cette approche après avoir brièvement résumé la théorie énergétique des champs diffus, aussi appelée théorie de Sabine, dont elle issue.

Cette approche énergétique constitue, encore aujourd'hui, la méthode prévisionnelle simple la plus présente dans la littérature spécialisée [*Kaiser 2009*]. *Poletti* lui même la cite fréquemment dans des articles récents mais sous une forme légèrement modifiée, car incluant l'effet des modules de réverbération électronique intégrés dans le système VRAS [*Poletti 2006, Poletti 2010*]. Ce système n'étant pas un système purement régénératif, puisque incluant justement des modules de réverbération électronique, il sort du cadre de notre étude à proprement parler, nous n'avons donc pas repris ici cette version de l'approche énergétique. Cependant, comme *Poletti* lui même le démontre, cette approche propre au système SAR se réduit à l'approche présentée dans la suite de ce sous-chapitre lorsque le système est diagonal et que la réverbération électronique est absente.

1.3.1.1 L'approche énergétique appliquée à une salle passive

Dans une salle de volume V , dont les parois internes ont une surface totale S et un coefficient moyen d'absorption en incidence aléatoire α , la perte d'énergie n'est due qu'aux phénomènes d'absorption par les parois et par l'air. Ainsi, pour une source de puissance $P(t)$ et en supposant l'homogénéité et l'isotropie du champ sonore, la densité volumique d'énergie $w(t)$ dans la salle passive s'établit à partir d'un simple bilan énergétique [*Jouhaneau 2003*] :

$$V \frac{dw(t)}{dt} + \frac{(A + 4mV)c}{4} w(t) = P(t) \quad (1.21)$$

où $A = S\alpha$ est appelée aire équivalente d'absorption et m le coefficient d'absorption du son dans l'air (ou coefficient d'absorption atmosphérique).

Si l'on considère que la source cesse d'émettre à l'instant $t = 0$:

$$w(t) = \beta e^{-\left(\frac{Ac}{4V} + mc\right)t} \quad (1.22)$$

où β est un coefficient fonction de la puissance de la source avant son extinction, qui vaut $\frac{P\delta t}{V}$ dans le cas d'une source impulsionnelle de puissance P et de durée infiniment petite δt .

La durée de réverbération théorique d'après l'approche de Sabine se déduit facilement de l'équation (1.22), puisque, par définition, il s'agit de la durée mise par la densité d'énergie pour décroître de 60 dB :

$$T_{r0} = \frac{24 \ln(10)V}{(A + 4mV)c} \quad (1.23)$$

D'où :

$$w(t) = \beta e^{-\frac{6 \ln(10)}{T_{r0}} t} \quad (1.24)$$

1.3.1.2 L'approche énergétique appliquée à une salle active

La présence d'un système électroacoustique à N canaux vient ajouter à l'équation (1.21) un terme source par canal égal au produit la densité d'énergie éventuellement retardé et du gain G_i^2 de la boucle directe de chaque canal¹⁰ :

$$V \frac{dw_{ea}(t)}{dt} + \frac{(A + 4mV)c}{4} w_{ea}(t) = \sum_{i=1}^N w_{ea}(t - \tau_i) G_i^2 + P(t) \quad (1.25)$$

où $w_{ea}(t)$ est la densité d'énergie acoustique d'une salle active, $\tau - i$ le retard électronique appliqué au i ème canal.

Après extinction de la source :

$$V \frac{dw_{ea}(t)}{dt} + \frac{(A + 4mV)c}{4} w_{ea}(t) = \sum_{i=1}^N G_i^2 w_{ea}(t - \tau_i) \quad (1.26)$$

Il s'agit ici d'une équation différentielle avec retards. *Poletti* [Poletti 1993] choisit de résoudre cette équation à partir de sa transposition dans l'espace de Laplace et en utilisant un développement limité au voisinage de zéro et à l'ordre 1 de la fonction exponentielle qui correspond à la transposée d'un retard :

$$\begin{aligned} \mathcal{L} \left[V \frac{dw_{ea}(t)}{dt} + \frac{(A + 4mV)c}{4} w_{ea}(t) \right] &= \sum_{i=1}^N G_i^2 w_{ea}(t) * \delta(t - \tau_i) \\ V (sW_{ea}(s) - w_{ea}(0^-)) + \frac{(A + 4mV)c}{4} W_{ea}(s) &= \sum_{i=1}^N G_i^2 W_{ea}(s) e^{-\tau_i s} \\ V (sW_{ea}(s) - w_{ea}(0^-)) + \frac{(A + 4mV)c}{4} W_{ea}(s) &= \sum_{i=1}^N G_i^2 W_{ea}(s) (1 - \tau_i s + o((\tau_i s)^2)) \end{aligned}$$

En considérant un gain identique et un retard identique appliqués à tous les canaux du système :

$$V (sW_{ea}(s) - w_{ea}(0^-)) + \frac{(A + 4mV)c}{4} W_{ea}(s) \approx N \bar{G}^2 W_{ea}(s) - N \bar{G}^2 \bar{\tau} s W_{ea}(s)$$

Or, le système considéré étant causal, la valeur $w_{ea}(0^-)$ est nulle.

$$V \left(1 + \frac{N \bar{G}^2 \bar{\tau}}{V} \right) (sW_{ea}(s) - w_{ea}(0^-)) + \frac{(A + 4mV)c}{4} W_{ea}(s) \approx 0$$

10. G_i^2 n'est pas un gain au sens strict du terme en ce sens qu'il n'est pas adimensionnel. Il s'agit de la puissance en watts produite par le haut-parleur d'un canal du SAR lorsque son microphone capte une densité d'énergie de 1 J.m³. Exprimé en fonction des caractéristiques de ces transducteurs, il s'écrit :

$$G_i^2 = \frac{\rho c^2 \eta_i \chi_i^2 g_i^2}{Q_i \zeta_{i \text{ hp}}}$$

où η_i est le rendement du haut-parleur et $\zeta_{i \text{ hp}}$ son impédance électrique, χ_i la sensibilité du microphone et Q_i son facteur de directivité, g_i^2 le gain électronique en puissance [Vuichard 1997].

en retransposant dans l'espace des temps :

$$\begin{aligned} \mathcal{L}^{-1} \left[V \left(1 + \frac{N\bar{G}^2\bar{\tau}}{V} \right) (sW_{ea}(s) - w_{ea}(0^-)) + \frac{(A + 4mV)c}{4} \left(1 - \frac{4N\bar{G}^2}{(A + 4mV)c} \right) W_{ea}(s) \approx 0 \right] \\ V \left(1 + \frac{N\bar{G}^2\bar{\tau}}{V} \right) \frac{dw_{ea}(t)}{dt} + \frac{(A + 4mV)c}{4} \left(1 - \frac{4N\bar{G}^2}{(A + 4mV)c} \right) w_{ea}(t) = 0 \end{aligned} \quad (1.27)$$

Le gain électronique moyen par canal peut être relié à $\bar{\Gamma}$, pour pouvoir réécrire l'équation (1.27) en fonction de ce paramètre, car comme vu précédemment, cette quantité est celle limitant l'action du système. $\bar{\Gamma}$ est le produit du gain de la boucle directe G^2 et de la boucle de rétroaction acoustique H^2 .

Soit :

$$\bar{\Gamma} = \|\overline{HG}\|^2 \quad (1.28)$$

ou, de manière plus développée et en travaillant à partir des fonctions de réponse en fréquence :

$$\frac{1}{B} \int_f^{f+B} \|H(f)G(f)\|^2 df \quad (1.29)$$

où f est la première fréquence de la bande spectrale considérée de largeur B . $H(f)$ est la fonction de réponse en fréquence acoustique de la salle sans système et $G(f)$ la fonction de réponse en fréquence de la boucle directe d'un canal du système. Cette dernière étant, en première approximation, invariante avec la fréquence :

$$\bar{\Gamma} = G^2 \frac{1}{B} \int_f^{f+B} \|H(f)\|^2 df \quad (1.30)$$

Afin d'obtenir une expression du transfert acoustique du haut-parleur vers le microphone d'un canal d'un SAR ($H^2 = \frac{1}{B} \int_f^{f+B} \|H(f)\|^2 df$), nous considérons la théorie énergétique des champs diffus. D'après celle-ci, la densité d'énergie w dans une salle produite en régime stationnaire par une source de puissance P s'écrit :

$$w \frac{(A + 4mV)c}{4} = P \quad (1.31)$$

Ainsi, le gain entre une source et un point de la salle, en particulier entre le haut-parleur d'un canal d'un SAR et l'emplacement du microphone du même canal vaut :

$$\frac{w}{P} = \frac{4}{(A + 4mV)c} \quad (1.32)$$

en considérant une largeur de bande B suffisante, afin de pouvoir assimiler H^2 à sa valeur moyenne :

$$H^2 = \frac{4}{(A + 4mV)c} \quad (1.33)$$

et donc

$$\bar{\Gamma} = G^2 \frac{4}{(A + 4mV)c} \quad (1.34)$$

Ainsi, l'équation (1.27) peut se réécrire :

$$V \left(1 + N \frac{(A + 4mV)c}{4V} \bar{\Gamma} \bar{\tau} \right) \frac{dw_{ea}(t)}{dt} + \frac{(A + 4mV)c}{4} (1 - N\bar{\Gamma}) w_{ea}(t) = 0 \quad (1.35)$$

Ainsi :

$$w_{ea}(t) = \beta' e^{-\left(\frac{1-N\bar{\Gamma}}{1+N\frac{(A+4mV)c}{4V}\bar{\Gamma}\bar{\tau}}\right)\left(\frac{Ac}{4V}+mc\right)t} \quad (1.36)$$

Le gain en terme de durée de réverbération et de force sonore dû au système se déduit alors des expressions (1.36) et (1.22) :

$$\frac{T_{rea}}{T_{r0}} = \frac{1 + N\frac{(A+4mV)c}{4V}\bar{\Gamma}\bar{\tau}}{1 - N\bar{\Gamma}} \quad (1.37)$$

Même en mettant de côté le fait que la théorie des champs diffus repose sur des hypothèses rarement rencontrées dans la réalité, l'expression (1.35) ne peut être totalement valide. L'introduction de retards modifie la répartition temporelle d'énergie ajoutée par le système, mais ne modifie pas sa quantité totale contrairement à ce que l'intégration de l'expression (1.36) laisserait apparaître. De plus, lors de l'établissement de l'équation (1.27), les termes supérieurs à l'ordre 2 du développement limité de l'exponentielle dans l'espace de Laplace $o((\tau_i s)^2)$ sont négligés sans réelle justification. Cependant, le développement théorique détaillé ici présente l'avantage de conduire à des expressions mathématiques simples dont l'interprétation permet une compréhension rapide de l'action d'un SAR régénératif. En effet, si l'absorption de l'air est négligée, les équations (1.35), (1.36) et (1.37) associent l'action du système à une diminution de l'aire équivalente d'absorption d'une quantité $N\bar{\Gamma}$ et à une augmentation virtuelle du volume de la salle d'un facteur $(1 + N\bar{\Gamma}\bar{\tau}(A + 4mV)c/4V)$.

1.3.2 L'approche systémique simplifiée d'un SAR à partir de réponses impulsionnelles construites sur un modèle énergétique

Pour établir une expression analytique de l'évolution temporelle de l'énergie d'une salle équipée d'un SAR régénératif, *Svensson* développa une approche basée sur la résolution approchée de l'équation temporelle exacte d'un système bouclé [Svensson 1998]. L'approche présentée ici n'a pas été reprise par d'autres auteurs. La raison en est probablement sa limitation à un système à un seul canal ; situation théorique, jamais rencontrée dans une installation réelle. Nous avons cependant choisi de la citer car elle constitue, encore aujourd'hui, la seule approche analytique concurrente de l'approche énergétique citée dans la littérature scientifique. Elle constitue donc la seule autre base de réflexion possible pour développer un modèle prévisionnel simple mais plus général et applicable à un système multicanal.

L'équation temporelle d'un système bouclée correspond à la somme de la réponse impulsionnelle passive $h_{sr}(t)$ et de la contribution du système $h_{act}(t)$. Si, comme *Svensson*, nous ne considérons un système qu'à un seul canal, la contribution du système est une convolution de trois réponses impulsionnelles ; celle de la source vers le microphone du canal électroacoustique $h_{sm}(t)$, celle du gain en boucle fermée $g_{bf}(t)$ donné par l'équation (1.6), et celle du haut-parleur vers le récepteur $h_{hr}(t)$.

$$h_{ea}(t) = h_{sr}(t) + h_{sm}(t) * g_{bf}(t) * h_{hr}(t) \quad (1.38)$$

$$h_{ea}(t) = h_{sr}(t) + h_{sm}(t) * [g_{mh}(t) + g_{mh}(t) * h_{hm}(t) * g_{mh}(t) + g_{mh}(t) * h_{hm}(t) * g_{mh}(t) * h_{hm}(t) * g_{mh}(t) + \dots] * h_{hr}(t) \quad (1.39)$$

L'idée de *Svensson* fut de construire les réponses impulsionnelles acoustiques h nécessaires au calcul de l'expression (1.39) à partir de la « théorie révisée » de *Barron* et *Lee* [Barron 1988], et

du fait que le champ réverbéré tardif puisse être assimilé à un bruit blanc gaussien [Polack 1992] décroissant. La « théorie révisée » de *Barron* et *Lee* permettant de prendre en compte la décroissance des énergies des champs direct et réverbéré avec l'éloignement du récepteur par rapport à la source (voir annexe A), et l'utilisation d'un bruit blanc gaussien permettant d'obtenir une forme réaliste du champ réverbéré tardif en pression. Les réponses impulsionnelles ainsi réalisées furent alors utilisées par *Svensson* pour calculer une valeur théorique du premier terme d'ajout d'énergie du système de l'équation (1.39). Il parvint ainsi à déterminer à 2 dB près l'énergie précoce apportée par un système composé d'un canal de type MCR :

$$\int_{t_d}^{t_d+0,08} h_{sm}(t) * g_{mh}(t) * h_{hr}(t) dt = \bar{\Gamma} r_{ref}^2 \times \left[\frac{6 \ln(10)V}{4\pi c T_{r0} r_{sm}^2 r_{hr}^2} e^{\frac{6 \ln(10)r_{hr}}{c T_{r0}}} + \left(\frac{e^{\frac{6 \ln(10)(r_{hm}-r_{hr})}{c T_{r0}}}}{r_{sm}^2} + \frac{e^{\frac{6 \ln(10)(r_{hm}-r_{sm})}{c T_{r0}}}}{r_{lr}^2} \right) \left(1 - e^{\frac{6 \ln(10)(r_{sr}-r_{sm}-r_{hr}+0,08c+\tau c)}{c T_{r0}}} \right) \right. \\ \left. + \frac{4\pi c T_{r0}}{6 \ln(10)V} e^{\frac{6 \ln(10)(r_{sr}-r_{sm}-r_{hr})}{c T_{r0}}} \left(1 - \left(1 - \frac{6 \ln(10)}{c T_{r0}} (r_{sr} - r_{sm} - r_{hr}) \right) \right) e^{\frac{6 \ln(10)(r_{sr}-r_{sm}-r_{hr}+0,08c+\tau c)}{c T_{r0}}} \right] \quad (1.40)$$

où r_{sm} , r_{sr} , r_{hm} et r_{hr} sont respectivement les distances entre la source et le microphone du système, la source et le récepteur, le haut-parleur et le microphone du système, le haut-parleur et le récepteur ; et r_{ref} la distance à laquelle la source produit un niveau de pression de 0 dB.

Les termes d'ajout d'énergie d'ordres supérieurs de l'équation (1.39), correspondant aux termes de régénération, sont ici négligés alors que leur importance ne peut plus être ignorée pour des temps supérieurs à 80 ms ; et même pour des temps inférieurs si le microphone et le haut-parleur sont placés à proximité l'un de l'autre comme dans le système Carmen. De plus, l'expression du gain en énergie dû au système pour les 80 premières millisecondes établie par *Svensson* n'est valable que pour un système à un canal, et le calcul théorique de convolutions multiples de réponses impulsionnelles théoriques (bruits blancs décroissants précédés d'impulsions de Dirac de hauteurs variables) devient très lourd avec l'augmentation du nombre de convolutions ; rendant cette approche théorique peu utilisable en pratique (l'équation (1.40) qui correspond à l'énergie d'une telle convolution sur seulement deux réponses impulsionnelles est déjà non triviale, comme sa longueur le laisse entrevoir). Cependant, l'idée initiale de *Svensson* d'injecter dans l'équation des systèmes bouclés des réponses impulsionnelles théoriques sera reprise au chapitre (3), car elle permet une approche sans approximation de l'action du SAR.

1.3.3 L'approche d'un SAR par impédance équivalente

L'association entre l'effet des canaux d'un SAR régénératif et une variation de l'air équivalente d'absorption dans la salle faite par l'approche énergétique peut amener à une réflexion sur la possibilité de traiter ce type de SAR par impédance équivalente. La question étant alors de savoir comment déterminer l'impédance équivalente du SAR. Cependant, se pose le problème d'un calcul d'impédance équivalence complexe, d'autant plus pour le système Carmen où l'utilisation de transducteurs directifs implique une impédance fortement fonction de l'angle d'incidence de l'onde. De plus, les transducteurs d'un même canal d'un SAR ne sont pas totalement confondus, se pose alors le problème de savoir comment répartir cette impédance sur une surface. Cette approche n'a été que très légèrement évoquée dans la littérature [Vuichard 1997] et n'a jamais abouti à un modèle effectif.

1.4 Précision du gain moyen en boucle ouverte d'un SAR

Dans ce chapitre, concernant les problèmes d'instabilité d'un SAR et les méthodes prévisionnelles analytiques existantes, nous avons repris des travaux qui tous caractérisent l'action d'un SAR à partir d'un paramètre $\bar{\Gamma}$ que les auteurs de ces travaux appellent « gain moyen en boucle ouverte ». Ce paramètre est défini par le gain du transfert de la boucle directe d'un canal d'un SAR G et par le gain du transfert acoustique du haut-parleur d'un canal vers le microphone du même canal H . Dans le cas d'un système à un seul canal, $\bar{\Gamma}$ correspond en effet au gain moyen de la boucle ouverte du canal. Par contre, dans le cas d'un système à plusieurs canaux, ce paramètre ne correspond plus au gain moyen de la boucle ouverte de chaque canal au sens strict. Pour un SAR multicanal, la boucle de rétroaction de chaque canal intègre l'action des autres canaux du système ; action qui n'est pas considérée dans le transfert H . Or, dans la pratique, lors de l'installation d'un SAR, le réglage d'un SAR se fait en priorité en considération des problèmes de stabilité qui ne peuvent être rigoureusement traités qu'en prenant en compte le gain en boucle ouverte réel des canaux (c.-à-d. intégrant l'effet des autres canaux dans la boucle de rétroaction). Concernant la prévision de la stabilité, mais aussi celle de l'effet d'un système multicanal, il est donc plus cohérent de considérer la valeur du réel gain moyen en boucle ouverte $\bar{\Gamma}'$ plutôt que le paramètre $\bar{\Gamma}$. Nous avons donc cherché ici à établir une expression analytique du gain moyen en boucle ouverte $\bar{\Gamma}'$ utilisable dans les modèles prévisionnels de l'instabilité ou de l'effet d'un SAR régénératif afin que leurs paramètres d'entrée soient plus directement liés aux quantités prises en compte lors d'une installation réelle.

Par définition, le gain moyen en boucle ouverte d'un des canaux d'un SAR est la valeur moyenne du gain de la boucle formée par le transfert de la boucle directe d'un canal et la boucle de rétroaction d'un canal $H_{(N-1)}$ incluant le transfert acoustique de la salle et l'action des $N - 1$ autres canaux du système (H_0 correspond alors au transfert purement acoustique entre le haut-parleur et le microphone d'un même canal, $H_0 = H$). Soit :

$$\bar{\Gamma}' = \|\overline{H_{(N-1)}G}\|^2 \quad (1.41)$$

ou, de manière plus développée et en travaillant à partir des fonctions de réponse en fréquence :

$$\bar{\Gamma}' = \frac{1}{B} \int_f^{f+B} \|H_{(N-1)}(f)G(f)\|^2 df \quad (1.42)$$

En première approximation, la boucle directe d'un canal étant considérée comme invariante avec la fréquence :

$$\bar{\Gamma}' = G^2 \frac{1}{B} \int_f^{f+B} \|H_{N-1}(f)\|^2 df \quad (1.43)$$

D'après l'approche énergétique, l'introduction d'un SAR régénératif diagonal revient à considérer que chaque canal est une source supplémentaire de puissance $G^2 w_{ea}$ [Franssen 1968] (le gain de la boucle directe des canaux est supposé identique pour chacun d'entre eux). La densité d'énergie w_{ea} produite dans une salle équipée de $N - 1$ canaux électroacoustiques par une source de puissance P obéit ainsi à la relation :

$$w_{ea} \frac{(A + 4mV)c}{4} = P + G^2(N - 1)w_{ea} \quad (1.44)$$

la valeur du gain moyen d'un transfert électroacoustique $H_{(N-1)}^2 = \frac{1}{B} \int_f^{f+B} \|H_{N-1}(f)\|^2 df$ dans une salle comportant $N - 1$ canaux vaut donc :

$$H_{(N-1)}^2 = \frac{w_{ea}}{P} = \left(\frac{4}{(A + 4mV)c} \right) \left(\frac{1}{1 - (N - 1)G^2 \frac{4}{(A + 4mV)c}} \right) \quad (1.45)$$

soit :

$$\bar{\Gamma}' = G^2 \left(\frac{4}{(A + 4mV)c} \right) \left(\frac{1}{1 - (N - 1)G^2 \frac{4}{(A + 4mV)c}} \right) \quad (1.46)$$

En injectant l'expression de $\bar{\Gamma}$ (1.34) dans celle de $\bar{\Gamma}'$ (1.46), il est possible d'établir une correspondance entre ces deux paramètres :

$$\bar{\Gamma}' = \frac{\bar{\Gamma}}{1 - (N - 1)\bar{\Gamma}} \quad (1.47)$$

ou

$$\bar{\Gamma} = \frac{\bar{\Gamma}'}{1 + (N - 1)\bar{\Gamma}'} \quad (1.48)$$

La substitution du paramètre $\bar{\Gamma}$ par $\bar{\Gamma}'$ dans les formules sur l'instabilité et la prévision de l'effet d'un SAR multicanal présentées dans les précédentes parties de ce chapitre permet d'en préciser leurs interprétations. Ainsi, les deux sous-parties suivantes sont dédiées au problème de stabilité et à l'effet théorique d'un SAR sur la durée de réverbération selon l'approche énergétique proposée par *Poletti* en considérant le réel gain moyen en boucle ouverte $\bar{\Gamma}'$.

Dans les autres chapitres de ce document, lors de la démonstration mathématique des modèles prévisionnels basés sur une approche énergétique, nous travaillerons à partir du paramètre $\bar{\Gamma}$, car cela permet de simplifier l'écriture. Néanmoins, les formules importantes qui feront l'objet d'une application, seront réécrites en fonction de $\bar{\Gamma}'$. Nous nous efforcerons aussi d'utiliser le terme de « gain moyen en boucle ouverte » (GMBO) que dans un sens réellement approprié, c'est à dire en référence à $\bar{\Gamma}'$.

1.4.1 Retour sur l'instabilité théorique d'un SAR multicanal

D'après les équations (1.47) ou (1.48), plus le nombre de canaux est grand, plus le gain en boucle ouverte considérant les interactions inter canal $\bar{\Gamma}'$ est supérieur à celui d'un canal isolé $\bar{\Gamma}$. Ceci est dû à un gain moyen de la boucle de rétroaction d'un canal plus important lorsque le reste du système y est pris en compte. Cette remarque permet d'expliquer en partie la diminution de stabilité d'un SAR avec l'augmentation du nombre de canaux, observée par *Poletti* [Poletti 2000]. En effet, en substituant le paramètre $\bar{\Gamma}$ par $\bar{\Gamma}'$ dans l'expression (1.20) afin de tracer les courbes de probabilité d'instabilité (figure 1.8), nous pouvons remarquer qu'effectivement l'instabilité s'établit pour des valeurs de GMBO plus élevées qu'en considérant le paramètre $\bar{\Gamma}$ (voir figure 1.6). Cependant, ces valeurs limites de GMBO avant instabilité, bien que moins dispersées en fonction du nombre de canaux, ne sont pas non plus confondues. La probabilité d'instabilité exprimée en fonction du réel GMBO augmente tout de même avec le nombre de canaux. Ceci trouve son origine dans le fait que l'augmentation du nombre de canaux ne fait pas qu'augmenter la moyenne énergétique d'un transfert dans une salle, mais modifie aussi la loi de répartition des valeurs de la fonction de réponse en fréquence correspondante, en particulier en augmentant l'écart entre sa valeur moyenne et ses valeurs maximales.

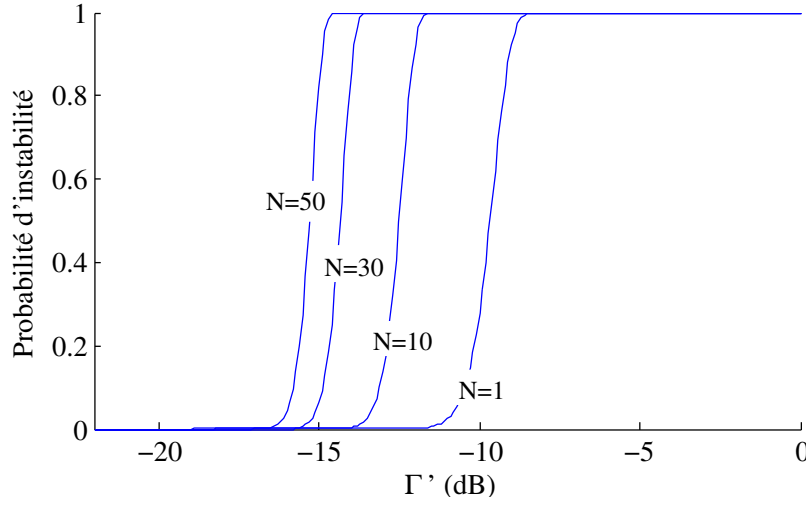


FIGURE 1.8 - Probabilité d'instabilité d'un SAR régénératif à plusieurs canaux en fonction du GMBO et du nombre de canaux N (la constante C de l'équation (1.20) étant fixée à 1,4 ; la valeur de BTr est de 10000).

1.4.2 Retour sur l'efficacité théorique d'un SAR multicanal

Si l'on reprend l'équation théorique d'augmentation de la durée de réverbération donnée par l'approche énergétique (équation (1.37)) en considérant un retard électronique des canaux de 20 ms et en y injectant le GMBO fixé de telle sorte que la probabilité théorique d'instabilité du système (équation (1.20)) soit inférieure à 5%, il est possible d'obtenir l'augmentation correspondante de la durée de réverbération en fonction du nombre de canaux. Nous pouvons voir sur la figure 1.9 que cette fonction n'est pas linéaire et que doubler le nombre de canaux ne permet pas de doubler l'effet maximal du système ; conformément aux observations expérimentales de *DeKoning* [De Koning 1983] et contrairement à ce que *Franssen* lui-même avançait [Franssen 1968]. Par exemple, 15 canaux permettent d'augmenter la durée de réverbération d'environ 65% alors que 30 canaux permettent d'obtenir une augmentation de ce même indice de 100%. La raison de ce comportement est là aussi que la valeur limite du GMBO avant instabilité est dépendante du nombre de canaux.

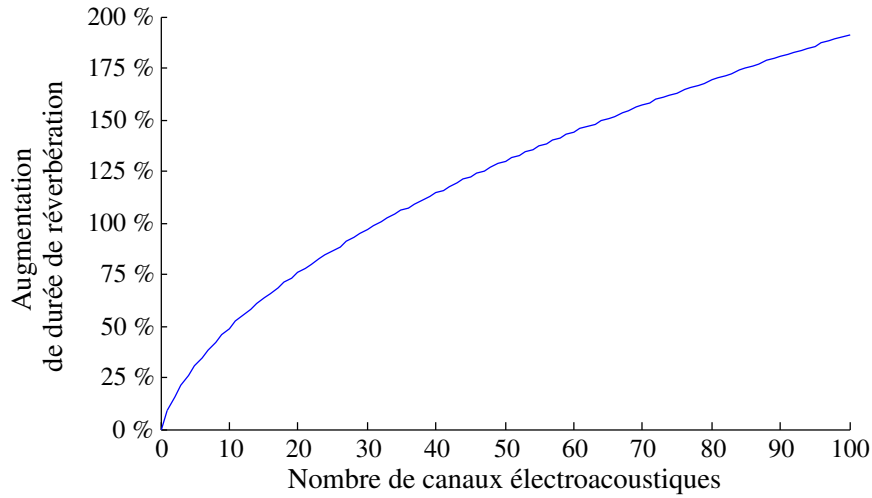


FIGURE 1.9 - Augmentation théorique de la durée de réverbération produite dans une salle par l'utilisation d'un SAR régénératif en fonction du nombre de canaux du système, pour un risque d'instabilité fixé à 5% et un retard électronique moyen de 20 ms. La valeur de BTr considérée est de 10000 et la constante C de l'équation (1.20) est fixée à 1,4.

1.5 Synthèse du chapitre 1

Dans ce chapitre consacré à l'état des connaissances sur l'acoustique des salles et sur les SAR nécessaires à la suite de nos travaux, nous avons dans un premier temps rappelé qu'une salle étant un système invariant dans le temps, le canal de transmission d'informations sonores qu'elle constitue est entièrement décrit par sa réponse impulsionnelle. Nous avons ensuite décrit six des principaux indices acoustiques objectifs déduits de cette réponse impulsionnelle. Ceux-ci étant les plus couramment utilisés pour quantifier la qualité acoustique d'une salle de spectacle, ils représentent l'ensemble des paramètres qu'un modèle prévisionnel suffisamment complet de l'effet acoustique d'un SAR doit chercher à établir. Dans un deuxième temps, nous avons présenté les différents types de SAR existant et leur principe de fonctionnement. Un point essentiel a alors été exposé : celui du problème de la stabilité inhérent à leur utilisation, en particulier dans le cas des SAR dits régénératifs. Nous avons ici repris les travaux de plusieurs auteurs décrivant ce problème, et amenant à la conclusion que la principale quantité limitant l'action de ces systèmes est la valeur du paramètre $\bar{\Gamma}$. Dans une troisième partie, nous avons exposé les approches prévisionnelles de l'effet d'un SAR déjà décrites dans la littérature, et aboutissant à deux modèles analytiques. Dans une quatrième et dernière partie, nous avons précisé le gain moyen en boucle ouverte d'un SAR afin de lever l'ambiguïté entre celui-ci et le paramètre $\bar{\Gamma}$; ce qui par ailleurs, nous a permis de réinterpréter certains résultats donnés aux parties précédentes et issus de la littérature.

Concernant les modèles prévisionnels existant, il est apparu que ceux-ci étaient souvent limités à la prévision d'un ou deux indices, qu'aucun d'entre eux ne s'intéressait directement à l'ensemble de la réponse impulsionnelle de sorte à pouvoir prévoir tous les indices acoustiques possibles déduits de celle-ci. De plus, ils souffrent tous d'un manque de validation. Enfin, aucun ne s'intéresse à l'utilisation particulière d'un SAR comme moyen d'augmentation du couplage dans le cadre d'une salle avec un balcon mal conçu. Cependant, chacun de ces deux modèles possède un avantage certain qui réside soit dans la simplicité d'établissement et d'exécution, soit dans la méthode de prise en

compte de l'effet du SAR à partir d'une approche exacte. Ainsi, ils constituent tout de même chacun une base de travail intéressante pour obtenir des modèles plus complets.

Approche systémique de l'action d'un SAR à partir de simulations numériques

Sommaire

2.1	Les modèles fréquentiel et temporel de l'approche systémique d'un SAR .	30
2.2	Simulation numérique des transferts acoustiques	32
2.2.1	Présentation des différentes approches numériques de détermination des contributions acoustiques constitutives d'une fonction de réponse en fréquence ou d'une réponse impulsionnelle	32
2.2.1.1	La méthode des sources-images	32
2.2.1.2	Le lancer de faisceaux adaptatif	33
2.2.1.3	Le lancer de particules	35
2.2.2	Combinaison des différentes approches numériques	36
2.3	Détermination des fonctions de réponse en fréquence électroniques du SAR	41
2.3.1	Égalisation automatique d'un canal	41
2.3.1.1	Prétraitement du gain en boucle ouverte	42
2.3.1.2	Aplanissement du gain en boucle ouverte	43
2.3.1.3	Élimination des fréquences émergentes du gain en boucle ouverte . . .	44
2.3.2	Égalisation automatique du système dans son ensemble	47
2.3.2.1	Calcul de la boucle de rétroaction de chaque canal en prenant en compte l'influence du reste du système	47
2.3.2.2	Arrêt de la procédure d'égalisation récursive	47
2.4	Exemple de l'approche systémique d'un SAR basée sur des simulations numériques	48
2.4.1	Présentation de la salle active et simulations numériques des transferts acoustiques	48
2.4.2	Procédure d'égalisation automatique	50
2.4.3	Exemple de réponse impulsionnelle passive et active au niveau de l'auditoire . .	53
2.5	Synthèse du chapitre 2	54

L'approche systémique (ou approche système) de l'action d'un SAR à partir de simulations numériques, souvent appelée par raccourci « simulation numérique d'un SAR », consiste à calculer dans le domaine temporel ou fréquentiel l'expression des systèmes bouclés multivariables. L'aspect numérique proprement dit réside dans l'obtention par des méthodes numériques des réponses impulsionnelles ou des fonctions de réponse en fréquence acoustiques injectées dans ces équations. Cette approche demande une connaissance *a priori* des matériaux présents dans la salle et une modélisation en trois dimensions de la géométrie de la salle. De plus, elle nécessite la réalisation de calculs numériques pouvant s'avérer très coûteux en temps. L'approche systémique de l'action d'un SAR à partir de simulations numériques, puisqu'elle repose justement sur des simulations numériques, ne peut donc pas directement répondre à l'objectif de cette thèse, à savoir la mise au

point de méthodes prévisionnelles qui soient rapides et demandant un minimum d'information sur la salle. Cependant, parce qu'elle présente l'avantage de se baser, d'une part, sur la résolution des équations des systèmes bouclés multivariables, n'effectuant ainsi pas d'approximation sur l'action du système et, d'autre part, sur des méthodes numériques de reconstruction de réponses impulsionnelles reconnues [Bork 2000] et pouvant inclure différents phénomènes propagatifs [Vorländer 2008], elle constitue sans doute l'approche prévisionnelle la plus fiable actuellement disponible. De plus, dans ce travail de recherche, compte tenu du fait que nous ne disposons que d'une seule salle réellement accessible à la mesure, la mise en œuvre de simulations numériques permet de générer un plus grand nombre de cas de référence auxquels confronter des modèles prévisionnels plus simples.

Dans la première partie de ce chapitre, après avoir présenté le principe de l'approche systémique de l'action d'un SAR de manière plus générale qu'à la partie 1.3.2 (c.-à-d. pour un SAR multicanal), nous discuterons les avantages et les inconvénients de travailler dans le domaine temporel ou fréquentiel pour la résolution de l'équation des systèmes bouclés multivariables ; ceci afin de justifier notre choix vis-à-vis du modèle fréquentiel. Nous nous attacherons ensuite à décrire les méthodes de simulation numérique de calcul de fonctions de réponse en fréquence acoustiques utilisées dans le cadre de cette thèse par le biais du logiciel Icare. Dans une troisième partie, nous décrirons la méthode mise au point pour obtenir les fonctions de réponse en fréquence correspondant aux traitements électroniques réalisés par le système. Enfin, dans une quatrième et dernière partie, nous présenterons un exemple de cette approche systémique des SAR à partir de simulations numériques.

2.1 Les modèles fréquentiel et temporel de l'approche systémique d'un SAR

D'un point de vue systémique, un SAR est un système bouclé multivariable. L'équation algébrique qui se rapporte à ce type de système s'exprime dans le domaine temporel par la somme de la réponse impulsionnelle passive et d'un terme actif constitué d'une somme infinie de produits de convolution¹. Dans le domaine fréquentiel, la valeur de la fonction de réponse en fréquence de la salle avec SAR $H_{ea}(f)$ est obtenue pour chaque fréquence à partir d'une équation matricielle composée de la somme de la fonction de réponse en fréquence passive $H_{sr}(f)$ et d'un terme d'action du système. Ce dernier est composé du produit matriciel d'un vecteur colonne $\underline{H}_{sm}(f)$ contenant les valeurs des fonctions de réponse en fréquence entre la source et les microphones de chaque canal, de la transposée d'un vecteur colonne $\underline{H}_{hr}(f)$ contenant les valeurs de la fonction de réponse en fréquence entre les haut-parleurs du système et le récepteur, et de la fonction de réponse en fréquence du gain en boucle fermée du système $G_{bf}(f) = \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh}(f) \underline{H}_{hm}(f) \right)^{-1} \underline{G}_{mh}(f)$ (toutes ces notations sont détaillées sur le schéma 2.1).

Ainsi :

$$H_{ea}(f) = H_{sr}(f) + \underline{H}_{hr}(f)^t \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh}(f) \underline{H}_{hm}(f) \right)^{-1} \underline{G}_{mh}(f) \underline{H}_{sm}(f) \quad (2.1)$$

1. il s'agit d'une extrapolation à un système multicanal de l'équation (1.38) utilisée par Svensson pour établir le modèle prévisionnel présenté à la partie 1.3.2

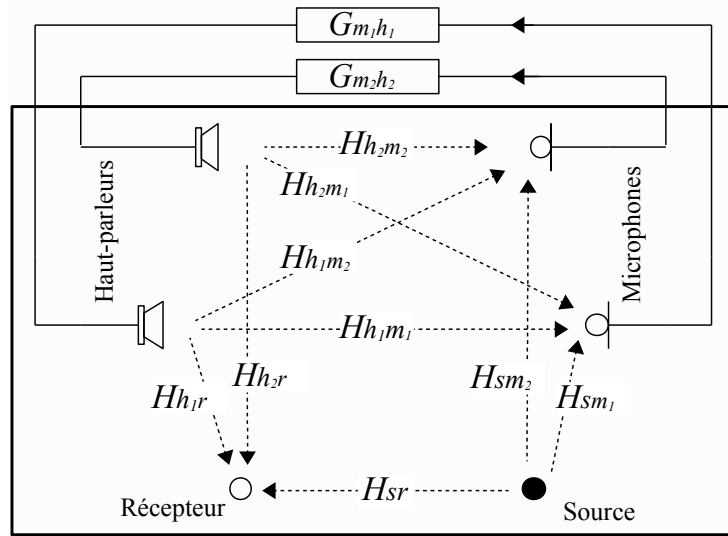


FIGURE 2.1 - Les différents transferts entrant en jeu dans une salle équipée d'un SAR (à 2 canaux), et nécessaires au calcul de la fonction de réponse en fréquence de la salle à partir l'équation des systèmes bouclés multivariables. H_{sr} : transfert acoustique entre la source et le récepteur (sans SAR). H_{sm_i} : transfert acoustique entre la source et le microphone du i ème canal du SAR. $H_{h_i r}$: transfert acoustique entre le haut-parleur du i ème canal du SAR et le récepteur. $H_{h_i m_j}$: transfert acoustique entre le haut-parleur du i ème canal du SAR et le microphone du j ème canal du SAR. $G_{m_i h_i}$: transfert électronique du i ème canal du SAR (boucle directe).

Selon que l'on utilise l'équation fréquentielle ou temporelle des systèmes bouclés multivariables, on parle de modèle fréquentiel exact ou temporel exact. L'avantage du modèle temporel est la possibilité d'inclure sans approximation l'effet d'éventuels filtres électroniques variant dans le temps (voir partie 1.2.2.3) [Svensson 1995a]. L'avantage du modèle fréquentiel exact réside quant à lui dans sa rapidité d'exécution. Pour un système diagonal à N canaux et des réponses impulsionnelles de n_{ech} échantillons, le gain en nombre de calculs élémentaires, et donc aussi en temps de calcul, du modèle fréquentiel par rapport au modèle temporel est de l'ordre de $n_{ech}/(4N + \ln(n_{ech}))$ [Vuichard 1997]. Si, par exemple, l'on souhaite convenablement extraire les indices acoustiques jusqu'à la bande d'octave centrée à 4 kHz à partir de réponses impulsionnelles d'une salle équipée d'un SAR dont l'action permet d'atteindre une durée de réverbération de 2 s, ces réponses impulsionnelles doivent au minimum être échantillonnées à 11314 Hz et avoir une durée de 2 s ; ce qui aboutit à un nombre d'échantillons par réponse impulsionnelle de 22628. Ainsi, pour un système comportant une trentaine de canaux (correspondant à une installation moyenne), le gain en calculs élémentaires du modèle fréquentiel par rapport au modèle temporel est d'environ 174. Ce gain n'est celui que d'un seul calcul de l'expression des systèmes bouclés multivariables or, comme nous le verrons dans la suite de ce chapitre, la simulation complète du système nécessite plusieurs calculs de cette expression. Le gain en temps de l'utilisation du modèle fréquentiel exact en est donc multiplié d'autant. Cet argument sur le temps de calcul nous a poussé à développer une approche fréquentielle exacte. La renonciation à simuler les filtres variant dans le temps que ce choix implique ne crée pas de manque réel dans le cadre de cette thèse. En effet, nous avons déjà expliqué que l'approche systémique utilisant des simulations numériques, et présentées dans ce chapitre, est destinée à fournir un ensemble de données auquel confronter des modèles analytiques simples. Or, les modèles dont il est question ici, et qui

seront développés aux chapitres 3 et 4, ne peuvent pas tous prendre en compte l'effet de ces filtres.

2.2 Simulation numérique des transferts acoustiques

Le logiciel Icare de simulation numérique de propagation acoustique développé par le CSTB repose sur une combinaison de méthodes numériques de résolution de l'équation de Helmholtz asymptotique [Noe 2012]. Cette dernière est une expression particulière de l'équation de Helmholtz permettant de transposer la propagation d'une onde sonore à celle de rayons interagissant ponctuellement avec les objets constitutifs de l'environnement. La validité de l'approche asymptotique est soumise à l'hypothèse que les longueurs d'onde du champ acoustique soient faibles devant les dimensions des objets. Au niveau des logiciels de simulation d'acoustique des salles, la résolution de l'équation de Helmholtz asymptotique s'effectue en calculant les trajets possibles de l'onde sonore entre la source et le récepteur, et en prenant en compte pour chacun d'entre eux les différentes interactions acoustiques du rayon concerné avec l'environnement. À l'issue de ce calcul, effectué pour chaque trajet et selon qu'il ait été réalisé dans le domaine fréquentiel ou temporel, on obtient la fonction de réponse en fréquence ou la réponse impulsionnelle entre la source et le récepteur.

Il existe plusieurs méthodes géométriques pour déterminer les différents trajets source-récepteur possibles et l'énergie associée. Chacune permet de prendre en compte différents phénomènes physiques avec plus ou moins de précision et de rapidité d'exécution [Vorländer 2008]. Le logiciel Icare utilise trois méthodes distinctes, mais complémentaires : celle par sources-images, celle du lancer de faisceaux dit adaptatif et celle du lancer de particules. Dans la suite de ce sous-chapitre, nous allons décrire successivement chacune de ces trois approches puis présenter un exemple de réponse impulsionnelle issue de leur combinaison et exploitable pour le calcul de l'équation des systèmes bouclés multivariables.

2.2.1 Présentation des différentes approches numériques de détermination des contributions acoustiques constitutives d'une fonction de réponse en fréquence ou d'une réponse impulsionnelle

2.2.1.1 La méthode des sources-images

La méthode des sources-images (figure 2.2) consiste à déterminer l'image d'une source ponctuelle par symétrie par rapport à chaque surface de la scène. Cette procédure est répétée pour chaque source-image ainsi créée en considérant alors la scène virtuelle obtenue à partir du symétrique de la scène initiale. On obtient alors les sources-images du deuxième ordre. Cette construction de sources-images à partir des sources-images d'ordre directement inférieur est répétée jusqu'à un ordre fixé. Lorsque les positions de toutes les sources-images ont été calculées, un test de visibilité des sources-images est effectué pour déterminer si le trajet acoustique entre chacune d'elles et le récepteur existe réellement [Vorländer 2008].

À chaque trajet source-image-récepteur valide est associé une valeur en pression $p_{tr}(f)$ dans le domaine fréquentiel à partir de la formule suivante :

$$p_{tr}(f) = D_s(\vec{tr}, f) D_r(\vec{tr}, f) \sqrt{\frac{\rho c P(f)}{4\pi}} \sqrt{e^{-m(f)r_{tr}} \frac{1}{r_{tr}^2} e^{j\frac{2\pi f}{c} r_{tr}} \Pi R_p(f)} \quad (2.2)$$

où $P(f)$ est la puissance de la source, r_{tr} est la longueur du trajet, $m(f)$ est le coefficient d'absorption de l'air, et $D_s(\vec{tr})$ et $D_r(\vec{tr})$ sont respectivement le facteur de directivité de la source et du

récepteur suivant le trajet considéré. La divergence géométrique du front d'onde est donnée par le terme $1/4\pi r_{tr}^2$ de sorte à prendre en compte le caractère ponctuel de la source. Les réflexions sont ici traitées à partir du produit $\prod R_p(f)$ des coefficients de réflexion des parois associées au trajet. Ceux-ci peuvent être obtenus soit à partir de l'impédance spécifique de surface² Z en prenant en compte l'angle d'incidence sur les parois θ , mais cette impédance est en pratique souvent inconnue.

$$R_p(f) = \frac{Z(f) \cos \theta - 1}{Z(f) \cos \theta + 1} \quad (2.3)$$

soit à partir du coefficient d'absorption de champ diffus $\alpha(f)$, mais il s'agit alors d'une approximation importante leur faisant, entre autres, perdre leur caractère complexe :

$$R_p(f) = \sqrt{1 - \alpha(f)} \quad (2.4)$$

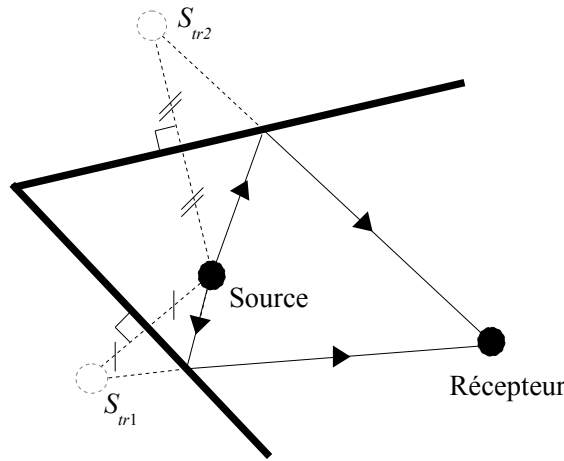


FIGURE 2.2 - Construction de deux sources-images du premier ordre S_{tr1} et S_{tr2} .

La méthode des sources-images présente l'avantage de déterminer de manière exhaustive et assez simple l'ensemble des trajets source-récepteur purement spéculaires. Cependant, elle ne peut déterminer que ce type de trajet, et le calcul de l'énergie des contributions associées est correct uniquement lorsque n'intervient ni réflexion sur une surface courbe ni diffraction. De plus, le calcul numérique des sources-images devient rapidement très coûteux en temps lorsque l'ordre de ces contributions devient important.

2.2.1.2 Le lancer de faisceaux adaptatif

Le lancer de faisceaux consiste en la propagation dans la scène (ou salle) de faisceaux en trièdre ou pyramides à partir du point source. Lorsqu'un faisceau rencontre une surface, chacun des rayons le supportant (correspondant aux arêtes initiales du trièdre) y subit une réflexion spéculaire ponctuelle. Si le front d'un faisceau ne rencontre une surface que de manière partielle, il est subdivisé

2. Dans ce chapitre, les impédances de surface Z intervenant dans les équations sont des impédances réduites soit, $Z = Z_0/\rho c$ avec Z_0 l'impédance de surface « non réduite ».

en nouveaux faisceaux. Cette subdivision s'effectue jusqu'à la cohérence³ de chaque nouveau faisceau ainsi formé ou jusqu'à une limite fixée par l'utilisateur. On parle alors de lancer de faisceaux adaptatif [Vermet 2010]. Le lancer de faisceaux tel que développé dans le logiciel Icare permet aussi de prendre en compte le phénomène de diffraction. Lorsqu'un faisceau rencontre une arête définie comme diffractante, une source linéique secondaire est disposée au niveau de l'intersection entre celle-ci et le faisceau. Cette source émet alors un nouvel ensemble de faisceaux suivant un diagramme de rayonnement dicté par la théorie géométrique de la diffraction [Noe 2010]. Les faisceaux diffractés sont aussi adaptatifs ; ils se propagent comme ceux issus de la source primaire⁴. Lorsqu'un faisceau secondaire rencontre un récepteur, le trajet associé issu de l'arête de diffraction est alors relié au trajet du faisceau incident au à l'arête de diffraction et issu de la source pour n'obtenir au final qu'un seul trajet et ainsi ne plus avoir à considérer les sources secondaires.

