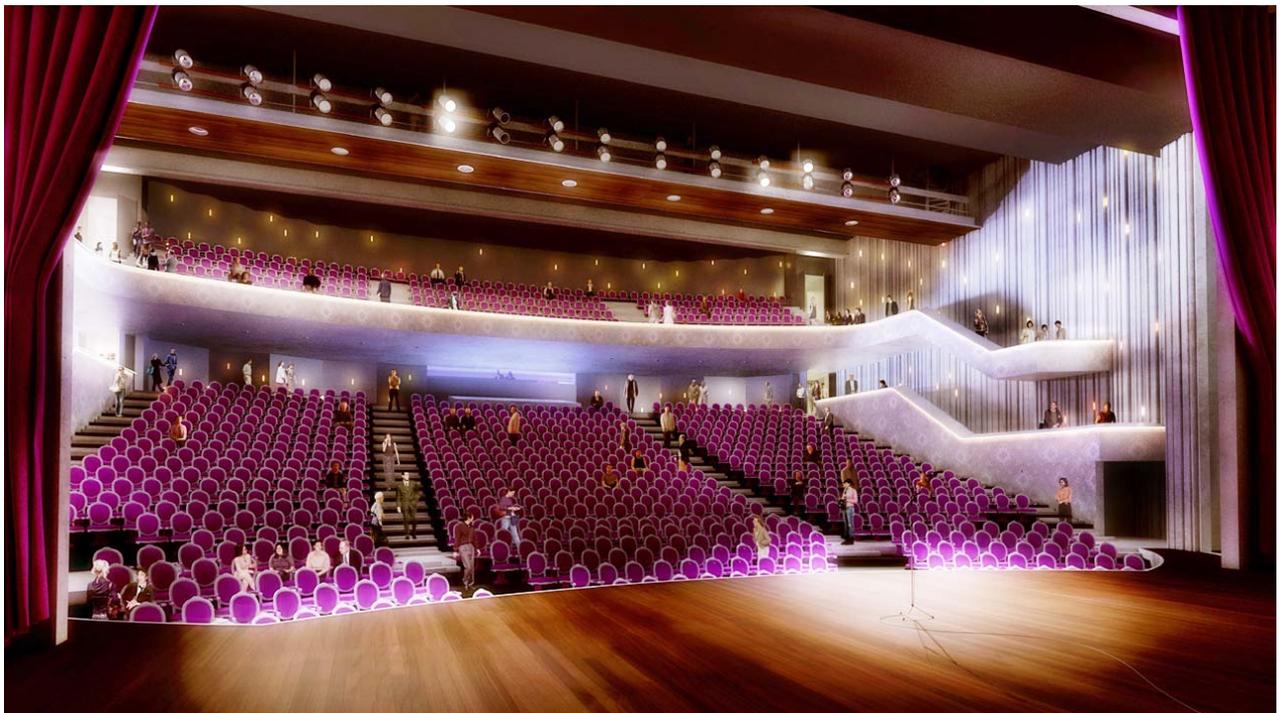


**LANDAIS  
Christopher**

*INSA Strasbourg  
Génie Civil – Promotion 2007  
Elève ingénieur en 5<sup>ème</sup> année*



## **Projet de Fin d'Etudes** *- Octobre 2007 -*



### **SUJET :**

*Etude de la diffusion du son dans le logiciel de modélisation acoustique CATT*

**Entreprise :** **LASA**  
*Laboratoire d'Application des Sciences Acoustiques*

**Dates :** Du 19 février au 15 septembre 2007

**Maître de stage :** M. Samuel TOCHON-DANGUY  
**Tuteur de stage :** M. Yves KAYSER



## RESUME

Cette étude porte sur l'effet de la composante diffuse du son réfléchi sur certains critères définissant la qualité acoustique d'une salle et sa prise en compte dans le logiciel de modélisation CATT. Une première partie de cette étude permet de définir les différentes méthodes utilisées pour modéliser la propagation du son et les limites rencontrées dans la prise en compte des phénomènes engendrant la diffusion de celui-ci. L'étude est ensuite ciblée sur le fonctionnement du logiciel CATT et notamment sur les fonctions permettant de modéliser la diffusion. L'optimisation d'une méthode de modélisation d'éléments diffusants dans le logiciel est réalisée par l'expérimentation, en comparant les résultats fournis par des mesures effectuées sur un cas réel à ceux prédits par le logiciel.

La conception et la fabrication d'un prototype de diffuseur, basé sur la théorie de Schroeder, a donc été entreprise et a permis la réalisation d'une campagne de mesures. Les résultats ont servi, d'une part à déterminer l'impact de la diffusion sur les critères de salle et d'autre part, à améliorer la méthode de modélisation du phénomène de diffusion.

Un cas concret de conception d'une salle de spectacle, nécessitant la mise en place d'éléments diffusants, sert de fil conducteur à l'étude tant théorique que pratique.

**Mots Clés :** *Diffusion, réflexion diffuse, CATT Acoustic, critère de salle, théorie de Schroeder, prototype QRD*

This study discusses about the effects of the reflected sound diffusive component on different parameters defining acoustic quality of halls, and its modelling in CATT Acoustic software. The first part's aim is to get familiar with the different methods used to model sound propagation as well as sound scattering phenomena and its limits.

That is followed by an analysis of CATT's calculation algorithms and more particularly, on functions ensuring to create sound diffusion. An optimisation of a modelling method for diffusive elements is made by experimentation, comparing results given by measures and software's predictions.

A diffusive prototype, based on Schroeder's theory, was designed and realised, and allowed me to make a series of measures. The results were used on one hand to determine scattering impact on room acoustic parameters, and on the other hand to improve the diffusion modelling method.

A current concert hall designed by LASA, requiring diffusive elements on the walls, is a guideline for the theoretical and practical study.

**Keywords:** *Sound scattering, diffuse reflection, CATT Acoustic, acoustical parameters, Schroeder's theory, QRD prototype*

## REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord mon maître de stage, Samuel TOCHON-DANGUY, pour m'avoir accordé sa confiance en me permettant de réaliser mon projet de fin d'études au sein du LASA, dans l'agence de Lyon. Je le remercie également de m'avoir éclairé et guidé tout au long de mon étude et surtout, pour le temps précieux qu'il m'a accordé à chaque fois que j'en avais besoin.

Je remercie Monsieur Philippe GUIGNOUARD de m'avoir accepté dans son entreprise et permis de commencer ma carrière au sein d'une équipe agréable et compétente.

