

Travaux encadrés de recherche

Olivier GUILLAUME



Master 1 Mécanique et ingénierie des systèmes

Encadrants :

Jean-Dominique Polack (Directeur du LAM)

Guillaume de France (doctorant en acoustique des salles au LAM)

Table des matières

INTRODUCTION	4
1. ELÉMENTS D'ACOUSTIQUE ARCHITECTURALE	5
1.1. PARAMÈTRES OBJECTIFS	5
A. La réponse impulsionnelle	5
B. Le son direct	6
C. Les réflexions primaires	7
D. Le son réverbéré	7
1.2. PARAMÈTRES SUBJECTIFS	8
A. Critère de clarté	8
B. Intelligibilité	9
C. EDT (Early Decay Time)	9
D. Tableaux récapitulatif	10
1.3. L'ABSORPTION ET LA DIFFUSION	11
A. Les absorbants	11
B. Les diffuseurs, définition et propriétés	12
1.4. BILAN : CONDITIONS SUR LES PARAMÈTRES OBJECTIFS ET SUBJECTIFS POUR UNE ACOUSTIQUE ADAPTÉE À LA BIBLIOTHÈQUE	13
2. DES LOGICIELS AU SERVICE DE L'ACOUSTICIEN.....	14
2.1. PRÉSENTATION D'UN LOGICIEL DE PRÉDICTION ACOUSTIQUE : CATT	14
A. Introduction au logiciel	14

B.	Principe général de fonctionnement du logiciel.....	15
2.2.	<i>MODÉLISATION DE LA BIBLIOTHÈQUE SOUS CATT</i>	16
A.	Entrée des paramètres géométriques de la salle.....	16
B.	Entrée des paramètres d'absorption et de diffusion	17
C.	La source sonore et la zone d'audience.....	17
3.	CONFRONTATION DU MODÈLE VIRTUEL ET DE LA SALLE RÉELLE.	18
3.1.	<i>MÉTHODES ET OBJECTIFS DES MESURES IN SITU</i>	18
A.	Nature des mesures et limite de l'étude acoustique	18
B.	Emission d'un bruit blanc	18
C.	Emission d'un bruit rose	19
D.	Ballons de baudruche qui éclatent.....	20
E.	Proposition d'une autre méthode.....	20
3.2.	<i>RÉSULTATS</i>	21
3.3.	<i>OPTIMISATION DE L'ACOUSTIQUE DE LA BIBLIOTHÈQUE</i>	22
	CONCLUSION	24
	BIBLIOGRAPHIE	25
	ANNEXES	26
	<i>A- ABSORPTION ET DIFFUSION</i>	26
	<i>B- LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE SIMULATIONS UTILISÉES</i>	28
	<i>C - LES COEFFICIENTS D'ABSORPTION DE DIFFÉRENTS MATÉRIAUX</i>	33
	<i>D – SCRIPT DU FICHER MAÎTRE MASTER.GEO</i>	34
	<i>E – RÉSULTATS FOURNIS PAR SMAART ET CATT</i>	35

Introduction

Le module Travaux encadrés de recherche (TER) s'inscrit dans le semestre 1 du parcours acoustique du Master 1 Mécanique et Ingénierie des Systèmes (Université Paris 6–ENS Cachan). Il a pour objectif de sensibiliser les étudiants au monde de la recherche et la réalisation d'un projet au sein même d'un laboratoire de recherche. Mes intérêts étant clairement tournés vers l'acoustique, j'ai choisi de faire mon TER au Laboratoire d'Acoustique Musical de Paris (LAM), encadré par Jean-Dominique Polack, directeur du laboratoire, et Guillaume de France, doctorant en acoustique des salles.

Ce projet comporte diverses étapes s'articulant autour d'un unique objectif : l'étude acoustique de la bibliothèque de premier cycle de l'université Paris VI afin de permettre, a posteriori, une réhabilitation acoustique pertinente. En effet la conservatrice souhaiterait avoir l'avis d'acousticiens sur la qualité acoustique de la bibliothèque.

Pour répondre à ce problème, nous avons modélisé la salle avec un logiciel de prédiction et confronté les résultats obtenus avec des mesures *in-situ* afin de vérifier la validité du modèle. Ce modèle permettra de modifier les paramètres agissant sur l'acoustique de la salle, de juger de sa pertinence, et de proposer alors une solution adaptée de réhabilitation.

Nous présenterons donc dans une première partie le fruit de recherches bibliographique concernant l'acoustique des salles. Ces éléments sont fondamentaux et gardés présents à l'esprit à chaque étape de notre projet. Dans une seconde partie, nous décrirons les caractéristiques et les intérêts d'une modélisation informatique et la démarche empruntée dans la réalisation de notre modèle. Enfin, nous confronterons, dans une troisième partie, les résultats obtenus grâce au modèle et les résultats issus de mesures *in situ* afin de dégager une proposition de réhabilitation de l'espace acoustique.

1. Éléments d'acoustique architecturale

L'objectif de cette partie est d'établir les éléments permettant de comprendre et de caractériser les phénomènes sonores dans un espace clos, et étant utilisés par les logiciels de prédiction d'acoustique. Ces éléments peuvent être classés dans deux catégories, les paramètres objectifs et les paramètres subjectifs. Les premiers sont clairement mesurables, et correspondent à une réalité physique. Les seconds répondent à une interprétation des sensations (psychoacoustique) que l'on peut ressentir à l'intérieur d'une salle. La combinaison des deux offre les principales informations à l'auditeur pour localiser et déterminer la nature et la position d'une source sonore dans un espace. Aussi, nous présenterons les propriétés d'absorption et de diffusion d'un matériau car c'est en jouant avec elles que l'acousticien peut « corriger » l'acoustique d'une salle.

1.1. Paramètres objectifs

Un son est une onde acoustique. Elle est émise, se déplace, « rebondit » sur les surfaces murales, puis *s'éteint*. Ce type de mesure permet d'évaluer les critères objectifs d'une salle. La première caractéristique est la réponse impulsionnelle.

A. La réponse impulsionnelle

Considérons un son très bref émis par une source S à un point donné A dans un volume V . L'onde est émise dans toutes les directions. Le microphone, placé dans la salle, captera tout d'abord l'énergie du son direct, atténuée suivant la distance par rapport à la scène, à cause de l'absorption de l'air. Les réflexions se produisant dans les 80 premières millisecondes après le son direct sont appelées *réflexions primaires*. Ce sont ces réflexions qui nous renseignent sur, entre autre, notre position par rapport aux parois et au volume de la salle dans laquelle l'auditeur se trouve. Puis, la multitude d'ondes sonores réfléchies sur les parois de la salle constituent le *son réverbéré* encore appelé *champ diffus*. La pression recueillie en un point donné constitue la réponse impulsionnelle de la salle et est souvent associé à un échogramme correspondant (cf. figure 1 ci-après).

La réponse impulsionnelle dépend de trois facteurs : la position du point de réception (qui peut être assimilé à un spectateur, un microphone etc.), les caractéristiques de la source et les caractéristiques de la salle elle-même. Elle illustre la manière dont la salle modifie le son émis par la source.

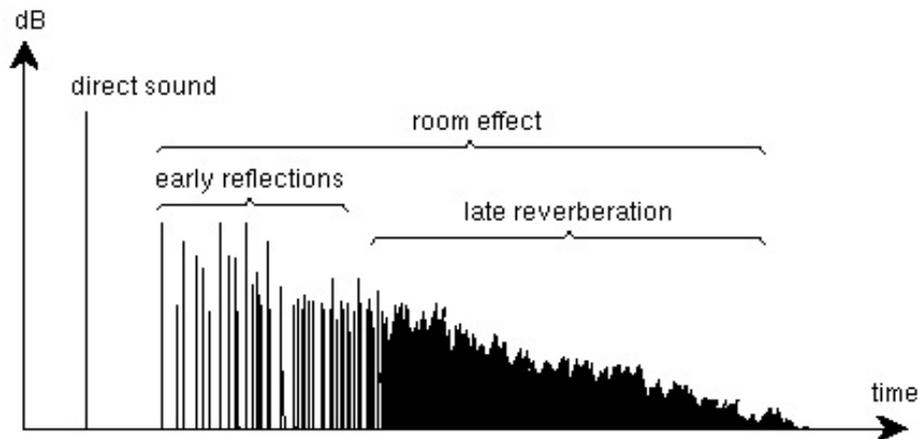


Figure 1 : La réponse impulsionnelle se décompose en 3 parties : le son direct, les réflexions primaires (EDT) et les réflexions secondaires (le champ diffus) [8]

B. Le son direct

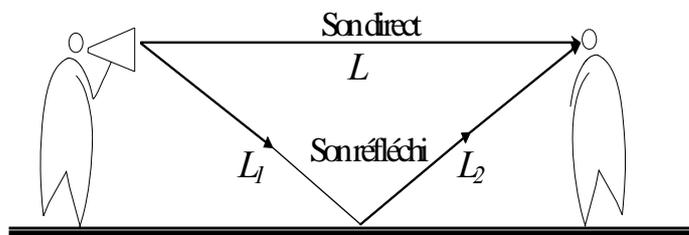


Figure 2 : Chemin élémentaire parcouru par un son émis par une source ponctuelle A, reçue par le récepteur B. [8]

Le son direct ne dépend que des caractéristiques de la source (puissance, directivité, etc.) et de la distance entre la source et le récepteur; la salle n'intervient pas. Dans ces conditions uniquement, on parle de *champs libre* (cf. figure 2).