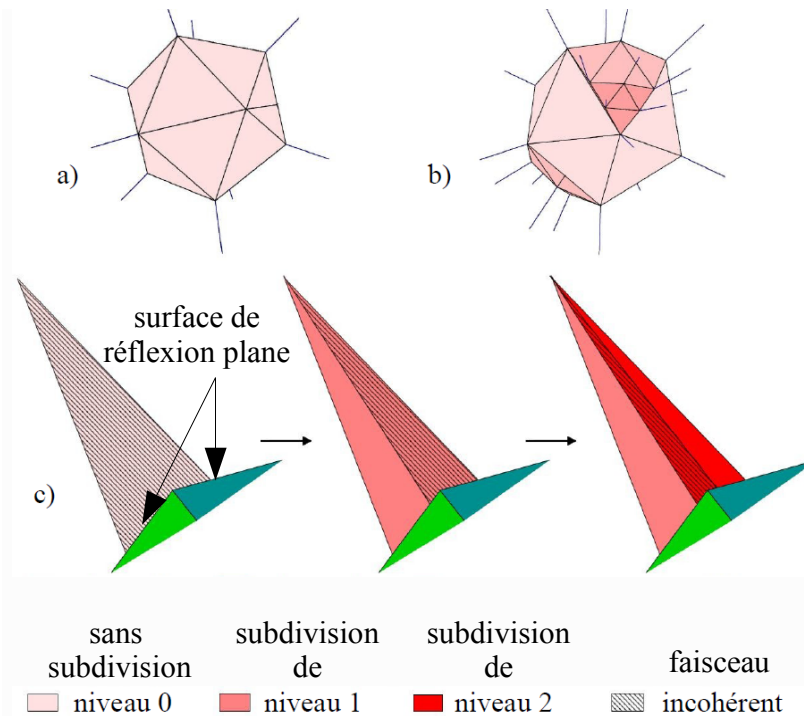


FIGURE 2.3 - Principe du lancer de faisceaux adaptatif (tiré de [Noe 2010]). a) : subdivision initiale en faisceaux depuis la source. b) : subdivision en faisceaux de niveaux différents depuis la source. c) représentation du principe de subdivision d'un faisceau pour l'obtention de faisceaux cohérents.

Comme dans le cas des sources-images, à chaque trajet est associée une valeur en pression dans l'espace fréquentiel. Celle-ci s'obtient à partir de l'expression suivante :

$$p_{tr}(f) = D_s(\vec{tr}, f) D_r(\vec{tr}, f) \sqrt{\frac{\rho c P(f)}{4\pi}} \sqrt{e^{-m(f)r_{tr}} \frac{d\omega}{dS_{tr}}} e^{j\frac{2\pi f}{c} r_{tr}} \Pi R_p(f) D_p(f) \quad (2.5)$$

Cette expression diffère de celle utilisée dans le cadre de la méthode des sources-images (équation (2.2)) par de l'incorporation des coefficients de diffraction $D_p(f)$ (calculés dans Icare à partir

3. Un faisceau est dit cohérent si pour toutes les réflexions subies son ouverture n'a interceptée qu'une seule et même surface (voir figure 2.3)

4. Contrairement aux rayons initialement issus de la source, les rayons modélisant la diffraction sont à base rectangulaire, car ils sont émis par une source linéique.

de la théorie uniforme de la diffraction [Vermet 2010]) et par la prise en compte de la divergence géométrique du front d'onde. Dans la formule (2.5), cette dernière est calculée par le rapport de l'angle d'ouverture du faisceau au niveau de la source $d\omega$ et de la surface du front d'onde au niveau du récepteur dS_{tr} . En revenant ainsi à la définition de la divergence géométrique, il est possible d'intégrer la divergence ou la convergence spatiale du front d'onde due à une réflexion sur une paroi incurvée.

La méthode par lancer de faisceaux permet de prendre en compte un nombre plus important de phénomènes que celle par sources-images ; les phénomènes de diffraction et de réflexion sur des surfaces courbes peuvent être inclus. Cependant, le principe de subdivision du faisceau en sous-faisceaux de tailles prédéterminées (figure 2.3-b) peut entraîner l'omission de quelques contributions. De plus, cette méthode étant couteuse en temps de calcul, il convient de la réserver aux contributions d'ordre de réflexion faible.

2.2.1.3 Le lancer de particules

Le lancer de particules, ou lancer de rayons stochastiques [Vorländer 2008], revient à échantillonner spatialement et de manière stochastique le front d'onde issu de la source. Chaque échantillon, appelé particule, est propagé à l'intérieur de la scène suivant les principes de l'acoustique géométrique. Lorsqu'une particule est réfléchiée, la nouvelle direction prise par celle-ci est soit régie par la loi de Snell-Descartes, s'il s'agit d'une réflexion spéculaire, soit obtenue par tirage aléatoire d'une direction selon la loi de Beer-Lambert, s'il s'agit d'une réflexion diffuse. La détermination du type de réflexion est aussi obtenue par tirage aléatoire, mais selon une loi équiprobable entre 0 et 1. Si le résultat de ce tirage est inférieur au coefficient de diffusion attribué à la surface mise en jeu, la réflexion est diffuse. S'il lui est supérieur, la réflexion est spéculaire. La collecte des particules se fait sur une sphère centrée au niveau du récepteur, car du fait de l'aspect ponctuel des particules, celui-ci ne peut lui aussi être ponctuel, comme illustré sur le schéma 2.4-a.

Contrairement aux approches précédentes, le calcul des contributions dues aux particules se fait dans le domaine temporel uniquement à partir de valeurs d'énergie. Le résultat final brut est donc un échogramme (schéma 2.4-b). Une particule est initialement affectée d'une quantité d'énergie $PD_s(\vec{r}_p, f)/N_p$, où N_p est le nombre total de particules lancées et $D_s(\vec{r}, f)$ la directivité de la source dans la direction $\vec{r}_p$ du lancer de la particule concernée. À chaque réflexion, l'énergie de la particule est multipliée par le coefficient de réflexion en énergie $(1 - \alpha(f))$. Dans cette approche, la divergence géométrique associée au caractère sphérique de l'onde est directement prise en compte par l'échantillonnage fixe du front d'onde. En effet, le nombre de particules étant constant, mais pas la surface du front d'onde qu'elles échantillonnent, leur densité surfacique diminue. La pression donnée par le lancer de particule au pas de temps centré sur l'horaire t_i s'obtient par :

$$p(\Delta t_i) = \sqrt{\rho c e^{-m(f)ct_i} \sum_{k=1}^{N_{t_i}} \frac{P(f)}{N_p} D_s(\vec{r}_{p_k}, f) D_r(\vec{r}_{p_k}^r, f) \Pi(1 - \alpha(f))} \quad (2.6)$$

où N_{t_i} est le nombre total de particules captées sur l'intervalle de temps considéré, $D_s(\vec{r}_{p_k}, f)$ la directivité de la source dans la direction initiale $\vec{r}_{p_k}$ prise par une particule k , et $D_r(\vec{r}_{p_k}^r, f)$ la directivité du récepteur dans la direction $\vec{r}_{p_k}^r$ prise par la même particule lors de sa collecte.

Le lancer de particules présente deux avantages certains par rapport au lancer de faisceaux et à la méthode des sources-images : il peut prendre en compte assez simplement les réflexions diffuses et son temps de calcul relativement court ne dépend pas de l'ordre de réflexions à considérer. Il est aussi important de noter que cette méthode, lorsqu'elle est utilisée dans le cadre de la reconstruction

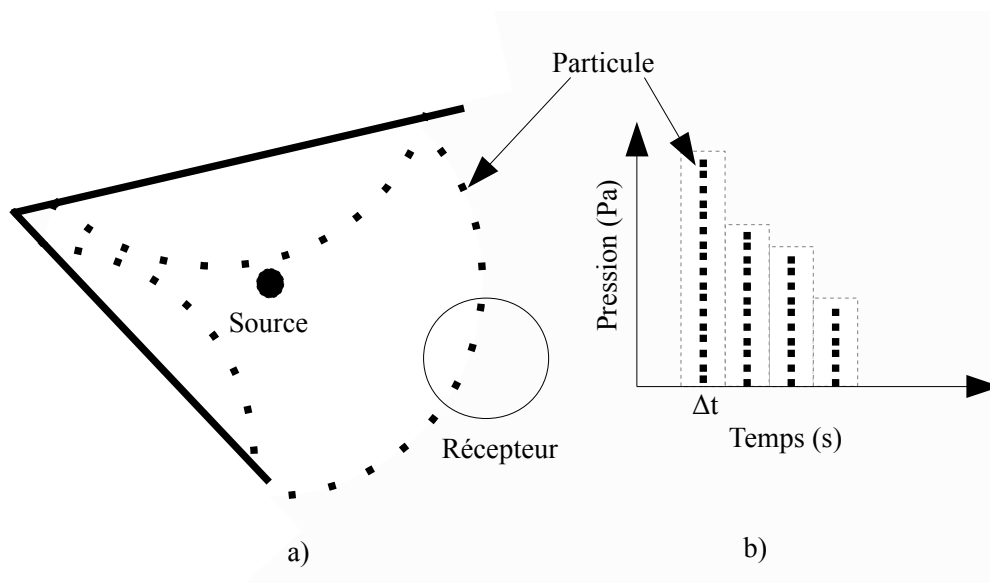


FIGURE 2.4 - Illustration d'un lancer de particules a) et du principe de collecte des particules au niveau du récepteur b).

de la partie tardive de la réponse impulsionnelle, n'est pas une approche statistique. Elle est une approche locale (au volume de la sphère réceptrice près), permettant ainsi de rendre compte de certains phénomènes acoustiques comme les échos francs, particulièrement nuisibles, ou une éventuelle disparité dans la répartition spatiale de l'énergie tardive dans la salle. Cependant, le principe de l'échantillonnage empêche d'être exhaustif au niveau des contributions acoustiques. Ce modèle n'est donc pas adapté à la simulation des réflexions précoces d'une réponse impulsionnelle de salle du fait que l'importance relative de celles-ci demande qu'elles soient prises en compte de la manière la plus exhaustive qu'il puisse être (voir partie 1.1.1).

2.2.2 Combinaison des différentes approches numériques

Comme cela a été exposé aux paragraphes précédents, la méthode par sources-images et celle par lancer de faisceaux adaptatifs sont complémentaires pour calculer les composantes spéculaires précoces d'une réponse impulsionnelle. L'approche par sources-images est plus exhaustive concernant les contributions spéculaires sur les surfaces planes et l'approche par lancer de faisceaux adaptatifs permet de prendre en compte de l'effet la courbure des surfaces et les phénomènes de diffraction. Concernant les réflexions tardives, un calcul par l'une de ces deux méthodes devient très coûteux en temps, car l'ordre des réflexions devient très élevé. Il vaut alors mieux utiliser l'algorithme de lancer de particules dont la simplicité permet un gain de temps par rapport aux deux autres méthodes. Même si le principe d'échantillonnage lié à cette approche implique l'omission de certaines contributions, les paramètres statistiques et certaines particularités spatio-temporelles de la partie tardive de la réponse impulsionnelle sont conservées, ce qui reste suffisant d'un point de vue physique et subjectif. De plus, cette approche permet de prendre en compte l'énergie issue de réflexions diffuses, aspect de plus en plus considéré en acoustique des salles [Ryu 2008]. Ainsi, afin d'optimiser le temps de calcul numérique d'un transfert acoustique sans perdre d'informations utiles, il convient de fixer un ordre limite des réflexions spéculaires en deçà duquel il est nécessaire d'utiliser la méthode

par sources-images combinée à celle du lancer de faisceaux adaptatifs, et au-delà duquel l'utilisation du lancer de particules suffit si, bien sûr, un nombre suffisant de particules sont lancées⁵.

Si nous souhaitons combiner différentes fonctions de réponse en fréquence pour calculer la réponse impulsionnelle correcte d'un système bouclé multivariable, il est nécessaire que les réponses impulsionnelles en pression correspondant à ces fonctions de réponse en fréquence comportent un signe arithmétique réaliste. En effet, l'expression de cette équation dans l'espace des temps, est une somme de produits de convolution de réponses impulsionnelles. Si les termes de cette somme sont tous de signe identique (ce qui se produit lors de la convolution de réponses impulsionnelles dont les composantes sont du même signe), leur combinaison par addition sera nécessairement constructive. Ce qui entraînera une réponse impulsionnelle $h_{ea}(t)$ contenant trop d'énergie. Nous avons cependant peu d'informations sur le signe exact des différentes contributions d'une réponse impulsionnelle de salle. Nous savons simplement que celui de la contribution du champ direct est identique à celui de l'impulsion source et qu'il ne dépend pas de la distance source-récepteur. Concernant le champ réverbéré, les phénomènes de déphasage à l'origine du signe des contributions sont les conséquences de réflexions avec des parois réelles. L'impédance de surface de ces parois étant complexe, l'onde réfléchie subit un déphasage. Selon ce déphasage et la phase de l'onde incidente, l'onde de pression réfléchie peut être de signe arithmétique différent de celle du champ direct.

Le calcul des contributions d'une réponse impulsionnelle obtenue à partir du lancer de particules ne peut pas faire intervenir une impédance, mais simplement un coefficient énergétique d'absorption. Il n'est donc pas possible d'obtenir d'information sur le signe de ces contributions. Cependant, si le lancer de particules est réservé au calcul d'un champ diffus⁶, la phase des ondes de pression peut être traitée de manière statistique en la considérant simplement aléatoire et équiprobable [Schroeder 1987]. Il a donc été choisi d'affecter un signe aléatoire à chaque valeur de pression obtenue par le lancer de particule.

Pour obtenir un signe réaliste des contributions temporelles issues de la transformée de Fourier des résultats fournis par le lancer de faisceaux et la méthode des sources-images (ces deux méthodes étant fusionnées dans le logiciel Icare), nous avons utilisé la capacité de ces méthodes à travailler en réflexion à partir d'impédances complexes de surface. Le coefficient de réflexion utilisé dans les expressions (2.2) et (2.6) est alors celui donné par la formule (2.3). En procédant ainsi, la contribution directe est assurée d'être de signe identique à celui de l'impulsion source sans avoir à effectuer de post-traitement. Malheureusement, contrairement aux coefficients d'absorption en champ diffus, les impédances de surface des matériaux utilisés dans une salle de concert sont rarement connues. Cependant, en faisant l'hypothèse de matériaux à réaction localisée (hypothèse aussi faite par les approches asymptotiques), il est possible d'établir une relation entre les parties réelle $\Re_Z$ et imaginaire $\Im_Z$ d'une impédance de surface d'un matériau d'une part, et son coefficient d'absorption en champ diffus d'autre part. Cette relation s'obtient par l'intégration du coefficient d'absorption défini à partir du coefficient de réflexion (formules (2.4) et (2.3)), sur l'ensemble des directions d'incidence des ondes sonores sur une paroi [Morse 1940].

$$\alpha = \frac{8 \Re_Z}{\Re_Z^2 + \Im_Z^2} \left[1 + \frac{\Re_Z^2 - \Im_Z^2}{\Im_Z(\Re_Z^2 + \Im_Z^2)} \arctan\left(\frac{\Im_Z}{\Re_Z + 1}\right) - \frac{\Re_Z}{\Re_Z^2 + \Im_Z^2} \ln\left((\Re_Z + 1)^2 + \Im_Z^2\right) \right] \quad (2.7)$$

5. À partir d'un test réaliser sur une salle d'environ 10000 m^2 avec une durée de réverbération moyenne de 1 s (qui correspond à une salle susceptible d'accueillir un système régénératif), une limite lancer de faisceau/lancer de particules fixé à l'ordre 12 de réflexion des contributions spéculaires semble suffire. Pour le même test, un lancer de 2.10^6 particules permet de rendre compte de l'énergie diffuse et tardive de manière satisfaisante [Drouet 2011].

6. Lorsque le lancer de particules n'a été utilisé que pour le calcul des contributions spéculaires de la réponse impulsionnelle d'un ordre élevé ou pour les contributions diffuses.

Afin d'avoir une seconde relation liant les parties réelle et imaginaire de l'impédance de surface, nous partons du fait que le phénomène de réflexion peut être assimilé à un filtrage par un système à réponse impulsionnelle réelle, causale et stable [Huopaniemi 1997, Martin 1993]. Ces propriétés sont aussi celles des filtres à minimum de phase ; filtres dont les parties réelle et imaginaire sont les transformées de Hilbert l'une de l'autre [Bellanger 1987] :

$$\Re_Z = \mathcal{H}(\Im_Z) \quad (2.8)$$

et

$$\Im_Z = \mathcal{H}(\Re_Z) \quad (2.9)$$

où $\mathcal{H}$ est la transformée de Hilbert.

Ainsi, comme illustrée par la figure 2.5, une correspondance directe entre un coefficient d'absorption en champ diffus et les parties réelle et imaginaire d'une impédance de surface peut être obtenue⁷. Il faut néanmoins bien noter que tous les filtres à réponse impulsionnelle réelle, causale et stable ne sont pas nécessairement à minimum de phase. Ainsi l'utilisation de tels filtres permet d'obtenir au final une réponse impulsionnelle réaliste (figure 2.6), mais en aucun cas une réponse impulsionnelle réelle ; en particulier pour les contributions faisant intervenir une réflexion sur une paroi de forte impédance [Emerit 1995].

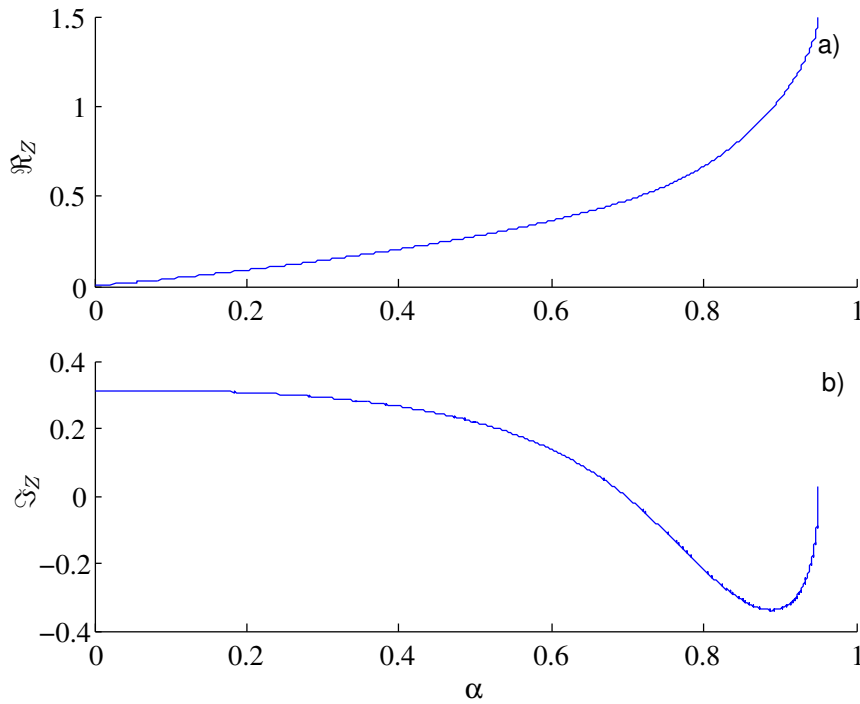


FIGURE 2.5 - Correspondance entre le coefficient d'absorption en champ diffus et la partie réelle a) ou la partie imaginaire b) d'un filtre à minimum de phase.

7. Les fonctions (2.8) ou (2.9) ne sont pas bijectives. Leur domaine de définition doit donc être réduit pour faire correspondre à chaque valeur d'absorption en champ diffus une valeur unique d'impédance du filtre à minimum de phase correspondant.

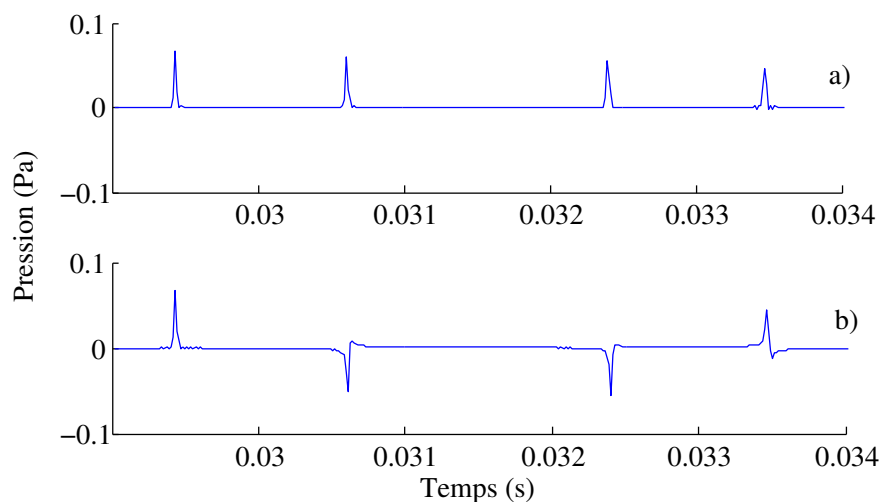


FIGURE 2.6 - Les quatre premières contributions spéculaires de la réponse impulsionnelle d'une salle obtenues à partir des algorithmes de lancer de faisceau et de construction de sources-images implémentés au sein du logiciel Icare. Le calcul de la pression au niveau du récepteur ayant été effectué à partir de coefficients d'absorption en champ diffus a) ou d'impédances de surface b).

Un exemple de reconstruction de réponse impulsionnelle de salle à partir des contributions calculées par le logiciel Icare est présenté sur la figure 2.7. La réponse impulsionnelle finale (c) est simplement la somme des contributions précoces obtenues par la méthode des sources-images et un lancer de faisceaux adaptatifs, dont le signe arithmétique est déterminé par les impédances complexes attribuées aux matériaux (a)⁸, et des contributions tardives et/ou diffuses obtenues par un lancer de particules et dont le signe arithmétique est aléatoire (b)⁹ (à chaque pas de temps un signe aléatoire est tiré et appliqué à la composante correspondante obtenue par le lancer de particule).

8. Pour les contributions spéculaires précoces, le calcul originel se faisant dans l'espace fréquentiel, il suffit d'effectuer une transformation de Fourier inverse pour se retrouver dans l'espace des temps.

9. Nous avons ici traité un transfert acoustique entre une source et un récepteur à partir de la réponse impulsionnelle, car elle permet une représentation graphique plus parlante. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que d'après la discussion menée dans la partie 2.1 il est préférable de travailler dans l'espace fréquentiel pour calculer le transfert entre une source et un récepteur dans une salle équipée d'un SAR.

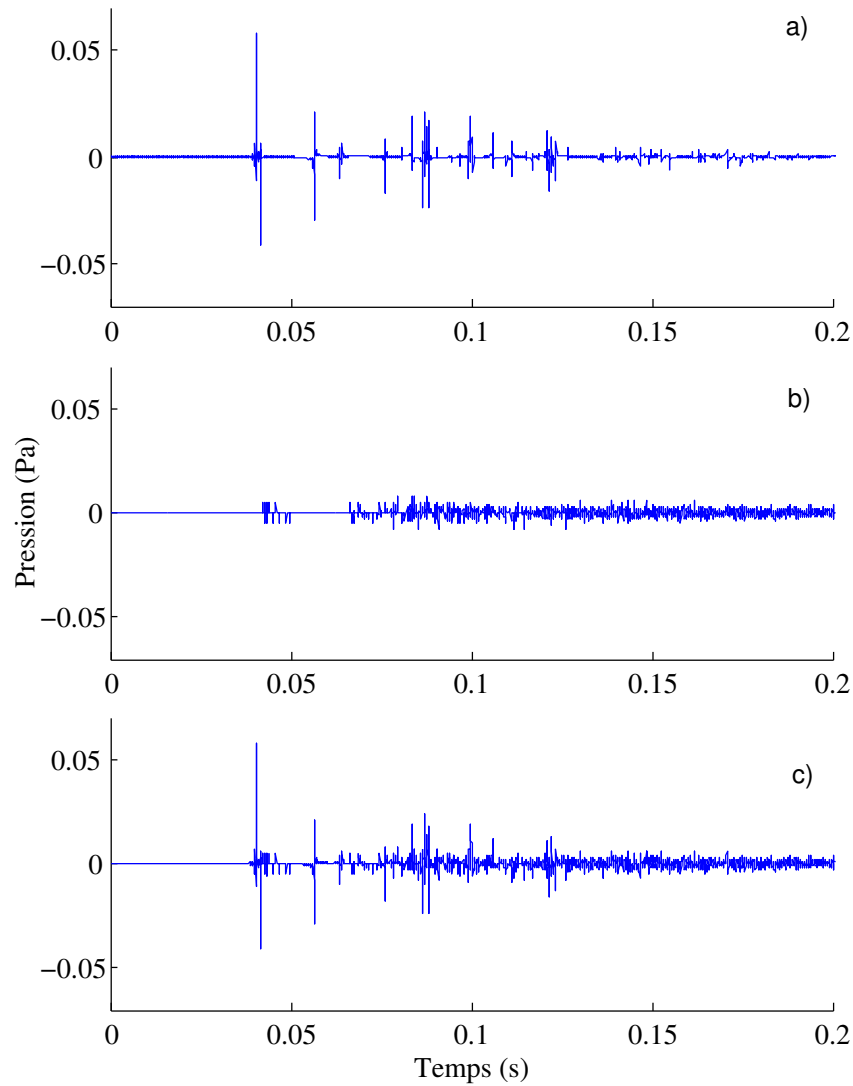


FIGURE 2.7 - Construction d'une réponse impulsionnelle à partir du logiciel Icare : sommation des contributions obtenues par la méthode des sources-images et par un lancer de faisceaux adaptatif d'une part a), et par un lancer de particules d'autre part b). La réponse impulsionnelle finale est représentée en c).

2.3 Détermination des fonctions de réponse en fréquence électroniques du SAR

L'unité électronique de traitement du signal de chaque canal d'un SAR régénératif diagonal constitue, d'un point de vue systémique, la boucle directe du dit canal. Nous avons vu au chapitre 1 que celle-ci ne contenait théoriquement qu'un gain pur mis en série avec un module de retard. Le retard et le gain pur sont réglés selon l'effet acoustique recherché, dans la limite où chacun d'eux ne dépasse pas une certaine valeur. Le retard électronique est limité à 40 ms pour des raisons psychoacoustiques. Le gain électronique est quant à lui limité par les phénomènes d'instabilité et de coloration. Cependant, lorsque l'on souhaite éviter une installation trop onéreuse, parce que composée d'un grand nombre de canaux, tout en assurant un effet suffisant du système, il est possible de pousser le gain d'un canal au-delà des limites théoriques présentées à la partie 1.2.2. Il suffit alors de filtrer l'amplitude des composantes fréquentielles du gain en boucle ouverte responsables de l'effet Larsen ou des phénomènes de coloration. Au-delà de ces raisons liées à la stabilité, l'insertion d'un dispositif de filtrage dans l'unité de traitement du signal d'un canal permet aussi de jouer sur l'équilibre spectral de l'effet de salle supplémentaire induit par le système. Au final, la boucle directe d'un canal est donc constituée d'un gain pur, d'un retard éventuel et d'un ensemble de filtres disposés en cascade. La fonction de réponse en fréquence correspondante, qui est simplement le produit des fonctions de réponse en fréquence de chacun de ces éléments, est ainsi en partie déterminée par l'égalisation de la boucle de rétroaction du dit canal (fonction de réponse en fréquence du haut-parleur vers le microphone) ; égalisation réalisée afin d'obtenir une fonction de réponse en fréquence en boucle ouverte répondant aux objectifs de stabilité et d'effet du système. Pour un système multicanal, la boucle de rétroaction d'un canal n'est pas indépendante de l'effet des autres canaux si bien que l'égalisation d'un seul canal modifie la boucle de rétroaction de tous les autres canaux. Cette particularité d'un système multicanal demande ainsi la mise en place d'une stratégie d'égalisation récursive sur l'ensemble des canaux du système.

Dans ce cadre d'une simulation d'un SAR utilisant une approche systémique basée sur des fonctions de réponse en fréquence acoustiques simulées numériquement, nous avons choisi de déterminer les fonctions de réponse en fréquence électroniques du système en reproduisant les processus d'égalisation d'un canal et de l'ensemble du système tels que réalisés lors de l'installation d'un système réel. Concernant l'égalisation individuelle de chaque canal, nous avons utilisé une méthode automatique préalablement développée et utilisée pour l'installation du système Carmen. Quant à la procédure d'égalisation récursive du système, elle a été, ici, automatisée. La détermination de la fonction de réponse en fréquence de la boucle directe de chaque canal permettant d'atteindre l'objectif fixé et assurant la stabilité du système est ainsi copiée sur la pratique tout en ne nécessitant pas d'intervention humaine.

2.3.1 Égalisation automatique d'un canal

La méthode d'égalisation automatique d'un canal utilisée ici dans le cadre de la simulation d'un SAR fut à l'origine développée par *Devallez* pour l'aide à l'égalisation du système Carmen [Devallez 2010]^{10 11}. Elle est destinée à fournir les paramètres physiques (gain, bande passante et éventuellement gain différentiel) d'un ensemble de filtres nécessaires à l'égalisation de la fonction de

10. Cette méthode est cependant assez générale et peut s'appliquer à n'importe quel SAR, voir à n'importe quel transfert acoustique dans une salle.

11. Cette méthode a fait l'objet d'un dépôt de brevet sous le numéro WO/2012/066265[Schmich 2012]

réponse en fréquence de la boucle de rétroaction d'un canal (un exemple de la fonction de réponse en fréquence de la boucle de rétroaction d'un canal est donné en figure 2.8). Connaissant la nature des filtres utilisés par le système Carmen, il est alors possible d'obtenir facilement leurs fonctions de réponse en fréquence.

Cette égalisation est guidée par trois objectifs principaux : se rapprocher le plus possible d'un gain moyen donné, obtenir un gain en boucle ouverte relativement plat en fréquence au sens psychoacoustique sur une échelle fréquentielle large, et éviter l'apparition de fréquences trop émergentes sur une échelle fréquentielle fine. Elle est aussi soumise à deux contraintes liées à la technologie du système : chaque filtre ne peut être que d'ordre 2 et leur nombre doit être minimum, typiquement inférieur à une quinzaine.

Nous allons ici détailler les trois principales tâches effectuées par l'algorithme d'égalisation automatique : le prétraitement du GMBO destiné à filtrer les hautes et les basses fréquences du gain en boucle ouverte et à ajuster sa valeur moyenne, l'aplanissement de son spectre évitant un déséquilibre fréquentiel audible, et la suppression des composantes fréquentielles émergentes.

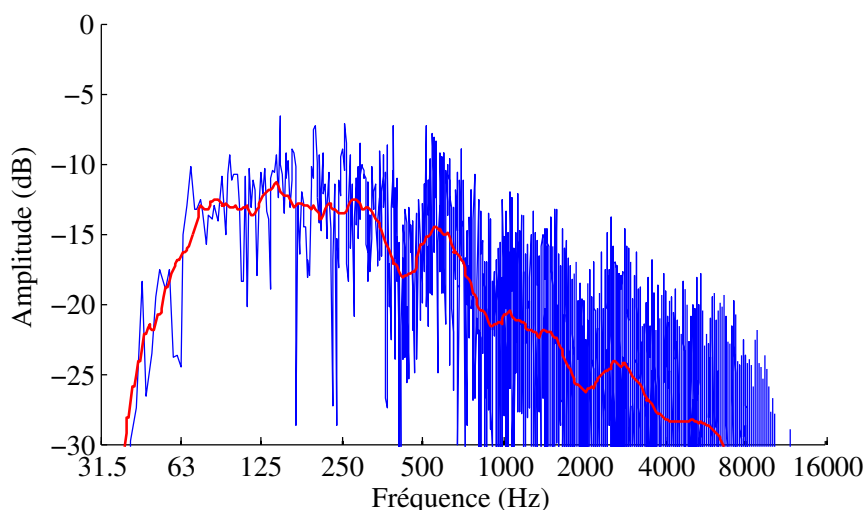


FIGURE 2.8 - Amplitude de la fonction de réponse en fréquence, en bande fine — et en 48^{ème} d'octave —, de la boucle de rétroaction d'un canal.

2.3.1.1 Prétraitement du gain en boucle ouverte

Le prétraitement de la boucle ouverte consiste, en premier lieu, à appliquer un filtre passe-bande à la boucle de rétroaction. Avec comme fréquence de coupure 50 Hz et 8000 Hz, ce filtrage passe-bande permet d'éliminer un nombre important de composantes fréquentielles pouvant entraîner l'instabilité du canal et ne présentant qu'un intérêt limité vis-à-vis du spectre utile d'un orchestre. Un gain pur est ensuite appliqué au gain en boucle ouverte pour faire correspondre sa valeur moyenne à la valeur souhaitée. Une fonction de réponse en fréquence idéale du gain en boucle ouverte est ensuite calculée afin de pouvoir quantifier l'erreur entre une égalisation effective et une égalisation idéale. Cette fonction de réponse en fréquence est appelée ici « fonction cible ». Concrètement, il s'agit de la fonction de réponse en fréquence d'un filtre passe-bande dont le gain en bande passante est égal au GMBO désiré et dont les fréquences de coupure sont les mêmes que celles du filtrage préliminaire (voir figures 2.9 et 2.12).

Étant donné que l'un des buts de l'égalisation automatique est d'utiliser un nombre de filtres qui soit le plus faible possible, il peut s'avérer avantageux de modifier le gain et la bande passante de la fonction cible quitte à ce que le GMBO visé s'éloigne légèrement de l'objectif initial. Cette optimisation est réalisée par l'algorithme DIRECT développé par *Finkel* [Finkel 2003] et codant une méthode d'optimisation lipschitzienne. Cette méthode est basée sur la recherche du minimum global d'une fonction supposée lipschitzienne¹² par subdivisions successives et sélectives de l'espace des solutions. Il s'agit d'une méthode déterministe ne demandant que peu d'informations sur le problème si ce n'est les limites de chacune de ses dimensions et la fonction coût que l'on cherche à minimiser [Jones 1993] qui, dans la situation qui nous intéresse ici, sont respectivement les limites hautes et basses acceptables de chaque fréquence de coupure et du gain de la fonction cible, et l'erreur absolue moyenne $\bar{\varepsilon}$ entre la fonction cible $|GH_c|^2$ et la fonction de réponse en fréquence du gain en boucle ouverte $|GH_{hm}|^2$. Cette erreur s'écrit :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n_f - n_i + 1} \sum_{k=n_i}^{n_f} ||GH_{hm}(k)|^2 - |GH_c(k)|^2| \quad (2.10)$$

où n_i et n_f sont les indices des fréquences inférieures et supérieures de la bande de fréquence considérée, soit ici 50 Hz et 8000 Hz¹³.

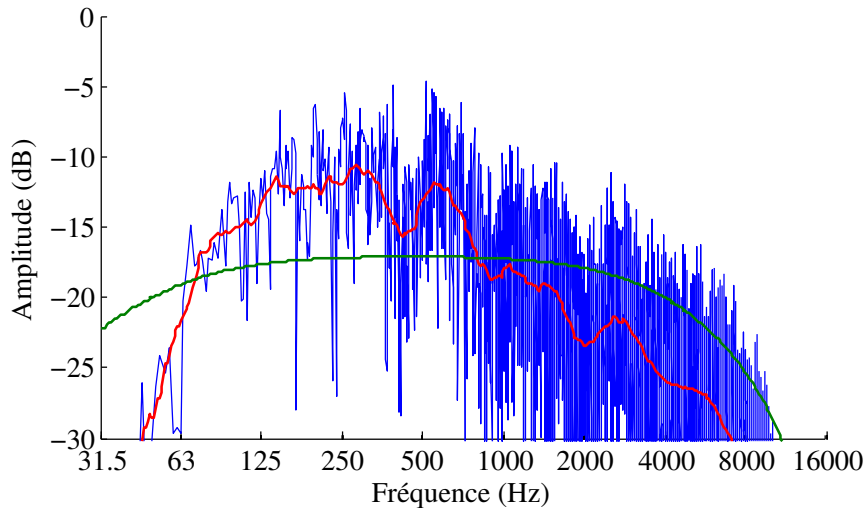


FIGURE 2.9 - Amplitude de la fonction de réponse en fréquence, en bande fine — et en 48^{ème} d'octave —, de la boucle ouverte d'un canal après la phase de l'égalisation automatique réalisant le prétraitement à partir de la fonction de réponse en fréquence de la boucle de rétroaction. Représentation de la fonction cible déterminée par la méthode d'optimisation DIRECT —.

2.3.1.2 Aplanissement du gain en boucle ouverte

Une fois le filtrage préliminaire réalisé et la fonction cible déterminée, l'algorithme d'égalisation automatique cherche à déterminer un petit nombre de filtres permettant d'aplanir suffisamment

12. Une fonction f est dite lipschitzienne si elle est à taux d'accroissement bornée, ou de manière plus formelle si elle vérifie :

$$\forall f(x, y) \in \mathbb{E}^2 \quad |f(x) - f(y)| \leq k|x - y|$$

où k est une constante réelle positive.

13. Nous utilisons des indices, car les spectres sont discrets ; l'égalisation automatique étant un processus numérique.

le gain en boucle ouverte afin d'éviter que l'action du canal concerné soit plus importante sur une certaine plage fréquentielle plutôt que sur une autre. Les filtres dont nous cherchons ici les paramètres optimaux sont des filtres réjecteurs et éventuellement en plateau. La fréquence centrale du premier filtre est déterminée par le maximum de la fonction d'écart $\Delta|GH|^2$ entre la fonction cible et le gain en boucle ouverte. Cette fonction d'écart est calculée en 48^{ème} d'octave afin qu'elle ait une progression fréquentielle cohérente avec celle du système auditif humain (progression logarithmique).

$$\Delta|GH(k)|^2 = |GH_{hm}(k)|^2 - |GH_c(k)|^2 \quad (2.11)$$

La largeur de bande, le gain et le gain différentiel (s'il s'agit de filtres en plateau) optimaux du filtre sont ensuite déterminés à partir de la méthode numérique DIRECT par minimisation de la fonction d'erreur absolue moyenne $\bar{\epsilon}$ donnée par la relation (2.10) calculée alors en 48^{ème} d'octave. La fonction de réponse en fréquence en boucle ouverte modifiée par ce premier filtre est alors injectée dans l'équation (2.11) puis, si la nouvelle fonction d'écart $\Delta|GH|^2$ contient un maximum positif, un second filtre est placé en ce maximum puis optimisé par la méthode DIRECT. Ainsi de suite jusqu'à ne plus détecter de maximum positif dans la fonction d'écart. À l'issue de cette étape, il se peut que le GMBO du canal soit légèrement modifié et s'écarte de l'objectif fixé par la fonction cible. Le gain du filtrage initial est alors revu en conséquence. Un exemple du gain de la fonction de réponse en fréquence de la boucle ouverte d'un canal à l'issue de cette phase d'aplanissement est donné par la figure 2.10. Les fonctions du gain de réponse en fréquence des filtres électroniques correspondants sont données à la figure 2.12.

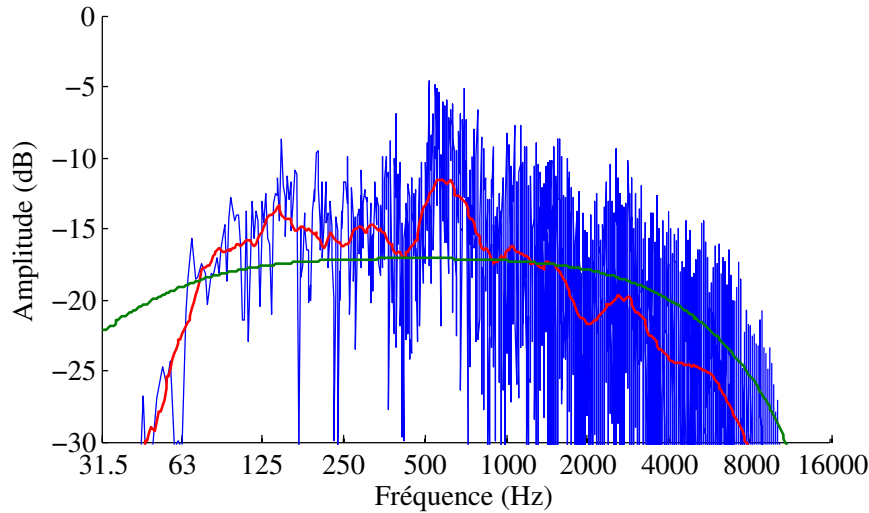


FIGURE 2.10 - Amplitude de la fonction de réponse en fréquence, en bande fine — et en 48^{ème} d'octave —, de la boucle ouverte d'un canal après la phase de l'égalisation automatique réalisant son aplanissement sur une échelle fréquentielle large. Représentation de la fonction cible utilisée par la méthode d'optimisation DIRECT pour réaliser cet aplanissement —.

2.3.1.3 Élimination des fréquences émergentes du gain en boucle ouverte

Du fait de l'importante variabilité en amplitude de la fonction de réponse en fréquence du gain en boucle ouverte d'un canal à une échelle fréquentielle fine (qui correspond idéalement à un transfert en champ diffus : voir chapitre 1.2.2.1), l'utilisation d'un nombre réduit de filtres d'ordre

limité implique l'impossibilité d'obtenir un gain en boucle ouverte totalement plat en fréquence. Par conséquent, la méthode destinée à supprimer les émergences ne cherche pas à supprimer toutes les composantes dont l'amplitude dépasserait la valeur moyenne du spectre. Par fréquence émergente, il faut ici comprendre toute composante du spectre dont l'amplitude dépasse une certaine valeur $|GH_{max}|^2$. Cette dernière doit être fixée à 0 dB pour garantir uniquement la stabilité, ou à une valeur moindre, typiquement entre -5 dB et -10 dB, pour limiter le phénomène coloration [Vuichard 2000].

La méthode de suppression automatique des émergences repose sur une démarche similaire à la méthode de lissage du gain en boucle ouverte, soit la répétition d'une détection du maximum d'une fonction d'écart et d'une optimisation du filtrage nécessaire à l'élimination des composantes fréquentielles correspondantes. La fonction d'écart $\Delta|GH'(k)|^2$ est ici la différence en bandes fines entre l'amplitude de la fonction de réponse en fréquence du gain en boucle ouverte et $|GH_{max}|^2$. Soit :

$$\Delta|GH'(k)|^2 = |GH_{hm}(k)|^2 - |GH_{max}|^2 \quad (2.12)$$

Lors de cette recherche de composantes spectrales émergentes, lorsque deux maximums de la fonction d'écart sont proches (séparés de moins d'un huitième d'octave), seul le plus important est considéré, car dans cette situation, la bande passante et le gain du filtre correspondant seront optimisés pour aussi supprimer l'émergence initialement négligée (voir figures 2.11 et 2.12). Lors de cette phase d'optimisation il convient aussi d'éviter au GMBO de s'éloigner de la valeur désirée. L'algorithme DIRECT détermine donc ici un jeu de filtres supprimant toutes composantes émergentes (supérieures à $|GH_{max}|^2$) tout en s'efforçant de minimiser l'erreur moyenne absolue entre le gain de la fonction de réponse en fréquence en boucle ouverte et le GMBO désiré $|GH_d|^2$. L'erreur moyenne absolue dont il est question ici s'exprime ainsi :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n_f - n_i + 1} \sum_{k=n_i}^{n_f} ||GH_{hm}(k)|^2 - |GH_d|^2| \quad (2.13)$$

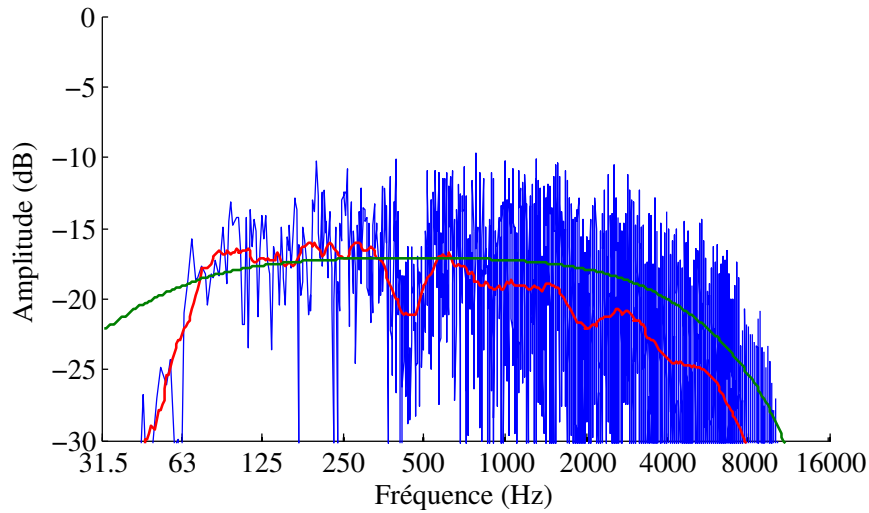


FIGURE 2.11 - Amplitude de la fonction de réponse en fréquence, en bande fine — et en 48^{ème} d'octave —, de la boucle ouverte d'un canal après l'égalisation automatique complète du canal (à la fin de la phase de suppression des composantes fréquentielles émergentes). Représentation de la fonction cible utilisée par la méthode d'optimisation DIRECT pour optimiser la suppression des composantes fréquentielles émergentes —. La valeur fixée ici de gain à ne pas dépasser $|GH_{max}|^2$ est de -10 dB.

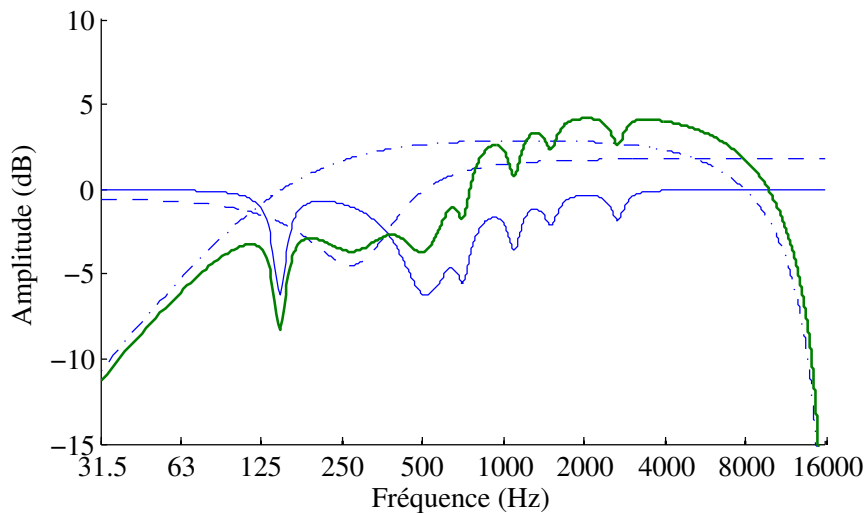


FIGURE 2.12 - Amplitude de la fonction de réponse en fréquence de la boucle directe d'un canal après avoir réalisé une égalisation automatique de ce canal —. Cette fonction de réponse en fréquence correspond à la mise en série de filtres déterminés par l'algorithme d'égalisation automatique au cours de l'étape de prétraitement de la boucle de rétroaction —, de son aplatissement — et de la suppression des composantes émergentes —.

2.3.2 Égalisation automatique du système dans son ensemble

Dans le cas d'un SAR régénératif multicanal, on ne peut négliger l'action croisée des différents canaux. Ainsi, modifier le traitement du signal d'un canal engendre aussi une modification de la fonction de réponse en fréquence de la boucle de rétroaction des autres canaux. Autrement dit, égaliser un canal a pour conséquence de remettre en cause l'égalisation des autres canaux. Dans la pratique cependant, si l'on procède à une égalisation récursive de chacun des canaux du système, il s'avère qu'après un nombre limité d'égalisations de l'ensemble du système les objectifs en terme de GMBO de chaque canal et de limitation de coloration provoquée par le système au niveau de l'auditoire sont atteints. Dans le cadre d'une automatisation du processus d'égalisation de l'ensemble du système se posent alors deux questions : comment calculer la boucle de rétroaction d'un canal en prenant en compte l'effet des autres canaux de façon à effectuer l'égalisation du canal à partir d'une fonction de réponse en fréquence correcte ? Quand stopper le processus d'égalisation récursif ?

2.3.2.1 Calcul de la boucle de rétroaction de chaque canal en prenant en compte l'influence du reste du système

La procédure de réglage de l'ensemble des canaux d'un système consiste à égaliser successivement chaque canal. Dans le cas où aucune fonction de réponse en fréquence électronique n'a encore été déterminée, la boucle de rétroaction du premier canal à considérer est uniquement acoustique. Il s'agit, dans le cadre d'une simulation numérique, de la fonction de réponse en fréquence acoustique entre le haut-parleur et le microphone du canal donnée directement par le logiciel de simulation numérique d'acoustique des salles¹⁴. Dans le cas où l'une au moins des fonctions de réponse en fréquence électroniques a déjà été déterminée, la boucle de rétroaction à considérer est influencée par le ou les canaux déjà égalisés. Dans ce cas, la fonction de réponse en fréquence de la boucle de rétroaction n'est plus purement acoustique, mais devient une fonction de réponse en fréquence d'une salle équipée d'un SAR dont les canaux sont ceux déjà égalisés. En d'autres termes, la boucle de rétroaction de n'importe quel canal d'un SAR n'est ni plus ni moins qu'un transfert entre deux points dans une salle active, au même titre qu'un transfert entre une source sur scène et un récepteur au niveau de l'auditoire. Pour l'obtenir, il suffit alors d'utiliser l'expression (2.1) en considérant le haut-parleur et le microphone du canal à égaliser comme l'entrée (source) et la sortie (récepteur) du système multivariable. Les valeurs des fonctions de réponse en fréquence électroniques G_{mh} à injecter dans cette expression sont simplement celles des canaux déjà égalisés, celles correspondant à des canaux encore non égalisés étant mises à zéro.