Je tiens aussi à adresser un grand merci à Thomas BOUQUET pour m'avoir conseillé et aidé tout au long de la réalisation des mesures et pour m'avoir épaulé lors de mes débuts avec le logiciel CATT Acoustic.

Je remercie l'équipe entière du LASA pour la bonne humeur quotidienne et pour avoir facilité mon intégration dans l'entreprise.

Je remercie Monsieur Yves KAYSER, pour m'avoir suivi tout au long de cette étude et particulièrement pour m'avoir soutenu lors de mes recherches d'une entreprise pour réaliser mon PFE.

Enfin, je remercie l'entreprise 01dB, en la personne de Monsieur Laurent FAIGET, et l'IUT Mesures Physiques de Saint-Etienne pour le prêt du matériel de mesure.

*« La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne.  
La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. »*

**- Albert EINSTEIN -**

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b>	<b>6</b>
Présentation de l'entreprise :	7
Déroulement de l'étude :	12
<b>1 THEORIE : LA DIFFUSION</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Préliminaires</b>	<b>13</b>
1.1.1 La propagation du son	13
1.1.2 La réponse impulsionnelle (échogramme)	14
1.1.3 Terminologie	16
<b>1.2 Propriétés des réflexions</b>	<b>17</b>
1.2.1 Les réflexions spéculaires	17
1.2.2 Les réflexions diffuses	18
1.2.3 La loi de Lambert	19
1.2.4 Comportement de l'onde réfléchie	19
1.2.5 Perception de la diffusion	20
<b>1.3 Mesure de la diffusion</b>	<b>22</b>
1.3.1 Terminologie	22
1.3.2 Mesure du « Diffusion coefficient » - coefficient de diffusion (d)	22
1.3.3 Mesure du « Scattering coefficient » - coefficient de dispersion (s)	24
1.3.4 Relation entre coefficient de diffusion et coefficient de dispersion	25
<b>1.4 Les différentes méthodes de modélisation en acoustique</b>	<b>26</b>
1.4.1 Méthodes basées sur les rayons	26
1.4.2 Prise en compte de la diffusion	29
1.4.3 Prise en compte de la diffraction et de la réfraction	32
1.4.4 Les limites du tracé de rayons	33
<b>2 LE LOGICIEL DE MODELISATION CATT ACOUSTIC</b>	<b>34</b>
<b>2.1 Présentation du logiciel</b>	<b>34</b>
<b>2.2 Les différents modes de simulation</b>	<b>35</b>
<b>2.3 Prise en compte de la diffusion dans le logiciel</b>	<b>36</b>
2.3.1 Algorithme de modélisation de la diffusion	37
2.3.2 Présentation des différentes fonctions permettant de modéliser la diffusion	37
2.3.3 Combinaisons des fonctions pour gérer la diffusion dans CATT	38
2.3.4 Effet de bord : fonction « auto_edge »	39
2.3.5 Estimation de la diffusion : fonction « Estimate »	40
2.3.6 Les limites de la modélisation dans ce logiciel	40
2.3.7 Méthodologie proposée pour prendre en compte la diffusion	41
<b>2.4 La modélisation du local de mesures</b>	<b>41</b>
2.4.1 Le local de mesures	41
2.4.2 Détermination des coefficients d'absorption	42
2.4.3 Réalisation des mesures dans le local vide, non meublé	44
2.4.4 Les limites de la mesure	46
2.4.5 Calage de la modélisation sur les résultats de mesures du local sans diffuseurs	51

<b>3</b>	<b>APPLICATION A UN CAS CONCRET : LA SALLE DE SPECTACLE DE SENS</b>	<b>54</b>
<b>3.1</b>	<b>Cahier des charges</b>	<b>54</b>
3.1.1	Le projet	54
3.1.2	Contraintes du projet	54
3.1.3	Solution envisagée	55
<b>3.2</b>	<b>Conception d'un diffuseur et réalisation d'un prototype</b>	<b>55</b>
3.2.1	Etude de la théorie de Schroeder	55
3.2.2	Déroulement de la construction du prototype	59
<b>3.3</b>	<b>Comparaison des résultats de mesures et des simulations CATT Acoustic</b>	<b>59</b>
3.3.1	Résultats des mesures réalisées avec diffuseurs dans le local de mesures	61
3.3.2	Modélisation des diffuseurs dans le logiciel CATT Acoustic	63
3.3.3	Réglage des coefficients de diffusion du modèle CATT Acoustic	64
3.3.4	Comparaison du modèle avec les résultats de la mesure avec diffuseurs	66
<b>3.4</b>	<b>Application à la salle de Sens</b>	<b>67</b>
	<b>CONCLUSION</b>	<b>71</b>
	<b>METHODE PROPOSEE POUR MODELISER LA DIFFUSION DANS LE LOGICEL CATT</b>	<b>72</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>75</b>
	<b>NOTES</b>	<b>76</b>

**Annexe 1** : Extraits du « Mémoire technique Concert Halls & Opera Houses » - Définition des critères de salle. -

**Annexe 2** : Plan de la séquence diffusante dimensionnée pour la salle de Sens

**Annexe 3** : Photos présentant la réalisation du prototype

**Annexe 4** : Photos présentant la réalisation des mesures

**Annexe 5** : Courbes des mesures comparant les résultats salle vide et avec la présence des diffuseurs

**Annexe 6** : Analyse des différences entre les échogrammes - Pas de 0,02 s -

**Annexe 7** : Analyse des différences entre les échogrammes - Pas de 0,01 s -

**Annexe 8** : Analyse des différences entre les échogrammes - Pas de 0,005 s -

**Annexe 9** : Aperçus de la modélisation du diffuseur

**Annexe 10** : Courbes comparatives des résultats mesurés et prédits

## INTRODUCTION

Dans la phase préliminaire de conception de l'opéra qui porte son nom, Charles Garnier analysa les plus grandes salles du monde dans l'espoir de découvrir une théorie acoustique unifiée. A l'époque sa conclusion tourna court et il dut admettre que pour l'obtention d'une acoustique de qualité, l'intuition restait encore le meilleur outil. Au cours de ses nombreux voyages, il avait constaté cependant que les moulures et les statues participaient de manière significative à la richesse sonore. Il ne manqua pas d'ailleurs d'en surcharger son opéra parisien.