C. Les réflexions primaires

On appelle réflexions primaires ou encore réflexions précoces les réflexions qui parviennent au point de réception dans les 80 à 100 premières millisecondes qui suivent le son direct (cf. figure 3). Le temps d'arrivée de la première réflexion significative est noté Initial Delay Gap (ITDG ou plus brièvement délai). Il est généralement de l'ordre de 10 à 50 ms. Il n'existe pas de limite temporelle précise qui limite les réflexions précoces du champ diffus. Cependant, on peut les distinguer des réflexions ultérieures car leur distribution temporelle n'est pas la même. En effet, il n'y a aucune forme de régularité dans les temps d'arrivée et les niveaux des réflexions primaires. Ces deux grandeurs dépendent des positions de la source et du récepteur, ainsi que de la configuration des parois mises en jeu (sol, mur du fond de scène, parois latérales...), il n'est donc pas possible de les modéliser par une loi mathématique simple. En pratique, ces premières réflexions, comprises entre 0 et -10dB, renseignent assez précisément notre oreille sur le timbre d'un instrument ou sur le volume dans lequel on se trouve.

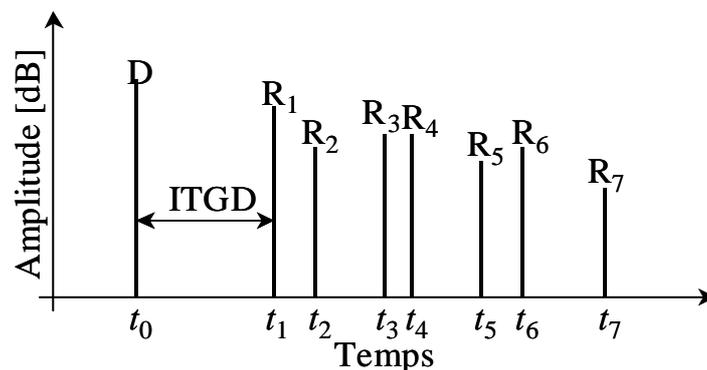


Figure 3 : Le temps mis par un son entre son émission (son direct D) et sa première réflexion (son réfléchi R1 par une paroi) est appelé ITDG.

D. Le son réverbéré

Il est généralement admis que le son réverbéré est l'ensemble des réflexions diffuses parvenant au point de réception après les 100 premières millisecondes suivant le son direct. C'est la partie diffuse de la réverbération.

Le Temps de réverbération

Le temps de réverbération dans une salle est un paramètre important, il permet notamment d'informer l'auditeur sur l'importance du volume dans lequel il se

trouve. En effet, en tout point d'une salle, le temps de réverbération est identique. Cela s'explique notamment grâce à la nature diffuse du champ sonore : le champ diffus est homogène dans la salle, le temps de réverbération est donc le même en tout points d'une salle (contrairement aux réflexions précoces). Il est généralement admis que le temps de réverbération, noté TR_{60} , correspond au temps que met un son pour s'atténuer de 60dB après extinction de sa source.

Le physicien Sabine¹ a défini le temps de réverbération comme étant relié au volume V de la salle et à la surface d'absorption des parois $S = \sum a_i S_i$ où a_i est le coefficient d'absorption de la surface S_i :

$$TR_{60} = \frac{0,16 \cdot V}{S} \quad [3]$$

1.2. Paramètres subjectifs

Bien qu'on puisse les définir physiquement, ces paramètres sont considérés comme subjectifs car ils rentrent dans le domaine de la perception et de la psychoacoustique, contrairement à ceux que l'on vient de voir qui, comme le temps de réverbération, ont une réelle existence « objective ». Nous allons définir quelques uns de ces critères de définition acoustique d'une salle.

A. Critère de clarté

Les premières réflexions survenant dans les 80 premières millisecondes qui suivent le son direct sont habituellement considérées comme « intégrées » à celui-ci. Ces réflexions font ainsi partie intégrante du son dit *utile*. A l'inverse, le son *nuisible* est constitué du signal survenant au delà de 80 ms (le champ diffus). La

¹ Sabine : Physicien américain né le 13 Juin 1868, et mort le 10 Janvier 1919, Wallace Clément Sabine a été un pionnier dans le domaine de l'acoustique architecturale. Diplômé de l'université de l'Ohio à 18 ans, il est ensuite allé étudier à Harvard, avant d'en devenir membre. Il a aussi été l'acousticien du Symphony Hall of Boston, considéré comme l'une des deux meilleures salles au monde au niveau de l'acoustique.

fusion des premières réflexions avec le son direct permettra une meilleure définition du son.

Il s'avère donc intéressant de différencier l'influence sur la perception des premières réflexions de celle de la réverbération diffuse. La caractéristique permettant d'évaluer le rapport entre l'énergie contenue dans les 80 premières millisecondes et l'énergie contenue au delà des 80 premières millisecondes est appelée clarté et se note $C80$. Le calcul du paramètre $C80$ se fait grâce à la formule [3] :

$$C_{80} = \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{+\infty} p^2(t) dt}$$

B. Intelligibilité

Pour exprimer l'intelligibilité de la parole on utilise généralement l'indice appelé RASTI. Ce nom provient de l'indice de transmission de la parole appelé STI, pour Speech Transmission Index. Il s'appuie sur le fait que la parole est un signal modulé en amplitude. L'intelligibilité est d'autant plus importante que les modulations sont bien perçues. Autrement dit, une bonne clarté correspond à un signal où les « pics » se détachent bien des « creux ». Or la présence de réverbération masque les « creux », ce qui réduit la modulation et altère l'intelligibilité.

Dans la pratique, on détermine le RASTI en émettant un signal sinusoïdal de fréquence f modulé en amplitude. Au point de réception est enregistré un signal dont la modulation est plus faible. On calcule ainsi le RASTI qui mesure la réduction de la modulation. L'indice RASTI est compris entre 0 et 1. On admet que l'intelligibilité est bonne si $0,6 < \mathbf{RASTI} < 1$.

En règle générale, pour garantir une bonne intelligibilité, il faudra modérer le nombre d'éléments diffusants et diminuer l'impression d'espace sonore.

C. EDT (Early Decay Time)

L'EDT est la décroissance de l'énergie calculée sur les 10 premiers dB (cf. figure 4)). Les premières réflexions (*Early sounds*) sont une succession d'ondes

réfléchies qui arrivent à l'auditeur entre le son direct et le champ diffus. De l'EDT et des premières réflexions dépend la plus ou moins bonne qualité acoustique de la salle, indépendamment des autres paramètres (RT60, clarté, répartition de l'énergie sonore...).

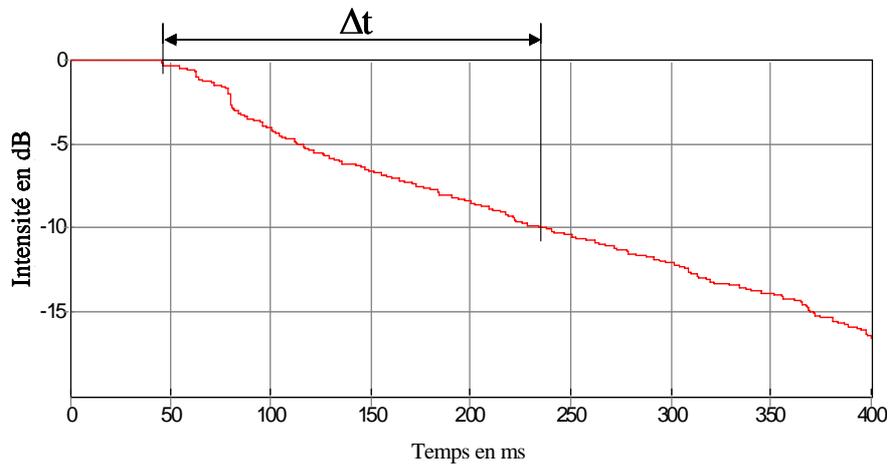


Figure 4 EDT, temps que met le son pour décroître de 10 dB.