2.3.2.2 Arrêt de la procédure d'égalisation récursive

Étant donné qu'une seule égalisation de l'ensemble des canaux d'un système (appelée aussi « passe » dans la suite de ce manuscrit) nécessite une quantité importante de calculs, il convient d'en effectuer le minimum possible tout en réduisant au maximum la coloration au niveau de l'auditoire et en convergeant vers l'objectif initial au niveau du GMBO des canaux. Dans la pratique, lors de l'installation du système Carmen, on considère d'après l'expérience que trois passes sont suffisantes. Cependant, dans la pratique, l'égalisation n'est pas uniquement automatique ; certains filtres d'égalisations sont paramétrés manuellement. Dans le cadre de l'approche systémique d'un SAR présentée dans ce chapitre, nous proposons d'effectuer une passe supplémentaire soit quatre

14. Les haut-parleurs comme les microphones sont supposés idéaux, leurs réponses fréquentielles sont supposées lisses.

en tout. Il ne s'agit ici que d'une proposition, mais nous vérifierons empiriquement au sous-chapitre suivant qu'un nombre de passes supérieures n'améliore ni la convergence du GMBO de chaque canal vers la valeur désirée, ni la coloration au niveau de l'auditoire.

2.4 Exemple de l'approche systémique d'un SAR basée sur des simulations numériques

2.4.1 Présentation de la salle active et simulations numériques des transferts acoustiques

L'approche systémique d'un SAR basée sur des simulations numériques demande dans un premier temps d'effectuer les simulations numériques des transferts acoustiques entre les sources sur scène, les récepteurs au niveau de l'auditoire et les transducteurs du système. Pour cela il nous faut modéliser la salle en trois dimensions en attribuant aux parois des propriétés acoustiques, définir l'emplacement des transducteurs du système ainsi que leur directivité en fonction du type de système que l'on souhaite simuler, définir l'emplacement et la directivité de la source et des récepteurs, puis définir les paramètres de la simulation numérique.

La salle simulée est fortement inspirée d'une salle existante ayant fait l'objet d'une installation du SAR Carmen, à savoir la salle de « La Rampe » à Échirolles en France. Avec un volume de 9542 m^3 (soit proche de 10000 m^3) pour une durée de réverbération de $0,94 \text{ s}$ (soit presque 1 s), elle est typique des salles dans lesquels ce système a été installé. D'un point de vue architectural, il s'agit d'une salle en shoe-box de 700 places sans balcon ni cage de scène. L'emplacement et les propriétés de la source et des récepteurs suivent la norme ISO : 3382-1 [ISO :3382-1 2009]. Ainsi, la source sur scène est placée à $1,5 \text{ m}$ du sol et elle est omnidirectionnelle. Les récepteurs sont à $0,5 \text{ m}$ au-dessus du volume modélisant les sièges (soit à $1,5 \text{ m}$ du sol) et sont aussi omnidirectionnels. Les points de réception sont au nombre de trente et sont placés aléatoirement sur une moitié de l'auditoire, car la salle est à peu près symétrique. Le SAR régénératif simulé ici étant le système Carmen, le microphone et le haut-parleur de chaque canal sont positionnés à proximité l'un de l'autre ; typiquement à une distance de $1,1 \text{ m}$ [Vuichard 2000]. Les canaux du système sont placés proches des murs latéraux ou du plafond. Les microphones sont bidirectionnels et orientés de telle sorte que leurs minimums de directivité soient dirigés vers le haut-parleur du canal correspondant et la paroi la plus proche (voir figure 2.14 a)). Les haut-parleurs du système sont hémidirectionnels et leur maximum de directivité est orienté vers le centre de la salle. Dans cette simulation, le système est constitué de 24 canaux, dont 6 à proximité de chaque mur latéral et 12 au niveau du plafond. Le GMBO ciblé est de -18 dB et le retard électronique de chaque canal est fixé à 20 ms , ce qui correspond aux paramètres d'une installation réaliste.

Concernant la simulation numérique des trajets entre la source, les récepteurs et les transducteurs du système, nous avons utilisé le logiciel Icare. Pour obtenir les contributions spéculaires des transferts acoustiques jusqu'à l'ordre 12 nous avons combiné le lancer de faisceaux et la méthode des sources-images. Pour les contributions spéculaires d'ordre supérieur et les contributions diffuses, nous avons utilisé un lancer de 2.10^6 particules. Les propriétés acoustiques des matériaux, utilisées comme paramètres d'entrée de la simulation numérique, ont été déduites des matériaux installés dans la salle de « La Rampe » par l'intermédiaire du travail de compilation réalisé par Vorländer [Vorländer 2008] concernant les propriétés en diffusion et absorption des matériaux de construction classiques.

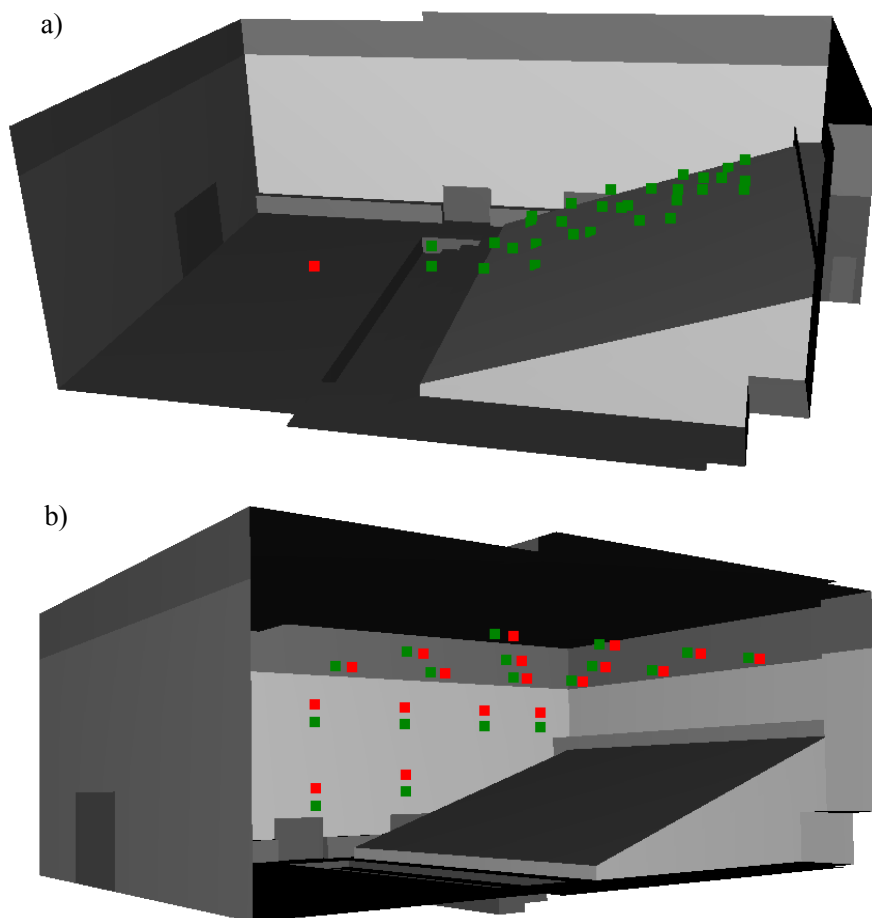


FIGURE 2.13 - Salle active simulée. a) : positions de la source ■ et des points de réception au niveau de l'auditoire ■. b) : positions des haut-parleurs ■ et des microphones ■ du SAR sur le plafond et sur le mur latéral côté cour (celles positionnées sur le mur latéral côté jardin sont placées à l'identique).

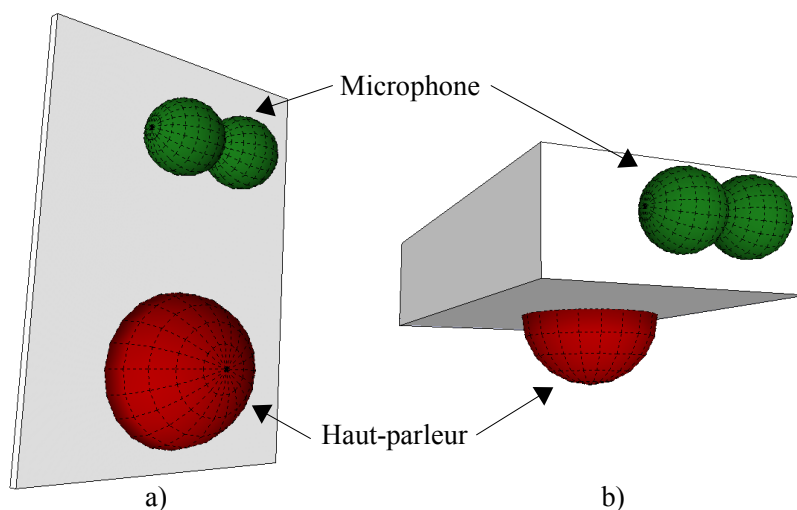


FIGURE 2.14 - Positionnement relatif du microphone (bidirectionnel) et du haut-parleur (hémidirectionnel) d'un même canal du système Carmen en fonction de leurs directivités, et suivant le placement de l'ensemble sur une paroi lisse (mur ou plafond) a) ou au niveau d'un nez de balcon b).

2.4.2 Procédure d'égalisation automatique

Après avoir obtenu par simulation numérique l'ensemble des trajets acoustiques nécessaires à une approche systémique du SAR, il nous faut déterminer des fonctions de réponse en fréquence du gain électronique (gain de boucle directe) de chaque canal. Autrement dit, il nous faut réaliser la procédure d'égalisation automatique. Nous allons, dans cette partie, observer le résultat de cette procédure sur le GMBO de chaque canal et sur le niveau de coloration dans l'auditoire en fonction du nombre de passes successives. L'objectif étant d'affirmer ou d'infirmer la proposition qu'un nombre de quatre passes d'égalisation suffit pour obtenir des résultats stables sur ces deux paramètres.

Le premier résultat présenté est le GMBO sur la bande de fréquence de 1000 Hz de chaque canal calculé à l'issue d'un nombre de passes d'égalisation successives entre 1 et 10. Nous pouvons observer sur la figure 2.15 que le GMBO de chaque canal converge dès la seconde passe. À l'issue de la première passe, il est supérieur d'environ 2 dB sur chaque canal par rapport à sa valeur à l'issue d'un nombre de passes supplémentaires. Cette différence s'explique principalement par le fait que lors de la première passe la boucle de rétroaction des canaux sur laquelle se base le processus d'égalisation automatique ne prend pas compte l'effet de l'ensemble des canaux du système ; ceux encore non égalisés sont supposés inactifs. Un autre résultat important tiré de la figure 2.15 est que le processus d'égalisation automatique ne permet pas d'atteindre, même à l'issue d'un nombre de passes important, un GMBO sur chaque canal qui soit exactement celui désiré, soit ici -18 dB. Cependant, à l'issue d'un nombre de passes supérieur à deux, si nous considérons la moyenne du GMBO sur l'ensemble des canaux du système, celle-ci oscille entre -18,4 dB et -18,8 dB. Il est donc possible d'atteindre un GMBO qui soit en moyenne proche de l'objectif à 1 dB près à partir d'un nombre de passes successives supérieur à deux.

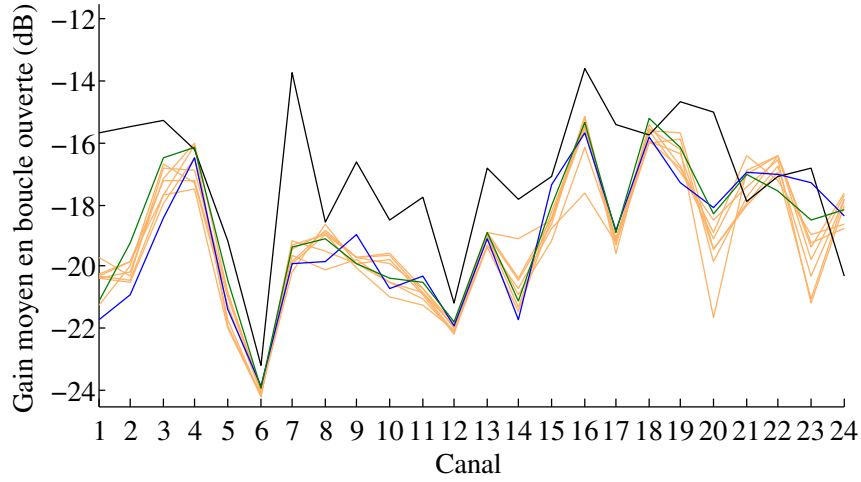


FIGURE 2.15 - Simulation d'un SAR par une approche systémique basée des réponses impulsionnelles numériques : GMBO sur la bande d'octave de 1000 Hz des 24 canaux du système au terme de la première passe —, de la deuxième — de la troisième — et de la quatrième à la dixième —.

Le second résultat est l'évaluation de la coloration moyenne induite par le système sur trente points de réception en fonction du nombre de passes successives. La coloration est ici quantifiée par un indice objectif obtenu à partir de résultats de tests psychoacoustiques conduits par *Meynial* et *Vuichard* [Meynial 1999]. Ces tests consistent en la mise en relation d'un niveau subjectif de coloration, exprimé en pourcentage, de réponses impulsionnelles d'une salle active équipée d'un SAR et de l'écart type réduit de la partie tardive de la réponse en fréquence de ces réponses impulsionnelles. Lorsqu'une ou plusieurs fréquences de cette fonction de réponse en fréquence deviennent prédominantes, son écart type réduit est augmenté et une impression de coloration peut être ressentie ; la présence de ces fréquences émergentes pouvant être due à un SAR mal réglé (voir partie 1.2.2). Dans le cadre de cette thèse nous avons donc simplement repris les résultats des tests menés par *Meynial* et *Vuichard* puis effectué une recherche de tendance par régression statistique afin d'obtenir une formule pour un indice objectif de coloration d'une salle active (voir figure 2.16). Les résultats de cette régression statistique avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,97$ donne un indice objectif de coloration C_{color} exprimé en pourcentage en fonction de l'écart type réduit $\bar{\sigma}$ tel que :

$$C_{color} = 0,323\bar{\sigma}^{-8,644} + 88,92 \quad (2.14)$$

La figure 2.17 montre que la coloration au niveau de l'auditoire diminue sur les trois premières passes pour se stabiliser aux alentours de 15% à 20%. Ainsi l'égalisation automatique vis-à-vis de l'atténuation du phénomène de coloration semble converger au bout de trois passes successives d'égalisation. Ce nombre est plus important que celui déduit de la convergence vers le GMBO. Nous retiendrons donc que la méthode de détermination automatique des fonctions de réponse en fréquence des gains électroniques du système nécessite un minimum de trois passes successives. Cependant, pour plus de sécurité vis-à-vis de la convergence de l'indice de coloration et du GMBO, un nombre de quatre passes successives d'égalisation semble plus approprié.

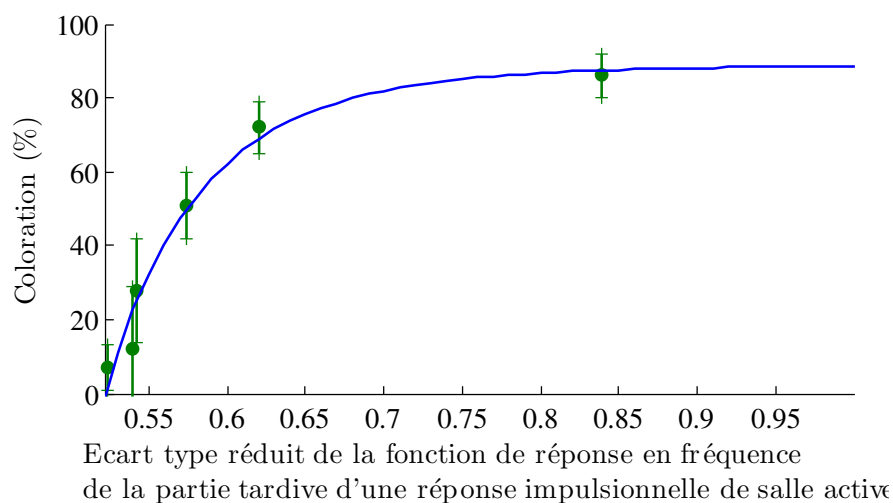


FIGURE 2.16 - Niveau de coloration en fonction de l'écart type réduit de la fonction de réponse en fréquence de la partie tardive d'une réponse impulsionnelle de salle active. Résultats bruts des tests psychoacoustiques : moyennes ● et écart type +. Régression statistique —.

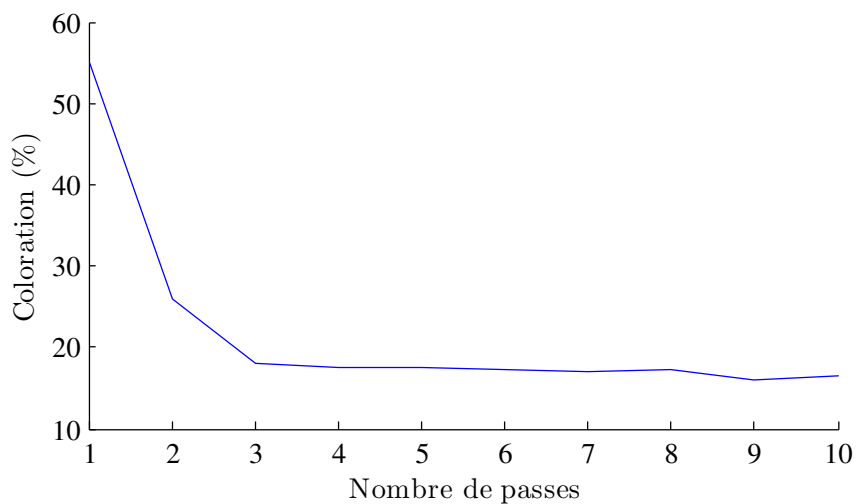


FIGURE 2.17 - Simulation d'un SAR par une approche systémique basée sur des réponses impulsionnelles numériques : évolution de la coloration moyennée sur trente points de réception, en fonction du nombre de passes réalisées.

2.4.3 Exemple de réponse impulsionnelle passive et active au niveau de l'auditoire

À la fin de la procédure d'égalisation automatique, toutes les fonctions de réponse en fréquence nécessaires à la résolution de l'équation des systèmes bouclés multivariable appliquée à une salle active sont connues. Il est alors possible d'obtenir la réponse impulsionnelle active en un point de réception. La figure 2.18 est un exemple d'échogrammes déduits du calcul de réponses impulsionnelles obtenues par simulations numériques uniquement (cas de la réponse impulsionnelle passive) et par l'approche systémique d'un SAR basée sur des simulations numériques (cas de la réponse impulsionnelle active). Nous pouvons y observer que l'ajout d'énergie du système se produit plus de 20 ms après l'arrivée du champ direct ; ceci s'expliquant par la valeur du retard électronique fixé ici à 20 ms et par le fait que le système ne puisse agir que sur les composantes réverbérées. Nous observons aussi que l'effet relatif du système est de plus en plus important au cours du temps, ce qui se traduit, par une augmentation de la durée de réverbération, de la force sonore et de la durée de réverbération précoce, et une diminution des indices de clarté et de définition. Ces modifications acoustiques induites par l'utilisation du SAR Carmen sont aussi constatées dans les salles réelles [Rougier 2008].

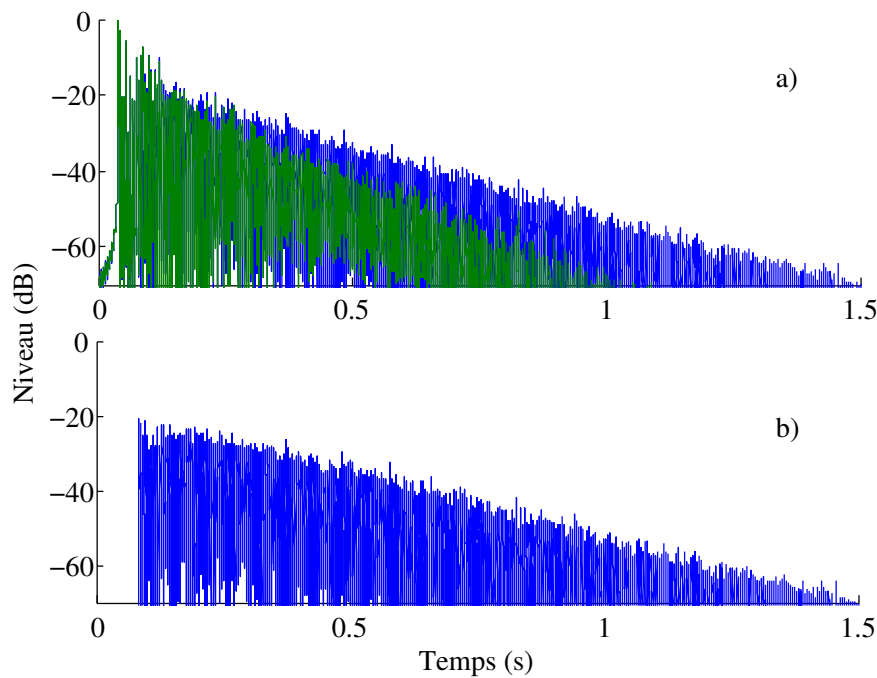


FIGURE 2.18 - a) : Échogrammes simulés entre une source et un récepteur dans une salle sans — et avec — SAR. b) : Échogramme simulé de l'ajout d'énergie uniquement dû au système pour la même source et le même récepteur —.

2.5 Synthèse du chapitre 2

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode de construction de réponse impulsionnelle d'une salle équipée d'un SAR, réalisée à partir de simulations numériques. Cette approche, bien qu'elle ne puisse répondre directement à l'objectif de cette thèse parce qu'elle est longue à mettre en place et demande de nombreuses informations sur la salle et le SAR, constitue l'approche prévisionnelle se rapprochant le plus de la mesure du fait qu'elle ne fait pas d'approximation de l'effet du système en utilisant l'équation des systèmes bouclés multivariables, et qu'elle repose sur des méthodes de simulations asymptotiques qui, comme nous l'avons vu, peuvent prendre en compte les détails architecturaux d'une salle, différents phénomènes de propagation acoustique¹⁵, et les particularités d'emplacement et de conception (directivité) des transducteurs d'un SAR. Pour des cas d'études, comme la vérification de la validité d'approches plus simples, nous pouvons ainsi considérer qu'elle peut s'y substituer. Pour l'obtention des fonctions de réponse en fréquence électroniques du SAR nécessaires à cette approche systémique basée sur des simulations numériques, nous avons ici intégré une méthode itérative et automatique. Celle-ci permet de fixer le GMBO de chaque canal et d'éviter l'apparition du phénomène d'instabilité en reproduisant la démarche effectuée lors du réglage d'une installation réelle d'un SAR ; ce qui rajoute un caractère réaliste supplémentaire aux réponses impulsionnelles actives obtenues. Une étude de convergence de l'algorithme d'égalisation automatique des canaux d'un SAR a été réalisée sur une salle virtuelle réaliste, et a montré la capacité de cet algorithme à répondre aux objectifs fixés. Par ailleurs, cette étude reposant sur une réalisation complète de l'approche systémique basée sur des simulations numériques nous a permis d'illustrer les réponses impulsionnelles attendues.

15. Ces méthodes ne sont, en toute rigueur, pas valables aux basses fréquences, mais dans le cadre de ce travail nous nous intéressons aux bandes de fréquences moyennes.

Développement et mise à l'épreuve de modèles théoriques de l'action d'un SAR régénératif dans une salle simple

Sommaire

3.1	Approche énergétique de l'action d'un SAR régénératif dans une salle simple	56
3.1.1	Développement analytique de la fonction de gain d'un SAR	56
3.1.2	Retour sur l'approximation de l'action des retards électroniques	57
3.2	Approche systémique de l'action d'un SAR régénératif dans une salle simple avec utilisation de réponses impulsionnelles stochastiques	59
3.2.1	Reconstruction de réponses impulsionnelles à partir de l'approche stochastique de l'acoustique géométrique	60
3.2.1.1	Le champ direct	60
3.2.1.2	Le champ réverbéré	62
3.2.2	Génération automatique des distances entre les transducteurs d'un SAR	65
3.2.3	Synthèse de l'approche systémique d'un SAR régénératif avec utilisation de réponses impulsionnelles stochastiques	68
3.3	Confrontation des modèles théoriques proposés à la mesure et à l'approche systémique de l'action d'un SAR basée sur des simulations numériques . .	70
3.3.1	Présentation des salles tests	71
3.3.2	Présentation des résultats	81
3.3.2.1	Durée de réverbération	82
3.3.2.2	Durée de réverbération précoce	85
3.3.2.3	Force sonore	88
3.3.2.4	Clarté, définition et temps central	90
3.3.3	Discussion des résultats	93
3.3.4	Synthèse des résultats	98
3.4	Synthèse du chapitre 3	98

La plupart des modèles théoriques analytiques utilisés en acoustique des salles se basent sur la théorie des champs diffus qui suppose l'homogénéité et l'isotropie du champ acoustique. La prévision de l'évolution temporelle de l'énergie d'une réponse impulsionnelle selon ces modèles repose sur l'extrapolation aux réflexions précoces, et parfois même au champ direct, de ces hypothèses. La limite de ces modèles apparaît donc clairement puisque, puisque comme vu dans la partie 1.1.1, ni les réflexions précoces ni le champ direct ne peuvent être traités de manière globale à l'intérieur d'une même salle, ne serait-ce qu'à cause de l'influence importante que les positions de la source et du récepteur peuvent exercer sur ses contributions. Cependant, ces modèles sont plus adaptés

aux contraintes d'une phase d'avant-projet que ceux reposant sur des méthodes numériques tels que celui présenté au chapitre 2. En effet, ils possèdent l'avantage de se réduire à des équations simples ne prenant en compte qu'un nombre réduit de paramètres d'entrée, permettant ainsi une première estimation rapide de l'ordre de grandeur des indices acoustiques et demandant peu de ressources de calcul et d'informations sur la salle. De plus, bien que ces approches ne soient pas toujours valides dans le cas des salles passives, il n'est pas dénué de sens de penser que l'action d'un SAR prévue à partir du modèle de champ diffus, puisse donner une quantification raisonnable de son effet, car l'utilisation d'un SAR régénératif rend certaines hypothèses de la théorie des champs diffus *a priori* mieux vérifiées que dans le cas d'une salle passive. En effet, d'une part, les haut-parleurs d'un système régénératif sont peu directifs et placés de manière à peu près homogène, ce qui confère au champ sonore créé par ceux-ci un caractère relativement isotrope. D'autre part, du fait qu'il résulte de la convolution de multiples réponses impulsionnelles, ce même champ acoustique se caractérise par une forte densité temporelle de contributions sonores [Vogel 1994] justifiant d'autant plus une approche statistique pour le décrire.

Dans ce chapitre, nous allons exposer deux approches théoriques pour prévoir l'action d'un SAR régénératif diagonal. Dans un premier temps, nous reprendrons l'approche basée sur la théorie énergétique des champs diffus initiée par *Franssen* et améliorée par *Poletti* afin de permettre une prévision de l'ensemble des indices acoustiques pouvant être déduits de la réponse impulsionnelle omnidirectionnelle d'une salle. Dans un deuxième temps, nous présenterons une seconde approche de l'action d'un SAR qui reprend en partie l'idée de *Svensson* de conjuguer des réponses passives théoriques par l'équation des systèmes bouclés multivariable. Cependant, contrairement à *Svensson*, nous développerons une méthode pour prévoir l'effet d'un système multicanal, et les réponses impulsionnelles passives utilisées seront établies à partir de l'approche stochastique de l'acoustique géométrique. Enfin, nous proposons d'éprouver ces approches théoriques de l'action d'un SAR. N'ayant à notre disposition qu'une seule salle accessible à la mesure, cette étude inclut également la confrontation à des données obtenues par l'approche systémique d'un SAR basée sur des simulations numériques, comme vu au chapitre 2. Dans cette partie, nous nous concentrerons sur l'effet du SAR produit sur l'évolution de six indices acoustiques objectifs parmi les plus utilisés par les acousticiens, et définis par la norme ISO : 3382-1 [ISO :3382-1 2009], à savoir la durée de réverbération, la durée de réverbération précoce, la force sonore, la clarté, la définition et le temps central (voir partie 1.1.2).

3.1 Approche énergétique de l'action d'un SAR régénératif dans une salle simple

3.1.1 Développement analytique de la fonction de gain d'un SAR

Nous allons établir ici une fonction de gain du système. D'une part, établir un gain plutôt que directement une réponse impulsionnelle active permet d'isoler l'action du SAR. Cette fonction de gain peut alors s'appliquer à n'importe quelle réponse impulsionnelle passive, qu'elle soit obtenue par approche analytique ou par une simulation numérique ou par la mesure. D'autre part, comme nous allons le voir, travailler à partir d'un gain plutôt qu'en terme d'ajout, autrement dit à partir d'un rapport entre les énergies théoriquement contenues dans les réponses impulsionnelles avec et sans SAR plutôt qu'à partir d'une différence entre ces deux énergies, permet de simplifier l'expression mathématique correspondante et de diminuer le nombre de paramètres d'entrée du modèle.

L'expression de cette fonction de gain en énergie Ξ_{ea} dû au système s'obtient en faisant le rapport

entre l'évolution de l'énergie dans la salle sans (équation (1.22)) et avec le système (équation (1.36)).

$$\Xi_{ea}(t) = \frac{\beta e^{\frac{(A+4mV)c}{4V}t}}{\beta' e^{\left(\frac{1-N\bar{\Gamma}}{1+N\frac{(A+4mV)c}{4V}\bar{\Gamma}\bar{\tau}}\right)\left(\frac{(A+4mV)c}{4V}\right)t}} \quad (3.1)$$

Elle ne peut être valide pour des temps inférieurs au retard électronique du système $\bar{\tau}$ puisque pour ces temps, le système ne peut avoir d'action dans la salle. La continuité de l'énergie de la réponse impulsionnelle au temps $\bar{\tau}$ impose la relation $\Xi_{ea}(\bar{\tau}) = 1$. Ainsi, il est possible d'exprimer β' en fonction de β :

$$\beta' = \beta e^{\left(\frac{(A+4mV)c}{4V}\right)\left(1 - \left(\frac{1-N\bar{\Gamma}}{1+\left(\frac{(A+4mV)c}{4V}\right)N\bar{\Gamma}\bar{\tau}}\right)\right)\bar{\tau}} \quad (3.2)$$

soit :

$$\Xi_{ea}(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } t < \bar{\tau} \\ e^{\left(\frac{(A+4mV)c}{4V}\right)\left(1 - \left(\frac{1-N\bar{\Gamma}}{1+\left(\frac{(A+4mV)c}{4V}\right)N\bar{\Gamma}\bar{\tau}}\right)\right)(t-\bar{\tau})} & \text{pour } t \geq \bar{\tau} \end{cases} \quad (3.3)$$

Si l'on applique cette fonction de gain à des réponses impulsionnelles qui prennent en compte le temps de propagation t_d de l'onde directe, il suffit alors de translater l'expression précédente de cette quantité, soit :

$$\Xi_{ea}(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } t < t_d + \bar{\tau} \\ e^{\left(\frac{(A+4mV)c}{4V}\right)\left(1 - \left(\frac{1-N\bar{\Gamma}}{1+\left(\frac{(A+4mV)c}{4V}\right)N\bar{\Gamma}\bar{\tau}}\right)\right)(t-t_d-\bar{\tau})} & \text{pour } t \geq t_d + \bar{\tau} \end{cases} \quad (3.4)$$

ou, en utilisant la formule de Sabine (1.24) (qui découle de la même approche énergétique) afin de réécrire l'expression (3.4) en fonction de la durée de réverbération initiale T_{r0} :

$$\Xi_{ea}(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } t < t_d + \bar{\tau} \\ e^{\left(\frac{6\ln(10)}{T_{r0}}\right)\left(1 - \left(\frac{1-N\bar{\Gamma}}{1+\left(\frac{6\ln(10)}{T_{r0}}\right)N\bar{\Gamma}\bar{\tau}}\right)\right)(t-t_d-\bar{\tau})} & \text{pour } t \geq t_d + \bar{\tau} \end{cases} \quad (3.5)$$

et si nous substituons $\bar{\Gamma}$ par sa valeur en fonction du GBMO $\bar{\Gamma}'$ (formule (1.48)) :

$$\Xi_{ea}(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } t < t_d + \bar{\tau} \\ e^{\left(\frac{6\ln(10)}{T_{r0}}\right)\left(1 - \left(\frac{1-N\left(\frac{\bar{\Gamma}'}{1+(N-1)\bar{\Gamma}'}\right)}{1+\left(\frac{6\ln(10)}{T_{r0}}\right)N\left(\frac{\bar{\Gamma}'}{1+(N-1)\bar{\Gamma}'}\right)\bar{\tau}}\right)\right)(t-t_d-\bar{\tau})} & \text{pour } t \geq t_d + \bar{\tau} \end{cases} \quad (3.6)$$

Cette fonction de gain peut alors être appliquée à n'importe quelle réponse impulsionnelle passive omnidirectionnelle. de la réponse impulsionnelle active ainsi obtenue peut être déduit n'importe quel indice acoustique omnidirectionnel (durée de réverbération, force sonore, clarté, etc).

3.1.2 Retour sur l'approximation de l'action des retards électroniques

Au chapitre 1, nous avons mentionné le fait que l'approximation sur l'action des retards par développement limité d'ordre un d'une exponentielle dans l'espace de Laplace était difficilement

appréciable, car le caractère négligeable des termes d'ordre supérieur est lié à la valeur de la variable de Laplace. Cependant, l'équation différentielle avec retards (1.26) est solvable sans approximation. Il est donc possible d'effectuer une comparaison entre la fonction de gain du système obtenue selon cette résolution exacte et celle obtenue par l'équation (3.4) utilisant l'approximation sur l'action des retards.

L'équation (1.26) est une équation dite avec retards du premier ordre à coefficients constants. Elle est solvable par récurrence sur chaque pas de temps où la densité d'énergie est continue (entre chaque retard) [Hale 1993]¹. Pour un pas de temps donné, la résolution de ce type d'équation se résume à la résolution d'une équation différentielle ordinaire du premier ordre avec coefficients constants et second membre. Ce second membre étant la valeur de la fonction donnée par la résolution de l'équation différentielle aux pas de temps précédents. Pour les premiers pas de temps, ce second membre est donné par les connaissances sur le système aux temps inférieurs au temps zéro. Or, dans le cas qui nous intéresse ici, celui de l'énergie de la réponse impulsionnelle d'un système causal, la valeur de cette énergie aux temps inférieurs à zéro est nulle. Ainsi, les conditions initiales du système sont $w_{ea}(t) = 0$ pour $t < 0$ et $w_{ea}(0) = \beta$. d'où :

$$w_{ea(n)}(t) = N \left(\frac{\bar{\Gamma}'}{1 + (N-1)\bar{\Gamma}'} \right) \frac{(A + 4mV)c}{4V} e^{-\frac{(A+4mV)c}{4V}t} \int e^{\frac{(A+4mV)c}{4V}t} w_{ea(n-1)}(t - \tau) dt$$

pour $n\tau \leq t < (n+1)\tau$ (3.7)

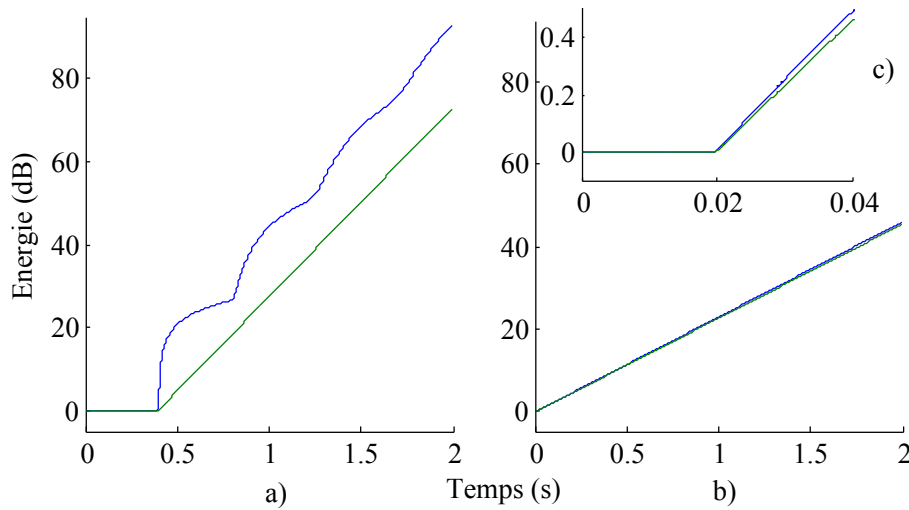


FIGURE 3.1 - Évolution de la fonction de gain calculée à partir de l'approche énergétique avec prise en compte des retards de manière approchée — ou exacte —, pour une valeur retard de 400 ms (a) et 20 ms (b et c).

La figure 3.1 représente les fonctions de gain calculées en utilisant l'approximation de l'action du retard électronique donnée par l'équation (3.4), ou en prenant en compte ce retard de manière exacte (équation (3.7)). La valeur de durée de réverbération initiale est fixée à 1 s et le système considéré comporte 30 canaux réglés chacun à un GMBO de -18 dB ; ce qui correspond à une installation type

1. Il existe d'autres méthodes analytiques plus rapides pour résoudre ce type d'équations différentielles comme celle utilisant la fonction W de Lambert. Cependant, la méthode itérative reste la plus instinctive et donc la plus facilement intelligible.

d'un SAR régénératif. Pour une valeur de retard de 400 ms, les augmentations de réverbération prévues par chacune des deux approches, et qui se caractérisent par la pente générale de la fonction de gain, sont à peu près identiques. Par contre, il apparait clairement que l'approche par approximation ne permet pas de rendre compte de manière satisfaisante du comportement de la fonction de gain du système. Ceci est une conséquence de la troncature des termes d'ordre élevé dans le développement limité de l'action retard (exponentielle) dans l'espace de Laplace. Les fluctuations de la fonction de gain, observées lors de l'utilisation de l'approche exacte, ne sont ainsi pas reproduites dans le cas de l'approche par approximation. Cependant, une telle valeur de retard n'est jamais utilisée, car elle pourrait engendrer une émergence trop importante de contributions issues du système par rapport au reste de la réponse impulsionnelle, créant alors un phénomène d'échos [Cremer 1982]. Par conséquent, il est conseillé de ne pas dépasser une valeur maximale de retard de 40 à 50 ms. Dans la pratique, un retard maximal moyen de l'ordre 20 ms est observé sur les différentes installations du système Carmen. En utilisant cette valeur, les fonctions de gain avec et sans approximation sont proches ; les fluctuations observées pour une valeur de retard plus importante sur la courbe de gain obtenu par l'approche exacte de l'action des retards sont négligeables. Nous pouvons aussi observer que la courbe de gain de l'approche analytique exacte de la prise en compte du retard contient plus d'énergie que celle obtenue avec une prise en compte approchée du retard. Or, à GMB0 équivalent, l'introduction de retards ne devrait, en théorie, pas ajouter d'énergie au système, mais simplement la répartir différemment dans le temps. Cet artéfact de l'approche énergétique des SAR est donc légèrement minimisé par l'approximation sur l'action du retard.

3.2 Approche systémique de l'action d'un SAR régénératif dans une salle simple avec utilisation de réponses impulsionnelles stochastiques

Comme dans le cas de l'approche énergétique, et pour les mêmes raisons, nous allons ici proposer un modèle théorique d'action du SAR distinct de la réponse impulsionnelle passive. L'idée est de calculer le terme d'action du système $H_{sra}(f) = H_{hr}(f) \left(I_d - \underline{G_{mh}}(f) \underline{H_{hm}}(f) \right)^{-1} \underline{G_{mh}}(f) \underline{H_{sm}}(f)$ de l'équation des systèmes bouclés multivariable (2.1) à partir de la transformée de Fourier de réponses impulsionnelles acoustiques théoriques issues d'une approche stochastique de l'acoustique géométrique initiée par Polack [Polack 1993]. Le terme passif $H_{sr}(f)$ devant être ajouté pour obtenir une fonction de réponse en fréquence active, peut être obtenu par une méthode similaire, mais aussi par une simulation numérique ou une mesure. Pour la détermination des fonctions de réponse en fréquence de la boucle directe des canaux $\underline{G_{mh}}(f)$, nous proposons d'utiliser le même algorithme d'égalisation automatique que celui présenté au chapitre précédent (partie 2.3) ; nous ne reviendrons donc pas ici sur ce point, nous nous focaliserons sur la construction de réponses impulsionnelles acoustiques.

Nous allons dans un premier temps reprendre la théorie stochastique de l'acoustique géométrique en l'adaptant à la création des réponses impulsionnelles. Le choix de cette approche théorique repose sur le fait qu'elle rende mieux compte de certains phénomènes que les autres approches théoriques classiques, en particulier celui de la répartition temporelle des réflexions de la réponse impulsionnelle et une certaine dispersion des indices acoustiques [Polack 2006]. Cette approche faisant intervenir la distance source-récepteur, nous verrons, dans un second temps, comment en obtenir une pour chaque réponse impulsionnelle nécessaire à la résolution de l'équation (2.1), sans connaissance sur le positionnement exact des transducteurs du système, et tout en faisant en sorte qu'elle soit en

accord avec le principe de fonctionnement du système et le volume de la salle.

3.2.1 Reconstruction de réponses impulsionnelles à partir de l'approche stochastique de l'acoustique géométrique

L'acoustique géométrique consiste à assimiler chaque point de la surface du front d'onde issu de la source à une particule sonore. Le trajet suivi par chacune d'entre elles au cours de leur propagation est alors appelé rayon, celui-ci est régi par les lois de réflexions, diffraction, réfraction, transmission et la direction initiale de propagation des particules. L'énergie de chaque particule est modifiée au cours de sa propagation dans la salle par les phénomènes d'absorption, de diffraction, et de dispersion. La quantité d'énergie en un point de la salle est alors égale à la somme des énergies portées par chaque particule atteignant ce point à l'instant considéré.

3.2.1.1 Le champ direct

Le champ direct issu d'une source en un point de réception situé à une distance r de celle-ci est capté $t_d = r/c$ après émission. La quantité d'énergie de la particule correspondante est fonction de la puissance P_s rayonnée par la source, de la directivité de la source dans la direction du récepteur $D_s(\vec{r}_{sr})$, de la directivité du récepteur dans la direction de la source² $D_r(\vec{r}_{rs})$ et de la perte d'énergie liée à la propagation. Cette dernière est en première approximation liée à la distance entre la source et le récepteur par l'intermédiaire de la décroissance géométrique d'une source sphérique et de la dissipation de l'air. La densité d'énergie du champ direct s'exprime donc :

$$w_{dir}(r) = \frac{P_s}{4\pi cr^2} D_s(\vec{r}_{sr}) D_r(\vec{r}_{rs}) e^{-mr} \quad (3.8)$$

En considérant une puissance de source P_s exprimée en fonction de la distance r_{ref} à laquelle cette source produirait un niveau de 0dB dans la direction de son maximum de directivité :

$$w_{dir}(r) = \frac{r_{ref}^2}{r^2} D_s(\vec{r}_{sr}) D_r(\vec{r}_{rs}) e^{-m(r-r_{ref})} \quad (3.9)$$

Si l'on veut résoudre l'équation des systèmes bouclés multivariable appliquée au système Carmen à partir de réponses impulsionnelles synthétisées selon l'approche géométrique, il nous faut considérer trois situations différentes concernant la prise en compte de directivité du microphone sur le niveau de champ direct : celle des réponses impulsionnelles captées par un récepteur au niveau des sièges ($h_{h_i r}$ et $h_{h_s r}$), celle des réponses impulsionnelles faisant intervenir le microphone et le haut-parleur d'un même canal ($h_{h_i m_i}$), et celle des réponses impulsionnelles faisant intervenir le microphone et une autre source ($h_{s m_i}$ et $h_{h_i m_j}$ avec $i \neq j$). Le facteur de directivité des haut-parleurs ou de la source est quant à lui toujours égal à un, car la source est omnidirectionnelle et les haut-parleurs du système, bien que pouvant être considérés comme hémidirectionnels, sont toujours positionnés au niveau des parois de la salle et orientés vers l'intérieur de celle-ci (voir figure 3.2)³.

2. La directivité d'un transducteur se caractérise par son diagramme de directivité. Celui-ci correspond au rapport de l'énergie d'une onde sonore captée par le transducteur sur celle qui le serait par un transducteur omnidirectionnel, en fonction de l'angle d'incidence de cette onde sonore [Olson 1957]. L'équation de directivité des transducteurs, qui est une forme algébrique de ce diagramme de directivité, permet d'obtenir directement la pondération à appliquer à l'énergie d'une particule sonore en fonction de sa direction incidence ou d'émission selon que le transducteur soit un récepteur ou une source.

3. Dans le cas du système MCR, les microphones du système sont omnidirectionnels. Par conséquent, les facteurs de directivité des transducteurs de l'expression (3.9) sont égaux à 1 quelle que soit la réponse impulsionnelle considérée.

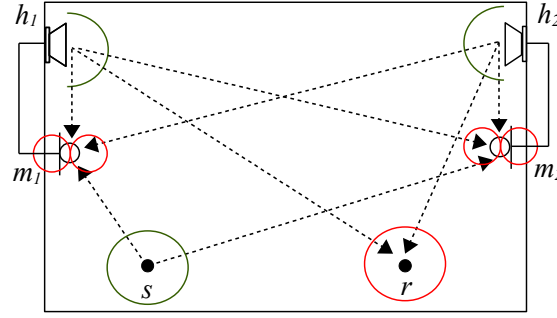


FIGURE 3.2 - Les différents trajets acoustiques entrant en jeu dans une salle active et représentations des diagrammes de directivité théoriques des transducteurs dans le cas du système Carmen (sources — et récepteurs —).

La valeur du facteur de directivité du récepteur appliqué au champ direct des réponses impulsionnelles faisant intervenir un récepteur au niveau des sièges vaut 1 puisque ce récepteur est défini comme étant omnidirectionnel, tel que spécifié par la norme sur la mesure des indices acoustiques [ISO :3382-1 2009]. Le champ direct vaut donc :

$$w_{dir}(r) = \frac{r_{ref}^2}{r^2} e^{-m(r-r_{ref})} \quad (3.10)$$

Lorsque la réponse impulsionnelle considérée est celle entre le haut-parleur et le microphone d'un même canal, le champ direct est théoriquement absent. En effet, pour minimiser l'énergie de la boucle de rétroaction d'un canal afin d'augmenter la limite de gain avant instabilité, le système Carmen utilise des microphones bidirectionnels positionnés de telle sorte que leur minimum de directivité soit orienté vers le haut-parleur du canal considéré (voir chapitre 1.2.1.2). Or, le minimum de directivité d'un microphone bidirectionnel est théoriquement nul⁴.

Lorsque la réponse impulsionnelle vers un microphone du système est issue de la source sur scène ou bien du haut-parleur d'un autre canal, nous n'avons *a priori* pas d'information sur l'incidence de l'onde directe. Celle-ci peut être alors considérée comme aléatoire. Ainsi, dans ce cas, pour prendre en compte la directivité du microphone, il suffit d'obtenir une direction stochastique par tirage aléatoire selon une loi équiprobable et d'injecter cette direction dans l'équation de directivité d'un microphone bidirectionnel d'ordre 1 qui vaut en énergie :

$$D_r(\vec{r}(\theta, \varphi)) = \cos(\theta)^2 \quad (3.11)$$

En coordonnées polaires, le tirage d'une direction aléatoire se fait en tirant d'une part un angle de colatitude θ de telle sorte que les valeurs de son cosinus soient équiprobables et, d'autre part un angle d'azimut φ équiprobable.

$$\theta = \arccos(\mathcal{U}[-1; 1]) \quad (3.12)$$

$$\varphi = \mathcal{U}[-\pi; \pi] \quad (3.13)$$

où $\mathcal{U}[a; b]$ est un tirage uniforme sur l'intervalle $[a; b]$.