L'importance de la diffusion est sans même le savoir connue depuis très longtemps. Effectivement, comme Charles Garnier, les architectes de jadis avaient résolu intuitivement le problème en surchargeant l'espace intérieur de lustres géants, de niches, de statues de grande taille, favorisant naturellement la diffusion sonore.

Mais comment peut-on créer de la diffusion ?

Le principe repose sur la dispersion maximum d'une onde sonore, afin de créer un brassage acoustique homogène. A l'image d'une vague se brisant sur les rochers, l'homogénéité sonore s'obtient en plaçant des formes géométriques aussi variées que possible, dont les dimensions se doivent d'être proportionnelles aux longueurs d'onde de la bande de fréquence que l'on désire traiter.

En principe, créer de la diffusion sonore est chose simple. Mais, comprendre les causes et les paramètres à l'origine de ce phénomène est relativement moins aisé. De nos jours, certains systèmes ont été mis au point, faisant la renommée d'acousticiens, permettant de contrôler les fréquences qui seront diffusées. Comment ces systèmes fonctionnent-ils ? A l'heure actuelle, avec les instruments informatiques dont sont dotés les acousticiens, l'étude et la conception de salles de concert, de théâtres et d'auditoriums passent forcément par des logiciels informatiques, afin de rendre les prédictions des critères définissant la qualité des salles toujours plus précises. Comme on l'a cité précédemment, la diffusion joue un rôle important dans l'appréciation de la qualité de la salle. Mais, comment est-elle vraiment prise en compte dans les logiciels et quelle méthode de modélisation est-il le plus judicieux d'utiliser pour fiabiliser les prédictions ? Ces questions sont d'actualité dans les bureaux d'études acoustiques actuels. C'est pourquoi, en collaboration avec le LASA, mon projet de fin d'études porte sur la diffusion du son et sa modélisation. Le bureau d'études LASA utilise le logiciel CATT Acoustic pour concevoir les salles de spectacles. Dans mon sujet intitulé « Etude de la diffusion du son dans le logiciel de modélisation acoustique CATT », je me suis intéressé à la modélisation de la composante diffuse du son réfléchi dans ce logiciel ainsi que son influence sur les critères de salle.

Comme vous pourrez le constater par la suite dans ce rapport, plusieurs coefficients ont été définis pour caractériser les propriétés diffusantes d'un objet. Il ne s'agit pas dans cette étude, de mesurer l'un de ces coefficients mais plutôt de qualifier l'impact d'une séquence diffusante dans une salle, sur les critères qui définissent sa qualité acoustique. On cherchera donc à mesurer un apport créé par le diffuseur, une différence entre un état initial (sans le diffuseur) et avec la présence de l'élément diffusant. Le but étant de savoir modéliser cet écart mesuré, s'il existe, dans le logiciel CATT Acoustics, par une procédure bien définie.

Mon étude, d'une durée de 7 mois, comporte donc plusieurs objectifs distincts. Dans ce rapport, je vais essayer de comprendre, d'une manière générale, comment la propagation et la diffusion d'une onde sonore peuvent être modélisées puis, plus particulièrement, sa prise en compte dans le logiciel CATT Acoustic. Enfin, je chercherais à caractériser l'influence d'un élément diffusant sur les critères de salle et à optimiser la méthode de modélisation de la diffusion dans ce logiciel. Parallèlement à cette étude, le LASA assure, entre autres, l'assistance acoustique à la maîtrise d'œuvre pour la conception d'une salle de spectacle. Ce projet a été le fil conducteur pour mon étude tant au niveau théorique que pratique. En effet, l'intégration de diffuseurs dans le traitement de l'acoustique interne de cette salle m'a donné l'occasion de dimensionner et construire un prototype d'une séquence diffusante et d'étudier son impact sur les critères définissant la qualité acoustique des salles.

## Présentation de l'entreprise :

Le LASA – Laboratoire d'Application des Sciences Acoustiques - à été créé en 1975 par Mathias MEISSER. A l'époque, ce bureau figurait comme l'un des pionniers de l'acoustique en France et chaque étude relevait à la fois de l'ingénierie et de l'expérimentation. C'est pourquoi, la dénomination « laboratoire » à été choisie, puis conservée au fil des années. Aujourd'hui, fort de cette expérience, le LASA intervient dans les différents champs d'application que sont les mesures et les études dans les domaines du bâtiment, de l'industrie et de l'environnement mais aussi à la mise au point et à l'amélioration des systèmes et des produits industriels.

Le LASA est une SARL au capital de 31 902 €. Son chiffre d'affaire pour l'année 2006 a été de un million d'euros. Les bureaux du LASA sont composés du siège social basé à Paris et d'une agence créée en octobre 2006 à Lyon.

## Les domaines d'activités du LASA :

Le LASA accompagne les architectes dans la conception des bâtiments, en mettant son savoir-faire au service de la recherche de solutions nouvelles permettant de respecter le concept architectural et d'apporter une plus value à l'ouvrage ainsi que le respect des réglementations et la prise en compte des critères HQE.

Le LASA assiste les maîtres d'ouvrages publics et privés pour la rédaction de leurs programmes, pour l'ingénierie des projets en conception construction, ainsi que pour le contrôle et la validation des solutions proposées par les équipes de maîtrise d'œuvre.

Le LASA assiste également les entreprises de construction pour la bonne exécution de leurs projets, pour la recherche et l'optimisation de solutions techniques adaptées aux contraintes du chantier et permettant de respecter leurs engagements contractuels ainsi que le budget alloué.

Le LASA apporte à tous ses projets des réponses spécifiques intégrant les critères acoustiques, mais aussi thermiques, esthétiques, ergonomiques, HQE et économiques.

Enfin, le LASA est qualifié par l'OPQIBI des qualifications 1601 (Etude en acoustique), 1602 (Ingénierie en acoustique des infrastructures de transport), 1604 (Ingénierie en acoustique du bâtiment), 1605 (Ingénierie en acoustique d'environnement). Ces qualifications ont pour objet de reconnaître la compétence et le professionnalisme d'un prestataire d'ingénierie. Elles attestent la capacité d'une structure à réaliser, à la satisfaction de clients, les prestations pour lesquelles elle est qualifiée. Elles ont pour objectif de sécuriser les clients (maîtres d'ouvrages, donneurs d'ordre) dans leurs choix de fournisseurs.