Il existe bien évidemment d'autres facteurs subjectifs. On peut citer par exemple la sensation de réverbération, l'intimité (sensation de distance que l'on peut avoir par rapport à la source) ou encore le timbre d'une salle, caractérisée notamment par sa réponse fréquentielle.

D. Tableaux récapitulatif

Facteurs subjectifs	Indices objectifs	Paramètres architecturaux
Sensation de réverbération	- Durée de réverbération (RT60) - EDT	Absorption des parois
Intelligibilité	- Rapport Dir/Rev - Niveau de réverbération	Hauteur de plafond
Intimité	- ITDG	Distance parois/auditeurs

Tableau 1 Récapitulatifs des indices objectifs et des facteurs subjectifs [1]

1.3. L'absorption et la diffusion

Dans le cadre de notre étude, il est important de définir ces deux phénomènes car les matériaux absorbants et diffusants serviront à modifier l'acoustique de la bibliothèque. En effet, panneaux, rideaux, laine de roche etc. sont les « armes » de l'acousticien pour lutter contre les phénomènes acoustiques non désirés.

A. Les absorbants

Définition

Lorsqu'une onde acoustique met en vibration un corps matériel, celle-ci perd de l'énergie sous forme de chaleur : c'est le phénomène *d'absorption acoustique*. On distingue trois types d'absorption :

- Des pores d'air compris dans un matériau (tissu par exemple) : c'est **l'absorption par matériaux poreux**.
- Un panneau placé à une certaine distance d'un mur : c'est **l'absorption par panneaux absorbants**.
- L'air compris dans une cavité : c'est **l'absorption par résonateurs**.

Selon le type d'absorption, l'énergie réverbérée dans la salle fait vibrer l'air compris dans les pores et les cavités, ou bien le panneau. Il en résulte des frottements, ce qui conduit à une dissipation de l'énergie acoustique en chaleur ; c'est pourquoi le niveau sonore diminue dans la salle. Nous avons détaillé ces trois méthodes de correction acoustique en annexe A- Absorbition et diffusion.

Coefficient d'absorption d'un matériau

L'absorption des matériaux est quantifiée par leurs coefficients d'absorption α qui représente la fraction de l'énergie incidente non réfléchiée par sa surface :

$$\alpha = \frac{\text{énergie absorbée}}{\text{énergie réverbérée}}$$

La valeur du coefficient α augmente avec la capacité d'absorption du matériau. C'est un nombre sans unité qui varie de zéro (pour une paroi totalement réfléchissante) à un (pour une paroi totalement absorbante).

Le coefficient d'absorption d'un matériau dépend de la fréquence de l'onde sonore et de l'angle d'incidence. On donne généralement le coefficient

d'absorption en fonction de la fréquence, sans préciser l'angle d'incidence : cela correspond au coefficient d'absorption pour tous les angles d'incidence, autrement dit pour le champ diffus. On pourra trouver en annexe C un tableau donnant les coefficients d'absorption de divers matériaux fréquemment employés dans le bâtiment.

B. Les diffuseurs, définition et propriétés

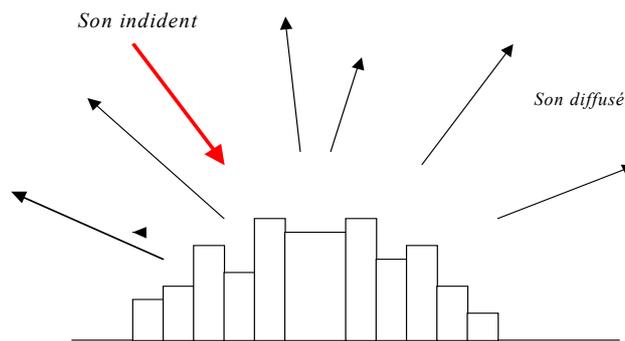


Figure 5 Diffusion d'une onde sonore sur un diffuseur [1].

On dit qu'une réflexion est diffuse si l'onde incidente est réfléchiée selon de multiples directions (cf. *figure 5*). La surface est diffusante si elle présente des irrégularités dont les dimensions sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde incidente.

Dans une salle, il est important d'avoir une bonne diffusion du son. Des tests d'écoute [1] montrent qu'une grande diffusion accentue l'impression de baigner dans le son. La diffusion est accentuée par les éléments architecturaux dissymétriques et irréguliers. Il est également possible d'installer des panneaux diffuseurs. Par exemple, les diffuseurs de Schroeder sont des panneaux de cellules de profondeurs différentes (cf. annexe A- Absorption et diffusion).

1.4. Bilan : Conditions sur les paramètres objectifs et subjectifs pour une acoustique adaptée à la bibliothèque

On déduit donc de cette première partie que pour que l'acoustique de la bibliothèque soit bien adaptée à sa fonction, il faut que le temps de réverbération soit court afin de donner une ambiance feutrée, une impression de confinement, et que la propagation du son dans la pièce soit mauvaise afin de minimiser le niveau sonore de bruits lointains sur l'auditeur.

2. Des logiciels au service de l'acousticien

Les simulateurs informatiques d'espaces sonores sont des outils très efficaces lorsqu'il s'agit de prédire le comportement d'une salle à des *événements* acoustiques. En effet, la modélisation par ordinateur permet d'évaluer à l'avance, critères subjectifs et critères objectifs et, dans l'idéal, d'affranchir l'acousticien de tests « grandeur nature » difficilement réalisables. Nous allons donc présenter un logiciel de prédiction, CATT, puis nous décrirons les différentes étapes suivies pour modéliser la bibliothèque. Enfin, nous présenterons les résultats fournis par notre modèle.

2.1. Présentation d'un logiciel de prédiction acoustique : CATT

A. Introduction au logiciel

CATT Acoustic (Computer Aided Theatre Technique) est un logiciel de simulation acoustique. Il rend possible la modélisation des salles, des sources acoustiques et électro-acoustiques et offre la possibilité de calculer de nombreux paramètres utilisés en acoustique des salles, notamment ceux qui ont été présentés dans la *partie I*. L'une des caractéristiques intéressantes proposée par cet outil est de pouvoir simuler l'écoute d'une source ou d'un système de sources, à différents points d'observations de la salle, permettant ainsi à l'utilisateur d'avoir un aperçu sonore de l'étude menée.

CATT offre deux types importants de prédictions basés sur les techniques de l'acoustique géométrique :

- Le mapping² de différents paramètres acoustiques grâce à un procédé de tracés de rayons acoustiques.

² Mapping : cartographie de différentes grandeurs physiques sur l'ensemble de l'auditoire.

- Calculs détaillés : Les prédictions données par ce module de calcul utilisent un procédé appelé RTC (Randomized Tail-corrected Cone-tracing) combinant à la fois les caractéristiques du tracé de cônes et de rayons ainsi que le modèle des sources images. Cette méthode de simulation numérique permet la création de réponses impulsionnelles.

B. Principe général de fonctionnement du logiciel

Le logiciel nécessite un certain nombre d'informations concernant la salle, les sources utilisées et l'emplacement des points de réception. Ces données sont répertoriées dans les fichiers d'entrées (input files) et sont utilisées pour tous les calculs de simulation. Les résultats de ces calculs sont consignés dans des fichiers de sortie (output files).

Entrée des données

Les paramètres d'entrée permettant de définir l'intégralité de notre modèle sont : les **caractéristiques géométriques** de la salle (les coordonnées de ses points, définitions de ses surfaces), les **caractéristiques des matériaux** constitutifs (les coefficients d'absorption et de diffusion des matériaux qui la compose), les **caractéristiques de la source** (type de sources, emplacements, orientations, directivité...), les données concernant les **points d'écoutes** (emplacement dans la salle)

Résultats fournis

La plupart des résultats sont visibles sur des diagrammes, courbes, et autres cartes colorées mais également synthétisés dans des fichiers texte. Les principaux résultats utilisés sont : la visualisation 2D et 3D de la salle, les valeurs des facteurs subjectifs tels que le C80 ou le RASTI, les valeurs des indices objectifs (Tr Sabine, Tr Eyring, T15, T30, EDT ...) ou encore les réponses impulsionnelles de l'ensemble source – salle – auditeur exporté dans un fichier son. Le fonctionnement du logiciel est présenté de manière plus précise en annexe B.