4. En pratique, le minimum de directivité d'un microphone bidirectionnel se situe plutôt aux alentours de -25 dB.

3.2.1.2 Le champ réverbéré

Principe général de construction du champ réverbéré

D'après l'acoustique géométrique, l'évolution temporelle de l'énergie de la partie réverbérée d'une réponse impulsionnelle, est gouvernée par deux phénomènes antagonistes. L'augmentation du nombre de particules sonores $N(t)$ arrivant au récepteur et la diminution de l'énergie portée par chacune d'elles. Cette perte d'énergie est causée, d'une part par réflexion partielle sur les parois de la salle et, d'autre part, comme pour le champ direct, par décroissance géométrique et dissipation dans l'air. Puisqu'à chaque réflexion une particule perd en moyenne une fraction d'énergie $\bar{\alpha}$, l'énergie du champ réverbéré peut se mettre sous la forme :

$$w_{rev}(t) = r_{ref}^2 e^{mr_{ref}} \frac{e^{-mct}}{c^2 t^2} \sum_{i=1}^{N(t)} (1 - \bar{\alpha})^{n_i(t)} \quad (3.14)$$

où $n_i(t)$ est le nombre de réflexions subies par une particule i en fonction du temps avant son arrivée au niveau du récepteur.

L'approche analytique classique de l'acoustique géométrique, appelée approche d'Eyring, utilise les valeurs moyennes de $N(t)$ et de $n(t)$ afin d'obtenir une expression de l'énergie du champ réverbéré. Le nombre moyen de particules $\bar{N}(t)$ arrivant pendant un court intervalle de temps δt se détermine par l'intermédiaire d'une représentation du champ sonore par sources-images [Jouhaneau 2003]. $\bar{N}(t)$ équivaut au nombre moyen de sources-images dans un volume compris entre deux sphères centrées sur le point d'émission et de diamètres ct et $c(t+\delta t)$. Une source image « occupant » un volume égal à celui de la salle :

$$\bar{N}(t) = \frac{4\pi c^3 t^2 \delta t}{V} \quad (3.15)$$

Le nombre moyen de réflexions $\bar{n}(t)$ subies par une particule est lié au temps par l'intermédiaire du libre parcours moyen $\bar{l}$ qui correspond à la distance moyenne parcourue par une particule entre deux réflexions successives [Jouhaneau 2003].

$$\bar{n}(t) = \frac{Sct}{4V} \quad (3.16)$$

L'expression (3.14) de la densité d'énergie selon l'approche d'Eyring s'écrit donc :

$$w_{rev}(t) = \frac{4\pi c r_{ref}^2 \delta t}{V} e^{mr_{ref}} e^{\frac{S \ln(1-\bar{\alpha})ct}{4V}} e^{-mct} \quad (3.17)$$

L'approche stochastique de l'acoustique géométrique consiste non pas en l'utilisation des valeurs moyennes du nombre de réflexions subies par une particule et du nombre de particules arrivant au récepteur, mais en l'utilisation de nombres aléatoires tirés selon la loi de probabilité donnée pour chacune de ces deux quantités. Pour déduire ces lois, *Polack* aborde le comportement des rayons sonores par le biais de la théorie des billards ; la notion de champ diffus est alors rapprochée de celle de mélange⁵. Selon cette approche, si la salle peut être considérée comme mélangeante, le comportement des particules vis-à-vis du nombre de réflexions est décrit par un processus aléatoire poissonnien, car les trois règles nécessaires à son existence sont respectées :

- la probabilité qu'une particule ait subi plusieurs réflexions dans un très petit intervalle δt de temps est négligeable

5. *Polack* souligne que cette propriété de mélange ne peut pas être rigoureusement vérifiée pour une salle absorbante, mais que l'on y tend tout de même avec le temps. La limite temporelle acceptable étant le temps de transition, qui obtient ici sa justification théorique.

- la probabilité d'obtenir une réflexion supplémentaire pendant un intervalle de temps donné est proportionnelle à la seule valeur de cet intervalle, quel que soit l'instant où il se situe sur l'axe des temps
- les nombres de réflexions d'un même rayon dans deux intervalles de temps disjoints sont indépendants

Ce processus de Poisson est gouverné par un paramètre égal au nombre moyen de réflexions par seconde explicité par l'expression (3.16). La probabilité qu'une particule ait subi n réflexions est alors donnée par :

$$p_n(t) = \frac{\left(\frac{Sct}{4V}\right)^n}{n!} e^{-\frac{Sct}{4V}} \quad (3.18)$$

Compte tenu du fait qu'une particule du champ réverbéré a nécessairement subi une réflexion au minimum, il nous faut, en toute rigueur, utiliser une loi de Poisson tronquée en zéro. Soit :

$$p'_n(t) = \frac{1}{(1 - e^{-\frac{Sct}{4V}})} \frac{\left(\frac{Sct}{4V}\right)^n}{n!} e^{-\frac{Sct}{4V}} \quad (3.19)$$

Le nombre de particules incidentes $N(t)$ ne peut pas, quant à lui, obéir de manière formelle à un processus de Poisson. En effet, rien ne suggère que deux événements (particules) ne peuvent se produire (atteindre le récepteur) à un même instant et le nombre moyen de particules captées sur un intervalle de temps fixe est dépendant de l'instant auquel est situé cet intervalle. Cependant, bien que ne correspondant probablement pas à la stricte réalité, l'utilisation d'un tel processus pour obtenir les valeurs de $N(t)$ est pratique, car il est borné aux entiers naturels et il ne demande qu'un seul paramètre, à savoir la valeur moyenne du nombre de particules incidentes $\bar{N}(t)$ données par l'expression (3.15).

L'évolution temporelle de l'énergie moyenne du champ réverbéré d'après l'approche stochastique peut se calculer en injectant la densité de probabilité (3.19) dans l'expression (3.14). Cela supprime l'aspect aléatoire, mais permet une comparaison directe avec les autres approches analytiques déterministes.

$$w_{rev}(t) = \frac{\bar{N}(t)}{c^2 t^2} e^{mr_{ref}} e^{-mct} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(1 - e^{-\frac{Sct}{4V}})} \frac{\left(\frac{Sct}{4V}\right)^n}{n!} e^{-\frac{Sct}{4V}} (1 - \bar{\alpha})^n \quad (3.20)$$

Pour des valeurs importantes de temps, correspondant à plusieurs fois la durée mise par une particule pour parcourir une distance égale au libre parcours moyen de la salle, le paramètre de la loi de Poisson tronquée en zéro s'éloigne de la valeur nulle. Or, dans cette situation, il s'avère qu'une loi de Poisson tronquée tend vers une loi de Poisson classique⁶. Ainsi :

$$w_{rev}(t) \simeq \frac{4\pi cr_{ref}^2 \delta t}{V} e^{mr_{ref}} e^{-mct} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{Sct}{4V}\right)^n}{n!} e^{-\frac{Sct}{4V}} (1 - \bar{\alpha})^n \quad \text{pour } t \gg \frac{4V}{Sc} \quad (3.21)$$

En remarquant que nous avons dans la somme le développement en série de la fonction exponentielle :

$$w_{rev}(t) \simeq \frac{4\pi cr_{ref}^2 \delta t}{V} e^{mr_{ref}} e^{-mct} e^{-\frac{S\bar{\alpha}ct}{4V}} \quad \text{pour } t \gg \frac{4V}{Sc} \quad (3.22)$$

Ainsi, comme *Polack* le remarqua lui-même, pour des temps importants, l'approche stochastique de l'acoustique géométrique donne une valeur moyenne de l'évolution temporelle de la densité d'énergie

6. Puisque la probabilité de tirer le nombre zéro d'après un processus de Poisson tend vers zéro pour des valeurs de paramètre très supérieures à zéro, les lois de Poisson classique et tronquée tendent l'une vers l'autre lorsque leur valeur moyenne (ou de paramètre) augmente.

identique à celle donnée par l'approche énergétique (relation (1.22)). La différence avec l'approche géométrique classique de l'équation (3.17) réside dans la prise en compte de l'absorption des parois dans l'amortissement de la salle. Cependant, lorsque cet amortissement est exprimé en fonction de la durée de réverbération obtenue à partir de l'expression de l'évolution temporelle de l'énergie réverbérée correspondante⁷, cette différence disparaît. Ainsi, quelle que soit l'approche théorique considérée :

$$w_{rev}(t) \simeq \frac{4\pi cr_{ref}^2 \delta t}{V} e^{mr_{ref}} e^{-\frac{6 \ln(10)}{T_{r0}} t} \quad \text{pour } t \gg \frac{4V}{Sc} \quad (3.23)$$

Comme le montre la figure 3.3, la différence principale entre les approches énergétique, géométrique classique et géométrique stochastique se situe aux valeurs de temps faibles. Cela vient de la méthode de prise en compte de l'impossibilité qu'une particule réverbérée ait pu subir moins d'une réflexion. Pour l'approche énergétique, cet aspect n'est simplement pas pris en compte. Pour l'approche classique de l'acoustique géométrique, il peut être introduit en supprimant les rayons ayant un ordre moyen de réflexion inférieur à 1 (ce qui revient à mettre à zéro la valeur de l'énergie de la réponse impulsionnelle pour des temps antérieurs à $t = \frac{\bar{l}}{c}$ [Vorländer 1995]). Pour l'approche stochastique de l'acoustique géométrique, nous l'avons ici pris en compte par l'utilisation d'un tirage aléatoire suivant une loi de Poisson tronquée en zéro pour déterminer le nombre de réflexions subies par une contribution du champ réverbéré.

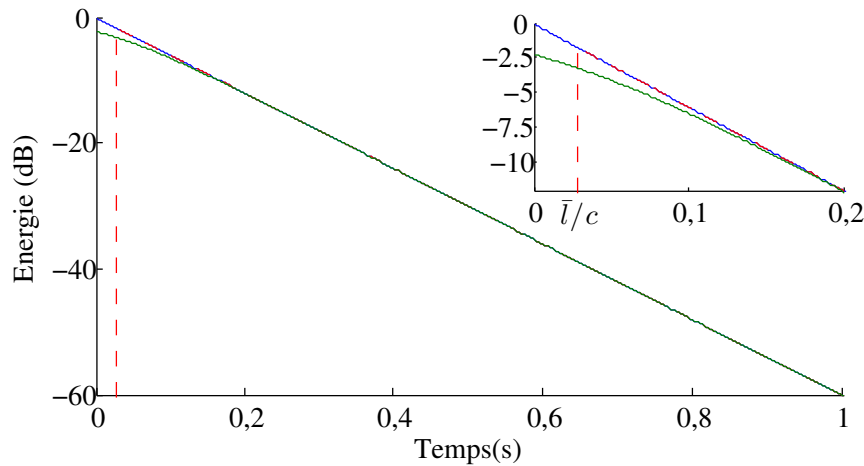


FIGURE 3.3 - Évolution temporelle de la densité d'énergie réverbérée moyenne selon l'approche énergétique —, l'approche classique de l'acoustique géométrique —., et l'approche stochastique de l'acoustique géométrique —.

Introduction de la directivité du récepteur

Dans le cas de l'approche stochastique dont il est question ici, comme dans celui plus général de la théorie des champs diffus, il est supposé que la direction d'incidence des contributions du champ

7. Soit :

- la formule de Sabine (1.24) pour l'approche énergétique et l'approche géométrique stochastique
- la formule d'Eyring pour l'approche géométrique classique :

$$T_{r0} = \frac{24 \ln(10) V}{(-S \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV)c}$$

réverbéré est aléatoire et équiprobable. Si, comme pour le cas du champ direct, nous souhaitons incorporer la directivité des microphones du système Carmen, il nous faut, là encore, effectuer un tirage aléatoire de direction d'incidence des contributions au niveau du récepteur, et ce pour chaque contribution du champ réverbéré. Ce tirage suit la même procédure que pour le champ direct explicité à la partie 3.2.1.1, et la pondération résultante D_{ri} à appliquer à chaque particule sonore réverbérée est aussi obtenue en injectant cette direction aléatoire dans l'équation de directivité des microphones (équation (3.11)). Ainsi, l'expression (3.14) se réécrit :

$$w_{rev}(t) = r_{ref}^2 e^{mr_{ref}} \frac{e^{-mct}}{c^2 t^2} \sum_{i=1}^{N(t)} D_{ri} (1 - \bar{\alpha})^{n_i(t)} \quad (3.24)$$

Introduction de la diminution d'énergie réverbérée avec la distance à la source

Afin d'introduire le phénomène de décroissance de l'énergie réverbérée avec l'augmentation de la distance source-récepteur observée expérimentalement dans les salles de spectacle [Barron 1988], nous avons choisi d'extrapoler l'approche de Barron et Lee (voir annexe A) aux réponses impulsionnelles synthétisées par l'approche stochastique de l'acoustique géométrique. Ainsi, la densité et l'ordre moyens des premières composantes réverbérées des réponses impulsionnelles sont considérés comme dépendant de la distance à la source r , et valent respectivement $4\pi cr^2 \delta t / V$ et $Sr/4V$; ce qui se traduit également par l'annulation de l'expression du champ réverbéré donnée par la formule (3.24) aux valeurs de temps inférieures à l'horaire d'arrivée du champ direct t_d . Soit :

$$w_{rev}(t) = \begin{cases} 0 & \text{pour } t \leq t_d \\ \frac{r_{ref}^2 e^{mr_{ref}} e^{-mct}}{c^2 t^2} \sum_{i=1}^{N(t)} D_{ri} (1 - \bar{\alpha})^{n_i(t)} & \text{pour } t > t_d \end{cases} \quad (3.25)$$

Introduction d'un signe arithmétique aux valeurs de pression

Si nous souhaitons pouvoir combiner différentes réponses impulsionnelles afin de résoudre l'équation des systèmes bouclés multivariables, il est nécessaire que ces réponses impulsionnelles comportent un signe arithmétique⁸ (voir partie 2.2.2). Nous n'avons cependant que peu d'information sur le signe des différentes contributions d'une réponse impulsionnelle de salle. Nous savons simplement que celui du rayon direct est identique à celui de l'impulsion issue de la source, quelle que soit la distance source-récepteur. Concernant le champ réverbéré, les phénomènes de déphasage sont plus complexes, car les réflexions modifient la phase en fonction des matériaux mis en jeu et de leur mise en œuvre. Par conséquent, nous avons choisi de distribuer le signe de la partie réverbérée de la réponse impulsionnelle de manière aléatoire. Ainsi, pour chaque pas de temps de la partie réverbérée de la réponse impulsionnelle considérée, un signe arithmétique aléatoire est tiré de manière équiprobable puis affecté à la composante correspondante.

3.2.2 Génération automatique des distances entre les transducteurs d'un SAR

Lors de l'installation d'un SAR régénératif, un soin particulier est apporté à faire en sorte qu'aucune contribution issue des haut-parleurs du système ne parvienne à l'auditeur avant l'arrivée du son direct issu de la source. Le cas échéant, il pourrait se produire un phénomène de délocalisation de source particulièrement nuisible à la garantie de l'aspect naturel de l'acoustique. Dans le cas du système Carmen, c'est le fait de placer les transducteurs d'un même canal à proximité

8. Nous avons jusqu'ici considéré que l'énergie des réponses impulsionnelles, si nous voulons obtenir leur valeur absolue en pression à une constante ρc^2 près, il faut prendre la racine carrée de cette énergie.

l'un de l'autre qui permet d'éviter une action du système précédent l'arrivée du champ direct issu de la source. En effet, les positions du microphone et du haut-parleur d'un canal étant presque confondues, la figure géométrique formée par la source sur scène, le récepteur dans l'auditoire et un canal (alors appelé cellule) est un triangle. L'inégalité triangulaire impose à la distance (et donc au délai de propagation) de la source au récepteur d'être nécessairement inférieure à la somme des distances entre la source et la cellule, et entre la cellule et le récepteur. Si l'on souhaite générer l'action du système de manière réaliste à partir de réponses impulsionnelles prenant en compte la distance source-récepteur, il est nécessaire de considérer des distances entre la source, le récepteur et les différents transducteurs du système qui soient cohérentes avec le principe du système. Ces distances peuvent bien sûr être obtenues directement à partir de la connaissance de l'implantation du système dans une salle donnée, mais cela n'est possible que dans une phase déjà avancée du projet d'installation. Ces distances peuvent aussi être générées de manière pseudo-aléatoire en prenant uniquement en compte la particularité d'implantation des canaux du système qui, dans le cas du système Carmen, correspond à une proximité des haut-parleurs et des microphones d'un canal. Cette approche, bien que ne demandant *a priori* pas d'information sur le positionnement des transducteurs du système, risquerait d'aboutir à un emplacement virtuel aberrant des transducteurs du système par rapport aux dimensions de la salle. Une approche intermédiaire a donc été mise au point pour respecter les particularités d'implantation des canaux tout en conservant, vis-à-vis des dimensions de la salle, un caractère réaliste aux distances obtenues entre les transducteurs ; ceci sans demander d'informations supplémentaires que celles déjà nécessaires pour la synthèse de réponses impulsionnelles par une approche géométrique analytique. L'idée est de construire dans un premier temps une salle virtuelle dont le volume est égal à celui de la salle dans laquelle nous souhaitons générer les réponses impulsionnelles, et dont la forme et les proportions se rapprochent de celles d'une salle courante. Dans un second temps, la source est placée sur la scène de cette salle virtuelle, les récepteurs au niveau de l'auditoire et les transducteurs du système en fonction des principes d'installation du système. Les distances entre tous ces « acteurs » d'une salle active sont ensuite simplement calculées.

La salle virtuelle choisie est de type shoe-box, car c'est une forme de salle de spectacle courante. Ses dimensions sont établies à partir du volume de la salle réelle et d'observations réalisées par Haan et Fricke lors d'une étude statistique sur la géométrie des salles de concert [Haan 1992a, Haan 1992b]. Ces auteurs conclurent que dans une salle de type shoe-box, les facteurs de proportionnalité entre les valeurs moyennes de hauteur, de largeur et de profondeur sont respectivement de 1, 1,59 et 2,9. Concernant l'angle d'inclinaison moyen de l'auditoire, ils observèrent qu'il se situait entre 6° et 22° , et qu'il n'y avait pas de corrélation évidente avec les autres grandeurs géométriques de la salle. Pour des raisons de simplification de calcul, nous avons choisi de le fixer à 18° ($\pi/10$). Quant à la profondeur de la scène, du fait de la relative stabilité de l'effectif maximum et de la configuration des orchestres pouvant se produire, elle reste à peu près constante. Nous avons choisi de la fixer à 9 m. Dans cette salle virtuelle, la source est placée sur la scène à 1,5 m de hauteur et 1,5 m de l'avant-scène, comme recommandé par la norme ISO-3382-1 [ISO :3382-1 2009]. Les points de réception sont positionnés aléatoirement au niveau du parterre à 1,5 m de hauteur et à une distance de la source donnée (voir figure 3.4). Concernant les transducteurs du système, dans le cadre de la simulation du système Carmen, ceux d'un même canal sont placés à 1,1 m l'un de l'autre [Vuichard 2000]. Chaque paire ainsi constituée est alors positionnée au niveau des murs latéraux et du plafond, de manière à peu près homogène sur ces trois surfaces et en utilisant les nœuds d'une grille virtuelle, comme cela est montré sur la figure 3.5.

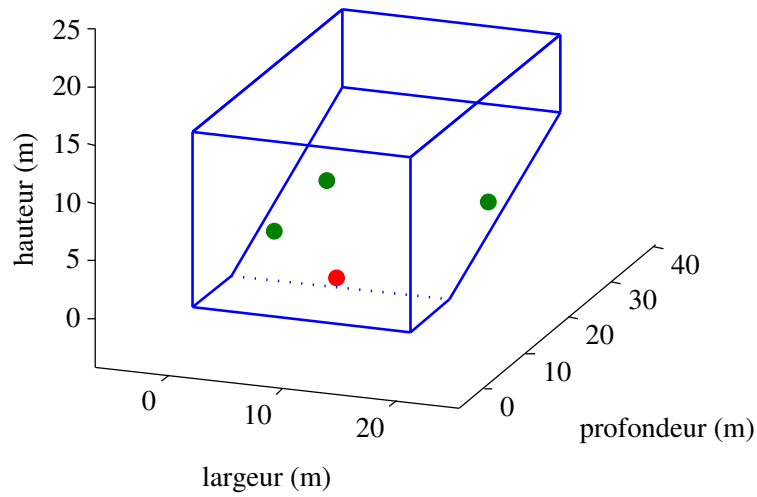


FIGURE 3.4 - Salle virtuelle d'un volume de 10000 m³ avec une source • et trois récepteurs • à 10, 15 et 16 mètres de cette source.

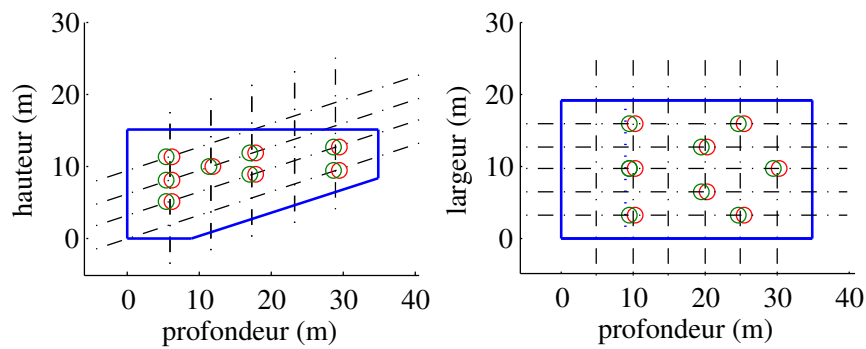


FIGURE 3.5 - Implantation virtuelle des haut-parleurs • et de microphones • d'un système Carmen à 24 canaux sur un mur latéral et le plafond de la salle virtuelle de la figure 3.4.

3.2.3 Synthèse de l'approche systémique d'un SAR régénératif avec utilisation de réponses impulsionnelles stochastiques

Pour obtenir chaque réponse impulsionnelle acoustique nécessaire à la résolution de l'équation des systèmes bouclés multivariable, nous procédons en quatre étapes résumées ci-dessous et dans le tableau 3.1.

- Une distance entre la source et le récepteur est obtenue en fonction des transducteurs mis en jeu (source sur scène et microphones du SAR, haut-parleurs du SAR et récepteur au niveau de l'auditoire) et du volume de la salle, comme décrit dans la partie 3.2.2.
- Le niveau de champ direct est calculé suivant la formule (3.9) dans laquelle est injectée la distance obtenue à l'étape précédente et le facteur de directivité du récepteur dépendant de la nature de la réponse impulsionnelle considérée (voir partie 3.2.1.1).
- Les différentes composantes énergétiques du champ réverbéré sont générées de manière stochastique en prenant en compte le volume de la salle, la surface totale de ces parois, la distance source-récepteur et la directivité des récepteurs, selon l'expression (3.25)
- Une réponse impulsionnelle en pression est obtenue en prenant la racine carrée des valeurs d'énergie du champ direct et du champ réverbéré, puis un signe aléatoire est ajouté à ce dernier.

Une fois ces réponses impulsionnelles acoustiques générées, elles sont transposées dans le domaine des fréquences par transformée de Fourier. Les fonctions de réponse en fréquence H_{hm} correspondant aux réponses impulsionnelles faisant intervenir deux transducteurs du SAR sont « injectées » dans l'algorithme d'égalisation automatique décrit au sous-chapitre 2.4.2 afin d'obtenir les fonctions de réponse en fréquences G_{mh} de la boucle directe de chaque transducteur du système (traitement électronique d'un SAR).

La fonction de réponse en fréquence d'un transfert dans la salle (entre source et récepteur dans l'auditoire) avec SAR est calculée à partir de l'expression des systèmes bouclés multivariable, car toutes les fonctions de réponse en fréquence nécessaires à ce calcul sont alors connues. La réponse impulsionnelle active est finalement obtenue par transformée de Fourier inverse.

	terme passif*	action du système			
Réponse impulsionnelle	h_{sr}	h_{hr}	h_{sm}	$h_{h_i m_j} \ i \neq j$	$h_{h_i m_i}$
Source	sur scène	haut-parleur SAR	sur scène	haut-parleur SAR	haut-parleur SAR
Récepteur	auditoire Omnidirect.	auditoire Omnidirect.	microphone SAR Bidirect.	microphone SAR Bidirect.	microphone SAR Bidirect.
Distance (r) source- récepteur	connue	connue ou générée automatiquement à partir d'une salle type et connaissant le volume V de la salle			
Champ direct (pression) pour $t = r/c$	$\sqrt{\frac{r_{ref}^2}{r^2}} e^{-m(r-r_{ref})}$		$\sqrt{D_r \frac{r_{ref}^2}{r^2}} e^{-m(r-r_{ref})}$		0
Champ réverbéré (pression) pour $t > r/c$	$\mathfrak{S} \sqrt{\frac{r_{ref}^2 e^{m r_{ref}} e^{-m c t}}{c^2 t^2}} \sum_{i=1}^{N(t)} (1 - \bar{\alpha})^{n_i(t)}$		$\mathfrak{S} \sqrt{\frac{r_{ref}^2 e^{m r_{ref}} e^{-m c t}}{c^2 t^2}} \sum_{i=1}^{N(t)} D_{ri} (1 - \bar{\alpha})^{n_i(t)}$		

Tableau 3.1 - Synthèse de la construction, à partir de l'approche stochastique de l'acoustique géométrique, des réponses impulsionnelles nécessaires à une approche systémique d'un SAR (appliquée au système Carmen).

* la réponse impulsionnelle source-récepteur passive peut éventuellement être issue de la mesure ou d'une simulation numérique.

$\bar{\alpha}$: coefficient d'absorption moyen des matériaux de la salle.

m : coefficient d'absorption de l'air

r_{ref} : distance de référence

D_r/D_{ri} : pondération aléatoire fonction de la directivité du récepteur ; pour un récepteur bidirectionnel $D_r = \cos(\arccos(\mathfrak{U}[-1;1]))^2$ avec $\mathfrak{U}[-1;1]$ un tirage aléatoire équiprobable entre -1 et 1.

$\mathfrak{S}$: signe aléatoire (-1 ou 1).

$N(t)$: nombre aléatoire tiré suivant une loi de Poisson de paramètre $\bar{N}(t) = \frac{4\pi c^3 t^2 \delta t}{V}$; avec V le volume de la salle.

$n_i(t)$: nombre aléatoire tiré suivant une loi de Poisson tronquée en zéro de paramètre $\bar{n}(t) = \frac{S c t}{4V}$; avec S la surface des parois de la salle.

3.3 Confrontation des modèles théoriques proposés à la mesure et à l'approche systémique de l'action d'un SAR basée sur des simulations numériques

Dans la suite de ce chapitre, nous proposons une mise à l'épreuve et une analyse de la capacité des modèles décrits précédemment à donner des résultats acceptables. Par résultats, nous entendons la prévision de l'effet d'un SAR régénératif sur l'évolution des durées de réverbération précoce et tardive, de la force sonore, de la clarté, de la définition et du temps central. Pour chaque indice nous avons considéré leur moyenne aux bandes d'octaves centrées en 500 Hz et 1 kHz, car, en acoustique des salles, il est usuel de travailler sur cette quantité pour traduire une impression globale de l'effet de salle.

Le travail sur la prévision des évolutions de ces indices plutôt que directement sur leurs valeurs en actif, est guidé par la volonté de minimiser l'influence de la salle, de ne s'intéresser le plus possible qu'à l'effet produit par le SAR.

Par évolution, nous entendons, pour la durée de réverbération et la durée de réverbération précoce, une augmentation relative due au SAR exprimée en pourcentage, et pour les autres indices une simple différence entre leurs valeurs sans et avec SAR. Ceci sous-entend qu'il nous faut, pour les cas de référence comme pour les approches théoriques, disposer de ces indices avec et sans système. Pour les cas de référence, ceux-ci sont, bien sûr, obtenus à partir des réponses impulsionnelles mesurées (ou simulées) avec et sans système. Concernant les approches théoriques, l'équation (3.6) issue de l'approche énergétique est une fonction de gain en fonction du temps, devant être multipliée par une réponse impulsionnelle passive pour obtenir une réponse impulsionnelle active. L'approche systémique basée sur des réponses impulsionnelles stochastiques telle que présentée en 3.2 donne, quant à elle, une quantité d'énergie évoluant avec le temps devant être additionnée avec une réponse impulsionnelle passive afin d'obtenir une réponse impulsionnelle active. Le choix de telles formulations a été fait pour, là encore, se concentrer le plus possible sur l'action du SAR en diminuant l'influence de la salle. De plus, cela permet d'utiliser n'importe quelle réponse impulsionnelle passive et notamment, si l'on en dispose, celles issues de la mesure ou de la simulation numérique afin d'augmenter, *a priori*, la validité de la réponse impulsionnelle active, réponse impulsionnelle devenant alors semi-théorique. Si l'on ne dispose pas d'une réponse impulsionnelle passive « exacte », il est préférable et logique d'utiliser une réponse impulsionnelle passive issue de la même approche théorique que celle sur laquelle se base l'action théorique du système. À savoir, la théorie révisée de *Barron et Lee* (voir annexe A) pour l'approche énergétique d'un SAR, et l'approche stochastique de l'acoustique géométrique (décrite en 3.2) pour l'approche systémique d'un SAR basée sur des réponses impulsionnelles stochastiques. Comme nous effectuons ici une étude de validation, et que nous disposons des réponses impulsionnelles passives « exactes », nous avons choisi de tester, si leur utilisation, comparée à celle de réponses impulsionnelles passives théoriques, permettait effectivement un gain sur la prévision de l'évolution des indices acoustiques par les modèles théoriques. Les paramètres d'entrée des modèles prévisionnels proposés précédemment ont été directement calculés ou mesurés sur les salles de références. Pour l'approche énergétique, il ne s'agit que de la durée de réverbération sans système, de la distance source-récepteur, du retard moyen et du GMBO par canal du SAR, et du nombre total de canaux du SAR. Pour l'approche systémique basée sur des réponses impulsionnelles stochastiques, en plus de ces données, il nous faut connaître la surface totale des parois de la salle et son volume. Pour cette approche, les emplacements des différents transducteurs du SAR peuvent aussi être nécessaires dans le cas où l'on ne souhaite pas utiliser la génération automatique des distances entre ceux-ci, la source et le récepteur, telle que décrite

en 3.2.2 ; ceci afin de gagner, là encore, *a priori*, en précision. Le tableau 3.2 résume les différentes approches théoriques ou semi-théoriques que nous nous proposons d'éprouver ici.

Méthode	Réponse impulsionnelle passive	Action du SAR
Ref	Mesure/Simulations numériques (Icare)	Mesure/Approche systémique d'un SAR basée sur des simulations numériques (Icare)
Energ	Théorie révisée de <i>Barron et Lee</i> (*)	Approche énergétique : fonction de gain (équation (3.6)) (*)
Stoch	Approche stochastique de l'acoustique géométrique (**)	Approche systémique d'un SAR basée sur des réponses impulsionnelles stochastiques avec génération automatique des distances entre les transducteurs du SAR, la source et le récepteur (**)
Stoch2	Approche stochastique de l'acoustique géométrique (**)	Approche systémique d'un SAR basée sur des réponses impulsionnelles stochastiques avec utilisation des distances exactes entre le SAR, la source et le récepteur (***)
Energ + Ri exacte	Mesure/Simulations numériques (Icare) (****)	Approche énergétique : fonction de gain (équation (3.6)) (*)
Stoch + Ri exacte	Mesure/Simulations numériques (Icare) (****)	Approche systémique d'un SAR basée sur des réponses impulsionnelles stochastiques avec génération automatique des distances entre le SAR, la source et le récepteur (**)
Stoch2 + Ri exacte	Mesure/Simulations numériques (Icare) (****)	Approche systémique d'un SAR basée sur des réponses impulsionnelles stochastiques avec utilisation des distances exactes entre les transducteurs du SAR, la source et le récepteur (***)

Tableau 3.2 - Les différentes méthodes théoriques ou semi-théoriques proposées pour obtenir les réponses impulsionnelles de salles avec et sans SAR. Pour la construction des réponses impulsionnelles passives comme pour l'effet du système, la prise en compte plus ou moins poussée des phénomènes acoustiques est indiquée par le nombre d'astérisques entre parenthèses ; celle-ci étant présumée aller de pair avec une augmentation de la capacité des méthodes théoriques à prévoir une augmentation correcte des indices acoustique due au SAR.

3.3.1 Présentation des salles tests

Dans le cas des salles simples (non couplées), les approches théoriques présentées et développées précédemment seront éprouvées dans la suite de ce chapitre avec une situation réelle (mesure), et cinq situations issues de l'approche systémique d'un SAR basée sur des simulations numériques, présentée au chapitre 2. Concernant les salles virtuelles, nous avons privilégié la modélisation de situations réalistes plutôt que celle de cas d'études purement théoriques comme celui d'une cavité de géométrie simple dont les caractéristiques acoustiques des surfaces seraient uniformes. Ainsi, trois

de ces cinq salles virtuelles sont fortement inspirées de salles réelles équipées du SAR Carmen⁹, et les deux restantes sont chacune l'adaptation d'une salle de concert décrite dans la littérature. Le volume et les propriétés acoustiques des parois de ces deux dernières salles virtuelles ont été modifiés par rapport à la réalité afin de les faire grossièrement correspondre aux caractéristiques géométriques et acoustiques des autres salles de notre panel d'étude. Comme cela peut être observé dans le tableau 3.3, leurs durées de réverbération ont ainsi été ramenées à 1 s aux fréquences moyennes, et leur volume a été abaissé à 10000 m³.

Les six salles ont des formes globales courantes en architecture des salles de spectacles ; trois d'entre elles sont de forme « shoe-box » (boite à chaussure, rectangulaire), deux de forme « fan-shape » (éventail) et la dernière est en arène. Elles respectent toutes certains principes architecturaux et scénographiques généraux éventuellement en lien avec une certaine qualité acoustique. Par exemple, l'inclinaison des gradins a été étudiée afin d'assurer, pour chaque position de l'auditoire, une visibilité suffisante de la scène ce qui, d'un point de vue acoustique, entraîne l'audibilité directe d'une source située sur cette même scène. Un soin particulier a aussi été apporté à la suppression de tout écho franc ou flottant, en affectant aux surfaces éventuellement responsables de cet artéfact des propriétés en absorption ou en diffusion élevées. Ainsi, nous avons ici choisi des salles relativement homogènes entre elles et typiques de la majorité de celles dans lesquelles un SAR régénératif a, ou pourrait, être installé.

La position et les caractéristiques des récepteurs et de la source ont été choisies pour respecter les directives de la norme de mesurage des indices acoustiques [ISO :3382-1 2009]. Ainsi, la source est omnidirectionnelle et, étant donné que nous ne nous intéressons pas ici aux indices d'efficacité latérale, tous les récepteurs au niveau de l'auditoire le sont aussi. Dans chaque salle, nous avons défini une position pour la source sur scène à 1,5 m de l'avant-scène et à 1,5 m de hauteur. Dans les salles virtuelles, nous avons placé 30 points de réceptions à 1,5 m du sol ; dans la salle réelle, une mesure s'étant avérée inexploitable, nous n'avons gardé que 29 points de réceptions. Chaque salle étant symétrique, les points de réception n'ont été choisis que sur une demi-salle.

Puisque la salle mesurée était équipée du système Carmen et que, dans le cadre de cette thèse, nous disposons d'une accessibilité privilégiée aux détails technologiques de ce système, nous avons focalisé l'étude qui va suivre sur celui-ci. Pour les salles virtuelles inspirées de salles existantes équipées de ce SAR, nous avons reproduit l'emplacement et l'orientation des transducteurs. Pour les autres salles virtuelles, le nombre de canaux du système simulé a été choisi pour rester cohérent avec celui d'installations réalisées dans des salles du même gabarit. Les caractéristiques propres au système Carmen, de positionnement relatif du microphone et du haut-parleur de chacun de ces canaux, ont été respectées (voir partie chapitre 2.4.1), de même qu'une répartition à peu près homogène de ceux-ci sur les murs latéraux et le plafond. Concernant les niveaux de réglage du SAR pour chaque salle virtuelle, le GMBO entré en paramètre de l'algorithme égalisation automatique fut fixé à -18 dB. Comme montrées dans le tableau 3.4, les valeurs effectives de gain sur les bandes d'octaves centrées à 500 Hz ou 1 kHz, relevées après l'exécution de cet algorithme, sont proches de la valeur cible à 0,5 dB près¹⁰. Le retard électronique de chaque canal fut fixé à 20 ms. Dans la pratique (de manière empirique) de tels réglages du système, rapportés au nombre de canaux du système (entre 24 et 30) et au volume de la salle, permettent généralement d'atteindre une durée de réverbération égale, ou légèrement inférieure, à deux fois la durée de réverbération sans système ; une augmentation artificielle de durée de réverbération d'un rapport supérieur n'étant généralement pas souhaitable, car elle pourrait entraîner un trop fort décalage entre l'acoustique et le visuel de la salle.

9. L'une d'elles est d'ailleurs une reproduction simplifiée de la salle dans laquelle nous avons effectué les mesures.

10. La déviation entre la valeur cible et la valeur effective est expliquée au chapitre 2.4.2.

	La Rampe* -Mesure-	La Rampe*	Waterside Theatre*	Prince Pierre*	Radiohuset Studio 1	Kammer- musiksaal
Abréviation	LR-M	LR	AY	MO	CO	BE
Forme	shoe-box	shoe-box	shoe-box	fanshape	fanshape	arène
Volume (m ³)	9542	9542	10263	8722	10800	11276
Surface (m ²)	4096	3340	5117	3388	4075	4562
Nombre de sièges	700	700	1200	600	1050	1250
Tr ₀ (s) (500 Hz-1 kHz)	0,94	1,03	0,98	1,11	1,03	1,01

Tableau 3.3 - Les principales caractéristiques acoustiques, architecturales et géométriques des salles virtuelles et de la salle mesurée.

L'astérisque indique une salle inspirée d'une salle réelle ayant fait l'objet d'une installation du SAR Carmen. Le volume inclut celui de l'espace de scène. Le nombre de sièges est estimé par division de l'aire de la surface d'auditoire par 0,6 m² (cette surface est à peu près celle occupée au sol par un siège).

Nous avons ainsi choisi, pour les salles virtuelles, de ne simuler qu'une seule configuration du SAR par salle, celle correspondant, *a priori*, à l'effet maximum qui peut être recherché sans utilisation de filtres électroniques variant dans le temps (ceux-ci n'étant pas pris en compte dans nos modèles théoriques et leur utilisation demandant de mettre au point de nouveaux indices acoustiques : voir partie 1.2.2.3). Pour la salle réelle, lors de la mesure, seuls les retards électroniques du système ont pu être modifiés et fixés à 20 ms. La valeur du GMBO était, quant à elle, celle d'une configuration préréglée.

Que ce soit pour l'obtention des réponses impulsionnelles au niveau de l'auditoire avec et sans utilisation du SAR, ou pour celle des fonctions de réponse en fréquence nécessaires au calcul du GMBO du SAR, les mesures dans la salle réelle ont été réalisées par la méthode des séquences pseudo-aléatoires (MLS) [Rife 1989]. Le calcul du GMBO de chaque canal a été fait à partir du produit des fonctions de réponse en fréquence de la boucle directe et de la boucle de rétroaction. La fonction de réponse en fréquence de la boucle directe comprenant l'unité électronique de traitement du signal a été mesurée en injectant le signal de mesure au niveau de la sortie du microphone et en récupérant le signal de sortie au niveau de l'entrée du haut-parleur. La fonction de réponse en fréquence de la boucle de rétroaction comprenant le transfert acoustique entre les deux transducteurs du canal a été mesurée en injectant le signal de mesure au niveau de l'entrée du haut-parleur et en récupérant le signal de sortie au niveau de la sortie du microphone. Lors de cette mesure, les autres canaux du SAR étaient en fonctionnement afin de mesurer un GMBO réel (en prenant en compte le reste du SAR) et cohérent avec celui rentré en paramètre de la procédure d'égalisation automatique des simulations numériques.

		LR-M	LR	AY	MO	CO	BE
Nombre de canaux du système		24	24	30	26	28	28
retard électronique fixé sur chaque canal du SAR (ms)		20	20	20	20	20	20
GBMO	500 Hz	-18,16	-17,57	-17,68	-17,68	-17,50	-17,66
par canal du SAR (dB)	1 kHz	-20,75	-17,99	-17,88	-17,91	-17,94	-17,70

Tableau 3.4 - Les principales caractéristiques du SAR installé (mesure) ou simulé.

La salle réelle et la salle virtuelle « La Rampe »

La salle de « La Rampe » est une salle de forme dite en « shoe-box ». Elle fut construite pour être polyvalente, mais bien qu'elle contienne quelques éléments constructifs mobiles, la qualité acoustique ne peut y varier que dans des proportions réduites. Du fait d'une durée de réverbération initialement faible, il fut décidé d'y installer un SAR Carmen pour y permettre, entre autres, la diffusion de musique orchestrale dans des conditions acoustiques satisfaisantes.

Contrairement à la salle virtuelle (figure 2.13) telle qu'elle fut modélisée, la salle réelle (figure 3.6) incluait, lors de la campagne de mesure, un cadre de scène et trois pendillons placés de chaque côté de cette même scène. Or, la surface et la quantité d'absorption ainsi rajoutées influent sur les conditions acoustiques, expliquant, en même temps que les inévitables incertitudes liées à une modélisation, les différences de durée de réverbération observées entre les deux salles (1,04 s pour la salle virtuelle et 0,94 s pour la salle réelle). D'un point de vue acoustique, il est donc plus convenable de dissocier ces deux salles plutôt que considérer que l'une est reproduction de l'autre. Mesures et simulations numériques des réponse impulsionnelles dans ces deux salles ne peuvent donc pas être directement comparées.

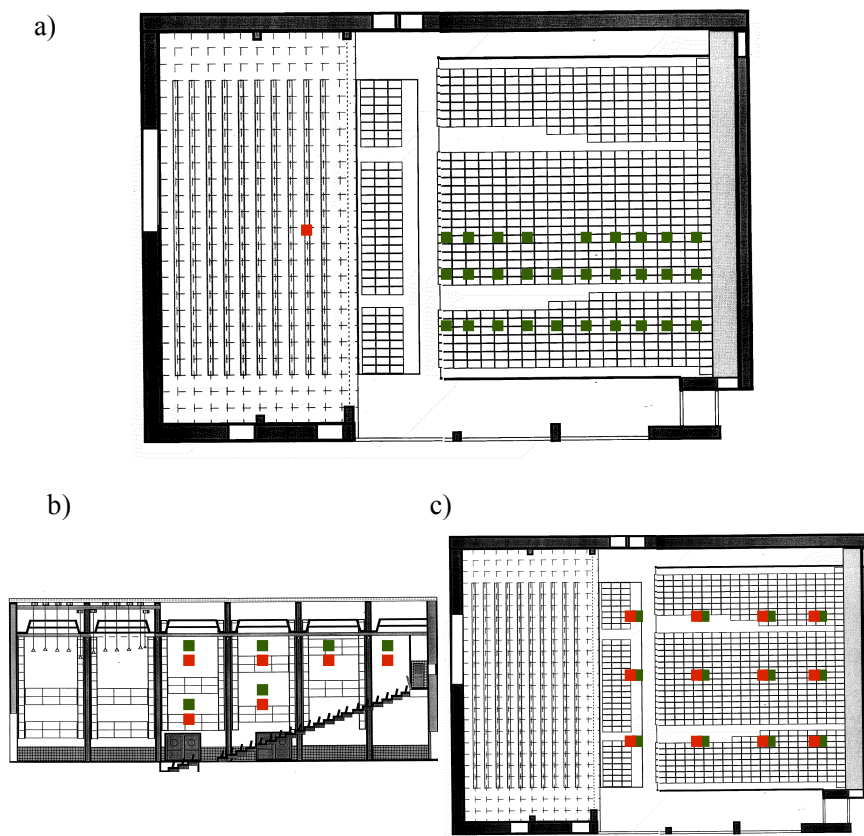


FIGURE 3.6 - Salle réelle de « La Rampe ». a) : positions de la source ■ et des 29 points de réception au niveau de l'auditoire ■. Positions des haut-parleurs ■ et des microphones ■ du SAR sur le plafond b) et sur le mur latéral côté cour c) (les transducteurs des canaux du SAR positionnés sur le mur latéral côté jardin sont placés à l'identique). Plan et coupe tirés de [CSTB 2008].

La salle virtuelle « Waterside Theatre »

La salle réelle du « Waterside Theatre » est une salle polyvalente en « shoe-box ». Contrairement à la salle « La Rampe », elle fut destinée, dès sa construction, à accueillir un SAR régénératif [Schmich 2011]. Elle possède aussi quelques éléments architecturaux modifiables. Bien qu'ils jouent aussi un rôle important sur les conditions d'écoute, certains sont davantage destinés à adapter la scénographie avec, par exemple, une fosse d'orchestre et une arrière-scène pouvant s'ouvrir. D'autres, comme le réflecteur convexe mobile au-dessus de l'avant-scène, sont plus spécifiquement dédiées à la modification des caractéristiques acoustiques. Cette salle comporte de nombreux balcons, mais du fait d'une ouverture suffisante sur le volume principal des espaces situés sous ceux-ci, on ne peut pas considérer qu'elle contient des espaces couplés.

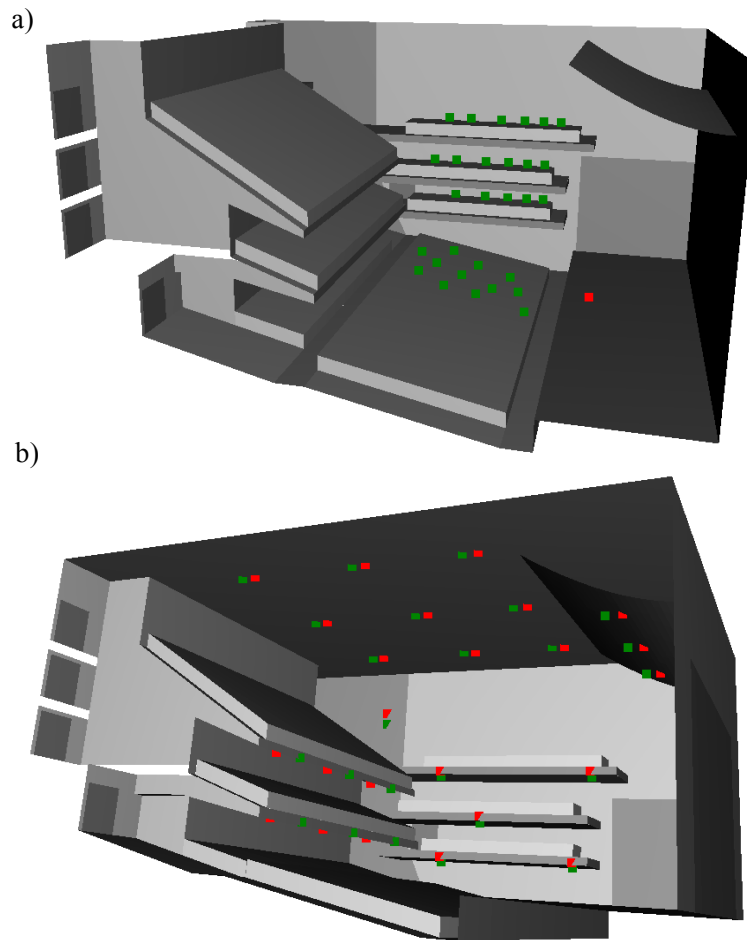


FIGURE 3.7 - Salle virtuelle inspirée par le « Waterside Theatre ». a) : positions de la source ■ et des 30 points de réception au niveau de l'auditoire ■. b) : positions des haut-parleurs ■ et des microphones ■ du SAR sur le plafond et sur le mur latéral côté jardin (les transducteurs des canaux du SAR positionnés sur le mur latéral côté cour sont placés à l'identique).

La salle virtuelle « Waterside Theatre » (figure 3.7) est une simplification de sa version réelle, en particulier au niveau du dessin des balcons et par l'utilisation d'une symétrie générale. Elle correspond à une configuration scénographique de la salle réelle pour musique orchestrale ; la fosse d'orchestre est fermée, de même que l'arrière-scène, et le réflecteur au-dessus de la scène est en

position. Bien que, comme nous l'avons précisé au paragraphe précédent cette salle ne comporte théoriquement pas d'espaces couplés, par précautions, nous n'avons cependant choisi des points de réception qu'au niveau du premier parterre ou sous les balcons latéraux qui sont très peu profonds. Les échos flottants ont été évités en affectant aux parois éventuellement responsables de ce phénomène un caractère diffusant, comme cela est d'ailleurs le cas dans la salle réelle.