## Le LASA, bureau d'étude acoustique et vibrations, réalise les études suivantes :

- ✓ ASSISTANCE CONCEPTION - REALISATION
  - MAITRISE D'ŒUVRE : conception et suivi d'exécution des projets avec l'équipe de maîtrise d'œuvre pour la part acoustique et vibrations. Bâtiments culturels, auditoriums, cinémas, bureaux, enseignements, bâtiments industriels, hôtels, logements, équipements de sports et loisirs, ...
  - ASSISTANCE MAITRISE D'OUVRAGE : programmes, conseil acoustique, stratégie cible HQE, ...
  - ASSISTANCE TRAVAUX : conseils en cours de chantier, optimisation des solutions, contrôles acoustiques en cours et en fin de chantier, ...
  - ETUDES CRITIQUE DES PROJETS (AUDITS) : vérification du respect des cahiers des charges et réglementations, optimisation des solutions, ...
  - ETUDES PREVISIONNELLES : simulations numériques sur ordinateur, étude de forme, position de réflecteurs, durée de réverbération RASTI – STI, décroissance spatiale, cartes de bruit, ...
  - DETERMINATION ET DESCRIPTION DE TRAITEMENTS ACOUSTIQUES
  - ELABORATION DE CAHIERS DES PRESCRIPTIONS PARTICULIERES ACOUSTIQUES
- ✓ ETABLISSEMENT DE PROGRAMMES D'OPERATION
- ✓ DIAGNOSTIQUES ACOUSTIQUES ET VIBRATOIRES DES BATIMENTS : respect des réglementations, transformations de locaux, bruit au poste de travail.
- ✓ ETUDE, MESURE ET CONTROLE DES BRUITS DE CHANTIER
- ✓ CAMPAGNES DE MESURES ACOUSTIQUES DANS L'ENVIRONNEMENT : infrastructures routières, ferroviaires, aériennes, industrielles, installations classées,...
- ✓ ETUDES D'IMPACT, REALISATION DE CARTOGRAPHIE DU BRUIT : infrastructures routières, ferroviaires, aériennes, industrielles, installations classées, salle de spectacles...

- ✓ RECHERCHES APPLIQUEES : développement des produits et logiciels, méthodes d'interventions, ...
- ✓ FORMATION DELIVREES :
  - Stage CIDB Acoustique du bâtiment
  - Stage CSTB Acoustique du bâtiment
  - CHEC (Centre des Hautes Etudes de la Construction)
  - ESIP (Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers)
  - ESGM (Ecole Supérieure du Génie Militaire d'Angers)
  - IFFI (Institut Français du Froid Industriel)

### **Ressources humaines :**

#### ➤ **Présents au siège social à Paris :**

**Philippe GUIGNOUARD** – Gérant

*Docteur en acoustique (Université du Maine)*

**David ADAM DE VILLIERS**

*Ingénieur en Bâtiment (Ecole Spéciale des Travaux Publics du Bâtiment et de l'Industrie de Paris)*

**Elise ARSLANAGIC**

*Architecte DPLG (Ecole d'Architecture Paris La Défense). Master en Acoustique Architecturale et Urbaine (Paris VI)*

**Sandrine LIAGRE BABY**

*Ingénieur en Acoustique (Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers)*

**Pierre OSSAKOWSKY**

*Ingénieur – Master Acoustique Architecturale et Urbaine (EAPLD / Université Paris VI – Pierre et Marie Curie)*

**David TROMEUR**

*Ingénieur en Acoustique (Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers)*

**Julien RICORDEAU**

*Technicien Supérieur (DEUST Vibration Acoustique et Signal de l'Université du Maine)*

**Cyrille AUBERT**

*Technicien Supérieur (IUT Saint-Denis – DEST Acoustique CNAM)*

**Guillaume DUVAL**

*Technicien Supérieur (DEUST Vibration Acoustique et signal de l'Université du Maine)*

**Xavier TIPA**

*Technicien Supérieur (AVTECH St Etienne)*

**Aline LIBERT**

*Assistante de Direction*

**Cécile GOUTALIER**

*Secrétaire de Direction*

**Kiem Y LAM**

*Chargé de Projet Informatique (Ecole Supérieure d'Informatique, Réseaux et Télécoms). Formation en alternance*

**Victor MAURICOURT**

*Technicien en Acoustique Architecturale (CFI Andrésy). Formation en alternance*

➤ **Présents à l'agence Sud Est à Lyon :**

**Samuel TOCHON – DANGUY** – Responsable Agence Sud - Est

*Ingénieur en Thermique et Acoustique (Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg)*

**Thomas BOUQUET**

*Technicien Supérieur (DU mesures en acoustique et vibration AVTECH St Etienne et DUT Mesures Physiques à Bordeaux)*

Le LASA prend également en permanence un à quatre stagiaires.

**Principales références du LASA:**

**- BATIMENT -**

***International projects :***

Offices Buildings, Dubai Tiara Twin Towers – DUBAI  
 Extension of the Abu Dabi International Airport – UNITED ARABIC EMIRATES  
 Kiptchak Monumental Mosque – TURKMENISTAN  
 Ashgabat Skating Rink "Ice Palace" –TURKMENISTAN  
 Budapest Arena – HUNGARY  
 The Musical Gardens, Ouagadougou – BURKINA FASO  
 Dubai College – DUBAI  
 Varadero Peninsula Hotel project « Playa Laguna – CUBA  
 Luxury Hotel in Marakech – MOROCCO  
 Cayo Ensenachos Hotel – CUBA  
 Home Office – LONDON  
 Kirshberg Parking – LUXEMBOURG  
 Hotel Sol Club Costa Verde – CUBA  
 Ibis Hotel Muranowska – POLAND  
 Singapore Channel – SINGAPORE  
 New Taaone Hospital, Pirae – TAHITI  
 Wola Shopping Center Varsovie - POLAND  
 Barnett General Hospital – LONDON

...

***Equipements culturels :***

Centre Culturel des Congrès : salle de 900 places + salle de 250 places – Montrouge (92)  
 Salle des Musiques Actuelles : salle de 1200 places + salle de 500 places + salle 400 places - Brest (29)  
 Maison des Musiques Amplifiées – Reims (51)  
 Théâtre classé : Réhabilitation d'un théâtre à l'Italienne de 500 places - Fontainebleau (77)  
 Salles Multifonctions : salle de 9000 places - Angers (49)  
 Pôle culturel – Villepinte (93)

...