2.2. Modélisation de la bibliothèque sous CATT

L'étude virtuelle d'une salle sous CATT peut se dérouler selon trois phases principales : l'entrée des paramètres architecturaux, l'entrée des paramètres d'absorption et de diffusion des matériaux constitutifs de la salle, le choix d'une ou des sources sonores et ses points de réceptions.

A. Entrée des paramètres géométriques de la salle

La modélisation géométrique est obtenue en répertoriant toutes les données nécessaires à la création du modèle, à savoir : coordonnées des points de la bibliothèque et définition des plans composant la salle. Les coordonnées des points sont ensuite entrées dans le fichier Master.GEO. La syntaxe de ces commandes est disponible dans l'annexe D [9].

Remarque : Un moyen alternatif à la reconstruction de la salle point par point, mais qui n'a pas été utilisé ici, est de la dessiner un peu à la manière d'Autocad, de manière plus intuitive, à l'aide d'un logiciel qui m'a été présenté par Michel RETBI (ACAR/ Paris VI). Mais n'ayant pas pu me le procurer, j'ai dû rentrer tous les paramètres un par un.

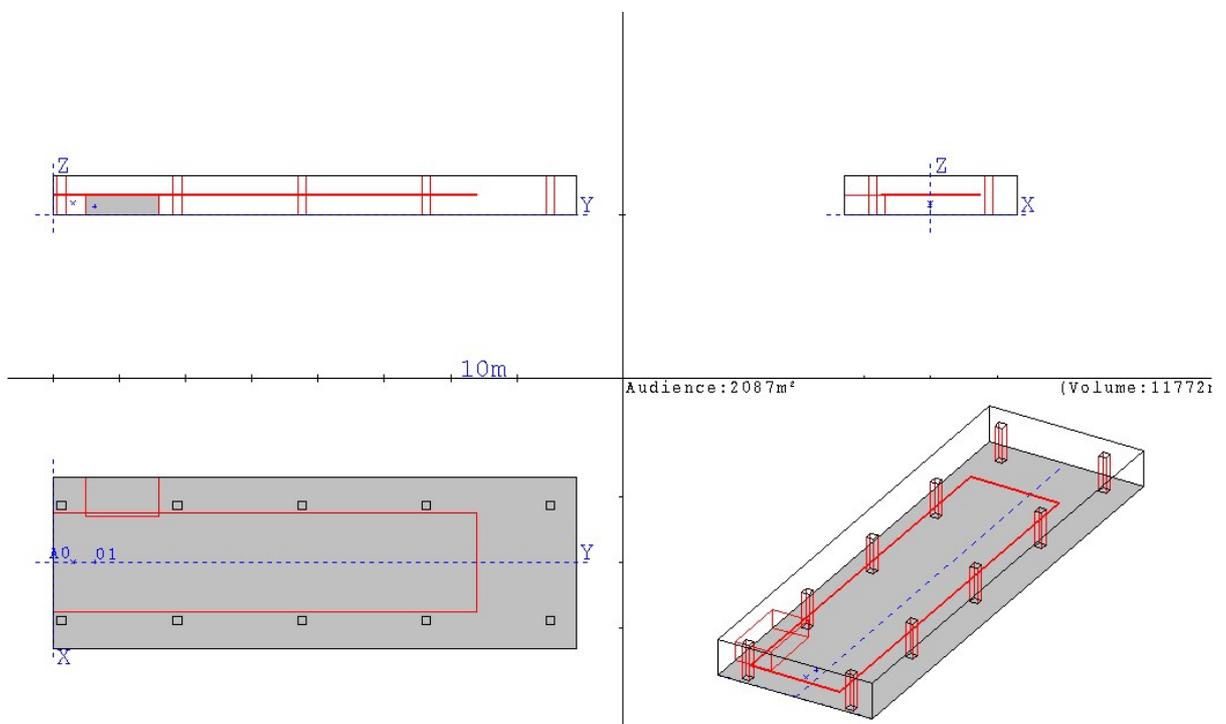


Figure 6 : Différentes perspectives de la bibliothèque de Jussieu modélisée avec CATT.

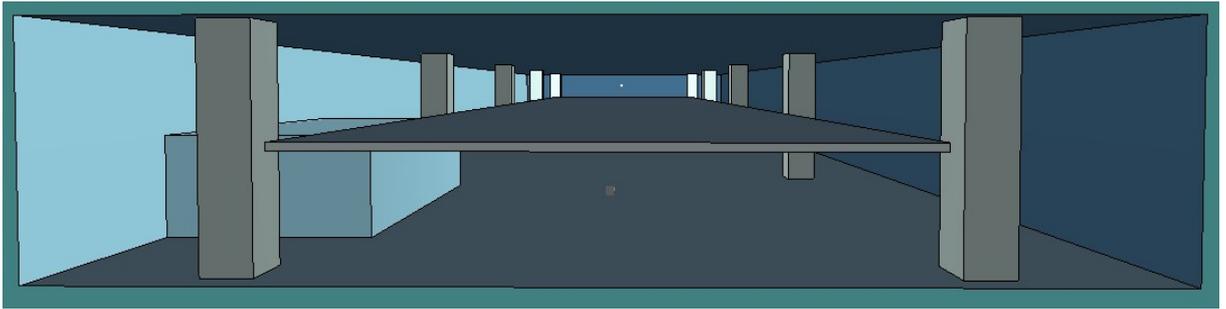


Figure 7 : Vue 3D de la bibliothèque de Jussieu modélisée avec CATT (on voit la mezzanine, l'entrée et les poteaux de soutien).

Bien que le modèle géométrique sous CATT ait été réalisé avec des plans Autocad, j'ai été confronté à des problèmes d'échelle, en effet, ne connaissant pas ce logiciel, je n'ai pas de moyen de vérifier que les distances fournies par celui-ci correspondent aux mesures réelles. **Les prédictions de CATT seront donc à considérer avec précaution.**

B. Entrée des paramètres d'absorption et de diffusion

Il existe une banque de donnée sous CATT dans laquelle quelques paramètres classiques d'absorption et de diffusion sont entrés : Alpha Base. Cependant je n'ai pas utilisé cet outil dans mon travail. En effet ces paramètres étant souvent peu précis, j'ai préféré utilisé les coefficients d'absorptions et de diffusion fournis par des sites spécialisés comme www.acousticalsurfaces.com. Ces coefficients sont donnés pour des surfaces plus proches de la réalité de notre espace à étudier, en la matière, l'omni-présence de **béton peint**, de **linoléum**, etc. On trouvera en annexe C les tableaux correspondants à ces coefficients et en annexe D, la syntaxe utilisée pour rentrer ses paramètres dans notre modèle.

C. La source sonore et la zone d'audience

L'objectif étant de comparer les valeurs mesurées *in situ* et les prédictions de CATT, nous allons placer les sources virtuelles et les points de réception aux endroits où ont été faites les mesures. On pourra donc comparer les résultats fournis par le logiciel et ceux fournis par les mesures réelles

CATT permet de définir le nombre de sources, leurs coordonnées, et leurs caractéristiques (directivité, niveau sonore,...) et les coordonnées d'un auditeur virtuel.

3. Confrontation du modèle virtuel et de la salle réelle.

Les mesures effectuées in situ sont faites à divers endroits de la bibliothèque, à l'aide de différents types d'excitation. Nous allons donc analyser la nature de ces mesures et en dégager les informations qu'elles fournissent sur l'acoustique de la salle. Puis, nous allons comparer ces résultats in situ avec ceux donnés par le modèle CATT. Enfin nous émettrons des hypothèses concernant le réaménagement acoustique de la bibliothèque afin qu'elle soit le plus possible adaptée à sa fonction : ambiance feutrée, réverbération courte (cf. partie 1).

3.1. Méthodes et objectifs des mesures in situ

Afin de vérifier la validité de notre modèle sous CATT, nous avons à notre disposition diverses mesures réalisées au sein même de la bibliothèque. Nous allons voir de quelle nature sont ces données et ce qu'elles nous fournissent. Chaque mesure a été réalisée à 9 endroits différents de la bibliothèque.