La salle virtuelle « Pierre Prince »

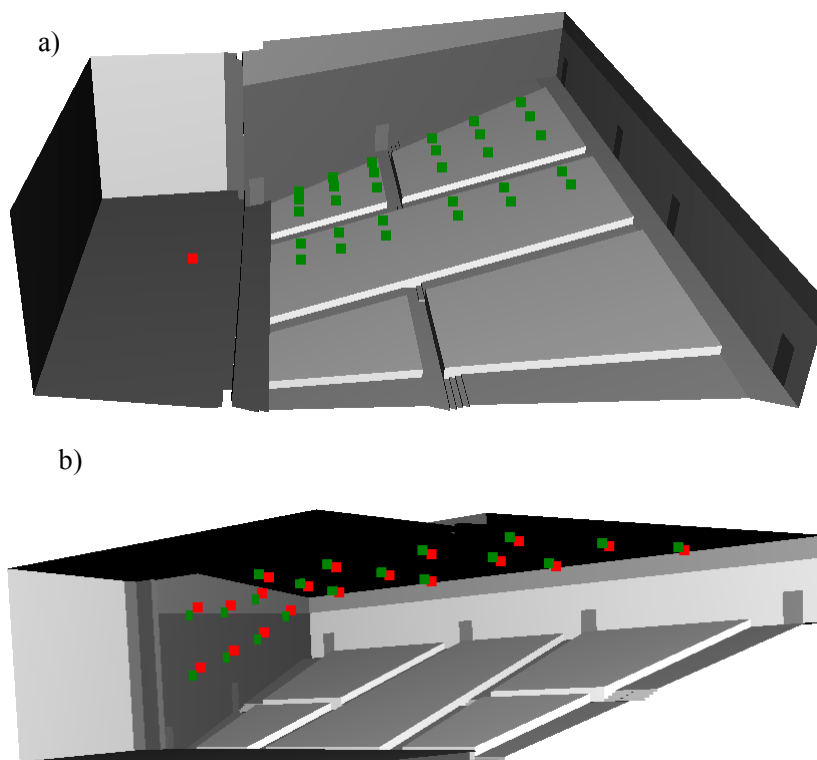


FIGURE 3.8 - Salle virtuelle inspirée par la salle « Prince Pierre ». a) : positions de la source ■ et des points 30 de réception au niveau de l'auditoire ■. b) : positions des haut-parleurs ■ et des microphones ■ du SAR sur le plafond et sur le mur latéral côté cour (les transducteurs des canaux du SAR positionnés sur le mur latéral côté jardin sont placés à l'identique).

Comme pour la salle décrite précédente, la salle originale « Prince Pierre » intégra, dès sa conception, le SAR Carmen. Sa forme est particulière puisque sa partie haute est pentagonale, alors qu'au niveau du sol son plan est en « fanshape » (éventail) [CSTB 2008]. Pour la salle virtuelle correspondante et utilisée ici, nous n'avons conservé que le plan au sol en « fanshape » que nous avons extrapolé sur la partie haute. Elle est ainsi de forme globale plus courante que la salle réelle.

La salle virtuelle « Radiohuset, Studio 1 »

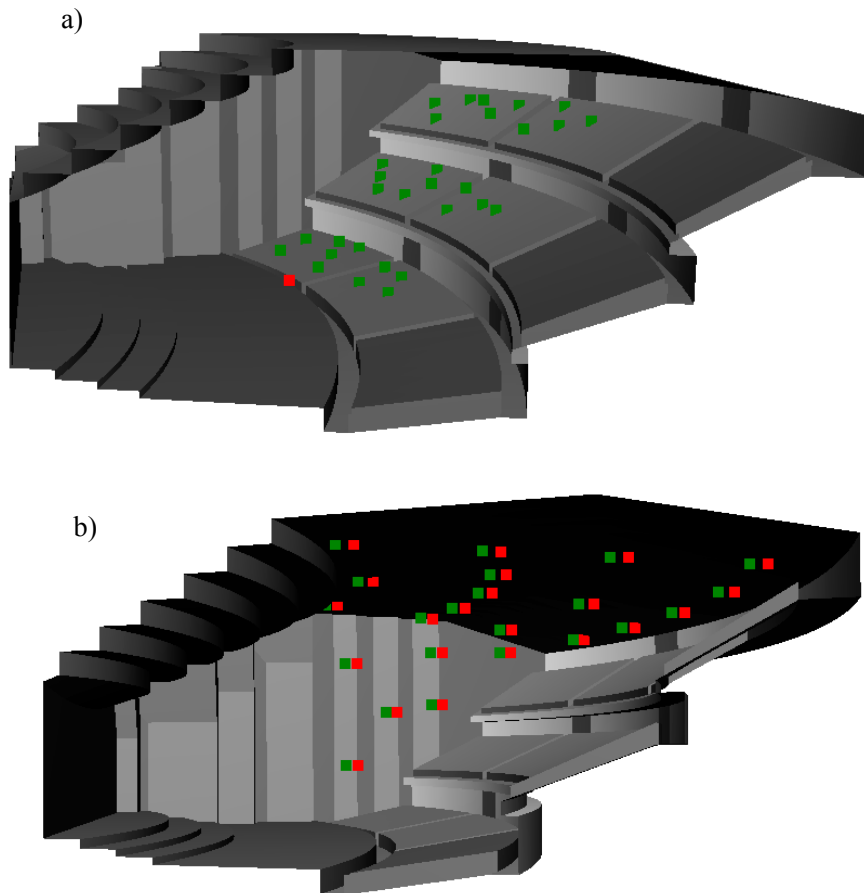


FIGURE 3.9 - Salle virtuelle inspirée par la salle « Radiohuset, Studio 1 ». a) : positions de la source ■ et des points 30 de réception au niveau de l'auditoire ■. b) : positions des haut-parleurs ■ et des microphones ■ du SAR sur le plafond et sur le mur latéral côté cour (les transducteurs des canaux du SAR positionnés sur le mur latéral côté jardin sont placés à l'identique).

La salle « Radiohuset, studio 1 » est une salle de concert située à Copenhague et résidence de l'orchestre symphonique de la radio danoise. Elle est en « fanshape » [Beranek 2002], mais comporte des murs latéraux dont la géométrie permet de pallier le manque de contributions précoces au niveau de l'auditoire généralement lié à ce type de salle (voir figure 3.9). La salle virtuelle inspirée de cette salle réelle, conserve cette particularité architecturale. Le volume a lui été réduit par une modification importante de la forme du plafond afin d'obtenir une salle ayant un gabarit plus proche des autres salles de cette étude. Les propriétés acoustiques des matériaux ont aussi dû être modifiées pour atteindre une durée de réverbération de 1 s.

La salle virtuelle de « Kammermusiksaal »

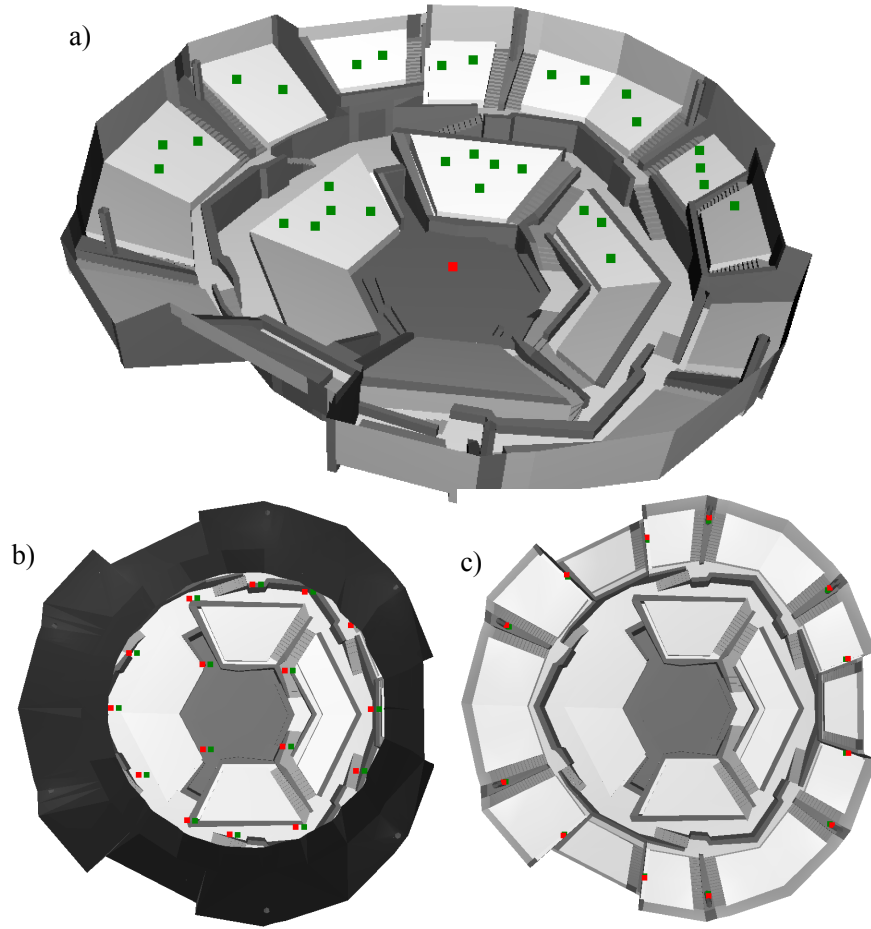


FIGURE 3.10 - Salle virtuelle inspirée par la salle « Kammermusiksaal ». a) : positions de la source ■ et des 30 points de réception au niveau de l'auditoire ■. b) et c) : positions des haut-parleurs ■ et des microphones ■ du SAR sur le plafond et sur le mur du pourtour.

La salle virtuelle de « Kammermusiksaal » est une salle de concert située à Berlin plutôt dédiée à la musique de chambre. Sa forme d'arène avec une scène placée au centre de l'auditoire permet d'assurer un maximum de proximité entre l'orchestre et les auditeurs [Beraneck 2002]. Un problème potentiellement rencontré dans ce type de salle est un manque d'enveloppement sonore dû à l'absence de paroi réfléchissante à proximité latérale des auditeurs. Ce défaut étant ici corrigé par une disposition des sièges en « vignoble » permettant de placer des surfaces réfléchissantes latérales proche de chaque siège. Du fait d'une hauteur sous plafond importante au niveau de la scène, cette salle est équipée de surfaces réfléchissantes dédiées à assurer un retour suffisant du son produit par les musiciens vers eux même. Comme pour la salle précédente, les propriétés acoustiques des matériaux ont été changées lors de la modélisation de la salle virtuelle. La raison en est, là aussi qu'il nous a fallu réduire la durée de réverbération initiale.

3.3.2 Présentation des résultats

Les résultats sur les confrontations entre les évolutions des indices acoustiques donnés par les approches théoriques décrites dans le tableau 3.2 et ceux obtenus par les approches de référence (mesure ou simulations numériques) vont être exposés et discutés dans ce qui va suivre. Ceux concernant la durée de réverbération, la durée de réverbération précoce et la force sonore seront traités séparément. Ceux concernant la clarté, la définition et le temps central seront regroupés, car ils traduisent une impression subjective commune, à savoir la précision, et qu’ils amènent à des conclusions semblables.

Nous présenterons ces résultats sous la forme d’une erreur de prévision, c’est-à-dire d’une différence entre les valeurs données par l’approche théorique considérée et l’approche de référence. Une erreur positive indiquant alors une surestimation de l’approche théorique et, à l’inverse, une erreur négative indiquant une sous-estimation de l’approche théorique.

Pour chaque indice, nous avons défini une marge d’erreur sur la prévision pouvant être considérée comme acceptable. Pour la force sonore, la clarté, la définition et le temps central, le seuil de discrimination constitue une marge logique, mais aussi raisonnable. Pour la durée de réverbération et la durée de réverbération précoce, le seuil de discrimination se situe à 5% ce qui, compte tenu des salles étudiées, correspond à une valeur de temps très faible, à peine mesurable (entre 0,07 s et 0,05 s). Nous avons donc choisi une marge d’erreur pour ces indices de réverbérance plus élevée, soit 10%.

	Abréviation	Seuil de discrimination [ISO :3382-1 2009]	Limite acceptable sur la prévision
Durée de réverbération (mesurée sur 20 dB de décroissance)	Tr (s)	5%	10%
Durée de réverbération précoce	EDT (s)	5%	10%
Force sonore	$\mathcal{G}$ (dB)	1 dB	1 dB
Clarté	C80 (dB)	1 dB	1 dB
Définition	D50 (u)	0,05	0,05
Temps central	Ts (ms)	10 ms	10 ms

Tableau 3.5 - Les indices acoustiques objectifs pris en compte dans l’étude de validation des modèles théoriques de l’action d’un SAR dans une salle simple.

Nous proposons ici deux types d’analyse : soit globale par moyennes sur l’ensemble de la salle, soit point par point de sorte à mettre en évidence d’autres caractéristiques, comme la dispersion à l’intérieur d’une même salle. Les résultats de la première sont résumés sous forme de tableaux dans lesquels apparaît pour chaque salle l’erreur moyenne de prévision sur l’ensemble des points de réception. La seconde s’appuie sur une représentation graphique de l’erreur en fonction de la distance source-récepteur, car celle-ci a souvent une influence importante sur les valeurs prises par les indices acoustiques [Barron 2005, Bradley 2005]. Afin d’éviter une lecture fastidieuse, nous avons choisi de ne faire apparaître les courbes d’erreur par point que pour une seule salle. Ce choix étant d’autant plus acceptable qu’aucune information supplémentaire n’aurait été apportée par une présentation plus exhaustive, si ce n’est que toutes les salles présentent les mêmes caractéristiques de dispersion

sur l'erreur de prévision de nos modèles.

3.3.2.1 Durée de réverbération

Si nous nous intéressons à la deuxième ligne du tableau 3.6, c'est-à-dire à l'effet du SAR tel que mesuré ou simulé, nous pouvons constater que les valeurs d'augmentation de durée de réverbération peuvent sensiblement varier d'une salle à l'autre. Ainsi, le SAR de la salle de « Waterside Theatre » permet un gain de 86% sur la durée de réverbération alors que celui-ci n'est que de 21% dans la salle mesurée. Pour cette dernière salle, le faible effet du système peut en grande partie se justifier par un petit nombre de canaux et un GMBO faible. Cependant, cette explication n'est pas suffisante pour rendre compte de l'ensemble des disparités constatées entre toutes les salles. En effet, dans la salle de « Kammermusiksaal », nous observons un effet sensiblement plus faible que dans les salles virtuelles « La Rampe » et « Pierre Prince » alors que le SAR y est constitué d'au moins deux canaux supplémentaires et que les gains moyens en boucle ouverte par canal des trois systèmes sont équivalents. Ainsi, les caractéristiques acoustiques ou géométriques des salles influent probablement de manière non négligeable sur l'augmentation de la durée de réverbération induite par le SAR. Certes, les modèles proposés incluent cet aspect, en intégrant la durée de réverbération initiale, ainsi que le volume et la surface des parois pour les approches basées sur des réponses impulsionnelles stochastiques. Néanmoins, d'après le tableau 3.6, il semble qu'aucun d'entre eux ne le fasse de manière toujours satisfaisante. Et ceci, même lorsque les réponses impulsionnelles passives « exactes » sont prises en compte. C'est donc l'effet même du SAR qui ne peut être abordé dans toutes les situations et dans des proportions acceptables, par une approche basée sur une théorie de champ diffus, qu'elle soit énergétique ou stochastique et qu'elle prenne en compte ou non les distances exactes entre les transducteurs du système.

Pour la salle mesurée, l'erreur de prévision constatée est tout de même étonnamment plus élevée que dans les autres salles, et comme nous le verrons par la suite cette remarque est valable pour presque tous les indices étudiés ici. Il se peut fortement que la raison en soit un GMBO mesuré, et donc injecté dans ces modèles, différent du GMBO effectif. En effet, afin de maximiser la dynamique de mesure de la fonction de réponse en fréquence de la boucle de rétroaction des canaux du SAR (du haut-parleur vers le microphone du même canal) en minimisant bruit de fond, nous avons utilisé la méthode MLS avec un niveau d'excitation des enceintes bien plus important que lors de leur fonctionnement normal. Or, comme le souligne *Vuichard* [Vuichard 1997], du fait de non-linéarités, une différence d'excitation du haut-parleur d'un système électroacoustique bouclé peut, à certaines fréquences, entraîner des écarts conséquents sur son gain en boucle ouverte ; et ce d'autant plus que la méthode MLS est très sensible aux non-linéarités [Kaneda 1995, Dunn 1993, Rife 1989]. *Vuichard* mesura que l'écart entre GMBO réel et mesuré pouvait ainsi atteindre jusqu'à 1,5 dB aux fréquences moyennes.

Pour les salles virtuelles, il peut être remarqué que les erreurs de prévision sont du même ordre que celles pouvant être faites par l'utilisation des formules de Sabine ou d'Eyring [Dance 1999]¹¹. Ainsi, les erreurs prévisionnelles de nos modèles peuvent être supérieures à 20% et en moyenne sur l'ensemble des salles elles sont de 10% à 15%. De plus, d'après la figure 3.11, quel que soit le modèle

11. Certes ces formules ne sont pas directement comparables à nos modèles puisque ces derniers utilisent la durée de réverbération mesurée dans la salle dans laquelle ils sont appliqués alors que les formules de Sabine et d'Eyring utilisent, par l'intermédiaire des coefficients d'absorption, des durées de réverbération mesurées dans d'autres salles (salle de réverbération normée [ISO :11654 1997]) que celle dans laquelle elles sont destinées à être appliquées. Cependant le rapprochement entre les formules de Sabine et d'Eyring avec nos modèles prévisionnels n'est pas totalement absurde puisque tous sont basés sur l'hypothèse des champs diffus.

théorique utilisé, la dispersion de ses erreurs prévisionnelles à l'intérieur d'une même salle est à peu près identique à la dispersion de la durée de réverbération initiale, et donc aussi à celle des erreurs prévisionnelles de la formule de Sabine¹². Ainsi, concernant la durée de réverbération, les modèles proposés doivent être vus comme l'équivalent de la formule de Sabine dans les salles équipées de SAR, avec les mêmes marges d'erreur potentielles que celle-ci.

Salle		LR-M	LR	AY	MO	CO	BE	Moyenne (sur $ \varepsilon\overline{\Delta} $)
$Tr_0(s)$	Ref	0,94	1,03	0,98	1,11	1,03	1,01	
$\overline{\Delta}_{Tr}(\%)$	Ref	21	65	86	62	63	49	
$\varepsilon \overline{\Delta}_{Tr}(\%)$	Energ	18	-14	-21	-6	-2	12	11
	Stoch	45	7	-5	16	-18	26	14
	Stoch2	49	9	-2	9	17	29	13
	Energ+Ri exacte	24	-17	-17	-8	-10	14	13
	Stoch+Ri exacte	46	7	1	16	18	24	13
	Stoch2+Ri exacte	44	9	4	12	18	26	14
	Moyenne (sur $ \varepsilon\overline{\Delta} $)		11	8	11	14	22	13

Tableau 3.6 - Durée de réverbération initiale; évolution de la durée de réverbération due au SAR; erreurs des modèles théoriques et semi-théoriques sur la prévision de l'évolution de durée de réverbération due au SAR par les approches théoriques (erreur moyenne comprise entre 10% et 20% ■, erreur moyenne supérieure à 20% ■). Les méthodes sont décrites dans le tableau 3.2, les salles dans le tableau 3.3. Les moyennes sont faites en écartant la salle mesurée (les mesures étant erronées comme expliqué au paragraphe 3.3.2.1), et à partir des valeurs absolues des erreurs prévisionnelles obtenues pour les autres salles. Ces moyennes sont faites soit sur l'ensemble des salles pour chaque modèle prévisionnel (moyenne des lignes), soit sur l'ensemble des modèles prévisionnels pour chaque salle (moyenne des colonnes); apparait aussi la moyenne sur l'ensemble des salles et des modèles prévisionnels.

12. Cette formule ne donnant qu'une seule valeur de durée de réverbération par salle, la dispersion de ses erreurs prévisionnelles est la même que celle de la durée de réverbération mesurée.

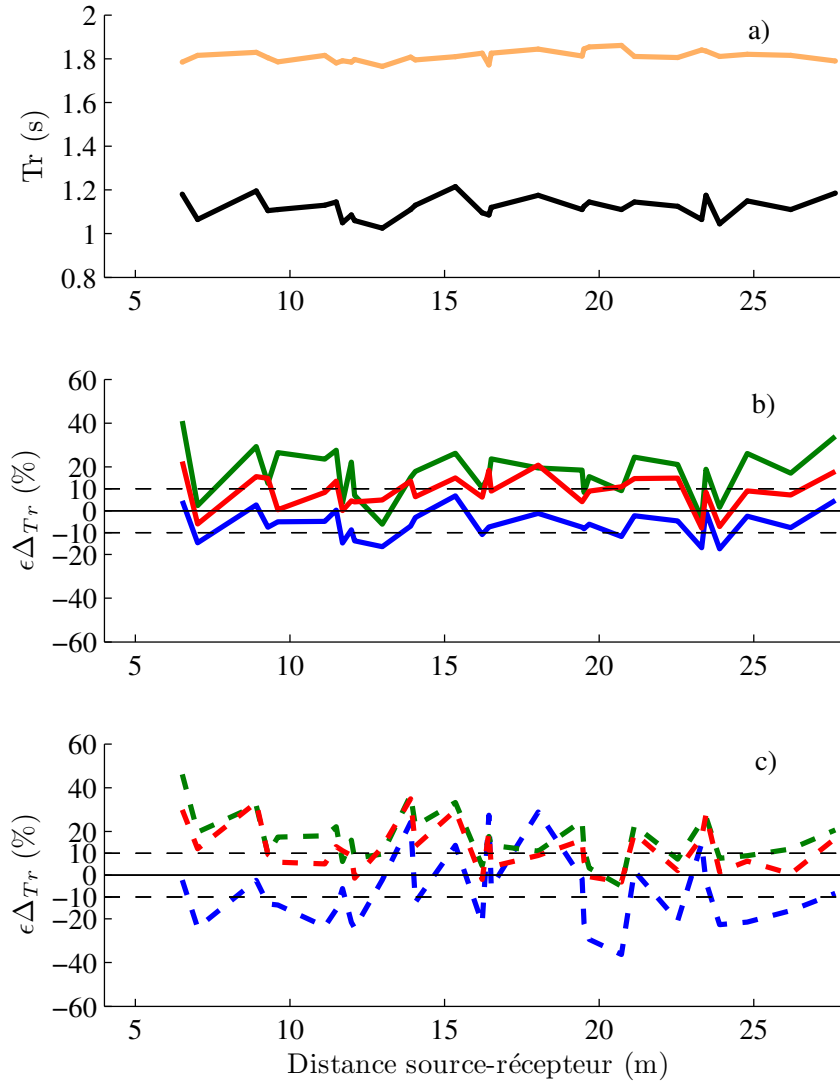


FIGURE 3.11 - Salle virtuelle « Prince Pierre » :

- a) Durée de réverbération initiale sans — et avec SAR — en fonction de la distance source-récepteur.
 b) Erreur sur l'évolution de la durée de réverbération due au SAR par les approches énergétique — et stochastique avec — ou sans — la prise en compte des distances exactes entre les canaux, et en utilisant une réponse impulsionnelle passive théorique.
 c) Erreur sur l'évolution de la durée de réverbération due au SAR par les approches énergétique -- et stochastique avec -- ou sans -- la prise en compte des distances exactes entre les canaux, et en utilisant une réponse impulsionnelle passive «réelle».

À noter que, bien que la figure a) ait un axe des ordonnées gradué en seconde et que celui des deux autres graphiques soit gradué en pourcentage, leurs échelles sont comparables, car, compte tenu d'une durée de réverbération passive de la salle d'environ 1 s, 10% d'augmentation correspond à peu près à 0,1 s.

3.3.2.2 Durée de réverbération précoce

Comme pour l'augmentation de durée de réverbération classique, l'augmentation de durée de réverbération précoce produite par le SAR ne peut s'expliquer sans prendre en compte certaines caractéristiques de la salle dans laquelle il est installé. En effet, d'après le tableau 3.7, celle-ci est, par exemple, plus importante de 23% dans la salle virtuelle de « La Rampe » que dans celle de « Kammermusiksaal », malgré quatre canaux supplémentaires pour un GMBO par canal presque identique. L'analogie entre les effets du système sur les durées de réverbération précoce et tardive ne se limite pas à cette constatation puisque ceux-ci sont globalement du même ordre de grandeur voir, dans quatre des six salles (Waterside Theatre, La Rampe, Pierre Prince et Radiohuset), identiques à quelques pourcents près. Cependant, il serait maladroit d'associer systématiquement l'augmentation produite sur la durée de réverbération classique à celle produite sur la durée de réverbération précoce, car pour deux des salles testées, celles-ci diffèrent de près de 20%. Les modèles proposés ne font, quant à eux, pas cette distinction, et leurs erreurs prévisionnelles peuvent être, selon les salles, plusieurs fois supérieures au seuil de discrimination ou à la valeur de la limite fixée comme acceptable. Toutefois, si là encore la salle mesurée est exclue, ces erreurs sont de l'ordre de grandeur de celles pouvant être faites par l'utilisation de la formule de Sabine (environ 15%).

Sur les erreurs moyennes comme sur leur dispersion à l'intérieur d'une même salle, aucune méthode ne semble être meilleure ou pire que les autres, que ce soit avec ou sans l'utilisation d'une réponse impulsionnelle « exacte ». D'après la figure 3.12, la dispersion peut dépasser les 80%. Cette valeur étant très supérieure aux erreurs moyennes compilées dans le tableau 3.7, il est nécessaire, si l'on souhaite utiliser l'un des modèles proposés, de le faire en plusieurs positions de l'auditoire. Néanmoins, cette dispersion n'est pas totalement démesurée en comparaison à la dispersion naturelle de la durée de réverbération précoce sans SAR et donc aussi en comparaison aux erreurs faites par l'utilisation de la formule de Sabine ou de la formule d'Eyring pour prévoir cet indice.

Salle		LR-M	LR	AY	MO	CO	BE	Moyenne (sur $ \varepsilon\Delta $)
EDT ₀ (s)	Ref	0,85	0,84	0,92	1,03	1,06	0,93	
$\overline{\Delta}_{EDT}$ (%)	Ref	25	86	81	68	60	63	
$\overline{\varepsilon\Delta}_{EDT}$ (%)	Energ	14	-34	-15	-12	1	-2	13
	Stoch	36	-23	-9	-1	14	3	10
	Stoch2	40	22	6	-12	10	3	11
	Energ+Ri exacte	13	-23	-17	-5	-4	1	10
	Stoch+Ri exacte	30	16	4	18	-19	20	15
	Stoch2+Ri exacte	18	8	11	-5	-13	15	10
	Moyenne (sur $ \varepsilon\Delta $)		21	10	9	10	7	12

Tableau 3.7 - Durée de réverbération précoce initiale ; évolution de la durée de réverbération précoce due au SAR ; erreurs des modèles théoriques et semi-théoriques sur la prévision de l'évolution de durée de réverbération précoce due au SAR (erreur moyenne comprise entre 10% et 20% ■, erreur moyenne supérieure à 20% ■). Les méthodes sont décrites dans le tableau 3.2, les salles dans le tableau 3.3. Les moyennes sont faites en écartant la salle mesurée (les mesures étant erronées comme expliqué au paragraphe 3.3.2.1), et à partir des valeurs absolues des erreurs prévisionnelles obtenues pour les autres salles. Ces moyennes sont faites soit sur l'ensemble des salles pour chaque modèle prévisionnel (moyenne des lignes), soit sur l'ensemble des modèles prévisionnels pour chaque salle (moyenne des colonnes) ; apparait aussi la moyenne sur l'ensemble des salles et des modèles prévisionnels.

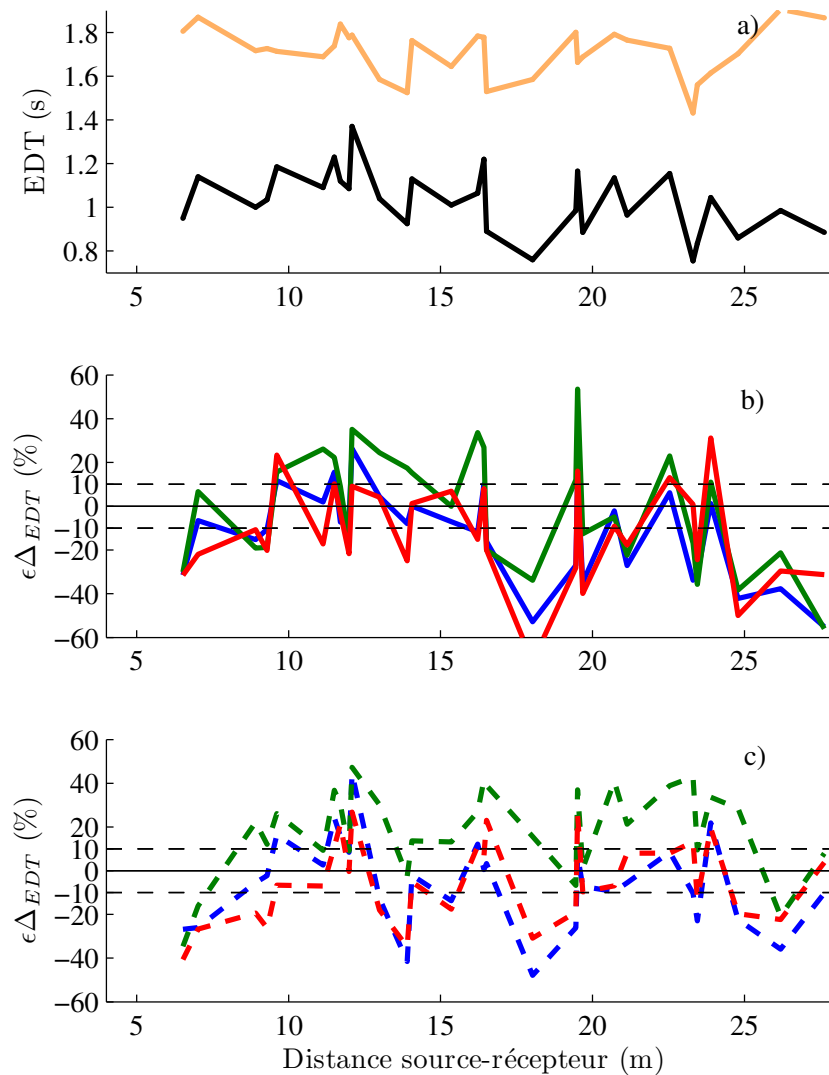


FIGURE 3.12 - Salle virtuelle « Prince Pierre » :

a) Durée de réverbération précoce initiale — et avec SAR — en fonction de la distance source-récepteur.

b) Erreur sur l'évolution de la durée de réverbération précoce due au SAR par les approches énergétique — et stochastique avec — ou sans — la prise en compte des distances exactes, et en utilisant une réponse impulsionnelle passive théorique.

c) Erreur sur l'évolution de la durée de réverbération précoce due au SAR par les approches énergétique - - et stochastique avec - - ou sans - - la prise en compte des distances exactes, et en utilisant une réponse impulsionnelle passive «réelle».

À noter que, bien que la figure a) ait un axe des ordonnées gradué en seconde et que celui des deux autres graphiques soit gradué en pourcentage, leurs échelles sont comparables, car compte tenu d'une durée de réverbération précoce passive de la salle d'environ 1 s, 10% d'augmentation correspond à peu près à 0,1 s.

3.3.2.3 Force sonore

Les valeurs minimale et maximale d'augmentation moyenne de force sonore produite par le SAR dans les salles simulées sont respectivement de 1 dB et 1,5 dB. D'un point de vue subjectif, ces valeurs sont faibles et très proches l'une de l'autre. L'effet du système est donc tout juste audible et peu différentiable entre ces salles. Pour la salle mesurée, cet effet est même inférieur au 1 dB du seuil de discrimination de cet indice, ce qui le rend imperceptible. Pour l'analyse des erreurs de prévision faite par les modèles théoriques, ces observations ne sont pas sans conséquence. En effet, à la lecture du tableau 3.8, mis à part l'approche stochastique utilisant des distances entre les transducteurs du SAR générées automatiquement, ces méthodes donnent des résultats acceptables, et ce même sur la salle mesurée malgré l'utilisation d'un GMBO probablement erroné. Cependant, si nous mettons ces erreurs en relation avec l'effet du système, il apparaît que celles-ci peuvent atteindre jusqu'à 50% de la valeur de l'augmentation de force sonore constatée dans les salles virtuelles, et qu'elles lui sont majoritairement supérieures dans la salle mesurée. Ainsi, si les modèles proposés peuvent être jugés comme corrects vis-à-vis de l'augmentation moyenne de force sonore c'est qu'ils le sont au niveau de son ordre de grandeur, et que celui-ci est, quelle que soit la salle, proche de la valeur de l'écart de prévision acceptable (seuil de discrimination). Néanmoins, d'après la figure 3.13, l'effet du système augmente en fonction de la distance source-récepteur¹³, ce qui ne semble pas être le cas des erreurs prévisionnelles. Les modèles théoriques, quels qu'ils soient, prennent donc en compte de manière satisfaisante cette variation de la décroissance de force sonore avec l'éloignement à la source due au SAR.

Salle		LR-M	LR	AY	MO	CO	BE	Moyenne (sur $ \varepsilon\Delta $)
$\mathcal{G}_0$ (dB)	Ref	7,5	4,2	4,1	5,1	3,3	4,1	
$\overline{\Delta}_{\mathcal{G}}$ (dB)	Ref	0,4	1,5	1,3	1,3	1,3	1,0	
$\overline{\varepsilon\Delta}_{\mathcal{G}}$ (dB)	Energ	0,5	-0,3	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1
	Stoch	1,9	0,9	0,4	0,9	1,2	1,0	0,9
	Stoch2	0,8	0,1	0,1	-0,4	-0,1	0,1	0,2
	Energ+Ri exacte	0,4	-0,4	0,1	-0,1	0,1	0,0	0,1
	Stoch+Ri exacte	0,7	0,4	0,3	0,4	1,1	0,6	0,6
	Stoch2+Ri exacte	0,1	-0,2	0,2	-0,7	-0,2	-0,1	0,3
	Moyenne (sur $ \varepsilon\Delta $)		0,4	0,3	0,5	0,3	0,3	0,4

Tableau 3.8 - Force sonore initiale ; évolution de force sonore due au SAR ; erreurs moyennes des modèles théoriques et semi-théoriques sur la prévision de l'évolution de force sonore due au SAR (erreur moyenne comprise entre 1dB et 2dB ■ , erreur moyenne supérieure à 2dB ■). Les moyennes sont faites en écartant la salle mesurée (les mesures étant erronées comme expliqué au paragraphe 3.3.2.1), et à partir des valeurs absolues des erreurs prévisionnelles obtenues pour les autres salles. Ces moyennes sont faites soit sur l'ensemble des salles pour chaque modèle prévisionnel (moyenne des lignes), soit sur l'ensemble des modèles prévisionnels pour chaque salle (moyenne des colonnes) ; apparaît aussi la moyenne sur l'ensemble des salles et des modèles prévisionnels.

13. Ce phénomène pouvant s'expliquer du fait d'une baisse de l'importance relative du champ direct sur la force sonore avec l'augmentation du niveau de champ réverbéré produit par le SAR.

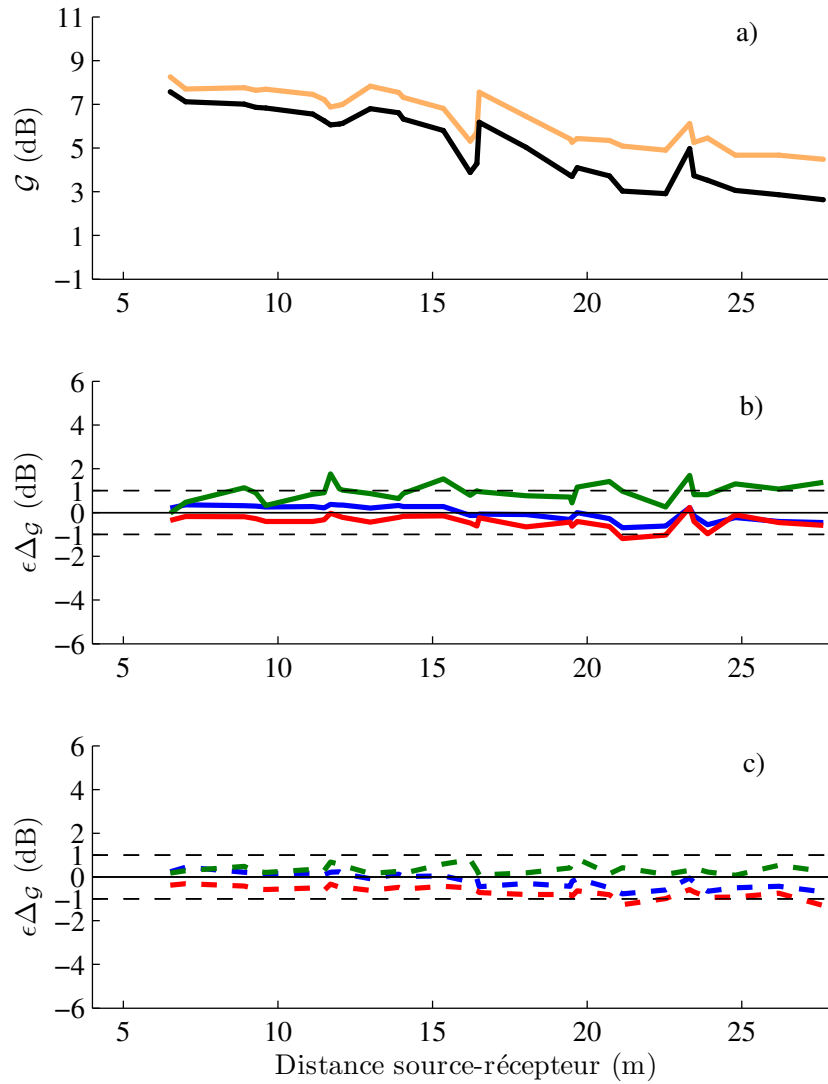


FIGURE 3.13 - Salle virtuelle « Prince Pierre » :

- a) Force sonore initiale — et avec SAR — en fonction de la distance source-récepteur.
- b) Erreur sur l'évolution de la force sonore due au SAR par les approches énergétique — et stochastique avec — ou sans — la prise en compte des distances exactes entre les canaux, et en utilisant une réponse impulsionnelle passive théorique.
- c) Erreur sur l'évolution de la force sonore due au SAR par les approches énergétique - - et stochastique avec - - ou sans - - la prise en compte des distances exactes entre les canaux, et en utilisant une réponse impulsionnelle passive «réelle».

3.3.2.4 Clarté, définition et temps central

De manière générale, l'action d'un SAR régénératif sur une réponse impulsionnelle est relativement moins importante sur sa partie précoce que sur sa partie tardive (voir figure 2.18). Ainsi, le barycentre de la répartition temporelle d'énergie de cette réponse impulsionnelle est décalé vers des valeurs de temps plus élevées, expliquant les diminutions de la clarté et de la définition, et l'augmentation du temps central constatées sur le tableau 3.9. Ces modifications, rapportées au seuil de discrimination de l'indice correspondant, apparaissent significatives et à peu près identiques sur chaque indice; ce dernier point n'est pas surprenant compte tenu de la corrélation entre ces indices [Pelorson 1991]. Par ailleurs, il est important de remarquer que, comme pour les durées de réverbération précoces et classiques, l'effet du système ne dépend pas uniquement de celui-ci, mais aussi probablement de la salle. En effet, si nous nous intéressons uniquement aux salles virtuelles, nous constatons que c'est dans la salle de « La Rampe » qu'il est le plus prononcé sur la clarté et la définition (et sur le temps central à 1 ms près) alors que le SAR correspondant a un nombre de canaux plus faible que dans les autres salles.

En analysant les erreurs prévisionnelles en fonction des modèles théoriques, il apparaît qu'aucun d'entre eux n'est clairement meilleur que les autres, mais que, si nous écartons là encore la salle mesurée, tous sont à peu près corrects pour la prévision de la clarté (environ 0,5 dB en moyenne), un peu moins pour celle de la définition (légèrement inférieur à 0,05 en moyenne) ou du temps central (environ 10 ms en moyenne). Si nous nous focalisons sur l'étude de la clarté, qui est probablement l'indice de précision le plus utilisé dans les salles de concert, le calcul de l'erreur de prévision absolue moyenne sur toutes les salles virtuelles et sur tous les modèles théoriques est inférieur au seuil de discrimination. Cette faible valeur permet de valider nos approches. De plus, d'après la figure 3.14, les modèles proposés peuvent aussi être considérés comme satisfaisants, vis-à-vis de la prévision individuelle en un point de la salle puisque la dispersion de l'erreur de prévision est rarement supérieure à 1 dB. Il peut être aussi remarquer que la valeur d'erreur moyenne des modèles théoriques proposés, est de l'ordre de grandeur de celle produite par l'utilisation de l'approche de *Barron et Lee* [Barron 1988]. Ainsi, pour la clarté, comme pour les durées de réverbération précoce et classique, les modèles théoriques proposés ici sont, vis-à-vis de leurs justesses aussi, l'équivalent d'un modèle d'acoustique des salles basées sur la théorie des champs diffus.

Salle		LR-M	LR	AY	MO	CO	BE	Moyenne (sur $ \varepsilon\Delta $)
C80 ₀ (dB)	Ref	6,1	5,0	5,7	4,3	3,9	6,1	
$\overline{\Delta}_{C80}$ (dB)	Ref	-1,5	-3,8	-3,5	-2,8	-2,6	-3,0	
$\varepsilon \overline{\Delta}_{C80}$ (dB)	Energ	-0,8	1,1	0,2	-0,1	-0,5	-0,2	0,4
	Stoch	-2,3	0,2	-0,2	-0,9	-1,7	-0,8	0,8
	Stoch2	-1,6	0,6	-0,2	0,5	-0,3	0,0	0,3
	Energ+Ri exacte	-0,6	1,3	0,3	0,0	-0,2	-0,1	0,4
	Stoch+Ri exacte	-1,1	-0,1	-0,3	-0,8	-1,2	-1,1	0,7
	Stoch2+Ri exacte	-0,4	0,6	-0,3	0,8	0,0	0,0	0,3
	Moyenne (sur $ \varepsilon\Delta $)		0,7	0,3	0,5	0,7	0,4	0,5
D50 ₀ (u)	Ref	0,68	0,56	0,64	0,59	0,53	0,70	
$\overline{\Delta}_{D50}$ (u)	Ref	-0,06	-0,15	-0,15	-0,13	-0,11	-0,13	
$\varepsilon \overline{\Delta}_{D50}$ (u)	Energ	-0,05	0,02	-0,01	0,00	-0,04	-0,02	0,02
	Stoch	-0,13	-0,03	-0,04	-0,06	-0,11	-0,07	0,06
	Stoch2	-0,08	-0,01	-0,01	0,03	-0,02	-0,01	0,02
	Energ+Ri exacte	-0,03	0,04	0,00	0,01	-0,02	-0,01	0,01
	Stoch+Ri exacte	-0,06	-0,01	-0,02	-0,03	-0,07	-0,07	0,04
	Stoch2+Ri exacte	-0,02	0,02	-0,02	0,06	0,00	0,00	0,02
	Moyenne (sur $ \varepsilon\Delta $)		0,02	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03
Ts ₀ (ms)	Ref	47	63	51	67	68	51	
$\overline{\Delta}_{Ts}$ (ms)	Ref	12	42	43	42	39	33	
$\varepsilon \overline{\Delta}_{Ts}$ (ms)	Energ	12	-7	-2	-5	2	7	5
	Stoch	36	11	14	14	24	21	17
	Stoch2	31	8	15	-4	14	14	11
	Energ+Ri exacte	8	-13	-5	-9	0	1	6
	Stoch+Ri exacte	14	6	7	5	19	16	11
	Stoch2+Ri exacte	7	0	10	-14	5	5	7
	Moyenne (sur $ \varepsilon\Delta $)		6	9	9	11	11	9

Tableau 3.9 - Clarté, définition et temps central initiaux; évolutions de clarté, définition et temps central dues au SAR; erreurs moyennes des modèles théoriques et semi-théoriques sur la prévision des évolutions de clarté, définition et temps central dues au SAR (C80 : erreur moyenne comprise entre 1dB et 2dB ■ , erreur moyenne supérieure à 2dB ■ ; D50 : erreur moyenne comprise entre 0,05 et 0,10 ■ , erreur moyenne supérieure à 0,10 ■ ; Ts : erreur moyenne comprise entre 10 ms et 20 ms ■ , erreur moyenne supérieure à 20 ms ■). Les méthodes sont décrites dans le tableau 3.2, les salles dans le tableau 3.3. Les moyennes sont faites en écartant la salle mesurée (les mesures étant erronées comme expliqué au paragraphe 3.3.2.1), et à partir des valeurs absolues des erreurs prévisionnelles obtenues pour les autres salles. Ces moyennes sont faites soit sur l'ensemble des salles pour chaque modèle prévisionnel (moyenne des lignes), soit sur l'ensemble des modèles prévisionnels pour chaque salle (moyenne des colonnes); apparait aussi la moyenne sur l'ensemble des salles et des modèles.

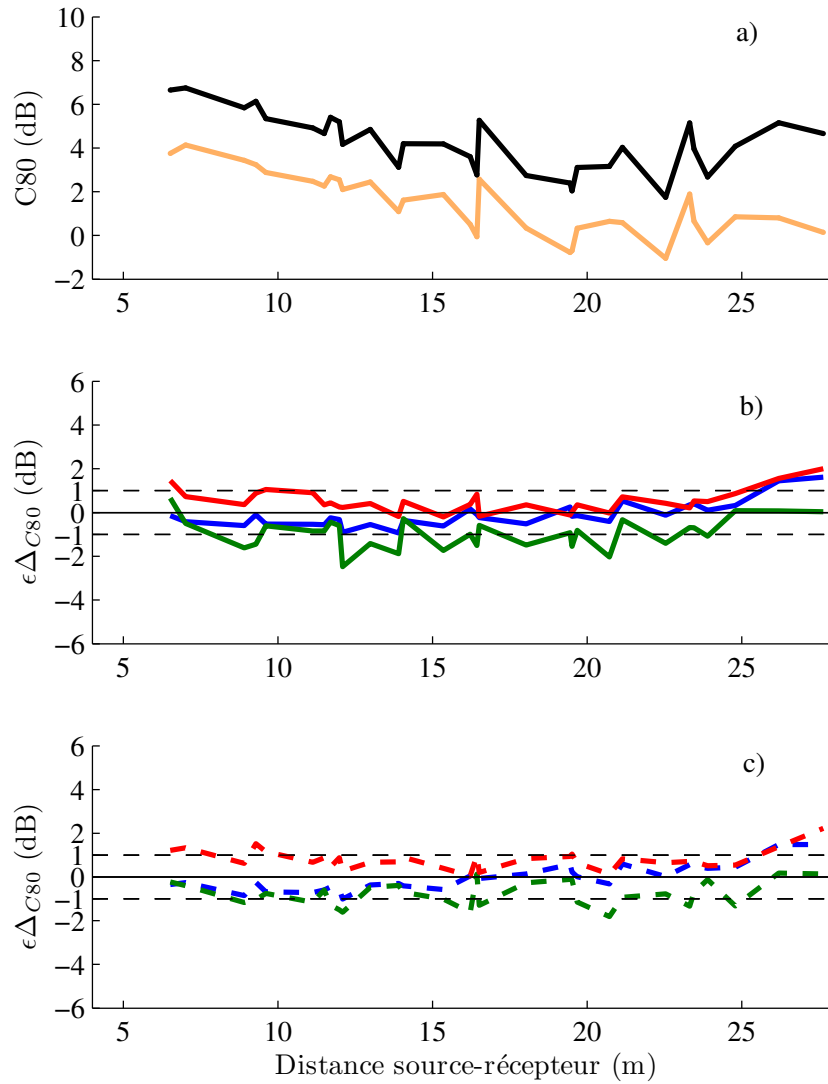


FIGURE 3.14 - Salle virtuelle « Prince Pierre » :

a) Clarté initiale — et avec SAR — en fonction de la distance source-récepteur.

b) Erreur sur l'évolution de la clarté due au SAR par les approches énergétique — et stochastique avec — ou sans — la prise en compte des distances exactes entre les canaux, et en utilisant une réponse impulsionnelle passive théorique.

c) Erreur sur l'évolution de la clarté due au SAR par les approches énergétique - - et stochastique avec - - ou sans - - la prise en compte des distances exactes entre les canaux, et en utilisant une réponse impulsionnelle passive «réelle».

3.3.3 Discussion des résultats

Afin de trouver des raisons au manque de précision du modèle systémique basé sur des réponses impulsionnelles stochastiques, nous nous proposons d'effectuer ici une étude consistant à injecter dans l'équation des systèmes bouclés multivariable certains termes (fonctions de réponse en fréquence) issus de l'approche stochastique et d'autres issus de simulations numériques (pour une meilleur lisibilité, nous rappelons ici cette équation déjà citée en (2.1)).

$$H_{ea} = H_{sr} + \underline{H}_{hr}^t \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm} \right)^{-1} \underline{G}_{mh} \underline{H}_{sm} \quad (3.26)$$

L'idée de cette étude est de partir du cas le moins proche de celui de la référence (cas « tout stochastique avec génération automatique des emplacements des transducteurs ») et de se rapprocher de celui de référence (cas « tout simulations numériques ») par étapes intermédiaires. Ceci dans le but d'identifier quels sont les termes de l'équation (3.26) qui jouent principalement sur la validité du modèle systémique basé sur une approche stochastique.