Musée d'Art Contemporain : salles d'expositions, ateliers, auditoriums - Vitry sur Seine (94)  
 Conservatoire de Musique, de Danse et d'Art Dramatique – Clichy (92)  
 Ecole Nationale de Musique et de Danse - Chalon sur Saône (71)

...

Extension de France TV (immeuble France 5) – Paris (75)  
 Studio TV 2<sup>ème</sup> chaîne (C.N.A.C) – Paris (75)  
 Studio TV TF1 – Boulogne (92)  
 Nouveau Siège RFO – Malakoff (92)

...

***Equipement publics :***

Bibliothèque Universitaire de Médecine – Tours (37)  
 Bibliothèque – Bobigny (93)

...

Musée d'Art Contemporain du Val de Marne – Vitry sur Seine (94)

...

Collège Pablo Neruda – Gagny (93)

Université de Rennes - ECSEVE et bâtiment Pharmacie – Rennes (35)

Université Descartes - Boulogne-Billancourt (92)

...

Centre Hospitalier Sud Francilien - Corbeil à Essonnes (91)

Hôpital d'Urgences de Pontchaillou – Rennes (35)

Centre Hospitalier d'Antibes - Juan les Pins (06)

...

Centre Aquatique – Verdun (55)

Centre Nautique HQE - Marnes la Vallée (77)

Centre Aquatique - Saint Brévin les Pins (44)

...

***Tertiaire :***

Imprimerie Nationale - Paris 15<sup>ème</sup> (75)

Euro-Athènes - Paris 8<sup>ème</sup> (75)

Ilot Hachette - Paris 15<sup>ème</sup> (75)

Assemblée Nationale - Paris 7<sup>ème</sup> (75)

...

Technopole Bouygues Telecom – Meudon (92)

Tour PB6 - La Défense (92)

Euro Stade - Saint Denis (93)

Siège Banque Transatlantique - Paris 9<sup>ème</sup> (75)

Siège Nortel Matra cellular – Chateaufort (78)

Siège TF1 – Boulogne (92)

...

Extension Palace Hôtel Le MAJESTIC – Cannes (06)

Grand Hôtel Intercontinental - Paris 9<sup>ème</sup> (75)

Palace Fouquet's Barrière - Paris 8<sup>ème</sup> (75)

...

**- ENVIRONNEMENT -**

***Etude d'impact ZAC, Bruit trafic routier, ferroviaire, aérien :***

ZAC du Landy - bruits ferroviaires et routiers – Saint Denis (93)

ZAC Wissous – bruits ferroviaires et aéroports – Wissous (93)

...

Tronçon RN136 et RN186 - Port Marly (78)

Autoroute A1 – District de Senlis (60)

...

Ville de Saint Maur des Fosses – voies RER A et SNCF (94)

Foyer SNCF – Aulnoye (59)

...

Aéroport de Paris Roissy Charles de Gaulle – projet Piratox (95)

Assistance technique auprès du Groupement Français des Hélicoptères (92)

...

***Surveillance chantier :***

Chantier du Musée des arts Premiers Quai Branly – Paris 7<sup>ème</sup> (75)

Chantier de rénovation de l'Assemblée Nationale – Paris 7<sup>ème</sup> (75)

...

**- INDUSTRIES -**

AREVA T&D Centrale de transformation électrique Haute Tension – HVDC link Espagne

SYCTOM - Ivry sur Seine (94)

ANDRA – Site de stockage déchets radioactifs – Aube (10)

CLIMESPACE – Centrale des Halles – production chaud / froid / électricité (75)

Usine HUTCHINSON – Persan (95)

...

Centre de Design PSA – Velizy Villacoublay (78)

Usine VALEO – La Suze sur Sarthe (72)

Atelier Louis VUITTON – Saint Pourçan sur Sioule (03)

RENAULT – Usine – Sandouville (76)

...

Hub de tri La Poste Internationale – Roissy (95)

Atelier de trempe CDI – SAINT GOBAIN GLASS – Thourotte (60)

Centre de tri La Poste – Nanterre (92)

...

**- LABORATOIRES ET BANCS D'ESSAIS -**

Laboratoire d'essais acoustiques – LAFARGE PLATRES – Avignon (84)

Institut d'Acoustique et de mécanique de l'Université du Maine – salle d'expérimentation – chambre anéchoïque - ateliers – Le Mans (72)

SECA Aérospatiale – Construction d'un banc d'essais de moteurs turbo-réacteurs – Le Bourget (93)

Centre de Recherche GDF – Chambre anéchoïque du laboratoire acoustique – La-Plaine-Saint-Denis (93)

...

## Déroulement de l'étude :

Cette étude s'inscrit dans la suite logique du tour du monde des salles de spectacle, entrepris par Samuel TOCHON-DANGUY au LASA, en s'intéressant à la modélisation de la diffusion acoustique. Le but est de pouvoir appliquer les résultats de ce travail à la conception des salles de spectacle confiées au LASA.

Mon étude s'articule autour de 3 phases principales.

La recherche bibliographique, la mise au point et le perfectionnement de mes connaissances constituent l'essentielle de la première phase. De nombreux ouvrages et publications anglophones m'ont permis de parfaire ma compréhension des différents critères qui définissent la qualité d'une salle ou d'un environnement sonore. Je me suis intéressé aux paramètres et aux points critiques que tout acousticien doit étudier lorsqu'il conçoit une salle. J'ai pu extraire les données essentielles sur lesquelles un regard vigilant doit être porté. Ensuite, je me suis servi de ces connaissances pour comprendre les bases et les fondements de l'acoustique géométrique ainsi que les méthodes utilisées pour modéliser les ondes sonores. Enfin, mon attention a été portée sur le fonctionnement de la diffusion et tout particulièrement la manière de prendre en compte la composante diffuse du son réfléchi dans les logiciels de calculs.

Cette étude bibliographique a abouti à la rédaction de deux écrits. Le premier est un document de synthèse récapitulant les définitions des termes acoustiques, les définitions mathématiques des critères de salle ainsi que leurs influences sur les impressions subjectives. Ce document comprend aussi toutes les grandeurs critiques pour la conception des salles avec les valeurs optimales des critères, ... Cette synthèse est une sorte « d'aide-mémoire » pour la conception de salles de spectacles à destination des acousticiens du LASA. Ce document pourra également servir à simplifier certaines démarches notamment lors de l'emploi de définitions dans l'élaboration d'un programme, pour expliquer ou appuyer certaines notions lors de réunions avec un client,...