A. Nature des mesures et limite de l'étude acoustique

Les 9 séries de mesure dont nous disposons sur un enregistrement DAT sont chacune constituée de : émission d'un bruit blanc, émission d'un bruit rose, explosion d'un ballon. Il y a en tout 9 séries de mesures en 9 endroits différents de la bibliothèque : 5 au rez-de-chaussée, 4 au premier étage (mezzanine). Cependant, par manque moyen et de temps, je n'ai utilisé qu'une seule de ces données : la réponse de la salle à l'émission d'un ballon qui éclate au rez-de-chaussée. Ceci nous permettra quand même d'avoir un bon aperçu du temps de réverbération à ce niveau de la bibliothèque et de quelques paramètres objectifs et subjectifs.

B. Emission d'un bruit blanc

Un bruit blanc, par analogie à la lumière blanche, est un signal issu d'un processus pseudo aléatoire. Il est composé de l'ensemble des fréquences audibles par l'homme, 20-20kHz, et chaque fréquence y a la même densité spectrale de puissance (cf. figure 8 ci-après).



Figure 8 Représentation d'un bruit blanc (intensité en fonction de la fréquence)

L'analyse de la réponse de la salle à un bruit blanc va donc pouvoir nous donner les temps de réverbération à toutes les bandes d'octaves situées à 125, 250, 500, 1000, 2000, et 4000 Hz. Cette analyse pourra être faite en filtrant la réponse de la salle à ce bruit blanc de manière à ne garder que la bande d'octave autour de la fréquence dont on souhaite connaître le TR.

C. Emission d'un bruit rose

Le bruit rose est également un signal pseudo aléatoire mais dont la densité spectrale décroît de 3dB par octave (figure 9). Sa densité spectrale tend donc vers l'infini vers les basses et vers zéro pour les aigus. Ce bruit se veut plus proche de la sensibilité de l'oreille humaine que le bruit blanc (cf. courbes isosoniques de Fechner, figure 10). L'intérêt du bruit rose est donc d'avoir une perception linéaire à toutes les fréquences: c'est pour cela que les fréquences basses dans ce type de bruit sont plus fortes car elles sont moins bien perçues par l'oreille humaine.

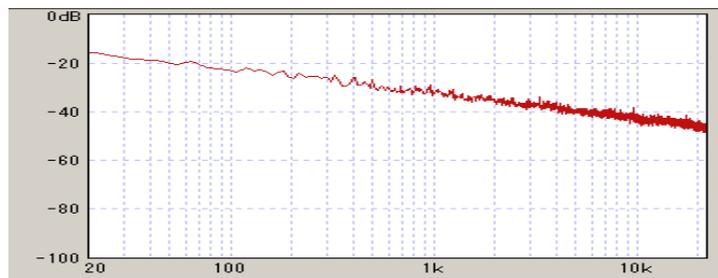


Figure 9 Intensité d'un bruit rose en fonction de la fréquence (source: <http://homepage2.nifty.com/miguel/SE/images/PinkNoise.gif>)

L'intérêt de l'émission de bruits blancs et roses par rapport au ballon qui éclate est que la salle est mieux excitée. En effet, ces séquences sonores sont plus énergétiques qu'un ballon qui éclate.

D. Ballons de baudruche qui éclatent

Un ballon de baudruche qui éclate engendre un son proche de celui émis par une impulsion de *Dirac*³. Or la réponse d'un système à une impulsion de Dirac nous donne sa réponse impulsionnelle et, en faisant la transformée de Fourier de cette réponse, on obtient la Fonction de transfert du système qui, à elle seule, définit totalement le système mécanique étudié : notre salle. En tant qu'acousticiens, cette réponse nous intéresse car elle nous donne le spectre en fréquence de la salle, donc sa « couleur », ses modes propres, etc.

Remarque : On peut noter qu'une impulsion de Dirac n'est pas physiquement réalisable car elle ne peut être diffusée avec mes moyens électroacoustiques actuels sans risque de détérioration.

On interprètera l'enregistrement de la réponse de la salle à cette explosion avec le logiciel *Smaart*. On obtiendra ainsi différents paramètres acoustiques que l'on trouvera en annexe E.

E. Proposition d'une autre méthode

On aurait pu également faire nos mesures grâce à la méthode utilisant des séquences MLS. *AcousticTools (Smaart)*, *WinMLS*, *MLSSA* sont des logiciels permettant de synthétiser une séquence pseudo aléatoire appelé *MLS* (pour Maximum Length Sequence). Cette dernière a comme propriété de donner une **impulsion de Dirac** lorsque l'on calcule son **auto corrélation** et peut donc fournir la réponse impulsionnelle d'un système lorsque l'on effectue la corrélation entre la séquence MLS originale et la séquence passée au travers du système. L'analyse de la réponse de la salle par ce logiciel nous donnera alors des critères acoustiques tel que le RT60, l'intelligibilité, le C80, le C40, etc. L'intérêt

³ Une impulsion de Dirac comporte, par définition, le spectre de **toutes les fréquences audibles à la même intensité acoustique** et permet donc d'exciter une salle à toutes ces fréquences.

principal de cette méthode est donc de générer via la séquence MLS une impulsion de Dirac productible par les dispositifs électroacoustiques classiques (amplis et hauts parleurs), sans risque de détérioration.

Il s'avère que cette méthode paraît plus rapide que la précédente car nous n'émettrons dans la salle qu'un unique signal dont nous déduisons toutes les informations nécessaires à la définition acoustique de la salle de manière quasi instantanée.

3.2. Résultats

A défaut d'avoir à disposition le logiciel MIDAS⁴ en raison de problèmes technologiques, l'analyse des résultats fournis par les enregistrements in situ ont été faites avec les logiciels *Matlab* et *Smaart*. Le RT60 peut être facilement déterminé à partir des sons des baudruches qui éclatent : il suffit de filtrer la réponse de la salle à cette impulsion autour des fréquences dont on veut connaître le TR et de mesurer le temps que met ce son pour décroître de 60 dB.

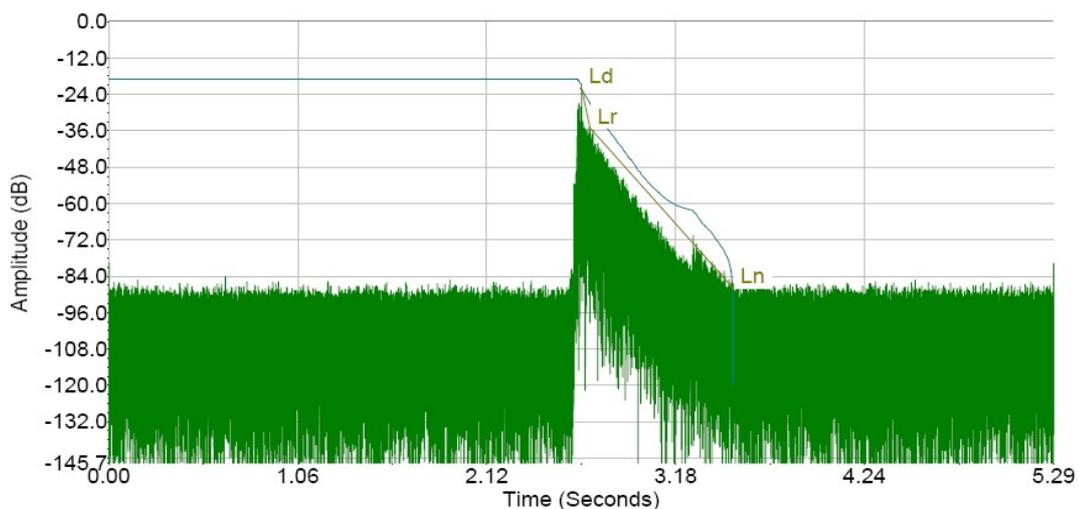


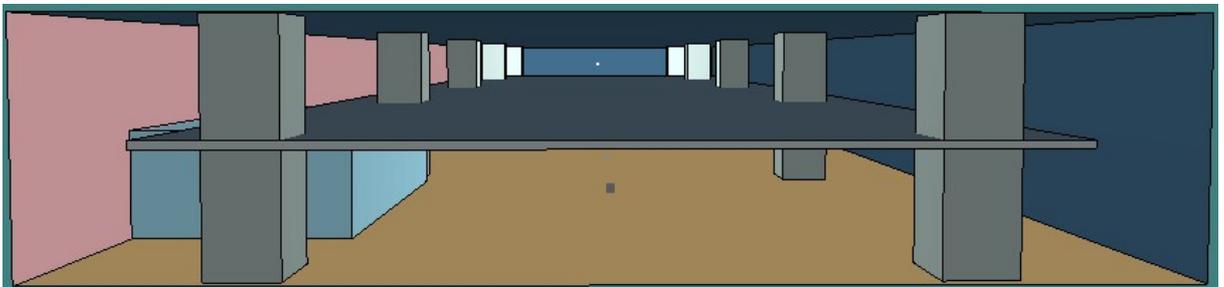
Figure 10 Intensité en fonction du temps de la réponse de la bibliothèque à un ballon de baudruche qui éclate pour la bande d'octave 500Hz.