Lorsque tous les termes sont issus de l'approche stochastique avec une génération automatique des emplacements des transducteurs du système, nous nous retrouvons dans la situation déjà éprouvée aux parties précédentes et correspondante au cas de figure « Stoch » du tableau 3.2. Une première évolution de ce modèle correspond au cas « Stoch2 » du tableau 3.2 où les emplacements des transducteurs sont exactement ceux des modèles en trois dimensions des salles utilisés pour les simulations numériques. Une deuxième évolution consiste, en plus des emplacements exactes des transducteurs du système, à utiliser la réponse impulsionnelle passive exacte pour obtenir le terme H_{sr} de l'équation (3.26), cas « Stoch2+RI exacte » du tableau 3.2. À ces trois cas déjà étudiés, nous proposons d'en rajouter trois autres. Le cas où les valeurs des matrices $\underline{G}_{mh}$ et $\underline{H}_{hm}$ sont obtenues à partir des simulations numériques ; cette situation permettra de savoir si la procédure d'égalisation peut être mise en cause dans la validité de notre approche car les valeurs des gains électroniques du système sont alors identiques à celles du cas de référence¹⁴. Les deux derniers cas que nous nous proposons de tester correspondent aux situations où en plus du cas précédent, les valeurs du vecteur $\underline{H}_{sm}$ ou du vecteur $\underline{H}_{hr}$ sont elles aussi issues des simulations numériques. Dans ces deux cas seuls les vecteurs $\underline{H}_{hr}$ ou $\underline{H}_{sm}$ sont issus de l'approche stochastiques, tous les autres termes de l'équation des systèmes bouclés multivariable sont donnés par les simulations numériques. Toutes les cas proposés précédemment sont résumés dans le tableau 3.10.

14. Il est important de noter que cela n'aurait pas eu de sens d'utiliser les valeurs de la matrice $\underline{G}_{mh}$ obtenues à partir des simulations numériques, et celles de la matrice $\underline{H}_{hm}$ obtenues par l'approche stochastique. En effet, les valeurs des fonctions de réponse en fréquence des gains électroniques obtenues par la méthode d'égalisation automatique ne sont valables que pour une fonction de réponse en fréquence bien précise dépendante de l'ensemble des transferts acoustiques intra et inter canal (soit des valeurs de la matrice $\underline{H}_{hm}$). En d'autres termes, on ne peut injecter dans l'équation des systèmes bouclés multivariable des valeurs de $\underline{G}_{mh}$ qui aurait été obtenues à partir des valeurs d'une matrice $\underline{H}_{hm}$ autres que celles aussi utilisées pour la résolution de cette équation, cela pourrait entraîner une instabilité des réponses actives obtenues.

Méthode	Réponse imp. passive	Action du SAR
Ref	H_{sr}	$\underline{H}_{hr}^t \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm} \right)^{-1} \underline{G}_{mh} \underline{H}_{sm}$
Stoch	$\underline{H}_{sr}$	$\underline{H}_{hr}^t \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm} \right)^{-1} \underline{G}_{mh} \underline{H}_{sm}$
Stoch2	$\underline{H}_{sr}$	$\underline{H}_{hr}^t \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm} \right)^{-1} \underline{G}_{mh} \underline{H}_{sm}$
Stoch2 +Ri exacte	H_{sr}	$\underline{H}_{hr}^t \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm} \right)^{-1} \underline{G}_{mh} \underline{H}_{sm}$
Stoch2 +Ri exacte +	H_{sr}	$\underline{H}_{hr}^t \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm} \right)^{-1} \underline{G}_{mh} \underline{H}_{sm}$
Stoch2 +Ri exacte ++	H_{sr}	$\underline{H}_{hr}^t \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm} \right)^{-1} \underline{G}_{mh} \underline{H}_{sm}$
Stoch2 +Ri exacte ++(bis)	H_{sr}	$\underline{H}_{hr}^t \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm} \right)^{-1} \underline{G}_{mh} \underline{H}_{sm}$

Tableau 3.10 - Les différentes configurations théoriques ou semi-théoriques proposées pour obtenir les réponses impulsionnelles de salles avec SAR selon une approche systémique. Ces configurations se différencient les unes des autres par la nature des fonctions de réponses en fréquence utilisées (obtenues à partir de l'approche stochastique ou de simulations numériques) afin d'identifier les termes responsables de la divergence du modèle basé sur l'approche stochastique. Les termes en noir sont obtenus à partir de simulations numériques. Les termes en vert sont obtenus à partir de l'approche stochastique en utilisant la génération automatique des distances entre la source, le récepteur et les transducteurs du SAR. Les termes en bleu sont obtenus à partir de l'approche stochastique en utilisant les distances exactes entre la source, le récepteur et les transducteurs du SAR.

Les résultats des divergences observées avec le cas de référence (« tout simulation ») en chaque point de l'auditoire de la salle « Pierre Prince » pour chacune des configurations du tableau 3.10 concernant les indices liés réverbérance, sont présentés aux figures 3.15 et 3.16. Nous avons choisi de nous intéresser ici qu'aux indices de réverbération (Tr) et de réverbération précoce (EDT) car, comme nous l'avons vu précédemment, ce sont sur ces indices que nos approches théoriques ou semi-théoriques donnent les résultats les moins valides. Nous avons choisi de nous intéresser aux divergences en chaque point car c'est ainsi que la validité d'un modèle peut être réellement jugée. Nous avons choisi de nous concentrer sur la salle « Pierre Prince » afin de rester cohérent avec les figures déjà présentées dans ce chapitre.

Les figures 3.15 et 3.16 montrent que lorsque que l'on utilise la réponse impulsionnelle passive « exacte » et des valeurs de la matrice $\underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm}$ issues des simulations numériques (configuration « Stoch2 + Ri exacte + »), aucune amélioration du modèle n'est constatée, et ceci même lorsqu'en plus de cette configuration un seul des deux vecteurs $\underline{H}_{hr}$ ou $\underline{H}_{sm}$ reste issu de l'approche stochastique (configurations « Stoch2 +Ri exacte ++ » et « Stoch2 +Ri exacte ++(bis) »). Ainsi, quelque soit la configuration testée, les valeurs des erreurs prévisionnelles sont du même ordre de grandeur que celles produites par les modèles « tout stochastique », que ce soit sur la durée de réverbération ou la durée de réverbération précoce. On peut noter que ces erreurs peuvent cependant fortement évoluer selon les points et les configurations ; ce qui montre la sensibilité du modèle systémique à l'exactitude d'un seul des termes de l'équation des systèmes bouclés multivariable. À noter aussi qu'on ne peut ici plus mettre seul en cause la procédure d'égalisation automatique car même en utilisant la même matrice $\underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm}$ que celle de la référence, l'approximation par l'approche stochastique d'un seul des autres terme de l'équation des systèmes bouclés multivariable

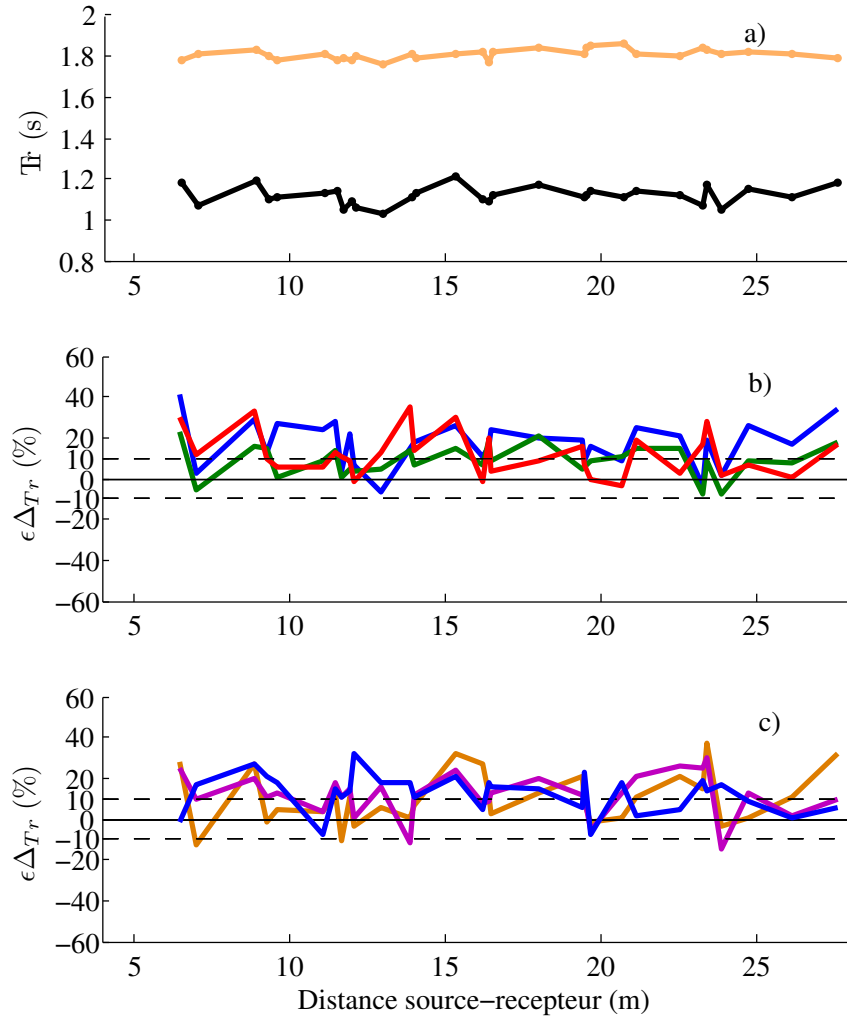


FIGURE 3.15 - Salle virtuelle « Prince Pierre » :

- a) Durée de réverbération initiale sans — et avec SAR — en fonction de la distance source-récepteur.
 b) Erreur sur l'évolution de la durée de réverbération due au SAR par les approches « Stoch » —, « Stoch2 » — et « Stoch2 + Ri exacte » —.
 c) Erreur sur l'évolution de la durée de réverbération due au SAR par les approches « Stoch2 + Ri exacte + » —, « Stoch2 + Ri exacte ++ » — et « Stoch2 + Ri exacte ++(bis) » —.

À noter que, bien que la figure a) ait un axe des ordonnées gradué en seconde et que celui des deux autres graphiques soit gradué en pourcentage, leurs échelles sont comparables, car compte tenu d'une durée de réverbération passive de la salle d'environ 1 s, 10% d'augmentation correspond à peu près à 0,1 s.

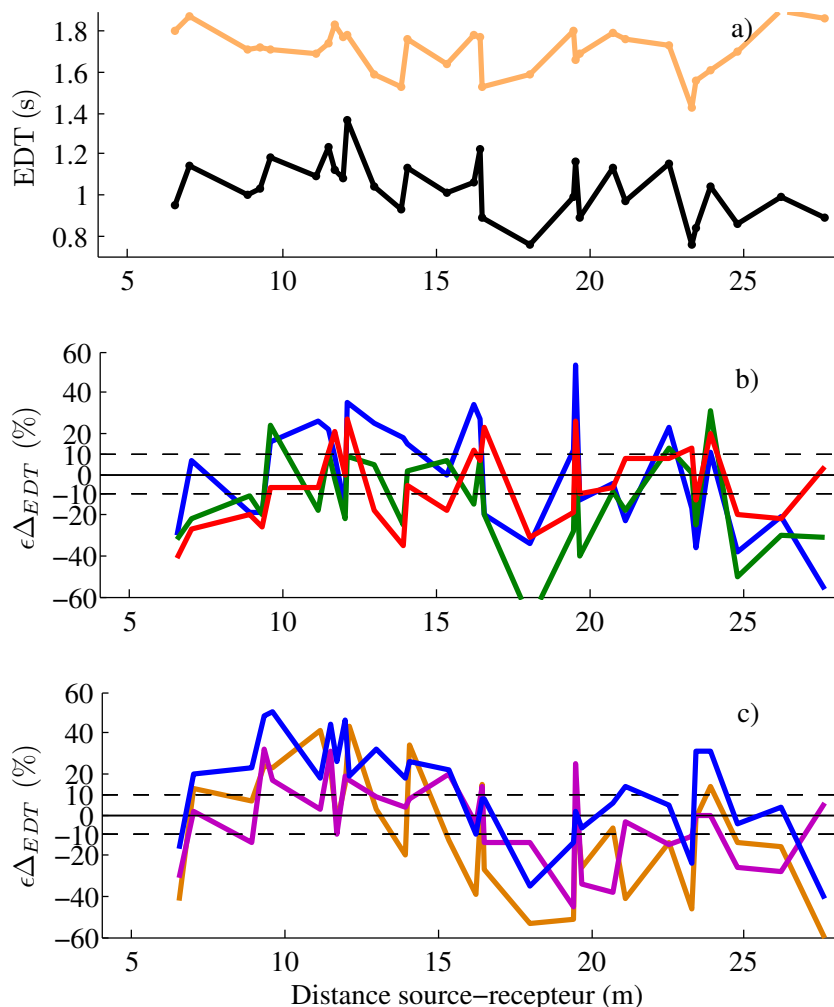


FIGURE 3.16 - Salle virtuelle « Prince Pierre » :

a) Durée de réverbération précoce initiale sans — et avec SAR — en fonction de la distance source-récepteur.

b) Erreur sur l'évolution de la durée de réverbération précoce due au SAR par les approches « Stoch » —, « Stoch2 » — et « Stoch2 + Ri exacte » —.

c) Erreur sur l'évolution de la durée de réverbération précoce due au SAR par les approches « Stoch2 + Ri exacte + » —, « Stoch2 + Ri exacte ++ » — et « Stoch2 + Ri exacte ++ (bis) » —.

À noter que, bien que la figure a) ait un axe des ordonnées gradué en seconde et que celui des deux autres graphiques soit gradué en pourcentage, leurs échelles sont comparables, car compte tenu d'une durée de réverbération précoce passive de la salle d'environ 1 s, 10% d'augmentation correspond à peu près à 0,1 s.

suffit à entraîner une erreur importante sur les résultats. Ainsi, la validité de l'approche systémique demande une exactitude de tous les termes de cette équation, qu'il s'agisse des transferts entre la source et les microphone du SAR, des transferts entre les haut-parleurs du SAR et le récepteur, ou des transferts entre les transducteurs du SAR. L'approche utilisant un modèle stochastique de réponses impulsionnelles n'est donc pas valable car ces réponses impulsionnelles théoriques et basées sur une approche de champ diffus ne reproduisent pas les particularités d'une réponse impulsionnelle réelle de salle, particularités fonction de la géométrie fine de la salle et des propriétés matériaux. En d'autres termes, si l'approche systémique avec utilisation de réponses impulsionnelles stochastiques n'est pas valable c'est très probablement parce que le modèle stochastique est basé sur les hypothèses du champ diffus et que ces hypothèses (homogénéité et isotropie du champ sonore) ne sont pas suffisantes pour rendre compte de l'ensemble des particularités d'une réponse impulsionnelle réelle alors que ces particularités impactent fortement sur les effets du système.

Concernant la recherche des raisons de la déviation des résultats donnés par l'approche énergétique, il n'est pas possible d'effectuer une analyse comparable à celle utilisée concernant l'approche systémique avec réponses impulsionnelles stochastiques. En effet, il n'existe pas de lien directe entre la référence (basée elle aussi sur l'approche systémique) et cette approche énergétique (basée sur une équation différentielle). Il nous est simplement possible de formuler des hypothèses dont la plus évidente est que cette approche énergétique repose elle aussi sur les hypothèses de champ diffus et que ces hypothèses ne sont pas suffisantes pour rendre compte de l'effet du système, et de l'effet de salle en général. Cette approche est beaucoup trop globale pour traduire l'ensemble des caractéristiques audibles d'une réponse impulsionnelle de salle, que ce soit avec ou sans SAR.

De manière générale, aucune des approches théoriques ou semi-théoriques ne se distingue des autres quant à sa faculté à reproduire de manière exacte les variations d'indices acoustiques dues au SAR. Ceci est probablement dû à l'absence de prise en compte par ces modèles de particularités architecturales impactant fortement sur l'effet du système. Sous l'action du système, chaque indice dans chaque salle réagit de manière différente suivant la salle et éventuellement l'emplacement des canaux du SAR, et aucune des approches proposées, qu'elles prennent en compte les réponses impulsionnelles passives « exactes » ou non et l'emplacement exact des transducteurs ou non, ne prend en compte cet effet mieux qu'une autre, ceci du fait des hypothèses de champ diffus sur laquelle elles reposent qui ne sont jamais totalement vérifiées dans la réalité, et ce d'autant plus dans les salles de spectacle où la répartition des matériaux est loin d'être homogène (par exemple, la surface de l'auditoire est souvent largement plus absorbante que le plafond) et dont la forme n'est pas non plus propice à une isotropie et une homogénéité du champ sonore, car pouvant favoriser une direction de propagation des rayons sonores au détriment des autres.

Concernant les comparaisons des modèles proposés avec les résultats de la campagne de mesures, nous avons déjà souligné le fait qu'une cause de la déviation entre théorie et mesure provenait probablement d'une mesure erronée du GMBO. Une seconde cause possible est évidemment ici aussi le manque de validité des hypothèses du champ diffus. En plus des raisons évoquées précédemment, dans ce cas de référence d'une salle réelle et non d'une simulation par un lancer de rayons, la validité de ces hypothèses peut être d'autant plus remise en cause du fait que dans le cas du système Carmen les transducteurs sont placés proches des murs. Or, aux basses fréquences le champ acoustique proche des parois d'une salle peut être sensiblement affecté par l'aspect ondulatoire du champ sonore, aspect non pris en compte dans une approche reposant sur les hypothèses de champ diffus. De même, la proximité des transducteurs d'un même canal entraîne probablement aussi un échec de ces approches aux basses fréquences. Cependant, rappelons que nous nous sommes ici intéressés aux mesures sur les bandes d'octaves 500 Hz et 1000 Hz soit plutôt dans les moyennes fréquences, ce qui réduit l'effet

des parois et de la courte distance entre microphone et haut-parleur d'un même canal sur le manque de validité des hypothèses de champ diffus.

3.3.4 Synthèse des résultats

Si nous nous intéressons à chaque indice séparément sur l'ensemble des salles virtuelles, les modèles théoriques permettent de prévoir les évolutions des durées de réverbération précoce et tardive avec des incertitudes pouvant atteindre plusieurs fois le seuil de discrimination de ces indices, mais qui reste de l'ordre de celles produites par les formules de Sabine ou d'Eyring. Pour la force sonore, le faible effet du système dans les salles-tests ne permet pas de juger complètement de la validité de ces modèles. Néanmoins, ils reproduisent cet effet dans des proportions acceptables, ainsi que la variation d'effet du SAR en fonction de la distance source-récepteur. Concernant les trois indices liés à la précision, l'effet du système est sensiblement identique et plutôt marqué. En se concentrant sur la clarté, les modèles théoriques prévoient dans la plupart des cas étudiés ici, une évolution globale avec une erreur inférieure à 1 dB, soit inférieure au seuil de discrimination de cet indice, mais aussi proche de l'erreur moyenne obtenue par l'utilisation classique de l'approche révisée *Barron* et *Lee* pour la prévision de cet indice dans une salle sans système.

Ainsi, tous ces modèles sont valides dans des proportions comparables à celles qui peuvent être obtenues par l'utilisation des approches basées sur l'hypothèse d'un champ diffus ; approches desquelles ils sont tous issus de manière plus ou moins directe. Ils doivent donc être vus comme une extension de ces approches à une salle équipée d'un SAR d'un point de vue théorique, mais aussi vis-à-vis de leur validité.

Puisqu'aucun modèle n'est meilleur ou pire que les autres vis-à-vis de la qualité de ces résultats, et ce aussi bien en considérant un point de l'auditoire ou la moyenne sur l'ensemble de l'auditoire, nous conseillons, dans une phase d'avant-projet, d'utiliser l'approche énergétique appliquée à une réponse impulsionnelle passive issue de la théorie révisée *Barron* et *Lee* pour prévoir l'effet d'un SAR. Celle-ci présente de nombreux avantages par rapport aux autres approches : elle ne demande pas de ressources informatiques, nécessite peu d'informations sur la salle, et elle est plus simple et plus rapide que l'approche systémique basée sur des réponses impulsionnelles stochastiques. De plus, parce qu'elle se résume à une équation simple, elle permet d'appréhender facilement l'action d'un SAR.

3.4 Synthèse du chapitre 3

Dans ce chapitre, nous avons cherché à savoir dans quelle mesure il est possible de prévoir l'effet d'un SAR sur les caractéristiques acoustiques d'une salle simple à partir de modèles théoriques rapides d'exécution et demandant le minimum d'informations sur la salle. Pour ce faire, nous avons dans un premier temps développé deux modèles différents basés sur l'hypothèse des champs diffus. Ces modèles ont l'avantage de chercher à prévoir, non pas directement l'évolution de certains indices acoustiques, mais l'effet du SAR sur l'ensemble d'une réponse impulsionnelle omnidirectionnelle ; ainsi, ils peuvent être utilisés pour prévoir l'évolution de tous les indices acoustiques issus d'une réponse impulsionnelle omnidirectionnelle. Dans un second temps, ces deux modèles prévisionnels ont été confrontés aux résultats d'une campagne de mesure, ainsi qu'à ceux obtenus par simulations numériques dans cinq salles virtuelles, mais réalistes.

Le premier modèle repose sur une approche énergétique simple, telle que celle permettant l'établissement de la formule de Sabine, avec une prise en compte approchée des retards électroniques

du SAR. Il présente l'avantage de se réduire à une formule analytique peu complexe ne nécessitant qu'un nombre réduit de connaissances sur le système (le nombre de canaux, leur GMBO et leur retard électronique moyens) et sur la salle (la durée de réverbération initiale et les distances source-récepteur). Le second modèle est basé sur une approche systémique des SAR à partir de réponses impulsionnelles obtenues par l'approche stochastique de l'acoustique géométrique. En plus des paramètres d'entrée du modèle précédent, il prend en considération le volume de la salle et la surface de ses parois internes, ce qui le rend plus complexe, mais aussi potentiellement plus exact. Et ce, d'autant plus qu'il ne fait pas d'approximation sur l'action du système et qu'il peut prendre en compte les distances exactes entre les transducteurs du SAR. Cependant, à l'inverse du premier modèle proposé, il nécessite l'utilisation de moyens informatiques, que ce soit pour générer les réponses impulsionnelles acoustiques ou les fonctions de réponse en fréquence électroniques du SAR.

Lors de la mise à l'épreuve de ces modèles théoriques, nous nous sommes concentrés sur leur capacité à prévoir l'évolution des durées de réverbération classique et précoce, de force sonore, de la clarté, de la définition et du temps central. Concernant le modèle reposant sur une approche stochastique, nous avons considéré séparément la prise en compte exacte ou approximative des distances entre les transducteurs du SAR. Par ailleurs, puisque ces modèles se réduisent à un gain ou à un ajout d'énergie dû au système sur la réponse impulsionnelle passive, nous avons aussi voulu tester quelle pouvait être l'influence de celle-ci sur la justesse des résultats. Nous avons ainsi utilisé deux types de réponses impulsionnelles passives, soit théoriques, soit « exactes » c'est-à-dire celles données par la mesure ou la simulation.

L'analyse des résultats a montré que les modèles prévisionnels proposés permettent de prévoir en moyenne les augmentations de durée de réverbération précoce et tardive à 10-15% près, les augmentations moyennes de clarté et de force sonore à 0,5 dB près et les augmentation de définition et de temps central respectivement à environ 0,05 et 10 ms. Par ailleurs, ces modèles reproduisent l'effet de la distance source-récepteur sur les valeurs ponctuelles d'augmentation de ces indices dans une salle. Ces résultats sont semblables à ceux pouvant être obtenus par les formules de Sabine ou d'Eyring ou par la théorie révisée de *Barron* et *Lee* dans le cas d'une salle sans SAR, théorie sur laquelle sont basés les modèles que nous avons proposés. La qualité prévisionnelle de ces modèles est identique à celle de l'approche desquelles ils sont issus. Que la salle soit avec ou sans SAR, et même si celui-ci favorise *a priori* l'établissement d'un champ acoustique diffus, l'absence de prise en compte de détails architecturaux permet de donner un ordre d'idée des valeurs de chaque indice acoustique et de leur comportement avec la distance à la source, sans toutefois permettre, concernant les évolutions des durées de réverbération classique et précoce, une prévision avec une marge d'erreur inférieure à leurs seuil de discrimination.

Par ailleurs, il est apparu que les modèles proposées sont tous équivalent en terme de validité, en conséquence de quoi nous conseillons d'utiliser le plus simple d'entre eux, à savoir l'approche énergétique appliquée à une réponse impulsionnelle passive issue de la théorie révisée de *Barron* et *Lee*¹⁵.

15. Si l'on ne s'intéresse qu'à la prévision de l'augmentation de durée de réverbération classique ou précoce, il est alors possible d'utiliser la relation (1.37) établie par *Poletti*, ou éventuellement la courbe de la figure 1.9 (cette courbe étant tracé à partir de la relation (1.37) en considérant un SAR avec un retard électronique moyen de 20 ms et risque d'instabilité de 5%). En effet, le modèle énergétique proposé ici est une extension de l'approche de *Poletti* à l'ensemble de la réponse impulsionnelle et n'en diffère pas concernant la prévision de la durée de réverbération précoce ou classique.

Modèle théorique et étude de l'effet d'un SAR dans une salle couplée

Sommaire

4.1	Approche énergétique de l'action d'un SAR dans les espaces couplés	103
4.1.1	Rappels sur l'approche énergétique des salles couplées	103
4.1.2	Salles couplées équipées d'un SAR	105
4.1.2.1	Approche énergétique de l'action du système	106
4.1.2.2	Stabilité d'un système électroacoustique d'augmentation de couplage	108
4.1.2.3	Illustration de l'action théorique d'un SAR dans des espaces couplés .	108
4.2	Étude du système d'augmentation de couplage à partir d'une approche systémique basée sur des simulations numériques	109
4.2.1	Présentation de la salle couplée virtuelle et du système électroacoustique d'augmentation de couplage	110
4.2.2	Effet du couplage sur l'énergie tardive des réponses impulsionnelles	112
4.2.3	Effet du système électroacoustique d'augmentation de couplage sur l'énergie tardive des réponses impulsionnelles	115
4.2.4	Retour sur les limites d'utilisation du système électroacoustique d'augmentation de couplage	116
4.2.5	Effet du système électroacoustique d'augmentation de couplage sur quatre indices classiques d'acoustique des salles	118
4.2.5.1	Effet du système électroacoustique d'augmentation de couplage sur la durée de réverbération	118
4.2.5.2	Effet du système électroacoustique d'augmentation de couplage sur la durée de réverbération précoce, la force sonore et la clarté	120
4.3	Synthèse du chapitre 4	121

Lorsque certaines règles constructives ne sont pas respectées, les loges d'un théâtre ou d'une salle d'opéra peuvent souffrir d'une qualité acoustique diminuée par rapport à celle de l'espace principal. Ce problème, dû à un couplage réduit entre ces deux espaces (ou volumes), apparaît aussi dans l'espace situé sous un balcon trop profond sans ouverture suffisante sur le reste de la salle. En terme d'indices acoustiques, *Barron* constata qu'un couplage faible entraîne une diminution de la force sonore et de la durée de réverbération précoce ainsi qu'une augmentation de clarté dans l'espace secondaire [*Barron 1995*, *Barron 2005*]. Bien que dans le cas de représentations théâtrales, la diminution de réverbérance associée à celle de l'EDT ainsi que l'augmentation de clarté constituent plutôt un avantage, elles ne permettent pas d'apprécier à l'identique des représentations de musiques orchestrales [*Beraneck 2002*]. Or, l'introduction d'un système d'assistance à la réverbération régénératif dans une salle de théâtre sert prioritairement à permettre une diffusion de musique, rendant ainsi problématique le découplage des loges ou de l'espace sous balcon.

Plusieurs auteurs ont déjà évoqué le fait que l'introduction de canaux électroacoustiques du type de ceux d'un SAR pouvait être utilisée pour améliorer la qualité acoustique d'un espace sous balcon (figure 4.1). *Van Muster* et *Prinssen* [Van Munster 2004] présentent cette idée en soulevant d'éventuels problèmes liés à cette méthode d'augmentation de couplage. Ils insistent tout particulièrement sur la nécessité de limiter l'énergie renvoyée par chaque haut-parleur quitte à augmenter leur nombre, de sorte à éviter la création d'artéfacts audibles dus à un mauvais équilibre entre le son provenant directement de la salle source et celui produit par les haut-parleurs. Plus récemment, *Watanabe* et *Ikeda* [Watanabe 2011] ont mesuré sur maquette l'effet d'un SAR installé en couplage sur la durée de réverbération de l'espace secondaire. Ils ont alors montré, que cet indice acoustique peut effectivement être augmenté et que la qualité acoustique de l'espace secondaire peut aussi être améliorée vis-à-vis de critères subjectifs autres que la réverbérance. Cependant, à notre connaissance, aucune étude théorique de l'augmentation de couplage produit par canaux électroacoustiques n'est présente dans la littérature, et le système UBR utilisé par *Watanabe* est un système « in-line » et non un système régénératif.

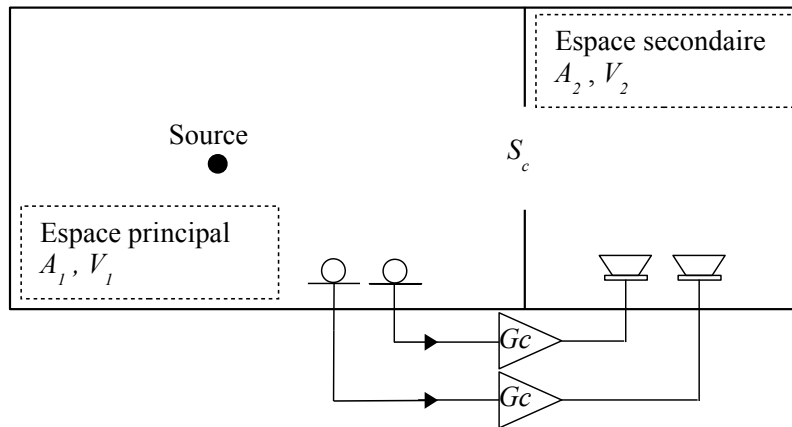


FIGURE 4.1 - Espaces couplés avec introduction de canaux électroacoustiques en augmentation du couplage. La surface de couplage entre les deux espaces est S_c , chacun d'eux est caractérisé individuellement par leur aire équivalente d'absorption A_i et leur volume V_i .

Dans ce chapitre, après avoir rapidement rappelé l'approche énergétique des salles couplées, nous allons, dans un premier temps proposer un modèle théorique de l'action d'un SAR régénératif en couplage d'espace à partir de cette approche. Dans un second temps nous proposons de confronter les résultats prévus par cette approche théorique à ceux obtenus par l'approche systémique des SAR réalisée à partir de simulations numériques telle que décrite au chapitre 2. Enfin, à partir de cette approche systémique, nous effectuerons une analyse de l'évolution des quatre indices acoustiques dans les espaces principal et secondaire due à l'utilisation d'un SAR dédié à l'augmentation du couplage. Notamment, nous constaterons que l'utilisation d'un tel système permet de réduire l'influence d'un balcon sur les valeurs prises par ces indices aux emplacements situés sous celui-ci.

4.1 Approche énergétique de l'action d'un SAR dans les espaces couplés

4.1.1 Rappels sur l'approche énergétique des salles couplées

Le développement mathématique de l'approche énergétique des salles couplées présenté ici est principalement tiré des travaux de *Cremer et al.* [Cremer 1982] et de *Jouhaneau* [Jouhaneau 2003]. Pour alléger les expressions mathématiques, nous négligerons l'absorption par l'air. Pour la même raison et pour nous rapprocher du cas d'une loge dans un théâtre ou d'un balcon, la surface de couplage S_c est considérée libre et les cloisons l'entourant sont considérées comme ayant un facteur de transmission faible permettant de négliger le flux d'énergie à travers celles-ci ¹.

Les équations différentielles régissant les évolutions de densité d'énergie dans les espaces principal et secondaire s'établissent séparément. Chaque espace se caractérise par son aire équivalente d'absorption égale à la somme de l'aire équivalente d'absorption de ses parois et de la surface libre séparant les deux espaces. Soit, pour l'espace principal :

$$A_{11} = A_1 + S_c$$

et pour l'espace secondaire :

$$A_{22} = A_2 + S_c$$

Dans chaque espace, un terme source correspond à l'énergie renvoyée par l'autre espace à travers S_c . Soit, dans l'espace principal :

$$V_1 \frac{dw_1(t)}{dt} + \frac{c}{4} A_{11} w_1(t) = P_1 + \frac{c}{4} S_c w_2(t) \quad (4.1)$$

et dans l'espace secondaire :

$$V_2 \frac{dw_2(t)}{dt} + \frac{c}{4} A_{22} w_2(t) = \frac{c}{4} S_c w_1(t) \quad (4.2)$$

en regroupant ces deux équations au sein d'un système d'équations :

$$\begin{cases} \frac{1}{\delta_1} \frac{dw_1(t)}{dt} + w_1(t) - k_1 w_2(t) = P_1 \frac{4k_1}{cS_c} \\ \frac{1}{\delta_2} \frac{dw_2(t)}{dt} + w_2(t) - k_2 w_1(t) = 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

où $\delta_1 = \frac{A_{11}c}{4V_1}$ et $\delta_2 = \frac{A_{22}c}{4V_2}$ sont les constantes d'amortissement des deux salles prises séparément, et où $k_1 = S_c/A_{11}$ et $k_2 = S_c/A_{22}$. Si l'on se place en régime stationnaire, k_2 correspond à la fraction de densité d'énergie de l'espace principal circulant vers l'espace secondaire. De même, lorsqu'une source est placée dans l'espace secondaire, k_1 correspond à la fraction de densité d'énergie circulant vers l'espace principal. C'est pourquoi k_1 et k_2 sont appelés respectivement les facteurs de couplage de l'espace 1 et de l'espace 2.

Le système d'équations (4.3) étant linéaire, on peut montrer [Cremer 1982] qu'à l'arrêt de la source P_1 , la solution de celui-ci est de la forme :

1. La prise en compte d'un facteur de transmission non négligeable τ_s de la surface S_s entourant la surface de couplage, et d'une surface de couplage non libre S_c avec un facteur de transmission τ_c peut être cependant intégré aux équations en remplaçant S_c par $S_c\tau_c + S_s\tau_s$.

$$\begin{aligned} w_1(t) &= w_{11}e^{-\delta_I t} + w_{12}e^{-\delta_{II} t} \\ w_2(t) &= w_{21}e^{-\delta_I t} + w_{22}e^{-\delta_{II} t} \end{aligned} \quad (4.4)$$

avec :

$$\delta_{I/II} = \frac{1}{2} \left((\delta_1 + \delta_2) \mp \sqrt{(\delta_1 - \delta_2)^2 + 4\kappa^2 \delta_1 \delta_2} \right) \quad (4.5)$$

où $\kappa^2 = k_1 k_2$ est le facteur de couplage global du système.

Les constantes w_{11} , w_{12} , w_{21} et w_{22} sont déduites des conditions initiales du système. Pour déterminer celles-ci dans le cadre d'une réponse impulsionnelle, nous considérerons au temps zéro les deux espaces séparément. À cet instant, l'impulsion d'énergie $P_1 \Delta t$ dans l'espace principal crée dans celui-ci une densité d'énergie initiale $P_1 \Delta t / V_1$ qui décroît sans qu'il n'y ait encore d'interaction avec l'espace secondaire. Dans l'espace secondaire, aucune énergie n'est encore établie, mais celle-ci tend à augmenter, car cet espace secondaire reçoit de l'énergie provenant de la première salle à travers la surface de couplage. Au temps initial, l'espace secondaire réagit comme s'il était isolé de l'espace principal et alimenté par une source produisant une densité d'énergie équivalente à $k_2 w_1(0)$. Par conséquent, les conditions initiales du système sont :

$$\begin{aligned} w_1(0) &= \frac{P_1 \Delta t}{V_1} & w_2(0) &= 0 \\ \left. \frac{dw_1}{dt} \right|_{t=0} &= -\frac{P_1 \Delta t}{V_1} \delta_1 & \left. \frac{dw_2}{dt} \right|_{t=0} &= k_2 \frac{P_1 \Delta t}{V_1} \delta_2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Soit :

$$\begin{cases} w_1(t) = \frac{P_1 \Delta t}{V_1} \frac{1}{\delta_{II} - \delta_I} \left((\delta_{II} - \delta_1) e^{-\delta_I t} - (\delta_I - \delta_1) e^{-\delta_{II} t} \right) \\ w_2(t) = k_2 \frac{P_1 \Delta t}{V_1} \delta_2 \frac{1}{\delta_{II} - \delta_I} \left(e^{-\delta_I t} - e^{-\delta_{II} t} \right) \end{cases} \quad (4.7)$$

Nous pouvons distinguer deux cas extrêmes du comportement de la densité d'énergie selon les valeurs relatives de δ_1 et δ_2 , comme illustré sur la figure 4.2 (en considérant bien sûr des facteurs de couplage faibles afin d'assurer un découplage effectif des deux espaces). Dans le cas où l'espace principal est fortement amorti par rapport au second ($\delta_1 > \delta_2$) nous obtenons un phénomène de double décroissance dans l'espace principal parfois exploité dans certaines salles à acoustique variable [Luizard 2010]. Lorsque, à l'inverse, l'espace secondaire présente un amortissement supérieur à celui de l'espace principal ($\delta_1 < \delta_2$), le phénomène de double pente n'est plus présent. La décroissance de niveau sonore est à peu près équivalente dans les deux espaces, mais le niveau sonore de l'espace secondaire est inférieur à celui de l'espace principal. C'est cette dernière situation qui correspond à notre problème initial ; le cas d'un théâtre avec loges ou d'une salle avec balcons.

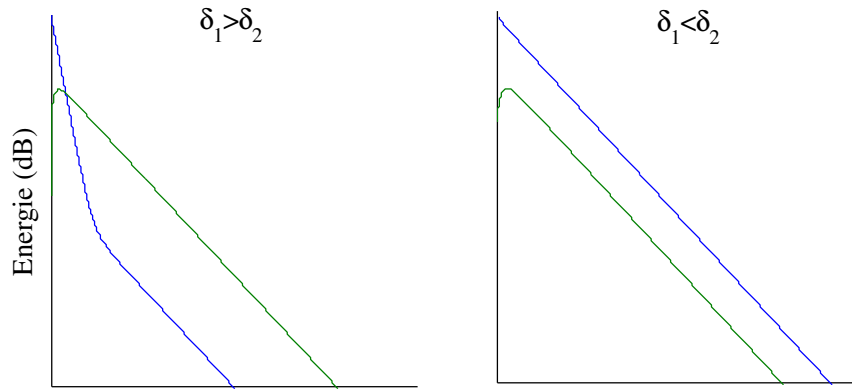


FIGURE 4.2 - Réponses impulsionnelles d'après la théorie énergétique dans deux salles couplées (salle 1—, salle 2 —).

4.1.2 Salles couplées équipées d'un SAR

Nous nous intéressons ici au cas illustré par le schéma 4.3. La salle principale contenant la source est équipée de canaux d'assistance à la réverbération identiques à ceux utilisés dans une salle classique, donc contenant éventuellement un retard électronique. Entre l'espace secondaire et la salle principale, quelques canaux sont installés en couplage. Ceux-ci ne contiennent pas de retard électronique, car ils sont utilisés pour rapprocher les caractéristiques du champ sonore de l'espace secondaire de celles de l'espace principal, et ce sans décalage temporel.

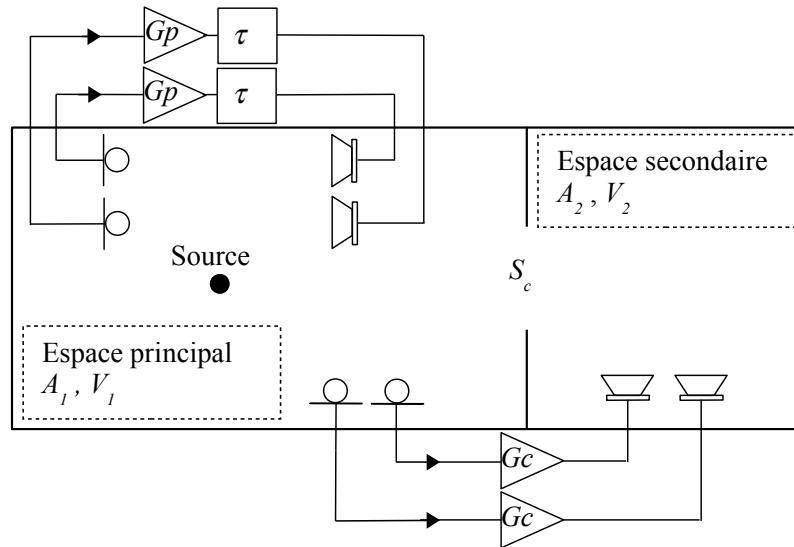


FIGURE 4.3 - Salles couplées avec introduction de canaux électroacoustiques en augmentation du couplage et en augmentation de l'effet de salle dans la salle principale. Le système est différencié en deux parties, les canaux d'augmentation de l'effet de salle dans l'espace principal ayant chacun un gain électronique G_p et les canaux de découplage ayant chacun un gain électronique G_c .

4.1.2.1 Approche énergétique de l'action du système

Comme dans le cas de salles non couplées, l'action d'un canal du système est vue dans chaque espace où est implanté le haut-parleur, comme une source équivalente fonction du gain électronique et de la densité d'énergie de l'espace où est positionné le microphone. Ainsi, d'après l'approche énergétique basée sur l'hypothèse d'un champ acoustique (isotrope et homogène) le système d'équations régissant l'évolution de la densité d'énergie se met sous la forme :

$$\begin{cases} \frac{1}{\delta_1} \frac{dw_{1\,ea}(t)}{dt} + w_{1\,ea}(t) - k_1 w_{2\,ea}(t) = P_1 \frac{4k_1}{cS_c} + N_p G_p^2 w_{1\,ea}(t - \tau) \frac{4}{cA_{11}} \\ \frac{1}{\delta_2} \frac{dw_{2\,ea}(t)}{dt} + w_{2\,ea}(t) - k_2 w_{1\,ea}(t) = N_c G_c^2 w_{1\,ea}(t) \frac{4}{cA_{22}} \end{cases} \quad (4.8)$$

Les valeurs des gains électroniques en puissance G_p^2 et G_c^2 peuvent se substituer par leurs expressions en fonction de deux paramètres $\overline{\Gamma}_p$ et $\overline{\Gamma}_c$. Avec :

$$\overline{\Gamma}_p = G_p^2 H_{11}^2$$

et

$$\overline{\Gamma}_c = G_c^2 H_{21}^2$$

où, H_{11}^2 correspond au gain en régime stationnaire de densité d'énergie dans l'espace principal produit par une source située dans ce même espace, et où H_{21}^2 correspond au gain en régime stationnaire de densité d'énergie dans l'espace principal produit par une source située dans l'espace secondaire. Ainsi :

$$G_p^2 = \overline{\Gamma}_p k_2 \frac{cS_c}{4} \frac{1 - \kappa^2}{\kappa^2} \quad (4.9)$$

et

$$G_c^2 = \overline{\Gamma}_c \frac{cS_c}{4} \frac{1 - \kappa^2}{\kappa^2} \quad (4.10)$$

En utilisant l'approximation faite par *Poletti* décrite dans la partie 1.3.1 concernant l'action des retards électroniques :

$$\begin{cases} \frac{1}{\delta_{1\,ea}} \frac{dw_{1\,ea}(t)}{dt} + w_{1\,ea}(t) - k_{1\,ea} w_{2\,ea}(t) = P_1 \frac{4k_{1\,ea}}{cS_c} \\ \frac{1}{\delta_{2\,ea}} \frac{dw_{2\,ea}(t)}{dt} + w_{2\,ea}(t) - k_{2\,ea} w_{1\,ea}(t) = 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

avec

$$\delta_{1\,ea} = \delta_1 \frac{1 - N_p \overline{\Gamma}_p (1 - \kappa^2)}{1 + N_p \overline{\Gamma}_p \tau \delta_1 (1 - \kappa^2)} \quad (4.12)$$

$$\delta_{2\,ea} = \delta_2 \quad (4.13)$$

$$k_{1\,ea} = k_1 \frac{1}{1 - N_p \overline{\Gamma}_p (1 - \kappa^2)} \quad (4.14)$$

$$k_{2\,ea} = k_2 \left(1 + N_c \overline{\Gamma}_c \frac{(1 - \kappa^2)}{\kappa^2} \right) \quad (4.15)$$

La similarité des systèmes d'équations (4.3) et (4.11) permet de déduire par analogie l'évolution de la densité d'énergie dans les salles couplées équipées d'un SAR contenant des canaux d'augmentation de couplage. Ainsi :

$$\delta_{I/II\,ea} = \frac{1}{2} \left((\delta_{1\,ea} + \delta_2) \mp \sqrt{(\delta_{1\,ea} - \delta_2)^2 + 4\kappa_{ea}^2 \delta_{1\,ea} \delta_2} \right) \quad (4.16)$$

où $\kappa_{ea}^2 = k_{1ea}k_{2ea}$ est le facteur de couplage global en actif. En reprenant des conditions initiales identiques à celles données par les relations (4.6), mais en y substituant les coefficients de couplage k_i et les coefficients d'amortissement δ_i à leurs équivalents en actif², nous obtenons :

$$\begin{cases} w_{1ea}(t) = \frac{P_1 \Delta t}{V_1} \frac{1}{\delta_{IIea} - \delta_{Iea}} \left((\delta_{IIea} - \delta_{1ea}) e^{-\delta_{Iea} t} - (\delta_{Iea} - \delta_{1ea}) e^{-\delta_{IIea} t} \right) \\ w_{2ea}(t) = k_{2ea} \frac{P_1 \Delta t}{V_1} \delta_2 \frac{1}{\delta_{IIea} - \delta_{Iea}} \left(e^{-\delta_{Iea} t} - e^{-\delta_{IIea} t} \right) \end{cases} \quad (4.17)$$

Vis-à-vis du phénomène de réverbération, les canaux principaux comme ceux de couplage contribuent à l'augmentation de réverbération dans les espaces principal et secondaire par l'intermédiaire de leur action sur l'argument des exponentielles du système d'équations (4.17) et sur leurs coefficients multiplicateurs. Ils participent aussi à homogénéiser les processus de décroissance tardive entre ces deux espaces du fait qu'en augmentant le coefficient de couplage global κ_{ea} (en le faisant se rapprocher de 1), ils diminuent la valeur de δ_{IIea} et augmentent celle de δ_{Iea} ; ce qui augmente l'influence relative du terme $e^{-\delta_{Iea} t}$ sur la décroissance dans chacun des deux espaces.

Il est possible de donner l'augmentation de la densité d'énergie dans les espaces principal et secondaire due au système en se plaçant en régime stationnaire. Ainsi, en reprenant l'expression (4.17) :

$$\frac{w_{1ea}}{w_1} = \frac{1}{1 - (N_p \overline{\Gamma_p} + N_c \overline{\Gamma_c})} \quad (4.18)$$

et

$$\frac{w_{2ea}}{w_2} = \frac{w_{1ea}}{w_1} \frac{k_{2ea}}{k_2} = \frac{\left(1 + N_c \overline{\Gamma_c} \frac{(1-\kappa^2)}{\kappa^2} \right)}{1 - (N_p \overline{\Gamma_p} + N_c \overline{\Gamma_c})} \quad (4.19)$$

Nous pouvons remarquer que la densité d'énergie dans l'espace principal est augmentée comme dans le cas d'un SAR classique et que les canaux d'augmentation de couplage influent sur l'augmentation d'énergie dans cet espace comme les canaux principaux. Pour l'espace secondaire, l'augmentation de densité d'énergie par rapport à l'augmentation de celle de l'espace principal est renforcée par les canaux d'augmentation de couplage permettant ainsi d'homogénéiser le niveau sonore des deux espaces (ce qui par ailleurs est aussi directement visible à partir de l'expression (4.15) du coefficient de couplage k_{2ea} en fonction du coefficient de couplage initial k_2).

Comme dans le cas des salles simples équipées d'un SAR, il est important de noter que $\overline{\Gamma_p}$ et $\overline{\Gamma_c}$ ne sont pas des GMBO au sens strict. Il est néanmoins là aussi possible de les relier aux GMBO réels $\overline{\Gamma'_p}$ et $\overline{\Gamma'_c}$ (voir annexe B) :

$$\overline{\Gamma_p} = \frac{\overline{\Gamma'_p}}{1 + \left(N_c \overline{\Gamma'_c} \left(\frac{1-\overline{\Gamma'_p}}{1-\overline{\Gamma'_c}} \right) + (N_p - 1) \overline{\Gamma'_p} \right)} \quad (4.20)$$

et

$$\overline{\Gamma_c} = \frac{\overline{\Gamma'_c}}{1 + \left(N_p \overline{\Gamma'_p} \left(\frac{1-\overline{\Gamma'_c}}{1-\overline{\Gamma'_p}} \right) + (N_c - 1) \overline{\Gamma'_c} \right)} \quad (4.21)$$

2. Contrairement à l'approche énergétique de l'action des SAR installés dans une salle simple développée dans la partie 3.1.1, nous considérons ici les retards électroniques du système principal uniquement vis-à-vis d'un effet d'augmentation du volume virtuel de l'espace principal. Nous ne prenons pas en compte le retard initial d'action du système. Cela compliquerait les expressions alors que le but de cette partie n'est pas de prévoir une réponse impulsionnelle. Nous ne cherchons ici qu'à comprendre l'action d'un système dans les salles couplées sur le processus de réverbération et le niveau sonore.