Le deuxième écrit, comme vous pourrez le voir, constitue la première partie de mon rapport décrivant la théorie de la diffusion et sa modélisation dans les logiciels de calcul.

Enfin, ces connaissances m'ont été nécessaires, tout au long de mon stage, pour étudier les limites de mon étude.

La deuxième partie de mon rapport est consacrée à l'étude du logiciel CATT Acoustic, des différents modes de calcul ainsi que la prise en compte de la diffusion.

Pour obtenir un point de comparaison, dans l'optique d'optimiser la procédure de modélisation de la diffusion dans le logiciel, des mesures ont été réalisées dans un local test modélisé au préalable. De ce fait, une partie est consacrée à l'étude du local, des limites de la mesure et du mode opératoire pour la réalisation de ces mesures.

Durant ce stage, j'ai eu la chance de pouvoir participer à la conception d'une salle de spectacle. Le respect du cahier des charges de ce projet a nécessité la conception d'une séquence diffusante, à mettre en œuvre à l'intérieure de la salle. Après avoir dimensionné ce diffuseur, un prototype à l'échelle 1 a été fabriqué et soumis à des tests. Les résultats de ces mesures ont permis d'étudier l'impact de la diffusion sur les critères de salle et de définir une procédure pour modéliser correctement la diffusion dans le logiciel CATT Acoustic.

**Note :** *Toutes les définitions des critères de salle sont fournies dans un document annexe. Ce document a été rédigé en conclusion de ma première partie : « Recherche bibliographique » visant à me familiariser avec la théorie de l'acoustique des salles, les termes principaux et les grandeurs fondamentales.*

*C'est pourquoi, certains critères utilisés dans ce présent rapport ne sont pas détaillés, libre donc au lecteur d'aller consulter le document en **Annexe 1**, si le besoin se fait sentir.*

*La partie concernant les valeurs optimales des différentes grandeurs caractérisant l'acoustique d'une salle n'est pas fournie dans ce rapport. En effet, ce document est à l'usage des acousticiens du LASA et ne présente pas d'intérêt dans cette étude.*

## 1 Théorie : La diffusion

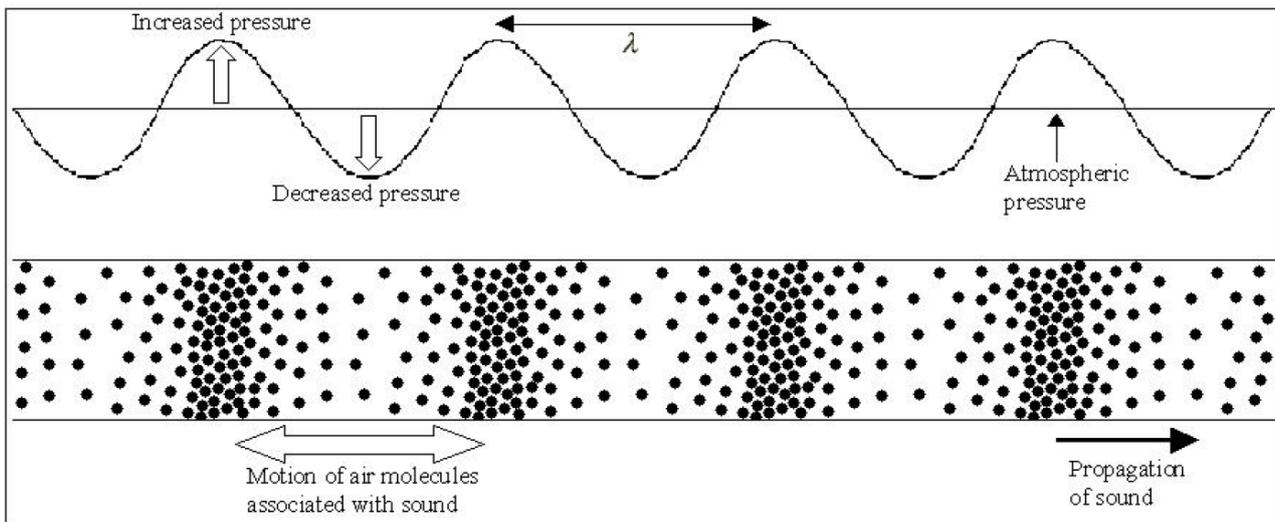
### 1.1 Préliminaires

#### 1.1.1 La propagation du son

Le son est une onde produite par la vibration mécanique d'un support fluide ou solide et propagée grâce à l'élasticité du milieu environnant sous forme d'ondes longitudinales.

Dans un milieu compressible, le plus souvent dans l'air, le son se propage sous forme d'une variation de pression créée par la source sonore. Notons que seule la compression se déplace et non les molécules d'air, si ce n'est de quelques micromètres.

La propagation du son est illustrée sur la *Figure 1*. Sur la partie supérieure du schéma, on peut voir l'évolution de la pression le long de l'onde longitudinale, par rapport à la pression atmosphérique alors que sur la partie inférieure, on peut observer le mouvement des molécules d'air associé à la propagation du son.



**Figure 1 :** Déplacement du son à travers l'air (onde longitudinale)

La vitesse de propagation du son (on parle également de la célérité) dépend de la nature, de la température et de la pression du milieu. Comme l'air est proche d'un gaz parfait, la pression a très peu d'influence sur la vitesse du son. Pour l'air, la célérité est donnée par la relation [1].

$$c = (331,4 + 0,6\theta) \quad [\text{m/s}] \quad [1]$$

Où  $\theta$  est la température en °C

Par exemple, à 22°C la célérité du son dans l'air est de 344 m/s.

La distance séparant deux points successifs égaux en phase est appelée la longueur d'onde,  $\lambda$  [m], voir *Figure 1*. Le temps écoulé à partir d'un point pour retourner à un point de même état vibratoire est la période,  $T$  [s]. De ce fait, la vitesse de propagation du son est donnée par la formule [2].

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad [2]$$

L'inverse de la période est appelé la fréquence,  $f$ . Elle indique le nombre de périodes présentes dans une unité de temps, en d'autres termes, c'est le nombre d'oscillations des particules d'air dans une seconde. En honneur à Heinrich Hertz, l'unité de la fréquence est le Hertz [Hz]. On peut ainsi écrire la relation de la formule [3].

$$c = \lambda \cdot f \quad [3]$$

Comme la vitesse du son est constante, les ondes longues ont un mouvement vibratoire lent (basses fréquences) et les ondes courtes ont un mouvement vibratoire rapide (hautes fréquences). La division en fréquences graves, moyennes et aiguës est assez arbitraire, surtout au niveau de leurs limites.