⁴ Midas est un logiciel développé par J-D Polack en 1990. Il permet la mesure de réponse impulsionnelle dans des salles réelles ou à échelle réduite et d'en tirer des paramètres acoustiques objectifs et subjectifs qui visent à caractériser l'acoustique de la salle.

Les résultats fournis par le logiciel Smaart concernant la réponse de la salle à un ballon qui éclate et ceux fournis par notre modèle sont disponibles en annexe E. Il en sort que **les résultats du modèle diffèrent de manière significative des valeurs de Smaart**. Notre modèle n'est donc pas valable sûrement à cause des données géométriques approximatives entrées dans le modèle. Cependant, nous allons continuer l'étude de ce modèle afin d'établir une solution pour améliorer l'acoustique de la bibliothèque. Pour cela nous nous baserons sur les valeurs de RT60, données par CATT, que l'on juge trop importante (>1.5 seconde). **En réduisant le temps de réverbération du modèle de la bibliothèque, on espère rendre l'acoustique mieux adapté à la fonction du lieu : ambiance feutrée, niveau de bruit minimum.**

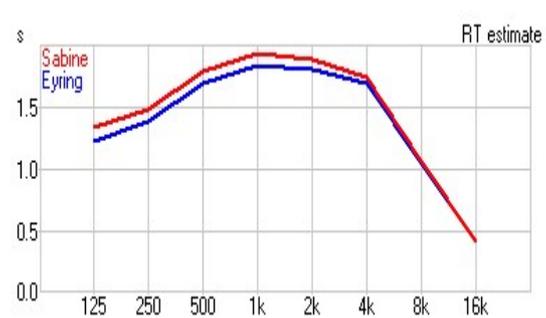
3.3. Optimisation de l'acoustique de la bibliothèque

Grâce à CATT, on va pouvoir modifier des éléments de la bibliothèque dans le but de réduire le temps de réverbération RT60. Pour cela, nous allons remplacer le linoléum par de la moquette et les grandes vitres seront masquées par de grands rideaux (les coefficients utilisés se trouvent en annexe C). Voici un aperçu de notre salle modifiée :

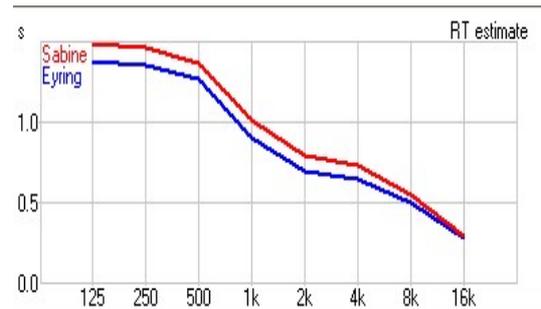


Voici les résultats de cette simple modification fournis par CATT :

Avant modification :



Après modification :



On voit bien que la salle après modification a un temps de réverbération globalement plus court que la salle avant modification. De plus on peut noter que désormais, le temps de réverbération correspondant aux fréquences de la voix humaine (1-3 kHz) est considérablement réduit. Cette simple optimisation des revêtements de la bibliothèque améliore l'acoustique de la salle car le brouhaha persistera moins longtemps : 0.75 secondes dans la salle traitée contre 1.75 secondes avec la salle non traitée, **on gagne donc 1 seconde de temps de réverbération**. Par contre, le temps de réverbération dans les fréquences basses a augmenté car la moquette n'absorbe que très peu ces fréquences.

L'aspect confiné et feutré que l'on souhaité donner à la bibliothèque a donc été atteint car ces impressions sont intimement liées au temps de réverbération comme on l'a vu dans la partie 1, tableau 1. L'objectif est donc atteint.

Enfin, le modèle étant basé sur la configuration de la bibliothèque lors de mesures in situ, c'est-à-dire une bibliothèque vide, sans étudiants, il semble donc intéressant de donner les résultats prédits par CATT en situation réelle : Nous allons faire l'hypothèse que 75% des emplacements disponibles dans la bibliothèque sont occupés. Pour cela, nous rajoutons, dans le modèle, une aire d'audience équivalente aux emplacements réservés aux étudiants et relançons notre module de prédiction. Nous trouvons que les résultats sont encore meilleurs : les fréquences basses semblent être bien absorbée par l'aire d'audience et le temps de réverbération est autour de une seconde pour toutes les fréquences :

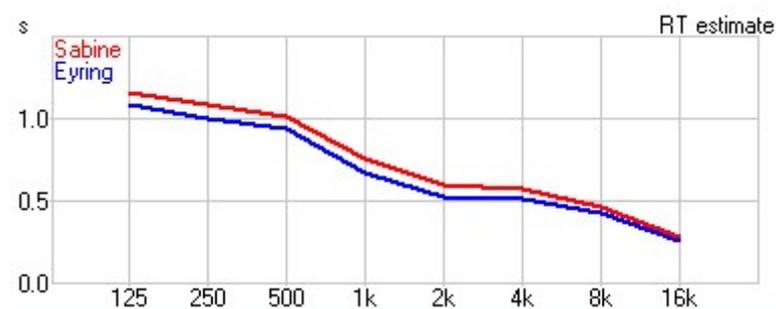


Figure 11 RT60 en fonction de la fréquence

Conclusion

Afin de mener l'étude acoustique de la bibliothèque de premier cycle de Jussieu, nous avons rappelé quelques paramètres objectifs et subjectifs qui permettent de décrire l'acoustique d'une salle ainsi que les moyens dont dispose l'acousticien pour la modifier et la corriger. Ceci nous a notamment amené à réfléchir sur la nature d'une bonne ou mauvaise acoustique dans une bibliothèque et sur les paramètres à modifier afin de répondre à cette demande de qualité. Nous avons déduit que pour que l'acoustique soit adaptée à la fonction du lieu, il faut que le temps de réverbération soit court afin de donner une ambiance feutrée au lieu, une impression de confinement, et que la diffusion du son dans la pièce soit mauvaise afin de minimiser le niveau sonore de bruits lointains sur l'auditeur.

Les paramètres ainsi présentés sont indispensables pour interpréter les résultats fournis par des logiciels de prédiction acoustique comme *CATT*. En effet, ce logiciel permet la modélisation d'espaces sonores et d'en donner les caractéristiques acoustiques. Dans le cadre de notre étude, nous avons donc modélisé la bibliothèque avec ce logiciel et nous avons confronté les résultats fournis par ce dernier avec les résultats donnés par des mesures effectuées in situ. Après analyse de ces mesures, nous avons déduit que même si le modèle était approximatif du fait de mesures incertaines fournies par *Autocad*, il s'avérait pratique pour juger de la pertinence d'une modification des paramètres de la salle sur son acoustique. En effet, la finalité du projet étant de proposer une solution offrant aux usagers de la bibliothèque un meilleur environnement acoustique – propice au travail, ce modèle a permis de prédire l'impact d'un changement de revêtement du sol et/ou des murs sur l'acoustique la salle.

Notre solution a donc été de mettre des rideaux épais sur les fenêtres et de remplacer le revêtement actuel du sol par de la moquette. Ces deux simples modifications modifient considérablement les paramètres influents sur le confort usagers de la bibliothèque. Le temps de réverbération est réduit significativement et améliore donc son confort acoustique.

Bibliographie

- [1] Antonio Fischetti, *Initiation à l'acoustique*, Editions BELIN.
- [2] Philippe Guillaume, *Musique et acoustique*, 2005, Editions LAVOISIER.
- [3] Donald E. Hall, *Musical Acoustic*
- [4] L. Beranek. Music, *Acoustics and Architectures* , 1962, John Wiley.
- [5] M. Bruneau, *Manuel d'acoustique fondamentale*, Hermes, Paris, 1998.
- [6] Denis Mercier, *Le livre des techniques du son*, 2002, Editions DUNOD.
- [7] <http://www.ircam.com>
- [8] <http://fr.audiofanzine.fr>
- [9] Manuel d'utilisation CATT

Annexes

A- Absorption et diffusion

Absorption par porosité

Un matériau poreux est un matériau dont la matière contient de nombreux pores plus ou moins ouverts vers l'extérieur et reliés entre eux par des canaux très fins. Lorsqu'une onde acoustique rencontre un tel matériau, une partie de l'énergie acoustique est transformée en chaleur par les effets de viscosité et de résistance frictionnelle liés à la présence des pores et des canaux.