4.1.2.2 Stabilité d'un système électroacoustique d'augmentation de couplage

Le système présenté sur la figure 4.3 étant un système bouclé multivariable, la fonction de gain en boucle fermée (1.17) est ici aussi applicable. La matrice de gain en boucle ouverte régit donc la stabilité de ce type de système. Cependant, dans le cas d'un système mixte, la statistique sur les valeurs propres de cette matrice n'est plus la même que celle décrite dans la partie 1.2.2. Car, contrairement au cas classique d'utilisation d'un SAR régénératif, les transferts acoustiques inter canaux n'ont théoriquement pas tous une énergie moyenne équivalente. Ceci est dû au phénomène même de découplage qui entraîne la non-équivalence énergétique entre les transferts acoustiques impliquant les haut-parleurs situés dans l'espace secondaire et ceux impliquant les haut-parleurs situés dans l'espace principal. La matrice de gain en boucle ouverte ne peut donc se mettre sous la forme d'une matrice composée de valeurs complexes gaussiennes possédant toutes les mêmes propriétés statistiques que dans le cas d'un système composé uniquement de canaux dans l'espace principal ou uniquement de canaux d'augmentation de couplage, car ainsi l'ensemble des transferts acoustiques inter et intra canaux sont équivalents au niveau énergétique. Dans ce cas seulement, on peut considérer que les règles sur les valeurs maximales de gain en boucle ouverte concernant la stabilité, données à la partie 1.2.2, sont applicables. Pour le cas d'un système uniquement composé de canaux d'augmentation de couplage, la condition sur la valeur de $\overline{\Gamma}_c$ vis-à-vis de la stabilité du système est donc donnée par la formule (1.20) sur la probabilité d'instabilité d'un système d'assistance en fonction du nombre de canaux (ici N_c).

4.1.2.3 Illustration de l'action théorique d'un SAR dans des espaces couplés

Nous nous proposons d'illustrer l'action théorique d'un SAR dans des espaces couplés, et ce dans le cadre d'une salle réaliste contenant un espace sous balcon mal couplé. Celle-ci est composée d'un volume principal de 10000 m^3 avec une aire équivalente d'absorption A_1 de 1600 m^2 . L'espace sous-balcon (espace secondaire) est d'un volume de 50 m^3 avec une aire équivalente d'absorption A_2 de 20 m^2 . La surface de couplage S_c est de 10 m^2 . Le coefficient d'amortissement δ_1 est de $13,8\text{ s}^{-1}$ et celui de l'espace secondaire δ_2 de $51,4\text{ s}^{-1}$ (ce qui correspond d'après la formule de Sabine (1.23) à des durées de réverbération de 1 s et de $0,27\text{ s}$). Ainsi, nous nous trouvons bien dans la situation de la figure 4.2 où $\delta_1 < \delta_2$. Le facteur de couplage initial k_2 vaut 0.33 et le facteur de couplage initial k_1 vaut 0.006.

Le SAR installé dans cette salle comporte 30 canaux, 27 principaux et 3 en découplage. Le paramètre $\overline{\Gamma}_p$ est fixé 2 dB en dessous de 5% de risque d'instabilité d'un système à 30 canaux soit -20,5 dB³. Les canaux principaux contiennent un retard électronique interne de 20 ms. Le paramètre $\overline{\Gamma}_c$ des canaux d'augmentation de couplage est fixé à -28,6 dB pour obtenir un facteur de découplage en actif k_{2ea} de 1. Comme cela est montré sur la figure 4.4(a), sans le SAR, la décroissance du son dans les deux espaces est principalement régie par les propriétés de l'espace principal sans considération de l'espace secondaire. Lorsque seuls les canaux principaux sont actifs, nous constatons que la durée de réverbération est modifiée de manière presque identique dans les deux espaces. Concernant les canaux d'augmentation du couplage, compte tenu de leur nombre et de leur gain faibles, ils ne modifient que très légèrement la durée de réverbération, mais permettent d'élever le niveau global de la réponse impulsionnelle de l'espace secondaire jusqu'à celui de l'espace principal.

L'utilisation simultanée de canaux d'augmentation de couplage et de canaux principaux permet

3. Malgré que, comme expliqué à la partie 4.1.2.2, les conditions de stabilité d'un système mixte composé de canaux principaux et canaux d'augmentation du couplage ne soient pas identiques à celles d'un système classique.

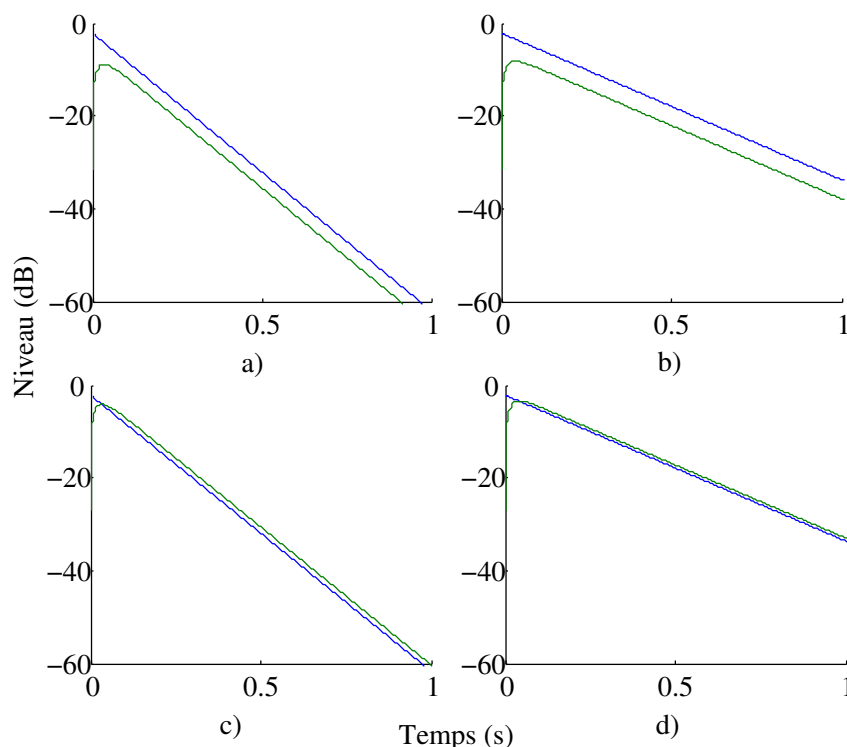


FIGURE 4.4 - Réponses impulsionnelles dans l'espace principal (—) et l'espace secondaire (—) d'une salle couplée. (a) sans SAR ; (b) avec un SAR composé de canaux principaux uniquement ; (c) avec un SAR composé de canaux d'augmentation de couplage uniquement ; (d) avec un SAR composé de canaux principaux et de canaux d'augmentation de couplage.

donc de combiner les effets dus aux deux types de canaux. Ainsi, on peut considérer en première approximation que les canaux principaux permettent d'augmenter la durée de réverbération des deux espaces, et que les canaux d'augmentation de couplage permettent d'augmenter le facteur de couplage, et que ceux-ci ne jouent que de manière faible sur l'augmentation de la durée de réverbération.

4.2 Étude du système d'augmentation de couplage à partir d'une approche systémique basée sur des simulations numériques

Dans la suite de ce chapitre, nous proposons d'étudier l'effet d'un SAR dédié à l'augmentation de couplage à partir de l'approche systémique de celui-ci basée sur des simulations numériques, telle que décrite au chapitre 2. Les réponses impulsionnelles nécessaires à cette approche ont, ici aussi, été générées par le logiciel Icare⁴.

Cette étude se divise en deux parties : l'une est principalement consacrée à la validation dans les espaces couplés de l'approche énergétique développée précédemment et à l'étude du phénomène

4. Cependant, nous avons modifié les paramètres de ces simulations par rapport à ceux utilisés dans l'exemple fourni au chapitre 2, car dans les espaces couplés, la circulation des faisceaux et des particules, propres aux méthodes asymptotiques, peut être limitée par le phénomène même de couplage. L'ordre maximal du lancer de faisceaux et le nombre de particules lancées ont ainsi été doublés pour obtenir une précision suffisante des réponses impulsionnelles simulées.

d'augmentation de couplage, dans un cadre général, produit par un SAR dédié. L'autre est centrée sur l'évolution produite par ce même système de quatre indices acoustiques. Notons que nous avons fait le choix de nous intéresser ici à un système composé uniquement de canaux d'augmentation de couplage pour différentes valeurs de leur GMBO. Du point de vue de l'approche énergétique développée précédemment cela revient à fixer un nombre de canaux principaux N_p à 0. Soit :

$$\begin{cases} w_{1\,ea}(t) = \frac{P_1 \Delta t}{V_1} \frac{1}{\delta_{II\,ea} - \delta_{I\,ea}} \left((\delta_{II\,ea} - \delta_1) e^{-\delta_{I\,ea} t} - (\delta_{I\,ea} - \delta_1) e^{-\delta_{II\,ea} t} \right) \\ w_{2\,ea}(t) = k_{2\,ea} \frac{P_1 \Delta t}{V_1} \delta_2 \frac{1}{\delta_{II\,ea} - \delta_{I\,ea}} \left(e^{-\delta_{I\,ea} t} - e^{-\delta_{II\,ea} t} \right) \end{cases} \quad (4.22)$$

$$\delta_{I/II\,ea} = \frac{1}{2} \left((\delta_1 + \delta_2) \mp \sqrt{(\delta_1 - \delta_2)^2 + 4k_1 k_{2\,ea} \delta_1 \delta_2} \right) \quad (4.23)$$

où $k_{2\,ea}$ est toujours donné par l'équation (4.15), et peut aussi s'exprimer en fonction du GBMO $\bar{\Gamma}'$:

$$k_{2\,ea} = k_2 \left(1 + N_c \frac{\bar{\Gamma}'}{1 - (N_c - 1)\bar{\Gamma}'} \frac{(1 - \kappa^2)}{\kappa^2} \right) \quad (4.24)$$

4.2.1 Présentation de la salle couplée virtuelle et du système électroacoustique d'augmentation de couplage

La salle virtuelle dont il est question dans cette étude est une salle réaliste dont la forme géométrique et les propriétés acoustiques des surfaces sont proches de celles pouvant être rencontrées dans une salle de concert réelle, quitte à s'éloigner des conditions acoustiques favorisant les hypothèses d'un champ diffus⁵. Pour ses proportions et les propriétés acoustiques de ses matériaux, cette salle est inspirée du « Waterside Theatre » à Aylesbury en Angleterre. Les balcons latéraux et le balcon supérieur à l'arrière-salle ont été supprimés (voir figure 4.5). Seul le balcon inférieur de l'arrière-salle a été conservé, mais aussi prolongé. Ceci dans le but d'augmenter la surface (et donc l'absorption) de l'espace sous-balcon et de réduire la valeur de l'ouverture de celui-ci sur l'espace principal, afin de diminuer le couplage entre celui-ci et la salle principale.

Nous avons fixé la source au niveau de la scène à 1,50 m au-dessus de celle-ci, sur l'axe médian de la salle et placé à 1 m de l'avant-scène. Nous avons placé 60 points de réceptions à 1,50 m de hauteur, 30 dans l'espace principal et 30 dans l'espace secondaire ; tous côté jardin, car cette salle est symétrique.

Les principales caractéristiques géométriques et acoustiques de chaque sous-espace de cette salle sont données dans le tableau 4.1. Les coefficients de couplage théoriques k_1 et k_2 calculés à partir de celles-ci sont respectivement de 0,07 et 0,27 ; théoriquement, ces espaces sont donc bien découplés. Nous avons indiqué dans ce tableau les durées de réverbération calculées à partir de réponses impulsionnelles données par le logiciel Icare. Celles-ci ont été obtenues en remplaçant la surface de couplage par une paroi totalement isolante pour supprimer l'effet de couplage, et totalement absorbante de sorte à être équivalente une surface libre. Pour obtenir k_1 la source a été placée dans l'espace principal, pour obtenir k_2 la source a été placée dans l'espace secondaire. Nous pouvons observer que dans l'espace principal comme dans l'espace secondaire, les valeurs de durées de réverbération issues des simulations sont très proches de celles calculées par la formule de Sabine. Ceci tend à montrer que chaque sous-espace de notre salle virtuelle vérifie plutôt bien les hypothèses de

5. À savoir pour chaque sous-espace (principal et secondaire) une forme géométrique favorisant une isotropie du champ acoustique, une absorption moyenne ni trop faible ni trop importante et une répartition de l'absorption homogène sur les surfaces.

	Espace principal	Espace secondaire (sous-balcon)
Volume (m ³)	8272	618
Nombre de sièges	726	520
Surface (m ²)	2893	520
Surface équivalente d'absorption (m ²) (500 Hz-1 kHz)	1281	245
Tr ₀ Sabine (s) (500 Hz-1 kHz)	1,03	0,30
Tr ₀ simulations (s) (500 Hz-1 kHz)	1,05	0,27
Surface de couplage (m ²)	90	

Tableau 4.1 - Les principales caractéristiques géométriques et acoustiques de la salle virtuelle simulée. Le volume donné ici inclut celui de l'espace de scène. Le nombre de sièges est obtenu par division de la surface au sol de l'auditoire par 0,6 m² ; cette valeur étant considérée comme étant la surface au sol occupée par un siège dans une salle de concert. Les surfaces d'absorption ont été obtenues en considérant uniquement les parois réelles à l'intérieur de chaque espace, la surface de couplage n'a donc pas été incluse.

l'approche énergétique, et ce malgré la présence d'une surface totalement absorbante importante (surface de couplage). La raison en étant peut être la présence d'éléments fortement diffusants sur les parois de chacun de ces sous-espaces.

Le système électroacoustique de découplage est constitué de trois canaux (voir figure 4.5-b). Le microphone de chacun d'entre eux est placé au niveau du nez de balcon, dans l'espace principal. Le haut-parleur correspondant est placé sous ce balcon à mi-profondeur de celui-ci. Les haut-parleurs et les microphones utilisés sont identiques à ceux du système Carmen si bien que ceux-ci sont respectivement hémidirectionnels et bidirectionnels. Le maximum de directivité des haut-parleurs est dirigé vers le bas (vers l'auditoire situé sous le balcon) et le maximum de directivité des microphones est dirigé suivant l'axe droite-gauche de la salle (voir figure 2.14). Notons cependant que, contrairement à une installation classique du système Carmen, l'orientation de la directivité des microphones n'est pas ici un paramètre sensible puisque comme le haut-parleur et le microphone d'un même canal ne sont pas ici en visibilité directe le découplage du champ direct est assuré, quelles que soient l'orientation et la directivité des microphones. Nous avons simulé le système pour quatre configurations se différenciant les unes des autres par le gain du système. Le tableau 4.2 présente les valeurs de GMBO par canal, calculées après la phase d'égalisation automatique.

Configuration n°		0	1	2	3	4
GMBO par canal $\overline{\Gamma}_c$ (dB)	toutes fréquences		-21,7	-19,6	-18,5	-15,9
GMBO par canal $\overline{\Gamma}_c$ (dB)	500 Hz	Système inactif	-21,8	-19,6	-18,1	-17,3
	1 kHz		-21,7	-19,5	-18,2	-17,6

Tableau 4.2 - Les différentes configurations du système et le GMBO par canal électroacoustique correspondant.

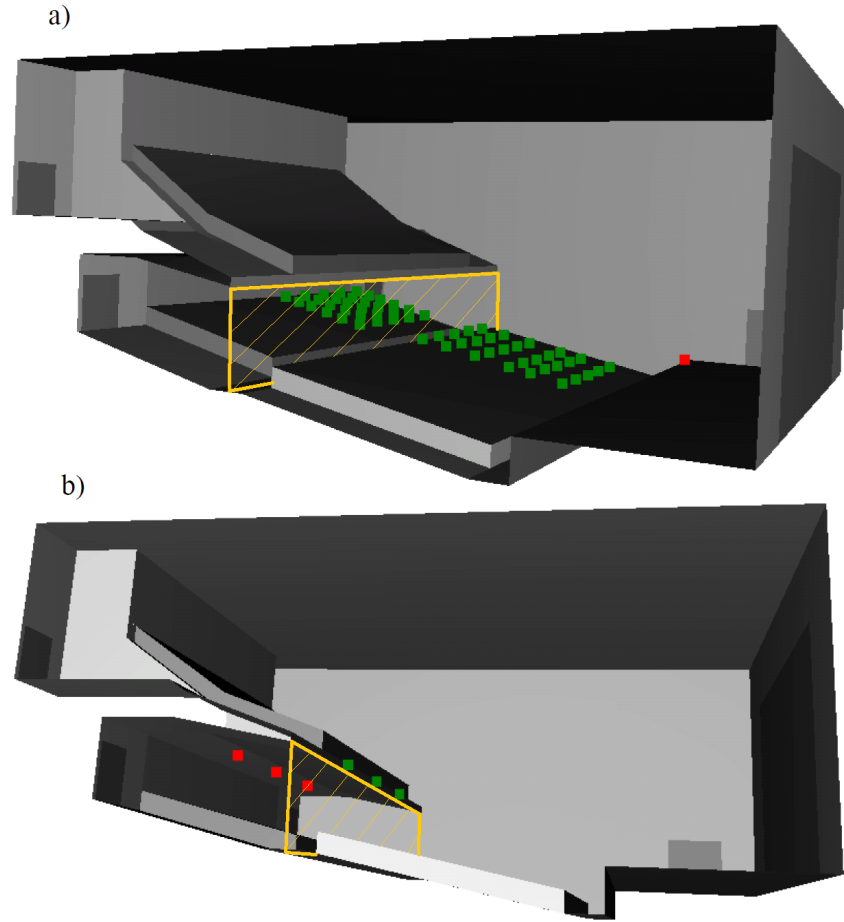


FIGURE 4.5 - Salle couplée virtuelle. a) : positions de la source ■ et des 60 points de réception au niveau de l'auditoire ■. b) : positions des haut-parleurs ■ et des microphones ■ du SAR. Surface de séparation entre l'espace principal et secondaire ▭.

4.2.2 Effet du couplage sur l'énergie tardive des réponses impulsionnelles

Du fait que les réflexions précoces ne peuvent être correctement abordées qu'en prenant en compte les détails architecturaux, et les positions exactes de la source et du récepteur, l'approche énergétique des salles couplées avec ou sans système électroacoustique de couplage présentée précédemment n'est possiblement valide que pour la partie tardive de la réponse impulsionnelle, après le temps de transition [Polack 1992]. Il serait donc illusoire de vouloir comparer, pour des temps proches du champ direct, l'évolution temporelle de l'énergie d'une réponse impulsionnelle simulée par une approche par méthodes asymptotiques qui prend en compte ces détails, et celle donnée par l'approche énergétique. La figure 4.6 illustre cette remarque en montrant que seules la fin de la décroissance donnée par l'approche énergétique et celle donnée par une approche par méthodes asymptotiques sont comparables. Pour cette partie tardive de la réponse impulsionnelle, cette figure met aussi en évidence le fait que, comme prévu par l'approche énergétique, le phénomène de couplage joue principalement sur la différence d'énergie entre l'espace principal et l'espace secondaire ; les décroissances dans ces deux espaces étant quant à elles quasiment identiques. La réponse

impulsionnelle peut être considérée comme tardive lorsque les décroissances du champ sonore dans l'espace principal comme dans l'espace secondaire peuvent être toutes deux jugées comme suffisamment régulières et peu influencées par les réflexions précoces (autrement dit, après l'établissement du champ diffus). Compte tenu de la dynamique importante des réponses impulsionnelles données par la simulation numérique, il est possible de fixer ici le début de ce champ tardif à un temps t_m relativement élevé de sorte à éviter au maximum d'inclure les réflexions précoces. Nous choisissons ainsi de la fixer à 300 ms après l'émission du signal source.

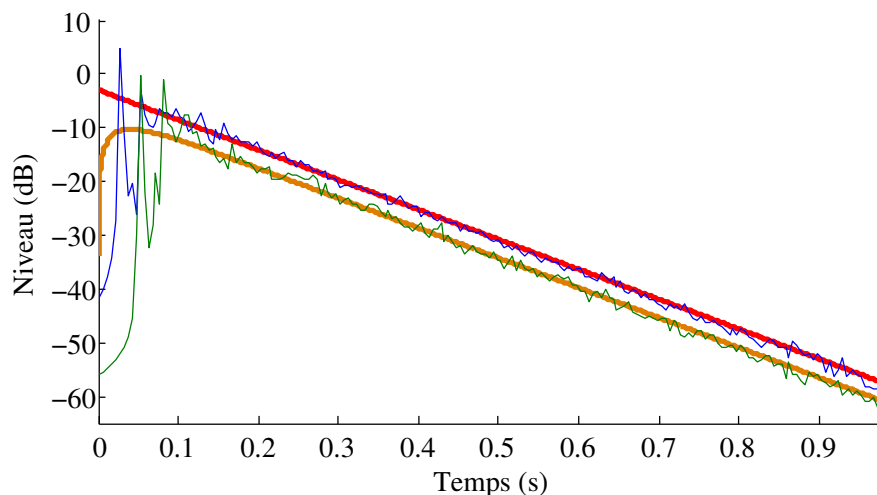


FIGURE 4.6 - Évolutions temporelles de la densité d'énergie dans l'espace principal (—) et secondaire (—) données par le Logiciel Icare de simulation numérique et par l'approche énergétique (—) (—).

Les valeurs de l'énergie tardive en chaque point de réception de la salle de la figure 4.5, sans utilisation du système électroacoustique d'augmentation du couplage, sont présentées sur la figure 4.7 b). Si dans cette salle, nous supprimons seulement le balcon et remplaçons la surface libre alors restante par une paroi réfléchissante, les valeurs d'énergie tardive aux mêmes points de réception sont alors celles données par lecture de la figure 4.7 a). Si nous comparons ces deux figures, il apparaît clairement que le comportement de l'énergie tardive des réponses impulsionnelles diffère de manière importante avec la présence ou non d'un balcon⁶. Dans la salle sans balcon, aucune différence sensible n'apparaît entre les premiers et les seconds gradins. Les niveaux y semblent à peu près identiques et aucune dépendance de la distance à la source n'est visible sur la figure 4.7 a). Par contre, dans la salle avec balcon, les énergies tardives obtenues en différents points sont légèrement influencées par l'éloignement de la source dans les premiers gradins, et fortement dans les seconds ; et surtout, elles sont sensiblement plus faibles sous le balcon que dans l'espace principal. Afin de quantifier le couplage de l'espace sous balcon, nous proposons d'utiliser un indice objectif Δ_w basé sur le rapport des énergies tardives entre les espaces principal et secondaire. Pour des raisons de dispersion selon les points de réception, notamment avec la distance à la source, il est préférable de le définir à partir de valeurs moyennes. Enfin, dans le but de prendre un minimum en

6. La différence globale de niveau de l'énergie tardive entre la salle sans balcon et avec résulte, très probablement, d'une dissipation d'énergie acoustique moins rapide dans la salle sans balcon, car le fait d'avoir supprimé le balcon a également supprimé une partie importante de matériaux absorbants sans avoir modifié le volume de la salle dans une proportion identique.

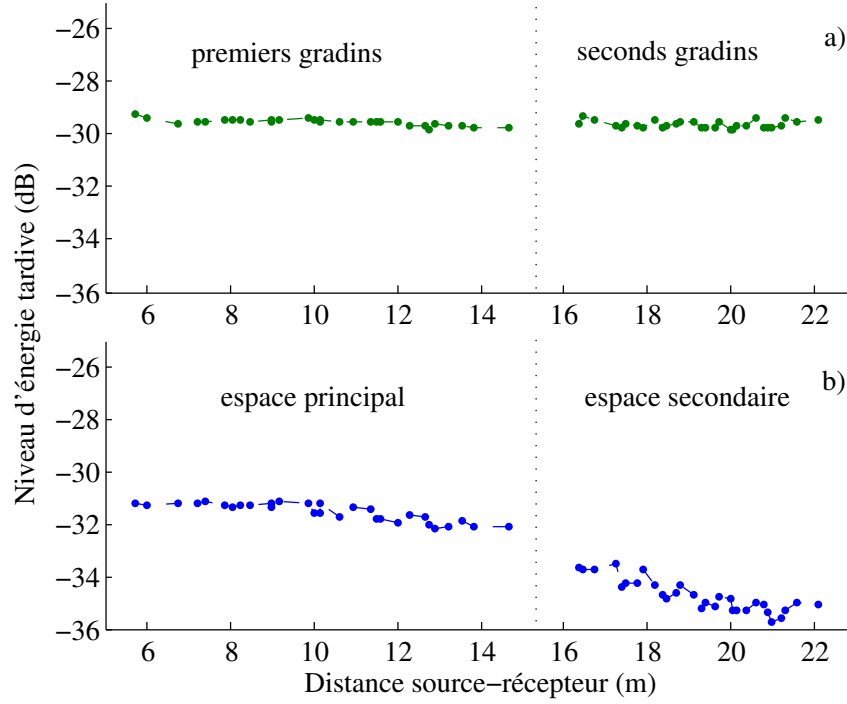


FIGURE 4.7 - Énergie tardive en fonction de la distance source-récepteur, dans la salle sans balcon a) et avec balcon b). Ces quantités ont été obtenues en considérant toutes les fréquences contenues dans les réponses impulsionnelles, soit de 0 Hz à 8192 Hz.

compte le comportement du système auditif il est proposé de l'exprimer en décibels.

$$\Delta_w = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_{0,3}^{+\infty} p_2^2(t) dt}{\int_{0,3}^{+\infty} p_1^2(t) dt} \right) \quad (4.25)$$

où $\int_{0,3}^{+\infty} p_1^2(t) dt$ est la moyenne des énergies tardives contenues dans les réponses impulsionnelles simulées en différents points dans l'espace principal et où $\int_{0,3}^{+\infty} p_2^2(t) dt$ est la moyenne des énergies tardives contenues dans les réponses impulsionnelles simulées en différents points dans l'espace secondaire. Plus cet indice est proche de 0 dB, plus les énergies tardives des espaces principal et secondaire sont proches et, plus il en est éloigné, plus elles sont différentes. Pour la salle avec balcon la valeur de cet indice est de -3,2 dB, pour celle sans balcon elle est inférieure à 0,1 dB.

Un avantage de cet indice est qu'il est possible d'en obtenir une expression théorique issue de l'approche énergétique. Celle-ci s'obtient à partir du système équation (4.7) :

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{k_2 \delta_2}{\delta_{II} - \delta_1} \left(\frac{1 - e^{-(\delta_{II} - \delta_I)t}}{1 - \frac{\delta_I - \delta_1}{\delta_{II} - \delta_1} e^{-(\delta_{II} - \delta_I)t}} \right) \quad (4.26)$$

À partir d'un temps important $t_m \gg 0$, les termes en exponentielle deviennent négligeables devant 1 puisque la différence $\delta_{II} - \delta_I$ est positive. Ainsi :

$$\Delta_w = 10 \log_{10} \left(\frac{k_2 \delta_2}{\delta_{II} - \delta_1} \right) \quad (4.27)$$

4.2.3 Effet du système électroacoustique d'augmentation de couplage sur l'énergie tardive des réponses impulsionnelles

Les valeurs de l'énergie tardive en chaque point de réception de la salle pour les différentes configurations du système électroacoustique sont présentées sur la figure 4.8. En introduisant le système électroacoustique de couplage et en augmentant son gain, la dépendance entre énergie tardive et distance source-récepteur évolue dans les deux espaces, mais de façon plus sensible dans l'espace secondaire. Pour des gains du système faibles ou moyennement élevés (configurations 1, 2 et 3), cette dépendance n'est plus aussi marquée, voir disparaît presque complètement comme dans le cas d'une salle sans balcon. Pour la configuration 4, correspondant au gain du système le plus élevé testé ici, l'influence de la distance à la source sur les valeurs de l'énergie tardive dans l'espace secondaire s'inverse ; celles-ci augmentent avec la distance source-récepteur. De plus, dans cette configuration, la dispersion des valeurs d'énergie tardive de l'espace secondaire est importante et semble avoir une autre source que la seule distance source-récepteur, celle-ci étant peut-être la proximité des points de réception avec les haut-parleurs du système. Ainsi, pour des gains moyens du système celui-ci réduit sensiblement la différence de comportement de l'énergie tardive avec la distance source-récepteur entre l'espace principal et l'espace secondaire, mais lorsqu'un gain trop important est appliqué au système, les différences de comportement de l'énergie tardive en fonction de la distance à la source entre l'espace secondaire et l'espace principal redeviennent significatives.

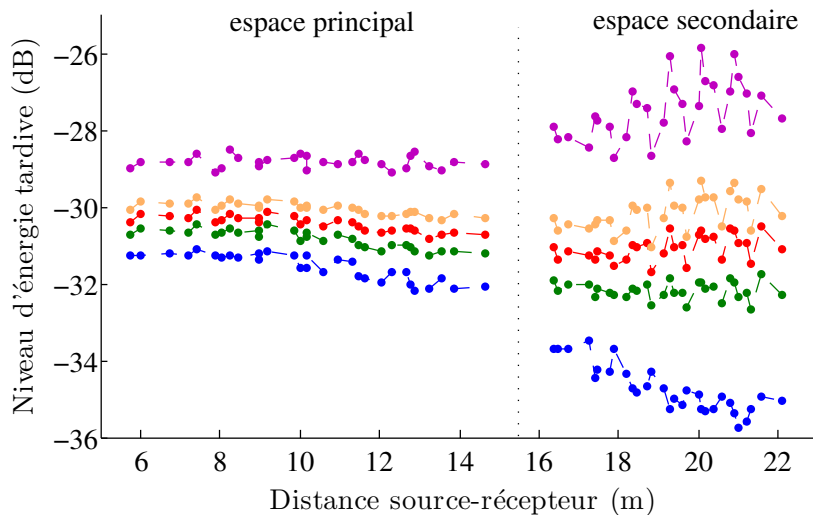


FIGURE 4.8 - Énergie tardive en différents points de la salle en fonction de la distance source-récepteur en l'absence (configuration 0 : —) et en présence de système électroacoustique de couplage (configuration 1 : —), (configuration 2 : —), (configuration 3 : —), (configuration 4 : —). Ces quantités ont été obtenues en considérant toutes les fréquences contenues dans les réponses impulsionnelles, soit de 0 Hz à 8192 Hz.

De manière plus globale, comme prévu par l'approche énergétique (équations (4.18) et (4.19)), nous pouvons remarquer sur la figure 4.8 que le système électroacoustique de découplage apporte en moyenne plus d'énergie tardive dans l'espace secondaire que dans l'espace principal. Ce qui a pour effet de faire évoluer l'indice de couplage. Sans système, la valeur de cet indice est nettement inférieure à 0 dB, pour les configurations 2 et 3, elle est proche de 0 dB, et pour la configuration 4, elle est largement positive. Ainsi, le système permet de combler le manque global d'énergie tardive

de l'espace sous-balcon par rapport au reste de la salle, dû au phénomène de couplage ; mais, si son gain est trop important, il crée le déséquilibre inverse.

D'un point vu analytique, puisque l'introduction du système d'augmentation de couplage ne modifie pas la condition nécessaire à l'établissement de la formule théorique de Δ_w , à savoir un facteur d'amortissement de l'espace primaire inférieur à celui de l'espace secondaire ($\delta_{II\ ea} - \delta_{I\ ea} > 0$), l'expression du facteur de couplage avec le système peut s'obtenir par analogie à partir de l'expression (4.27). Soit :

$$\frac{w_{2\ ea}}{w_{1\ ea}} = 10 \log_{10} \left(\frac{k_{2\ ea} \delta_2}{\delta_{II\ ea} - \delta_1} \right) \quad (4.28)$$

D'après le tableau 4.3, les valeurs théoriques de l'indice Δ_w ne semblent pas correspondre exactement aux valeurs issues des simulations puisque celles-ci sont souvent légèrement hors de l'intervalle de confiance des valeurs simulées. Cependant, la différence entre les valeurs théoriques et simulées n'est souvent que de l'ordre de quelques dixièmes de décibels, ce qui reste probablement acceptable d'un point de vue psychoacoustique. De plus, les dynamiques des valeurs de Δ_w théoriques et issues de simulations avec l'augmentation du gain du système sont comparables. Ainsi, bien que non exacte, l'approche énergétique de la prévision de Δ_w , est suffisante pour décrire qualitativement l'effet d'un système électroacoustique.

Configuration n°	0	1	2	3	4
Δ_w simulations (dB)	-3,2	-1,3	-0,6	0,1	1,4
Intervalle de confiance à 95% sur Δ_w simulations (dB)	-3,5/-2,9	-1,5/-1,2	-0,8/-0,5	-0,3/0,2	1,0/1,7
Δ_w théorique (dB)	-4,1	-1,6	-0,4	0,3	2,6

Tableau 4.3 - Évolution théorique et simulée de l'énergie tardive moyenne dans l'espace principal et l'espace secondaire, due à la présence du système électroacoustique d'augmentation de couplage. Les calculs, comme les résultats issus de simulations, sont obtenus en considérant toutes les fréquences contenues dans les réponses impulsionnelles, soit de 0 Hz à 8192 Hz.

4.2.4 Retour sur les limites d'utilisation du système électroacoustique d'augmentation de couplage

Nous avons évoqué au sous-chapitre 4.1.2.2 la limite du gain du système d'augmentation de couplage en rapport avec la stabilité. Au regard des résultats qui viennent d'être présentés un autre phénomène limitant le gain électronique appliqué à un tel système doit être pris en compte. Pour des valeurs importantes du GMBO l'ajout d'énergie du système dans l'espace secondaire peut entraîner un surplus d'énergie dans l'espace secondaire par rapport à l'espace principal, sans pour autant entraîner l'instabilité de ce même système. Or, ce résultat (correspondant à la configuration 4 du système), est à l'inverse de celui recherché, à savoir une homogénéisation des conditions acoustiques entre les deux espaces.

La limite du système vis-à-vis d'un ajout d'énergie trop important dans l'espace sous balcon par rapport à l'énergie dans l'espace principal peut être définie par un facteur de couplage maximum de 0 dB. Théoriquement cette limite se traduit par une condition sur le gain du système de découplage tel que $\Delta_w \leq 0$. Soit :

$$\overline{\Gamma}_c \leq \frac{1}{N_c} \frac{k_1 - \frac{\delta_2}{\delta_{II\,ea} - \delta_1} \kappa^2}{\frac{\delta_2}{\delta_{II\,ea} - \delta_1} - \kappa^2} \quad (4.29)$$

ou, en utilisant l'expression (4.21) de sorte à exprimer cette condition en fonction du GMBO du système $\overline{\Gamma}'_c$:

$$\overline{\Gamma}'_c \leq \frac{1}{N_c \frac{\frac{\delta_2}{\delta_{II\,ea} - \delta_1} - \kappa^2}{k_1 - \frac{\delta_2}{\delta_{II\,ea} - \delta_1} \kappa^2} - (N_c - 1)} \quad (4.30)$$

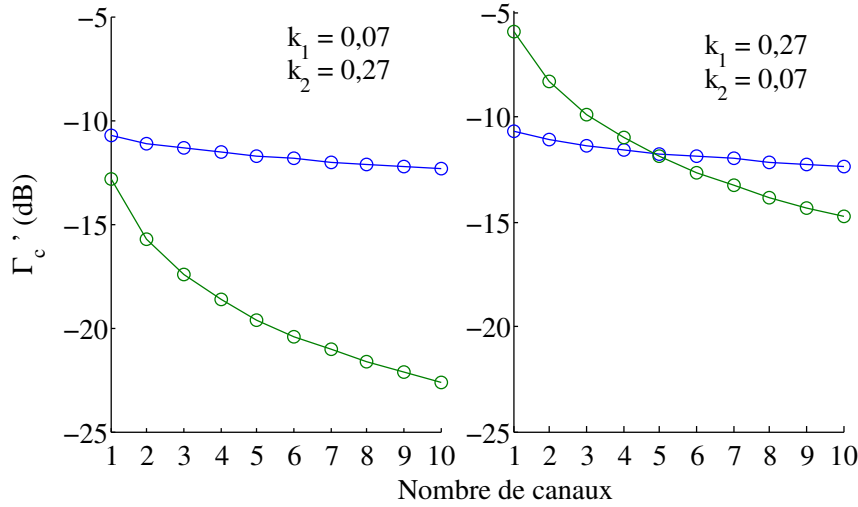


FIGURE 4.9 - Évolution de la limite maximum du GMBO $\overline{\Gamma}'_c$ d'un système électroacoustique d'augmentation de couplage selon le nombre de canaux. Condition limite liée à l'instabilité du système ($\circ$) ; condition limite liée à un facteur de couplage actif supérieur à 1 ($\circ$).

La figure 4.9 illustre deux situations théoriques différenciées par les valeurs des facteurs de couplage k_1 et k_2 différentes. Pour une faible valeur de k_1 et une valeur de k_2 plus importante, c'est la condition sur un facteur de couplage actif $k_{2\,ea}$ inférieur à 1 qui régit la valeur maximum de $\overline{\Gamma}'_c$ quelque soit le nombre de canaux. Si les valeurs des facteurs de couplage sont interverties, la valeur maximum du GMBO est régit par les problèmes de stabilité pour un faible nombre de canaux (inférieur à 5) ; pour un nombre de canaux plus important elle est régit par un facteur de couplage trop important. Dans le cas d'une loge dans un théâtre ou d'un espace sous balcon mal couplé, le facteur k_1 est souvent très faible et le facteur k_2 plus important, comme cela est le cas dans la salle virtuelle présentée précédemment. Il convient donc, dans de telles situations, de prioritairement considérer la limite du GMBO du système vis-à-vis d'un ajout d'énergie trop important dans l'espace secondaire.

Il est important de noter que les limites du système d'augmentation de couplage évoquées précédemment se basent sur une approche en champ diffus, sans considération du champ direct. Or, lors d'une installation effective de ce type de système, il faut aussi prendre en compte la valeur relative du champ direct issue des haut-parleurs du système au niveau de l'auditoire de l'espace secondaire. En effet, pour des valeurs de gain trop importantes, ce champ direct peut être détecté par le système auditif entraînant une possible délocalisation de source apparente. Cette remarque conforte l'idée que pour les canaux d'augmentation de couplage, la limite maximum de gain peut ne

plus être liée aux phénomènes d'instabilité, mais aux artéfacts que ces canaux peuvent créer dans l'espace secondaire.

4.2.5 Effet du système électroacoustique d'augmentation de couplage sur quatre indices classiques d'acoustique des salles

Comme rappelé dans l'introduction de ce chapitre sur le découplage des espaces par l'utilisation d'un SAR, les indices objectifs de réverbération précoce, de force sonore et de clarté diffèrent sensiblement selon qu'ils sont mesurés dans l'espace principal ou dans l'espace secondaire. Nous allons ici étudier le comportement de ces trois indices ainsi que celui de la durée de réverbération classique dans ces deux espaces, avec et sans système électroacoustique de couplage. Cette étude est basée sur les mêmes simulations numériques que celles utilisées pour l'étude précédente concernant l'effet du système sur l'énergie tardive des réponses impulsionnelles dans les salles couplées. Nous avons décidé ici de nous limiter à la salle sans système et avec le système en configuration 3. D'après les conclusions du paragraphe précédent, cette configuration correspond à celle où le système augmente le couplage de façon optimale ($\Delta_{w\text{sim}} \approx 0$ dB). Contrairement à l'énergie tardive, les quantités présentées dans ce paragraphe sont des moyennes sur les indices aux bandes d'octave centrées en 500 Hz et 1 kHz. Nous avons fait ce choix, car en acoustique des salles, il est coutumier de travailler sur ces quantités moyennes pour traduire une impression globale.

4.2.5.1 Effet du système électroacoustique d'augmentation de couplage sur la durée de réverbération

Les valeurs de durée de réverbération en chaque point de réception sont représentées sur la figure 4.10 en fonction de la distance source-récepteur. Avec ou sans système, la durée de réverbération semble en moyenne ne pas dépendre de la distance à la source et être à peu près homogène sur l'ensemble de l'auditoire. Pour les salles couplées sans SAR, ces deux aspects ont déjà été mis en évidence par Barron [Barron 1995], mais il est intéressant de noter que l'introduction du système électroacoustique de couplage ne les modifie pas. Ainsi, l'augmentation de durée de réverbération produite par ce système est indépendante de l'espace dans lequel elle est mesurée. Ce résultat est mis en évidence dans le tableau 4.4 où nous pouvons lire que les intervalles de confiances sur les valeurs moyennes de cette augmentation dans chacun des deux espaces se superposent.

	Espace principal	Espace secondaire (sous-balcon)
ΔT_r simulations (500 Hz-1 kHz) (%)	6,9	5,7
Intervalle de confiance à 95% sur ΔT_r simulations (500 Hz-1 kHz) (%)	6,0/7,7	5,2/6,4
ΔT_r théorique (500 Hz-1 kHz) (%)	6,9	

Tableau 4.4 - Évolution simulée et théorique de la durée de réverbération dans l'espace principal et l'espace secondaire, due à la présence du système électroacoustique d'augmentation de couplage en configuration 3. Ces valeurs sont des moyennes sur celles des bandes d'octaves centrées en 500 Hz et 1 kHz.

Dans le tableau 4.4, nous avons aussi fait figurer une valeur théorique de cette augmentation afin de la comparer aux valeurs issues de simulations. Pour le cas particulier des salles couplées, l'ex-

pression approchée de la décroissance tardive peut ainsi, en première approximation, être donnée en remarquant la prédominance, pour des temps importants, du terme en $e^{-\delta_{II}t}$ sur celui en $e^{-\delta_{II}t}$ dans le système d'équations (4.7) (ou celle du terme $e^{-\delta_{I}ea t}$ sur celui en $e^{-\delta_{II}ea t}$ dans le système d'équations (4.22) si un système électroacoustique de couplage est installé). Que nous nous plaçons dans l'espace principal ou dans l'espace secondaire, la décroissance tardive d'énergie peut être considérée comme uniquement régie par le terme $e^{-\delta_{II}t}$ (ou par le terme $e^{-\delta_{I}ea t}$). Ainsi, l'augmentation de durée de réverbération dans les deux espaces est théoriquement à peu près identique sous l'action du système électroacoustique de couplage ; celle-ci étant simplement donnée par :

$$\frac{T_{r\ ea}}{T_{r0}} = \frac{\delta_I}{\delta_{I\ ea}} \quad (4.31)$$

Dans l'espace principal, l'augmentation théorique de durée de réverbération est en accord avec la valeur issue de simulations. Dans l'espace secondaire, les valeurs théoriques et simulées diffèrent d'environ 1%. Cette différence n'est cependant que très peu significative d'un point de vue psychoacoustique puisqu'elle demeure inférieure au seuil de discrimination auditif de cet indice qui est de 5%. Ainsi, l'expression théorique (4.31) d'augmentation de durée de réverbération due au système d'augmentation de couplage semble être suffisante pour décrire ce phénomène et le quantifier de manière acceptable. Il est intéressant de noter que ce résultat semble contredire ceux du chapitre 3 desquels nous avons conclu que l'approche énergétique n'était pas totalement adaptée pour prévoir convenablement une augmentation de durée réverbération produite par un SAR dans une salle simple. Cependant, il faut garder en mémoire qu'un système d'augmentation de couplage est composé d'un faible nombre de canaux et qu'il n'apporte que très peu d'énergie. L'erreur relative de prévision en est alors probablement réduite d'autant.

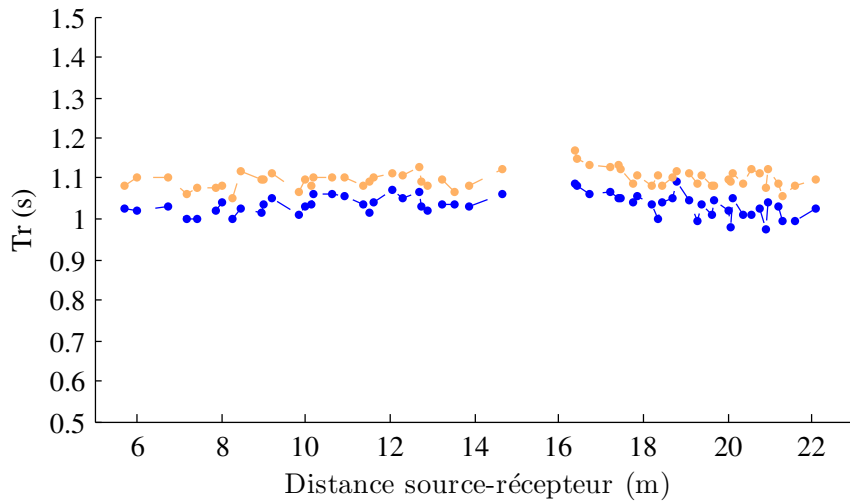


FIGURE 4.10 - Valeur de la durée de réverbération en différents points de la salle en fonction de la distance source-récepteur en l'absence (configuration 0 : —) et en présence de système électroacoustique de couplage (configuration 3 : —). Ces valeurs sont des moyennes sur celles des bandes d'octaves centrées en 500 Hz et 1 kHz.

4.2.5.2 Effet du système électroacoustique d'augmentation de couplage sur la durée de réverbération précoce, la force sonore et la clarté

Contrairement à son action sur la durée de réverbération, le système électroacoustique de couplage a, sur les indices de réverbération précoce, de force sonore et de clarté, un effet plus prononcé dans l'espace secondaire que dans l'espace principal (voir figure 4.11). Nous pouvons aussi remarquer que dans chacun de ces espaces pris séparément, cet effet ne semble pas, ou peu, dépendre de la distance source-récepteur. Ainsi, le rôle du système sur ces indices peut raisonnablement être décrit à partir de valeurs moyennes de leur augmentation sur les différents points de réception en distinguant chaque sous-espace. Ces valeurs de variation moyenne sont présentées dans le tableau 4.5. Si nous nous intéressons aux signes des valeurs présentes dans ce tableau, nous pouvons en déduire que dans chaque sous-espace, le système augmente la durée de réverbération précoce et la force sonore alors qu'il diminue la clarté. Si nous nous intéressons aux valeurs numériques de ce tableau concernant la force sonore et de la clarté, nous remarquons que l'effet du système dans l'espace principal engendre une évolution de ces indices de l'ordre de grandeur de leurs seuils de discrimination ou inférieur. Par contre, dans l'espace secondaire, les modifications moyennes de ces indices, dues au système, en sont largement supérieures. L'effet du système est donc tout juste perceptible dans l'espace principal alors qu'il est marqué dans l'espace secondaire. Concernant la durée de réverbération précoce, l'effet du système, bien qu'audible dans toute la salle, est, lui aussi, largement plus important dans l'espace secondaire que dans l'espace principal. Or dans les salles couplées, d'après *Barron* [Barron 1995], la réverbération précoce et la force sonore sont plus faibles dans l'espace secondaire que dans l'espace principal et, à l'inverse, la clarté est plus importante dans l'espace secondaire que dans l'espace principal. En augmentant la force sonore et la durée de réverbération précoce de l'espace secondaire et en diminuant sa clarté, dans des proportions plus importantes que dans l'espace principal, le système électroacoustique a tendance à équilibrer la qualité acoustique entre les deux sous-espaces, et diminue donc l'effet du couplage dû au balcon.