A titre d'information, la plage de fréquence audible par l'être humain s'étend de 20 à 20000 Hz, alors que la majeure partie de l'énergie de la voix se concentre dans une plage de fréquence allant de 500 à 2000 Hz.

Les bandes d'octaves sont utilisées en acoustique comme une fréquence individuelle. Lorsque deux sons ont des fréquences  $f_1$  et  $f_2$ , ils définissent une bande de fréquences, c'est-à-dire un intervalle de largeur  $\Delta = f_2 - f_1$ . Lorsque la relation  $\frac{f_2}{f_1} = 2$ , l'une des fréquences est le double de l'autre et l'intervalle entre les deux fréquences est appelé une octave. Les bandes d'octaves sont centrées sur les fréquences listées dans la première colonne du *Tableau 1*.

Fréquence médiane en [Hz] Bande d'octave	Fréquence médiane en [Hz] Bande 1/3 d'octave	Dénomination des domaines fréquentiels
125	100	Graves
	125	
	160	
250	200	
	250	
	315	
500	400	Médiums
	500	
	630	
1000	800	
	1000	
	1250	
2000	1600	Aigus
	2000	
	2500	
4000	3150	
	4000	
	5000	

**Tableau 1** : Fréquences centrales des bandes et tiers d'octaves et leurs dénominations associées

### 1.1.2 La réponse impulsionnelle (échogramme)

La réponse impulsionnelle est la réponse dans le domaine temporel du comportement d'un local fermé, à l'excitation produite par une impulsion parfaite infiniment courte (fonction de Dirac). Pour les salles, cela représente la distribution des réflexions dans le temps.

La propagation du son, d'une source vers un récepteur, est caractérisée par une réponse impulsionnelle. Les informations spatiales et temporelles sur les différents parcours possibles d'une onde entre ces deux points sont représentées dans ce signal.

Le premier pic correspond toujours au son direct puis figurent les premières réflexions. Le délai entre les pics correspond à la durée de chaque parcours et l'amplitude des pics (qui représente l'énergie si l'on ne tient pas compte de la phase) dépend de l'absorption de l'air et des matériaux. Il existe une réponse impulsionnelle différente pour chaque fréquence. Le tracé de cette réponse impulsionnelle en fonction du temps s'appelle un échogramme, voir *Figure 2* et *Figure 3*.

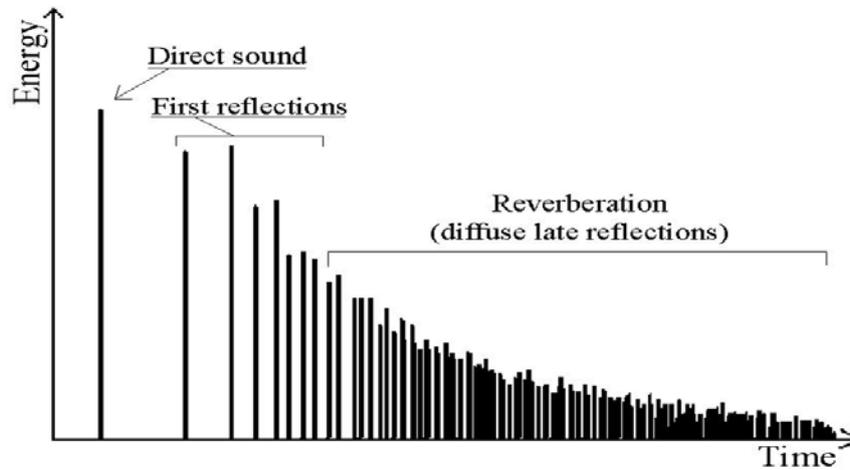


Figure 2 : Exemple d'une réponse impulsionnelle, on peut y voir le son direct et les multiples réflexions

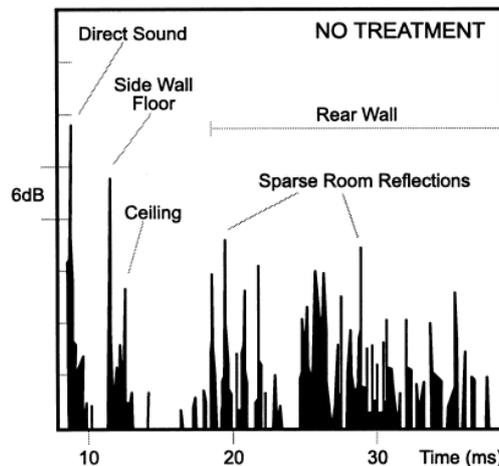


Figure 3 : Exemple d'un échogramme définissant les réflexions sur les différentes surfaces d'une salle

La séparation des réflexions précoces et tardives se fait à 50 ms pour la parole et 100 ms pour la musique. La mesure ou le calcul de la réponse impulsionnelle donne énormément d'informations sur les caractéristiques du local. Il est ainsi possible de calculer plusieurs paramètres acoustiques C, D, EDT,... Par exemple, le calcul des critères énergétiques, tels que la Clarté et la Définition, se base sur le ratio entre l'énergie des réflexions précoces et l'énergie des réflexions tardives de la réponse impulsionnelle. Cependant, tous ces critères ne sont qu'une interprétation de la réponse impulsionnelle et permettent de juger la qualité de différents lieux d'écoute.

Il peut parfois être utile de pouvoir écouter le comportement d'une salle avant sa construction. Pour cela, on utilise le procédé d'auralisation qui permet de recréer de manière virtuelle l'environnement sonore à l'intérieur de la salle. Pour ce faire, la réponse impulsionnelle temporelle complète de l'espace étudié est nécessaire.

### 1.1.3 Terminologie

L'**absorption** est le résultat de la perte d'une fraction de l'énergie sonore de l'onde incidente en contact avec une paroi ou un obstacle. Cette absorption peut être nulle (réflexion totale) partielle ou totale (ouverture sur un espace infini).

L'absorption est le résultat de plusieurs phénomènes pouvant se produire simultanément : la réfraction, la transmission et la dissipation.

La **diffusion** du son est le résultat de tous les changements de direction des ondes sonores provoqués simultanément par les phénomènes de réflexion, de réfraction et de diffraction.

La **réflexion** est le changement de direction de l'onde sonore arrivant sur une paroi sous incidence donnée et réfléchi suivant les lois de Descartes.