Tous les matériaux poreux possèdent des caractéristiques communes :

- Absorption en fonction de la fréquence : pour un matériau poreux donné, à épaisseur constante, le coefficient d'absorption croît avec la fréquence.
- Absorption en fonction de l'épaisseur : pour un matériau donné, à fréquence constante, le coefficient d'absorption croît avec l'épaisseur, et d'autant plus que la fréquence est basse.
- Influence de la distance à la paroi.

Absorption par panneau acoustique

Les panneaux acoustiques, encore appelés diaphragmes, sont des panneaux placés à une distance d d'un mur. Le panneau et la masse d'air situé derrière celui-ci entrent en vibration. Cet ensemble forme une masse relativement lourde qui oscille sur des **basses fréquences**. Ces dernières sont donc particulièrement **absorbées**. L'absorption est maximale pour la fréquence propre du panneau. On admettra que la fréquence propre d'un panneau situé à la distance d d'un mur et de masse surfacique ρ , vaut :

$$f = \frac{60}{\sqrt{\rho d}}$$

- *Résonateurs du type Helmholtz* : Le résonateur de Helmholtz est composé d'une cavité à paroi rigide qui communique avec l'air par une ouverture possédant un col. L'air enfermé dans la cavité agit comme un ressort pour les ondes de longueurs d'onde grande devant les dimensions de la cavité, et l'air contenu dans le col comme une masse; on se trouve donc en présence d'un dispositif masse ressort dont on peut calculer la fréquence de résonance :

$$F = \frac{c}{\pi} \sqrt{\frac{S}{lV}}$$

Où S est la surface de la section du col, l sa longueur et V le volume de la cavité. Il est également possible de jouer sur l'amortissement de ce type de résonateur en introduisant un matériau poreux sur les bords du col ou dans la cavité.

Diffuseurs de Schroeder

Les diffuseurs de Schroeder sont des panneaux de cellules de profondeurs différentes. La manière dont l'onde sonore est diffusée dépend du nombre de ces cellules ainsi que de leur profondeur et de leur largeur cf. *ci photo ci dessous*)



Diffuseur de Schroeder.

B- Les différentes techniques de simulations utilisées par CATT ([9])

Prediction methods

CATT-Acoustic offers three different prediction, or acoustic simulation, methods detailed in this section:

Audience area mapping utilizes standard ray-tracing with a spherical receiver. Ray-tracing is a robust method for prediction of numerical measures but the echograms are difficult to use for auralization.

Early part detailed ISM utilizes the Image Source Model with added first-order diffuse reflection. This method is meant for qualitative reflection path analysis and does not estimate any room acoustic parameters other than SPL. The reason is that diffuse reflection is extremely difficult to include in the ISM in a proper manner. For special cases that require high early part detail but no reverberation, postprocessing files can be generated.

Full detailed calculation utilizes Randomized Tail-corrected Conetracing (RTC) that combines features of both specular cone-tracing, standard ray-tracing and the ISM. The RTC is a general and robust numerical prediction method and can as well create echograms that can be used for auralization. Since this method (as all other prediction methods) has drawbacks, first order reflections and the direct sound are handled deterministically.

The prediction methods are based on geometrical acoustics and is partly documented in a Ph.D. thesis [Dalenbäck-95b], [Chalmers].

Audience area mapping

Audience area coverage mapping estimates early sound pressure level, lateral energy fraction, and parameters (D-50 etc.) over a grid covering selected audience-planes. A separate ray-tracing with fixed-size spherical receivers, where also source directivity and source delay is taken into account, is performed. "Fixed-size receiver" means that, unlike conetracing, the receiver radius does not change depending on how long a received ray has travelled. Diffuse reflection is handled by randomizing the direction of rays reflected off diffusing surfaces and the likelihood of diffuse reflection is determined by the diffusion factor, d .

The map is divided into a square grid where the grid step can be selected in the Audience area mapping dialog. The receiver diameter is set to slightly larger than the map step and the receiver center is normally placed at half a map step above the mapping planes so that the sphere does not penetrate the audience plane. The maximum number of resulting squares allowed are 90 in the x-direction and 150 in the y-direction. Should the selected step be too small to cover all selected audienceplanes, the step is automatically increased. Some squares may fall partly outside the room (close to wall positions) causing a loss of energy

received at those positions.

To arrive at correct pressure levels the number of rays used should ideally match the map step chosen. To avoid this strict dependence, a different approach has been used. The number of rays needed to give a possibility of one ray per square at the longest chosen time is first calculated. The power of each ray is then adjusted dependent on the actual number of rays used so that roughly the same levels are obtained even if the number of rays are "too few". A systematic error is thus converted to a statistical error.

If audience surfaces overlap in z, only the surface with highest z is mapped (i.e. if both balcony and stalls are included the stalls under the balcony will not be mapped but has to be run separately). For 3D map views the map points closest to the viewpoint are drawn last thus covering points behind.

The direct sound is handled separately connecting the source directly to each receiver center taking into account any obscuring surfaces.

Early part detailed ISM

The Image Source Model (ISM) can determine all specular reflections between a source point and a receiver point. The ISM works by calculating first order image sources (IS) of the main source in all reflecting planes. From each of these first order IS second order sources are created by calculating new IS in all reflecting planes (except the plane that created the first order IS since it would yield the previous order IS). This procedure is repeated until a requested max order of reflection or max arrival-time is exceeded.

Once all valid IS are found, the corresponding reflection arrival times can be found simply by calculating the length of the three-dimensional vector from each IS to the receiver. The level of each reflection is calculated from the output power and directivity of the source, spherical spreading (inverse square law) and is adjusted by absorption and diffusion (first order) properties of the planes that created the IS and also by air dissipation.

On each diffusing surface a number of square patches are placed. For first order reflections these patches act as elementary sources radiating according to Lambert's law when excited [Kuttruff]. Diffusing surfaces are automatically patched.

The Early part detailed ISM dialog selection Diffuse refl. order determines the maximum order that will give diffuse reflection. Specifying a value greater than one will generate many thousands of reflections and is generally of no importance with the current implementation, and is therefore blocked. All specular reflections up to and including the diffusion order will be diminished by $(1 - d)$. For higher order images sources the diffusion factor, d , is neglected (or the energy would be lost).

Note: diffusing properties can be changed, added or removed on any surface when running from pre-calculated images. However, to use

diffuse reflection order = 1 if the images were calculated using 0 diffuse orders requires a new calculation from scratch.

The diffuse reflection order should typically be set to 1.

Full detailed calculation

CATT-Acoustic v7 utilizes a new unique prediction method that is based on the experience of using the ISM and ray-tracing in previous software versions as well as on a Ph.D. thesis at Chalmers University [Dalenbäck-95b], [Chalmers].

The design goals for the new method, called Randomized Tail-corrected Cone-tracing (RTC for short), were to create:

_ a general method that requires as few assumptions as possible e.g. regarding the statistical properties of the room under consideration:

RTC only assumes that reflection density growth is quadratic and that can be shown to hold generally for closed rooms. For open rooms no use is made of the reflection growth.

_ a method that uses the same algorithm for both the early part and the late part of the echogram:

RTC employs randomized cone-tracing (cone-tracing that handles diffuse reflection in the same manner as ray-tracing does) for the full response but handles the direct sound and first order specular and diffuse reflection deterministically. What is labelled the "early part" in RTC is up to the time where the details of the echogram are considered to be valid and no extrapolation of the growth is necessary (due to the divergence of rays cone- and ray-tracing do not detect late reflections from small surfaces). The more cones that are used the longer the "early part" becomes (typically 300-500 ms in concert halls, i.e. longer than in most other combined methods and considerably longer than in CATT-Acoustic v6.x).

_ a method that can handle frequency dependent diffuse reflection for the full echogram and not only for the late or the early part (this rules out pure ISM, specular cone- or pyramid- tracing, the hybrid method etc.):

RTC handles diffuse reflection for order > 1 the same way as raytracing does i.e. for each reflection a random number $[0,1[$ is generated and if the number is less than the diffusion factor, d , of the surface the ray direction is randomized according to Lambert's law (ideal diffuse reflection [Kuttruff]) otherwise the reflection is specular. As a necessary consequence of the frequency dependent diffuse reflections, an independent cone-tracing is performed for each octave-band, so when 10000 rays are selected, 6×10000 rays are actually traced.