	Espace principal	Espace secondaire (sous-balcon)
ΔEDT (500 Hz-1 kHz) (%) (SDD=5%)	9,8	37,6
Intervalle de confiance à 95% sur ΔEDT (500 Hz-1 kHz) (%)	8,5/11,1	31,2/44,0
$\Delta\mathcal{G}$ (500 Hz-1 kHz) (dB) (SDD=1dB)	0,3	2,0
Intervalle de confiance à 95% sur $\Delta\mathcal{G}$ (500 Hz-1 kHz) (dB)	0,2/0,4	1,8/2,2
ΔC80 (500 Hz-1 kHz) (dB) (SDD=1dB)	-0,9	-3,1
Intervalle de confiance à 95% sur ΔC80 (500 Hz-1 kHz) (dB)	-1,0/-0,8	-3,4/-2,8

Tableau 4.5 - Évolutions de la durée de réverbération précoce, de la force sonore et de la clarté dans l'espace principal et dans l'espace secondaire dues à la présence du système électroacoustique d'augmentation de couplage en configuration 3. Ces valeurs sont des moyennes sur celles des bandes d'octaves centrées en 500 Hz et 1 kHz. Pour chaque indice, le seuil de discrimination correspondant est indiqué par l'abréviation «SDD»

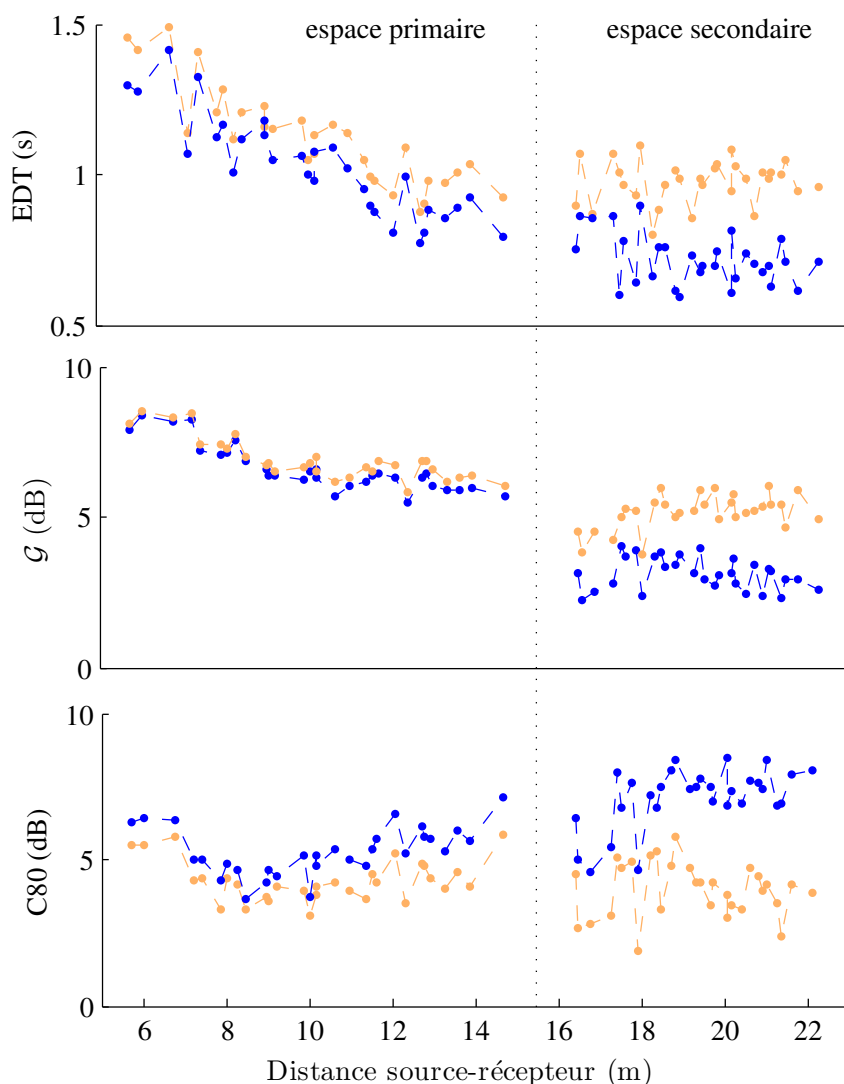


FIGURE 4.11 - Valeur de la durée de réverbération précoce (EDT), de la force sonore ($\mathcal{G}$) et de la clarté (C80) en différents points de la salle en fonction de la distance source-récepteur en l'absence (configuration 0 : —) et en présence de système électroacoustique de couplage (configuration 3 : —). Ces valeurs sont des moyennes sur celles des bandes d'octaves centrées en 500 Hz et 1 kHz.

4.3 Synthèse du chapitre 4

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la possibilité de réduire le problème de couplage des espaces sous-balcons d'une salle de concert à l'aide d'un SAR. Dans une première partie, nous avons fait un développement théorique de l'action du système dans une salle couplée, basé sur l'approche énergétique de l'acoustique des salles. Le système considéré pour cette étude théorique peut se diviser en deux sous-systèmes : un SAR régénératif classique dans la salle principale et un système électroacoustique dédié à l'augmentation du couplage, injectant une partie de l'énergie de la salle principale dans l'espace sous-balcon. Suite à cette étude théorique il est apparu deux points importants : le système d'augmentation du couplage augmente le facteur de couplage de

l'espace secondaire, et l'action des canaux d'augmentation de couplage est distincte de celle du système dans l'espace principal. Dans une seconde partie, nous avons réalisé une étude de l'effet d'augmentation du couplage par un système électroacoustique à partir de l'approche systémique d'un SAR basé sur des simulations numériques. Nous avons alors proposé un indice objectif de couplage basé sur la différence d'énergie tardive entre l'espace principal et l'espace secondaire. Cet indice pouvant être donné par l'approche énergétique, nous en avons confronté les valeurs théoriques et celles issues de simulations numériques. Les résultats de cette confrontation, pour plusieurs configurations du système, indiquent que le système diminue effectivement le couplage et que ce phénomène est raisonnablement prévisible par une approche théorique. Enfin, nous avons étudié l'action du système d'augmentation de couplage sur la durée de réverbération, puis sur la durée de réverbération précoce, la force sonore et la clarté. Concernant la durée de réverbération, le système produit un effet identique dans les deux espaces comme prévu par l'approche énergétique. Concernant les trois autres indices, l'introduction de ce système permet, dans l'espace secondaire, de rapprocher leurs valeurs de celles d'un espace qui serait complètement intégré à l'espace principal.

Conclusion

Afin de pouvoir dimensionner un SAR régénératif en fonction de l'effet recherché sur les indices acoustiques d'une salle de spectacle, ce travail s'est attaché à mettre au point ou à élaborer différents modèles prévisionnels de l'action d'un SAR régénératif. Outre le fait qu'ils devaient permettre d'aboutir à des prévisions acceptables, ces modèles devaient être rapidement applicables et ne demander qu'un nombre réduit d'informations sur les caractéristiques acoustiques et géométriques de la salle ; ces conditions étant fixées par la volonté de faire en sorte qu'ils puissent être compatibles avec la phase de consultance d'un projet d'installation d'un SAR, phase lors de laquelle les détails architecturaux de la salle ne sont pas encore tous fixés et où une proposition doit pouvoir être faite dans un bref laps de temps.

Dans le premier chapitre, après avoir fait un état des connaissances en acoustique des salles et sur les SAR, les modèles prévisionnels simples déjà publiés ont été exposés. Il est alors apparu que ceux-ci étaient limités à la prévision d'un nombre réduit d'indices acoustiques et qu'ils souffraient d'un manque de validation.

Dans un second chapitre, nous avons présenté une méthode de prévision basée sur des simulations numériques et sur une approche systémique exacte de l'action d'un SAR. Bien que son principe ait déjà été décrit dans la littérature spécialisée, nous l'avons ici combinée avec une technique de détermination automatique des fonctions de réponse en fréquence de la partie électronique d'un SAR régénératif ; fonctions de réponse en fréquence nécessaires à la mise en œuvre concrète de cette méthode. Cette technique récursive et calquée sur l'approche manuelle utilisée lors d'une installation réelle du SAR Carmen, associée avec des méthodes de simulations numériques performantes, permet le calcul complet de réponses impulsionnelles réalistes de salles équipées d'un SAR. La réalisation de simulations numériques correctes demande cependant une connaissance approfondie de l'architecture de la salle, et un temps important à accorder à la modélisation de la salle et aux calculs numériques. L'approche exposée dans ce chapitre ne peut donc pas répondre directement à la problématique de cette thèse. Néanmoins, parce qu'elle peut s'appliquer sur n'importe quelle salle et que les résultats qu'elle fournit prennent en compte un maximum de phénomènes acoustiques et de détails sur le système et la salle, elle demeure l'approche prévisionnelle existante la plus exacte. N'ayant eu accès qu'à une seule salle réelle, elle nous sert donc dans la suite de nos travaux à établir un nombre plus important de cas de référence auxquels confronter les approches prévisionnelles plus simples proposées aux deux derniers chapitres.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes concentrés sur la mise au point et la mise à l'épreuve de deux modèles prévisionnels plus simples dans le cas d'une salle simple, sans espace couplé. Tous deux reposent sur la théorie des champs diffus, mais l'abordent de manière différente : soit par une approche énergétique, soit par combinaison de l'approche stochastique de l'acoustique géométrique et d'une approche systémique exacte de l'action d'un SAR. Le premier se caractérise par sa simplicité, le second par sa prise en considération plus fine de l'effet du système et des propriétés du champ acoustique d'une salle. Ces modèles ont été déclinés en plusieurs variantes présumées donner des résultats plus ou moins corrects. Toutes ces variantes ont ensuite été confrontées aux résultats d'une campagne de mesure et à cinq situations issues de simulations numériques de cinq salles virtuelles équipées d'un SAR. Nous nous sommes ici intéressés à la faculté des modèles théoriques proposés de prévoir les évolutions des durées de réverbération et de réverbération précoce, de force sonore et d'indices de précision. Lors de l'analyse de résultats, il est apparu qu'aucune variante de l'un ou de l'autre des modèles n'était meilleure qu'une autre, en conséquence de quoi nous

conseillons de privilégier l'utilisation du modèle énergétique qui est plus simple. Pour la clarté et la force sonore, les modèles théoriques aboutissent à des erreurs prévisionnelles proches ou inférieures au seuil de discrimination ce qui les rend acceptables pour la prévision de l'effet d'un SAR sur ces indices. Par contre, quelle que soit l'approche choisie, les erreurs de prévision sur les durées de réverbération précoce et tardive peuvent atteindre plusieurs fois le seuil de discrimination de ces indices. Ces résultats sont proches de ceux pouvant être obtenus par les approches d'acoustique des salles basées sur la théorie des champs diffus dans le cas d'une salle sans SAR. La valeur prévisionnelle des modèles proposés ici est ainsi identique à celle des approches desquelles elle est issue. Ainsi, l'absence de prise en compte de détails architecturaux ne permet pas de prévoir convenablement tous les indices acoustiques, que la salle soit avec ou sans SAR, et même si celui-ci favorise *a priori* l'établissement d'un champ acoustique diffus.

Dans le quatrième chapitre, nous nous sommes intéressés à l'utilisation d'un SAR comme moyen d'augmentation du couplage, en particulier dans le cadre des salles comportant un espace sous-balcon mal couplé. Le modèle théorique proposé repose sur l'approche énergétique des salles couplées et sur l'approche énergétique de l'utilisation d'un SAR dans une salle simple. Après l'avoir établi, son étude a fait apparaître la possibilité théorique d'utiliser un système électroacoustique comme moyen d'augmentation du facteur de couplage pouvant aller jusqu'à un ajout trop important d'énergie acoustique dans l'espace sous balcon. Comme dans le cas des salles simples, afin de vérifier ce modèle nous avons généré un ensemble de réponses impulsionnelles d'une salle équipée d'un SAR à partir de l'approche systémique de l'action d'un SAR basée sur des simulations numériques. Nous avons alors validé que, pour la salle virtuelle dont il était question ici, le modèle théorique de l'action d'un SAR en augmentation du couplage donnait des résultats très proches de ceux obtenus par les simulations numériques. En particulier au niveau de la prévision de l'effet du système sur la durée de réverbération et sur un indice de couplage que nous avons défini dans cette thèse. À partir des simulations numériques, nous avons aussi montré que le système permettait de réduire l'effet du balcon sur d'autres indices acoustiques, en atténuant les différences de clarté, de durées de réverbération précoce et de force sonore entre la salle principale et l'espace sous-balcon.

L'étude des modèles théoriques développés dans ce document pourrait, par exemple, être poursuivie en les confrontant à plus de configurations du SAR Carmen ou en les appliquant à d'autres SAR régénératifs. Une étude paramétrique pourrait aussi être réalisée afin de déterminer quelles caractéristiques de la salle favorisent leur validité. La forme globale de la salle a-t-elle une influence ? Est-ce que la diffusivité des parois a un effet favorable ? etc. Cette analyse paramétrique pourrait aussi amener à terme à la construction d'autres modèles prévisionnels basés sur une approche par statistiques prévisionnelles faisant intervenir des paramètres architecturaux n'intervenant pas dans les approches de types champs diffus. Par ailleurs, du fait du peu de disponibilité de salles de spectacles équipées d'un SAR, ces modèles n'ont pu être réellement confrontés qu'à des simulations numériques. Or, ces dernières, malgré le souci de les rendre substituables à des mesures, restent des simulations. Dans la perspective d'aller plus loin dans la validation de ces modèles, il serait donc important d'effectuer plusieurs campagnes de mesures. Cependant, pour cela il faudra nécessairement réfléchir en amont à une méthode de mesure des paramètres du système qui ne soit pas intrusive, car comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 3, la méthode MLS utilisée lors de ce travail peut entraîner une divergence importante entre le résultat de la mesure du gain moyen en boucle ouverte d'un canal d'un SAR et sa valeur effective. Pour l'étude de l'effet du SAR utilisé en augmentation de couplage, il serait d'autant plus intéressant de réaliser des mesures que ces systèmes n'ont été que très peu étudiés. Celles-ci pourraient, entre autres, être orientées dans une direction psychoacoustique pour déterminer comment l'introduction d'un système électroacoustique d'augmentation

de couplage est acceptée par l'auditoire, en particulier pour déterminer expérimentalement le gain limite du système n'entraînant pas d'artéfacts audibles.

Dans une autre optique de poursuite de ce travail sur la recherche de modèles prévisionnels simples, il conviendrait de prendre en compte les filtres électroniques variant souvent utilisés dans les SAR pour repousser leurs limites. Cependant il serait au préalable indispensable de chercher à comprendre l'effet de ces filtres variant sur la qualité acoustique d'une salle; qualité ne pouvant alors peut-être plus se déduire d'une simple mesure de réponse impulsionnelle du fait du caractère non linéaire que ces filtres apportent à l'effet de salle.

La théorie révisée de *Barron* et *Lee*

L'énergie de la réponse impulsionnelle d'une salle diminue avec l'augmentation de la distance à la source. Cette diminution s'explique en partie par la dispersion d'énergie du champ direct due à la décroissance géométrique d'une source omnidirectionnelle, mais elle aussi est due à une diminution de l'énergie des composantes du champ réverbéré de la réponse impulsionnelle.

Pour prendre en compte ce phénomène dans une reconstruction analytique de réponse impulsionnelle, *Barron* et *Lee* introduisirent une « théorie révisée » en se basant sur une considération simple et intuitive : les composantes du champ réverbéré ne peuvent atteindre un récepteur avant le champ direct [*Barron 1988*].

Concernant le champ réverbéré, cette approche consiste à considérer que l'expression de l'énergie du champ diffus donnée par l'approche de Sabine ne peut être assimilée à l'énergie du champ réverbéré w_{rev} que pour des temps supérieurs à celui mis par l'onde directe issue de la source pour atteindre le récepteur. Soit :

$$w_{rev}(t) = \begin{cases} 0 & \text{pour } t \leq t_d \\ \frac{4\pi c r_{ref}^2}{V} \delta t \quad e^{-\frac{6 \ln(10)}{Tr_0} t} & \text{pour } t > t_d \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

où $t_d = r/c$, r est la distance source-récepteur, V le volume de la salle, et en considérant une source impulsionnelle et omnidirectionnelle produisant un niveau de pression en champ libre de 0 dB à une distance r_{ref} et dont l'impulsion de durée δt est infiniment courte.

La seconde différence avec la théorie diffuse de Sabine réside dans la prise en considération du champ direct w_d de manière distincte du champ réverbéré afin de prendre en compte la décroissance d'énergie spécifique au champ direct. Cette décroissance étant simplement régie par l'augmentation de la surface du front d'onde associé à une source omnidirectionnelle en champ libre :

$$w_d(t = t_d) = \frac{r_{ref}^2}{r^2} \quad (\text{A.2})$$

Les évolutions théoriques de l'énergie de deux réponses impulsionnelles construites suivant ce modèle sont représentées sur la figure [A.1](#).

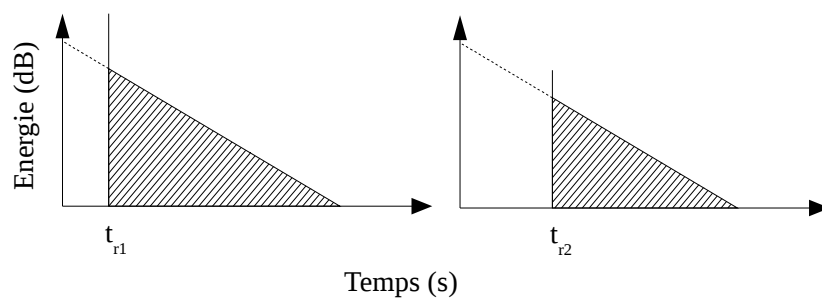


FIGURE A.1 - Énergie d'une réponse impulsionnelle selon « l'approche révisée » de *Barron* et *Lee* pour deux points de réception situés dans une même salle à deux distances différentes de la source $r1$ et $r2$.

Gain moyen en boucle ouverte des canaux d'un SAR installé dans une salle couplée

Dans cette annexe, nous cherchons à déterminer, à partir de l'approche énergétique de l'acoustique des salles, le gain moyen en boucle ouverte d'un canal d'un SAR dans le cas de l'utilisation de celui-ci dans une salle couplée. Le système considéré ici est composé de N_p canaux « classiques » dans l'espace principal et de N_c canaux d'augmentation du couplage entre cet espace et l'espace secondaire, comme montré sur le schéma B.1.

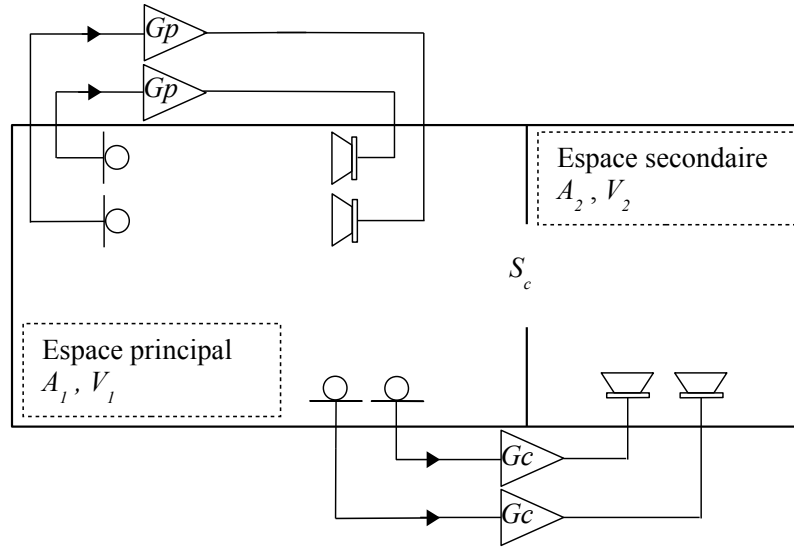


FIGURE B.1 - Salles couplées avec introduction de canaux électroacoustiques en augmentation du couplage et en augmentation de l'effet de salle dans la salle principale. Les canaux d'augmentation de l'effet de salle dans l'espace principal ayant chacun un gain de boucle directe G_p et les canaux d'augmentation de couplage ayant chacun un gain de boucle directe G_c .

Les gains en boucle ouverte des canaux du système principal $\overline{\Gamma}_p'$ et des canaux du système d'augmentation de couplage $\overline{\Gamma}_c'$ sont égaux aux produits des gains en puissance des boucles directes (G_p^2 et G_c^2) par ceux des boucles de rétroaction ($H_{11}'^2$ et $H_{21}'^2$).

$$\overline{\Gamma}_p' = G_p^2 H_{11}'^2 \quad (\text{B.1})$$

et

$$\overline{\Gamma}_c' = G_c^2 H_{21}'^2 \quad (\text{B.2})$$

$H'_{11}{}^2$ correspond au gain moyen de densité d'énergie dans l'espace principal produit par une source située dans ce même espace lorsque la salle est équipée d'un système composé de $N_p - 1$ canaux dans l'espace principal et N_c dans l'espace secondaire. $H'_{21}{}^2$ correspond au gain moyen de densité d'énergie dans l'espace principal produit par une source située dans l'espace secondaire lorsque la salle est équipée d'un système composé de N_p canaux dans l'espace principal et $N_c - 1$ dans l'espace secondaire. Les expressions de $H'_{11}{}^2$ et $H'_{21}{}^2$ peuvent être données à partir de l'approche énergétique en régime stationnaire. D'après cette approche appliquée aux espaces couplés, chaque espace se caractérise par son aire équivalente d'absorption égale à la somme de l'aire équivalente d'absorption de ses parois (A_1 ou A_2) et de la surface libre S_c séparant les deux espaces. Soit, pour l'espace principal :

$$A_{11} = A_1 + S_c$$

et pour l'espace secondaire :

$$A_{22} = A_2 + S_c$$

Les densités d'énergies des espaces principal et secondaire (w_1 et w_2) s'obtiennent en considérant dans chaque espace, un terme source supplémentaire correspond à l'énergie renvoyée par l'autre espace à travers la surface de couplage [Cremer 1982].

L'action d'un canal du SAR est, quant elle, équivalente dans chaque espace où est implanté son haut-parleur à une source de puissance égale au produit du gain de sa boucle directe par la densité d'énergie dans l'espace où est placé son microphone. Ainsi :

$$\begin{cases} w_1 - k_1 w_2 = P_1 \frac{4k_1}{cS_c} + N_p G_p w_1 \frac{4}{cA_{11}} \\ w_2 - k_2 w_1 = P_2 \frac{4k_2}{cS_c} + N_c G_c w_1 \frac{4}{cA_{22}} \end{cases}, \quad (\text{B.3})$$

où P_1 et P_2 sont les puissances des sources sonores placées dans les espaces principal et secondaire, et où $k_1 = S_c/A_{11}$ et $k_2 = S_c/A_{22}$ sont appelées constantes de couplages.

Si l'on veut obtenir la valeur de $H'_{11}{}^2$, il faut reprendre le système d'équations (B.3), mais en considérant un nombre de canaux dans l'espace principal égal à $N_p - 1$ et en supprimant la source dans l'espace secondaire ($P_2 = 0$). Soit :

$$\begin{cases} w_1 - k_1 w_2 = P_1 \frac{4k_1}{cS_c} + (N_p - 1) G_p^2 w_1 \frac{4}{cA_{11}} \\ w_2 - k_2 w_1 = + N_c G_c^2 w_1 \frac{4}{cA_{22}} \end{cases} \quad (\text{B.4})$$

ainsi :

$$H'_{11}{}^2 = \frac{w_{1ea}}{P_1} = \frac{1}{\frac{cS_c}{4k_1}(1 - k_1 k_2) - (N_p - 1)G_p^2 - N_c G_c^2 k_2} \quad (\text{B.5})$$

d'où :

$$\overline{\Gamma_p} = \frac{G_p^2}{\frac{cS_c}{4k_1}(1 - k_1 k_2) - (N_p - 1)G_p^2 - N_c G_c^2 k_2} \quad (\text{B.6})$$

Pour la valeur de $H'_{21}{}^2$, la démarche est identique, mais cette fois-ci, le nombre de canaux dans l'espace secondaire doit être égal à $N_c - 1$, et il faut supprimer la source dans l'espace primaire ($P_1 = 0$). Soit :

$$\begin{cases} w_{1ea} - k_1 w_{2ea} = N_p G_p^2 w_{1ea} \frac{4}{cA_{11}} \\ w_{2ea} - k_2 w_{1ea} = P_2 \frac{4k_2}{cS_c} + (N_c - 1) G_c^2 w_{1ea} \frac{4}{cA_{22}} \end{cases} \quad (\text{B.7})$$

ainsi :

$$H_{21}'^2 = \frac{w_{1ca}}{P_2} = \frac{1}{\frac{cS_c}{4k_1k_2}(1 - k_1k_2) - \frac{N_p G_p^2}{k_2} - (N_c - 1)G_c^2} \quad (\text{B.8})$$

d'où :

$$\overline{\Gamma}_c' = \frac{G_c^2}{\frac{cS_c}{4k_1k_2}(1 - k_1k_2) - \frac{N_p G_p^2}{k_2} - (N_c - 1)G_c^2} \quad (\text{B.9})$$

Les expressions de $\overline{\Gamma}_c'$ et $\overline{\Gamma}_p'$ peuvent s'écrire en fonction de deux autres quantités $\overline{\Gamma}_c$ et $\overline{\Gamma}_p$ égales au produit du gain de la boucle directe de chaque canal et du gain du transfert purement acoustique entre le haut-parleur et le microphone du canal considéré (c-à-d la boucle de rétraction sans prendre en compte l'effet de autres canaux du système) ; $\overline{\Gamma}_c$ et $\overline{\Gamma}_p$ correspondent, en quelque sorte, au gain en boucle ouverte d'un canal sans l'effet de autres canaux.

$$\overline{\Gamma}_p = G_p^2 H_{11}^2 \quad (\text{B.10})$$

et

$$\overline{\Gamma}_c = G_c^2 H_{21}^2 \quad (\text{B.11})$$

où H_{11}^2 correspond au gain moyen de densité d'énergie dans l'espace principal produit par une source située dans ce même espace en l'absence de SAR, et où H_{21}^2 correspond au gain moyen de densité d'énergie dans l'espace principal produit par une source située dans l'espace secondaire en l'absence de SAR.

À partir du système d'équations régissant les densités d'énergie dans les salles couplées [Cremer 1982, Jouhaneau 2003] :

$$\begin{cases} w_1 - k_1 w_2 = P_1 \frac{4k_1}{cS_c} \\ w_2 - k_2 w_1 = P_2 \frac{4k_2}{cS_c} \end{cases} \quad (\text{B.12})$$

en considérant une source $P_2 = 0$ il est possible d'obtenir directement la valeur de H_{11}^2 à partir de sa définition. Soit :

$$H_{11}^2 = \frac{w_1}{P_1} = \frac{4}{cS_c} \frac{k_1}{1 - k_1k_2} \quad (\text{B.13})$$

Il en va de même pour la valeur de H_{21}^2 , mais il faut alors poser $P_1 = 0$. Soit :

$$H_{21}^2 = \frac{w_2}{P_2} = \frac{4}{cS_c} \frac{k_1k_2}{1 - k_1k_2} \quad (\text{B.14})$$

ainsi :

$$\Gamma_p = \frac{4}{cS_c} \frac{k_1}{1 - k_1k_2} \quad (\text{B.15})$$

et

$$\Gamma_c = \frac{4}{cS_c} \frac{k_1k_2}{1 - k_1k_2} \quad (\text{B.16})$$

soit, finalement :

$$\overline{\Gamma}_p' = \frac{\overline{\Gamma}_p}{1 - (N_c \overline{\Gamma}_c + (N_p - 1) \overline{\Gamma}_p)} \quad (\text{B.17})$$

$$\overline{\Gamma}_c' = \frac{\overline{\Gamma}_c}{1 - (N_p \overline{\Gamma}_p + (N_c - 1) \overline{\Gamma}_c)} \quad (\text{B.18})$$

ou

$$\overline{\Gamma}_p = \frac{\overline{\Gamma}'_p}{1 + \left(N_c \overline{\Gamma}'_c \left(\frac{1 - \overline{\Gamma}'_p}{1 - \overline{\Gamma}'_c} \right) + (N_p - 1) \overline{\Gamma}'_p \right)} \quad (\text{B.19})$$

$$\overline{\Gamma}_c = \frac{\overline{\Gamma}'_c}{1 + \left(N_p \overline{\Gamma}'_p \left(\frac{1 - \overline{\Gamma}'_c}{1 - \overline{\Gamma}'_p} \right) + (N_c - 1) \overline{\Gamma}'_c \right)} \quad (\text{B.20})$$

Bibliographie

- [Atal 1965] B. S. Atal, M. R. Schroeder et G. M. Sessler. *Subjective reverberation time and its relation to sound decay*. 5th international congress on acoustics, Liège, Belgique, 1965. (Cité en page 6.)
- [Bakker 2012] R. Bakker. *Active Acoustic Enhancement Systems - introducing Yamaha AFC3*. 27th Tonmeistertagung, Cologne, Allemagne, 2012. (Cité en page 11.)
- [Barnett 1989] P. W. Barnett. *RODS—An advanced approach to electronic reverberation enhancement*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 86, no. S1, page S2, 1989. (Cité en page 10.)
- [Barron 1988] M. Barron et L. Lee. *Energy relations in concert auditoriums. I*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 84, no. 2, pages 618–628, 1988. (Cité en pages 7, 21, 65, 90 et 127.)
- [Barron 1995] M. Barron. *Balcony overhangs in concert auditoria*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 98, no. 5, pages 2580–2589, 1995. (Cité en pages 7, 101, 118 et 120.)
- [Barron 2005] M. Barron. *Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results*. Acoustical Science and Technology, vol. 26, no. 2, pages 162–169, 2005. (Cité en pages 81 et 101.)
- [Bellanger 1987] M. Bellanger. *Traitement numérique du signal*. Masson, Paris, France, 3^{ème} édition, 1987. (Cité en page 38.)
- [Beraneck 2002] L. L. Beraneck. *Concert halls and opera houses : Music, acoustic & architecture*. Springer, Berlin & New York, 2^{ème} édition, 2002. (Cité en pages 5, 7, 79, 80 et 101.)
- [Berkhout 1988] A. J. Berkhout. *A holographic approach to acoustic control*. Journal of the Audio Engineering Society, vol. 36, no. 12, pages 977–995, 1988. (Cité en page 10.)
- [Berkhout 1993] A. J. Berkhout, D. De Vries et P. Vogel. *Acoustic control by wave field synthesis*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 93, no. 5, pages 2764–2778, 1993. (Cité en page 10.)
- [Bork 2000] I. Bork. *A Comparison of Room Simulation Software - The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation*. Acta Acustica united with Acustica, vol. 86, no. 6, pages 943–956, 2000. (Cité en page 30.)
- [Bradley 1986] J. S. Bradley. *Predictors of speech intelligibility in rooms*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 80, no. 3, pages 837–845, 1986. (Cité en page 8.)
- [Bradley 1999] J. S. Bradley, R. Reich et S. G. Norcross. *A just noticeable difference in C50 for speech*. Applied Acoustics, vol. 58, no. 2, pages 99–108, 1999. (Cité en page 8.)
- [Bradley 2005] J. S. Bradley. *Using ISO 3382 measures, and their extensions, to evaluate acoustical conditions in concert halls*. Acoustical Science and Technology, vol. 26, no. 2, pages 170–178, 2005. (Cité en page 81.)
- [Bradley 2011] J. S. Bradley. *Review of objective room acoustics measures and future needs*. Applied Acoustics, vol. 72, no. 10, pages 713–720, 2011. (Cité en page 9.)
- [Cox 1993] T. J. Cox, W. J. Davies et Y. W. Lam. *The Sensitivity of Listeners to Early Sound Field Changes in Auditoria*. Acta Acustica united with Acustica, vol. 79, no. 1, pages 27–41, 1993. (Cité en page 8.)

- [Cremer 1982] L. Cremer et H. A. Müller. Principles and applications of room acoustics. Applied Science, London and New York, 1982. (Cité en pages 6, 8, 59, 103, 130 et 131.)
- [CSTB 2008] CSTB. Carmen[®] : Les salles équipées. Brochure commerciale, 2008. (Cité en pages 76 et 78.)
- [Dance 1999] S. M. Dance et B. M. Shield. *Modelling of sound fields in enclosed spaces with absorbent room surfaces. Part I : performance spaces*. Applied Acoustics, vol. 58, no. 1, pages 1 – 18, 1999. (Cité en page 82.)
- [Dart 1954] T. Dart. The interpretation of music. London, hutchinson's university library édition, 1954. (Cité en page 1.)
- [Dauvois 1994] M. Dauvois et X. Boutillon. *Acoustique des grottes ornées paléolithiques et de leurs lithophones naturels*. La pluridisciplinarité en archéologie musicale, IVe Rencontres internationales d'archéologie musicale de l'ICTM 1990, Saint-Germain-en-Laye, France, 1994. C. Homo-Lechner et al. eds, Paris. (Cité en page 1.)
- [De Koning 1983] S. H. De Koning. *The MCR system-multiple-channel amplification of reverberation*. Philips technical review, vol. 41, no. 1, pages 12–23, 1983. (Cité en page 25.)
- [De Vries 2001] D. De Vries. *Variable Acoustics in Auditoria yesterday, today and tomorrow*. Proceeding 17th International Congress on Acoustics, Rome, Italie, 2001. (Cité en page 1.)
- [Devallez 2010] D. Devallez. *Automatic parametric equalization of the Carmen system*. Rapport technique interne, CSTB, 2010. (Cité en page 41.)
- [Drouet 2011] T. Drouet. *Validation de méthodes de simulation en acoustique des salles*. Rapport de stage, CSTB, 2011. (Cité en page 37.)
- [Dunn 1993] M. J. Dunn Chris ; Hawksford. *Distortion Immunity of MLS-Derived Impulse Response Measurements*. Journal of the Audio Engineering Society, vol. 41, no. 5, pages 314–335, 1993. (Cité en page 82.)
- [Emerit 1995] M. Emerit. *Simulation binaurale de l'acoustique des salles de concert*. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de grenoble, 1995. (Cité en page 38.)
- [Finkel 2003] D. E. Finkel. *DIRECT Optimization Algorithm User Guide*. 2003. (Cité en page 43.)
- [Franssen 1968] N. V. Franssen. *Sur l'amplification des champs sonores*. Acustica, vol. 20, no. 6, pages 315–323, 1968. (Cité en pages 11, 18, 23 et 25.)
- [Griesinger 1991] D. Griesinger. *Improving room acoustics through time-variant synthetic reverberation*. AES 90th Convention, Paris, France, 1991. (Cité en page 17.)
- [Griesinger 2000] D. Griesinger et S. Barbar. *Recent experiences with electronic acoustical enhancement in concert halls, opera houses, and outdoor venues*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 107, no. 5, pages 2783–2783, 2000. (Cité en page 11.)
- [Haan 1992a] C. H. Haan et F. R. Fricke. *Geometry as a measure of acoustic performance of auditoria*. Proceedings of the 14th international congress on acoustics, Pékin, Chine, 1992. (Cité en page 66.)
- [Haan 1992b] C. H. Haan et F. R. Fricke. *Statistical investigation of geometrical parameters for the acoustic design of auditoria*. Applied Acoustics, vol. 35, no. 2, pages 105–127, 1992. (Cité en page 66.)
- [Hale 1993] J. K. Hale et S. M. Verduyn Lunel. Introduction to functional differentiel equations. Springer-Verlag, New York, USA, 1993. (Cité en page 58.)

- [Huopaniemi 1997] J. Huopaniemi, L. Savioja et M. Karjalainen. *Modeling Of Reflections And Air Absorption In Acoustical Spaces - A Digital Filter Design Approach*. 1997. (Cité en page 38.)
- [ISO :11654 1997] ISO :11654. *1997 Acoustics - Acoustics - Sound absorbers for use in buildings - Rating of sound absorption*, 1997. (Cité en page 82.)
- [ISO :3382-1 2009] ISO :3382-1. *1 :2009 Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1 : performance spaces*, 2009. (Cité en pages 6, 48, 56, 61, 66, 72 et 81.)
- [Jaffe 1992] J. C. Jaffe et P. H. Scarbrough. *Electronic architecture : toward a better understanding of theory and application*. Audio Engineering Society Convention 93, 1992. (Cité en page 10.)
- [Jones 1972] M. H. Jones et F. Fowweather. *Reverberation reinforcement an electro-acoustical system for increasing the reverberation time of an auditorium*. *Acustica*, vol. 27, pages 357–363, 1972. (Cité en page 10.)
- [Jones 1993] D. R. Jones, C. D. Perttunen et B. E. Stuckman. *Lipschitzian optimization without the Lipschitz constant*. *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 79, no. 1, pages 157–181, 1993. (Cité en page 43.)
- [Jordan 1970] V. L. Jordan. *Acoustical Criteria for Auditoriums and Their Relation to Model Techniques*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 47, no. 2A, pages 408–412, 1970. (Cité en page 6.)
- [Jouhaneau 2003] J. Jouhaneau. *Acoustique des salles et sonorisation*. Editions Tech & Doc, Paris, France, 2^{ème} édition, 2003. (Cité en pages 4, 11, 18, 62, 103 et 131.)
- [Kaiser 2009] F. Kaiser. *Acoustic Enhancement Systems*. Bachelor-thesis, Graz University of Technology, Institute of Broadband Communications, 2009. (Cité en pages 9 et 18.)
- [Kaneda 1995] Y. Kaneda. *A study of non-linear effect on acoustic impulse response measurement*. *Journal of the acoustical society of japan*, vol. 16, pages 193–193, 1995. (Cité en page 82.)
- [Kuttruff 1976] H. Kuttruff et N. Hesselmann. *Zur Klangfärbung durch akustische Rückkopplung bei Lautsprecheranlagen*. *Acustica*, vol. 36, pages 105–112, 1976. (Cité en page 14.)
- [Kuttruff 2009] H. Kuttruff. *Room acoustics*. Spon Press, Abingdon, UK, 5^{ème} édition, 2009. (Cité en page 13.)
- [Lehman 1980] P. Lehman et H. Wilkens. *Zusammenhang subjectiver beurteilungen von konzertsälen mit raumakustischen kriterien*. *Acustica*, vol. 45, pages 256–268, 1980. (Cité en page 7.)
- [Luizard 2010] P. Luizard. *Etude des volumes couplés en acoustique des salles*. Rapport de stage, LIMSI, 2010. (Cité en page 104.)
- [Martin 1993] J. Martin, D. V. Maercke et J.-P. Vian. *Binaural simulation of concert halls : A new approach for the binaural reverberation process*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 94, no. 6, pages 3255–3264, 1993. (Cité en page 38.)
- [Meynial 1999] X. Meynial et O. Vuichard. *Objective Measure of Sound Colouration in Rooms*. *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 85, no. 1, pages 101–107, 1999. (Cité en page 51.)
- [Meynial 2001] X. Meynial et F. Nicols. *Influence of intercorrelation between channels in regenerative reverberation enhancement systems*. *Proceeding 17th International Congress on Acoustics*, Rome, Italie, 2001. (Cité en page 11.)
- [Miśkiewicz 2012] A. Miśkiewicz, T. Rogala, T. Rościszewska, T. Rudzki et T. Fidecki. *Concert Hall Sound Clarity : A Comparison of Auditory Judgments and Objective Measures*. *Archives of Acoustics*, vol. 37, no. 1, pages 41–46, 2012. (Cité en page 7.)

- [Morse 1940] P. M. Morse, R. H. Bolt et R. L. Brown. *Acoustic impedance and sound absorption*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 12, no. 2, pages 217–227, 1940. (Cité en page 37.)
- [Müller-BBM 2013] Müller-BBM. *Vivace - Electronic system for room acoustics* : www.muellerbbm.se/Products/VivaceElectronicsystemforroomacoustics/tabid/76/Default.aspx, 2013. (Cité en page 10.)
- [Nielsen 1995] J. L. Nielsen. *Detection of coloration in reverberation enhancement systems*. Proceeding of Active 95, The 1995 international symposium on active control of sound and vibration, pages 1213–1222, Newport Beach, Californie, USA, 1995. Sommerfeldt, Hamada. (Cité en page 12.)
- [Nielsen 1999] J. L. Nielsen et P. U. Svensson. *Performance of some linear time-varying systems in control of acoustic feedback*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 106, no. 1, pages 240–254, 1999. (Cité en page 17.)
- [Noe 2010] N. Noe et M. Vermet. *Application de l’acoustique géométrique à la simulation de la réflexion et de la diffraction par des surface courbes*. 10^{ème} Congrès Français d’Acoustique, Lyon, France, 2010. (Cité en page 34.)
- [Noe 2012] N. Noe, C. Rougier, J. Rouch et I. Schmich. *An hybrid beam and particle tracing with time dependent radiosity for accurate impulse response of rooms prediction*. Acoustics 2012 : 11^{ème} Congrès Français d’Acoustique & 2012 Annual IOA Meeting, Nantes, France, 2012. (Cité en page 32.)
- [Ohsmann 1990] M. Ohsmann. *Analyse von mehrkanalanlagen*. Acustica, vol. 70, pages 233–246, 1990. (Cité en page 16.)
- [Olson 1957] H. F. Olson. *Elements of acoustical engineering*. New York, D. Van Nostrand company, inc., 3^{ème} édition, 1957. (Cité en page 60.)
- [Parkin 1970] P. H. Parkin et K. Morgan. *"Assisted Resonance" in The Royal Festival Hall, London : 1965–1969*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 48, no. 5A, pages 1025–1035, 1970. (Cité en page 10.)
- [Pelorson 1991] X. Pelorson. *Pertinence des paramètres objectifs utilisés pour caractériser la qualité acoustique d’une salle*. Thèse de doctorat, Université du Maine, 1991. (Cité en pages 6, 8 et 90.)
- [Polack 1992] J.-D. Polack. *Modifying Chambers to play Billiards : the Foundations of Reverberation Theory*. Acta Acustica united with Acustica, vol. 76, no. 6, pages 256–272, 1992. (Cité en pages 22 et 112.)
- [Polack 1993] J.-D. Polack. *Playing billiards in the concert hall : The mathematical foundations of geometrical room acoustics*. Applied Acoustics, vol. 38, no. 2–4, pages 235–244, 1993. (Cité en pages 4 et 59.)
- [Polack 2006] J.-D. Polack. *Reverberation time and mean absorption in concert halls*. Proceedings of the institute of acoustics, Copenhagen, Danemark, 2006. (Cité en page 59.)
- [Poletti 1993] M. A. Poletti. *On controlling the apparent absorption and volume in assisted reverberation systems*. Acustica, vol. 78, no. 2, pages 61–73, 1993. (Cité en pages 18 et 19.)
- [Poletti 1994] M. A. Poletti. *The performance of a new assisted reverberation system*. Acta Acustica, vol. 2, pages 511–524, 1994. (Cité en page 11.)

- [Poletti 2000] M. Poletti. *The Stability of Single and Multichannel Sound Systems*. Acta Acustica united with Acustica, vol. 86, no. 1, pages 163–178, 2000. (Cité en pages 12, 14, 17 et 24.)
- [Poletti 2006] M. Poletti. *Reverberators for use in wide band assisted reverberation systems*. Brevet US n° RE39,189, 2006. (Cité en page 18.)
- [Poletti 2010] M. Poletti. *The Control of Early and Late Energy Using the Variable Room Acoustics System*. Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics-ISRA2010, Melbourne, Australia, 2010. (Cité en page 18.)
- [Poletti 2011] M. Poletti. *Active Acoustic Systems for the Control of Room Acoustics*. Building acoustics, vol. 18, no. 3, pages 237–258, 2011. (Cité en pages 9 et 11.)
- [Prinssen 1994] W. Prinssen et B. Kok. *Technical innovations in the field of electronic modification of acoustic spaces*. Proceedings of the institute of Acoustics, vol. 16, no. 4, 1994. (Cité en page 10.)
- [Reichardt 1974] W. Reichardt, O. Abdel Alim et W. Schmidt. *Abhängigkeit der grenzen zwischen brauchbarer und unbrauchbarer durchsichtigkeit von der art des musikmotives, der nachhallzeit und der nachhalleinsatzzeit*. Applied Acoustics, vol. 7, no. 4, pages 243–264, 1974. (Cité en page 7.)
- [Reznikoff 2008] I. Reznikoff. *Sound resonance in prehistoric times : a study of paleolithic painted caves rocks*. Proceedings of Acoustics'08, Paris, France, 2008. (Cité en page 1.)
- [Rife 1989] D. D. Rife et J. Vanderkooy. *Transfer function measurement with maximum length sequences*. Journal of the Audio Engineering Society, vol. 37, no. 6, pages 419–444, 1989. (Cité en pages 74 et 82.)
- [Rougier 2008] C. Rougier, I. Schmich, P. Chervin et P. Gillieron. *CARMEN® in the Norwich Theatre Royal, UK*. Paris, France, 2008. (Cité en page 53.)
- [Ryu 2008] J. K. Ryu et J. Y. Jeon. *Subjective and objective evaluations of a scattered sound field in a scale model opera house*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 124, no. 3, pages 1538–1549, 2008. (Cité en page 36.)
- [Schmich 2011] I. Schmich, H. Butcher et C. Rougier. *The benefit of a CARMEN® electroacoustic system in the Aylesbury Theatre*. 8th international conference on auditorium acoustics, Dublin, Ireland, 2011. (Cité en page 77.)
- [Schmich 2012] I. Schmich et D. Devallez. *Spectrum correction system intended in particular for an auditorium*. Brevet n° WO/2012/066265, 2012. (Cité en page 41.)
- [Schroeder 1962] M. R. Schroeder. *Frequency-correlation functions of frequency responses in rooms*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 34, no. 9, pages 1819–1823, 1962. (Cité en page 13.)
- [Schroeder 1964] M. R. Schroeder. *Improvement of Acoustic-Feedback Stability by Frequency Shifting*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 36, no. 9, pages 1718–1724, 1964. (Cité en pages 13 et 14.)
- [Schroeder 1965] M. R. Schroeder. *Some new results in reverberation theory and measurement methods*. 5th international congress on acoustics, Liège, Belgique, 1965. (Cité en page 6.)
- [Schroeder 1987] M. R. Schroeder. *statistical parameters of the frequency response curves of large rooms*. Journal of the Audio Engineering Society, vol. 35, no. 5, pages 298–305, 1987. (Cité en pages 13, 14, 16 et 37.)

- [Svensson 1995a] P. U. Svensson. *Computer Simulations of Periodically Time-Varying Filters for Acoustic Feedback Control*. Journal of the Audio Engineering Society, vol. 43, no. 9, pages 667–677, 1995. (Cité en page 31.)
- [Svensson 1995b] P. U. Svensson et M. Kleiner. *Review of active systems in room acoustics and electroacoustics*. Proceeding of Active 95, The 1995 international symposium on active control of sound and vibration, Newport Beach, Californie, USA, 1995. Sommerfeldt, Hamada. (Cité en pages 9 et 10.)
- [Svensson 1998] P. U. Svensson. *Energy-time relations in a room with an electroacoustic system*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 104, no. 3, pages 1483–1490, 1998. (Cité en page 21.)
- [Van Munster 2004] B. Van Munster et W. Prinssen. *On the Importance of the Loudspeaker Layout of a Room Acoustic Enhancement System*. Proceeding 18th International Congress on Acoustics, Kyoto, Japan, 2004. (Cité en page 102.)
- [Vermet 2010] M. Vermet. *Simulations par l’acoustique géométrique en présence de surfaces courbes avec prise en compte de la diffraction*. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2010. (Cité en pages 34 et 35.)
- [Vermeulen 1956] R. Vermeulen. *Stereo reverberation*. IRE, Transactions on audio, vol. 4, pages 98–105, 1956. (Cité en page 10.)
- [Vogel 1994] P. Vogel et D. De Vries. *Electroacoustic System Response in a Hall : A Convolution of Impulse Sequences*. Journal of the Audio Engineering Society, vol. 42, no. 9, pages 684–690, 1994. (Cité en page 56.)
- [Vorländer 1995] M. Vorländer. *Revised Relation between the Sound Power and the Average Sound Pressure Level in Rooms and Consequences for Acoustic Measurements*. Acta Acustica united with Acustica, vol. 81, no. 4, pages 332–343, 1995. (Cité en page 64.)
- [Vorländer 2008] M. Vorländer. *Auralization : fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Springer, Berlin, 1^{ère} édition, 2008. (Cité en pages 30, 32, 35 et 48.)
- [Vuichard 1997] O. Vuichard. *Etude des systèmes actifs de contrôle de l’acoustique des salles. Développement d’un système à réaction quasi-locale*. Thèse de doctorat, Université du Maine, 1997. (Cité en pages 15, 19, 22, 31 et 82.)
- [Vuichard 2000] O. Vuichard et X. Meynial. *On Microphone Positioning in Electroacoustic Reverberation Enhancement Systems*. Acta Acustica united with Acustica, vol. 86, no. 5, pages 853–859, 2000. (Cité en pages 11, 45, 48 et 66.)
- [Warusfel 2002] O. Warusfel, J. Blauert et D. Wessel. *Synopsis of reverberation enhancement systems*. Proceedings of the 3rd European Congress on Acoustics, Sevilla, Spain, 2002. (Cité en page 9.)
- [Watanabe 2011] T. Watanabe et M. Ikeda. *Improvement of the Acoustics under the Balcony in Auditoria using the Electro-Acoustic Method—A Study with a Full-Scale Model*. Building Acoustics, vol. 18, no. 3, pages 281–292, 2011. (Cité en page 102.)
- [Zamarreno 2007] T. Zamarreno, S. Giron et M. Galindo. *Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 121, no. 1, pages 234–250, 2007. (Cité en page 8.)
- [Zwicker 1999] E. Zwicker et H. Fastl. *Psychoacoustics : Facts and models*. Springer, Berlin & New York, 2^{ème} édition, 1999. (Cité en page 7.)

AUTORISATION DE SOUTENANCE

Vu les dispositions de l'arrêté du 7 août 2006,

Vu la demande du Directeur de Thèse

Madame M-A. GALLAND

et les rapports de

Monsieur J-J. EMBRECHTS
Professeur - Université de Liège - Institut Montefiore - Campus du Sart-Tilman - B28 - B-4000 LIEGE 1 - Belgique

et de

Monsieur J. PICAUT
Directeur de Recherche HDR - IFSTTAR Nantes - Route de Bouaye - CS 4 - 44341 BOUGUENNAIS cedex

Monsieur ROUCH JérémY

est autorisé à soutenir une thèse pour l'obtention du grade de **DOCTEUR**

Ecole doctorale MECANIQUE , ENERGETIQUE, GENIE CIVIL ET ACOUSTIQUE

Fait à Ecully, le 1er juillet 2013

P/Le directeur de l'E.C.L.
La directrice des Etudes