RTC handles diffuse reflection for order = 1 by letting each firstorder ray impact create an elementary source radiating to all visible positions according to the Lambert law. The radiated power is proportional to $d(1-a)$ where d is the frequency dependent

diffusion factor of the surface and a the absorption factor. Similarly, any first-order specular reflections (handled by the ISM) are diminished by $(1-d)(1-a)$. The more rays that are used the more diffuse sources are created and the weaker they become. Since this procedure will generate a very great number of weak first-order diffuse reflections, that are not necessary to treat in detail, they are decimated so that reflections arriving within 1 ms and within 5 degrees from each other are added together.

_ a method that requires few settings (methods with different algorithms for the early and the late part often have settings about the early-late transition that may be very critical and that are difficult to select):

RTC just requires the selection of the number of rays/cones to use and how long to trace them and even offers an automatic choice.

_ a method that can handle open rooms:

RTC detects the case of an open room and does then not use extrapolation (since the reflection growth is unknown in an open room). Good calculations for open rooms require more rays than for the average closed room but no fundamental method limitations exist. Calculations for open rooms also goes faster since all rays eventually escape. For very big open rooms, such as stadiums, the ISM can be used as an alternative for auralization.

_ a method that can handle rooms with one or two dimensions very different from the third (this rules out many methods that rely on e.g. statistical tails):

RTC requires the use of more rays for rooms with odd shapes than for the average closed room but no fundamental method limitations exist (it is quite natural that unusual cases require more rays).

_ a method that can resolve under-balcony and similar positions:

RTC requires the use of more rays but no fundamental method limitations exist (i.e. narrower cones) for good prediction of difficult positions such as under balconies (it is quite natural that under balcony positions require more rays because the shape is narrow).

_ a method that is robust and gives reasonable results also with fairly few rays:

Since cone-tracing has an initially small receiver (or cone face) the likelihood for detection of the randomized ray is less than for raytracing (using a larger fixed-size receiver) giving a higher statistical variation from run to run. This is compensated for in the RTC by handling the very important first-order reflections deterministically. Even with as few as 1000 rays, estimated parameters should not vary more between runs than the difference limen of each parameter unless the statistical properties are very special (although minor details in the early echogram for reflection order > 1 may differ from run to run). Since a stochastic process is involved it may be necessary to perform test runs for each new hall to determine the number of rays needed to give repeatable results

(this is no difference from other methods using a stochastic process).

_ a method that can create echograms possible to use for auralization (this rules out direct use of standard ray-tracing since the reflection density is not naturally increasing with time, and specular cone-tracing since it creates unnatural late echoes because the reflection density is too low and no diffusion is applied):

RTC creates discrete reflections as were they created by the ISM and the reflection growth goes as time squared up to the end of the "early part" where reflections are beginning to become undetected. For numerical prediction, energy in the late part (the "tail") is corrected using extrapolation but details are not valid and would give an unnatural-sounding response. For binaural post-processing only, the late part is re-created by statistical generation of reflections (with the correct reflection density growth) using a simplified model of the room taking into account the room shape. The late part ray incidence distribution from the prediction is used for post-processing so that also the late part of the synthesized impulse response has some spatial properties from the actual model. Since the early part often is as long as 300-500 ms the details of the reverberation tail in v7 is not so important. If a longer early part is required more rays/cones have to be used which is only natural.

C - Les coefficients d'absorption de différents matériaux

Matériau	Fréquence (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Fenêtre	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Draperie légère	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Tenture lourde	0,05	0,15	0,35	0,45	0,40	0,35
Contreplaqué 5mm à 25mm du mur	0,07	0,12	0,28	0,11	0,08	0,08
Contreplaqué 5mm à 50mm du mur	0,47	0,34	0,30	0,11	0,08	0,08
Béton	0,32	0,25	0,22	0,20	0,19	0,20
Plâtre	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,08
Parquet	0,03	0,04	0,08	0,12	0,10	0,10
Moquette 15mm sur béton	0,20	0,25	0,31	0,36	0,52	0,73
Laine de verre	0,11	0,19	0,41	0,54	0,60	0,75
Spectateur assis	0,58	0,70	0,80	0,90	0,90	0,88

Figure 3 tableau donnant les coefficients d'absorption de différents matériaux couramment utilisés. Source : www.acousticalsurfaces.com.

D – Script du fichier maître Master.geo

global l=12; hall largeur
 Global prof= 60; hall profondeur unité nombre de poteaux
 Global ref =10
 Global ep =0.2;épaisseur mezzanine
 Local A =0.1

ABS audience = <46 56 65 75 72 65> L <30 40 50 60 70 70> {255 0 0} ; Chaises
 en bois, surface à 75% occupée
 ABS mur = <15 13 10 9 8 7> L <30 30 30 30 30 30 > {40 67 87}
 ABS verre = <35 25 18 12 7 4> {142 197 215}
 ABS bois = <19 14 9 6 6 5>
 ABS linoleum = <2 3 3 3 3 2> {74 94 108}
 ABS muR2 = <1 5 6 7 9 8 >
 ABS moquette = <2 6 14 37 60 65>
 ABS rideaux = <5 15 35 45 40 35>
 ABS Beton <32 25 22 20 19 20>
 ABS beton_poreux = <36 44 31 29 39 25 >
 ABS Panneau <60 95 85 8 2 4>

INCLUDE mezza.geo
 INCLUDE audience.geo
 INCLUDE poteaux_blocs.geo

;INCLUDE escaliers.geo
 CORNERS

;sol -----

1-13	0	0
2-13	79	0
3 13	79	0
4 13	0	0

;plafond -----

11	-13	0	h
12	-13	79	h
13	13	79	h
14	13	0	h

;entrée -----

15	-13	5	0
16	-13	16	0
17	-7	16	0
18	-7	5	0
19	-13	5	h/2

20	-13	16	h/2
21	-7	16	h/2
22	-7	5	h/2

PLANES

- [1 sol/ 4 3 2 1 / moquette]
 [2 plafond \ 14 13 12 11 \ mur]
 [3 fond bas/ 1 11 14 4/ mur]
 [4 limite bas/ 3 13 12 2/ mur]
 [5 cot jardin/ 2 12 11 1/ rideaux]
 [6 cot cour/4 14 13 3/ mur]
- [7 \ 16 17 21 20\ verre]
 [8 \19 20 21 22 \ verre]
 [9 / 15 18 22 19/ verre]
 [10 \ 17 18 22 21\ verre]

E – Résultats fournis par Smart et CATT

Table de valeur (Smart) de la réponse de la salle à un ballon qui éclate :

Band	T (R)	EDT (R)	DTR	T (20)	T (30)	EDT	C10	C20	C50	C80
Broadband	1.61	1.06	4	1.25	***	1.19	-8.84	-5.30	-1.52	1.66
63 Hz	2.88	***	***	***	***	***	-13.11	-11.83	-6.40	-4.02
125 Hz	1.62	***	***	1.88	***	1.72	-10.46	-7.76	-5.91	-3.92
250 Hz	2.10	0.99	7	1.63	1.76	1.79	-5.58	-4.76	-1.36	0.11
500 Hz	1.64	1.32	2	1.55	1.60	1.83	-8.24	-4.74	-1.77	0.09
1 kHz	1.52	3.17	1	1.30	1.33	1.38	-10.15	-7.98	-1.80	0.84
2 kHz	1.14	0.74	8	1.02	1.05	1.05	-9.14	-5.75	-1.32	1.95
8 kHz	0.97	0.29	20	***	***	***	-1.84	0.27	4.91	8.18

Table de valeur (CATT) de la réponse de la salle à un ballon qui éclate :

	125	250	500	1k	2k	4k	
EyrT	1,35	1,53	1,89	2,06	2,00	1,84	s
EyrTg	1,35	1,54	1,91	2,09	2,03	1,87	s
SabT	1,38	1,55	1,89	2,06	2,01	1,85	s
T-15	1,92	1,84	2,36	2,68	2,52	2,02	s
T-30	2,22	2,16	2,48	2,74	2,66	2,15	s
AbsC	15,10	13,39	10,87	9,72	9,38	7,98	⊘
AbsCg	15,02	13,33	10,74	9,57	9,22	7,76	⊘
MFP	5,49	5,53	5,57	5,52	5,51	5,52	m
DiffS	16,56	16,41	16,46	16,54	16,49	16,50	⊘

Les valeurs fournies par Smart sont les valeurs de références. Notre modèle diffère de manière importante si l'on se réfère aux temps de réverbération de Sabine (SabT pour les valeurs CATT, T(R) pour les valeurs Smart)