La **réfraction** est le changement de direction de l'onde sonore dû aux variations de la vitesse de propagation dans le milieu (fluide inhomogène).

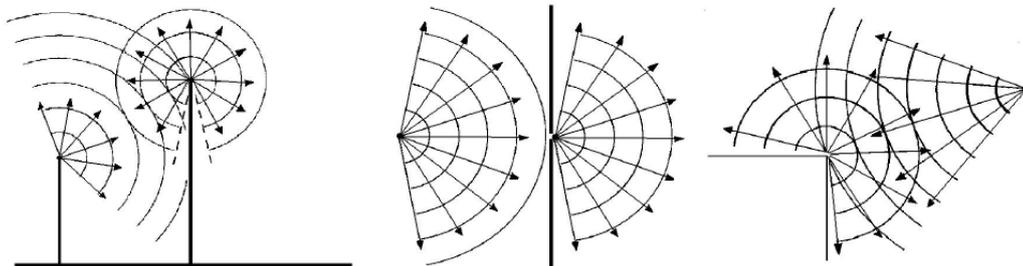
La **diffraction** est le changement local de direction dans la propagation d'une onde acoustique causé par le bord d'un obstacle. La diffraction dépend directement du ratio entre la longueur d'onde et les dimensions de l'obstacle.

A l'image de l'optique, lorsqu'une onde rencontre un obstacle, petit par rapport à la longueur d'onde. L'onde passe alors autour, presque comme si l'obstacle n'existait pas, formant alors une petite ombre. Mais si la fréquence de l'onde est suffisamment haute et que la longueur d'onde est suffisamment petite, une ombre importante est formée.

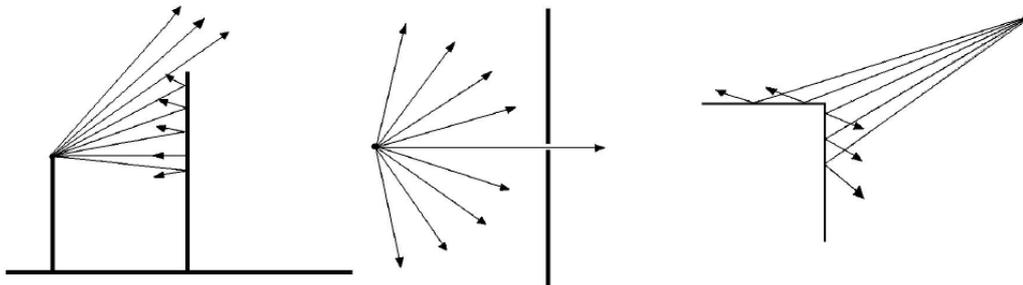
Les causes de la diffraction peuvent être classées en trois catégories, voir *Figure 4* :

- La diffraction liée à un écran,
- La diffraction liée au coin d'un obstacle
- La diffraction liée à une ouverture ou une fente

Cas des basses fréquences :



Cas des hautes fréquences :



**Figure 4** : Diffraction causée par un écran(a), une fente(b) et un coin(c).

- a. La conséquence de la diffraction par un écran est la présence du son derrière elle.
- b. La diffraction par une fente cause généralement la perte d'énergie.
- c. La diffraction par coin/angle entraîne de la diffusion ou de la dispersion du son.

La **réflexion diffuse** est le terme approprié pour décrire le phénomène de réflexions sur un diffuseur ou une paroi diffusante, c'est-à-dire une paroi qui possède une certaine rugosité.

## 1.2 Propriétés des réflexions

La plupart des lois utilisées en acoustique sont à l'origine issues de l'optique. De ce fait, on peut se poser la question de l'efficacité des modèles étant donné les différences de longueurs d'onde entre le son et la lumière. Pourtant, à l'heure actuelle il n'y a pas d'autres modèles qui fonctionnent aussi bien. De plus, de nombreuses autres approximations sont réalisées, par ailleurs, qui peuvent également être source de réflexion quant à la validité du modèle.

La réflexion d'une onde acoustique sur une paroi peut être de deux types selon les caractéristiques spatiales et temporelles de l'énergie réfléchie : les réflexions spéculaires et les réflexions diffuses.

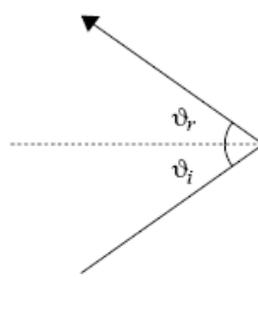
Ces deux catégories sont les réflexions spéculaires et les réflexions diffuses.

### 1.2.1 Les réflexions spéculaires

Si les dimensions de la surface sont grandes par rapport à la longueur d'onde, on dit qu'il y a réflexion spéculaire. La loi, empruntée de l'optique, qui décrit ce phénomène est la loi de Snell [4].

Cette loi traduit la relation entre l'angle de l'onde incidente  $\nu_i$  et l'angle de l'onde réfléchie  $\nu_r$  par rapport à la normale à la surface, voir *Figure 5*.

$$\sin(\nu_r) = \sin(\nu_i) \quad [4]$$



**Figure 5 :** Exemple d'une réflexion spéculaire sur une paroi

Les propriétés de cette loi sont :

➤ *Dans le domaine spatial :*

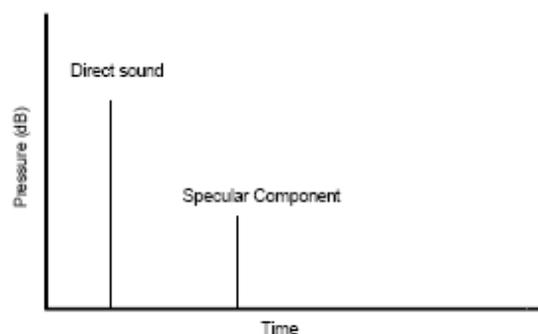
Pour un rayon réfléchi il y a une seule et unique source.

Le point de réflexion sur la surface dépend de la position de la source et du récepteur par rapport à la surface c'est-à-dire de la position et de l'angle d'inclinaison de la surface elle-même.

➤ *Dans le domaine temporel :*

Si la surface est un réflecteur parfait avec une impédance infinie (pas de perte d'énergie par absorption) alors l'onde réfléchie est l'exacte copie de l'onde incidente. Donc, la réponse impulsionnelle équivaut à un simple retard avec une atténuation de l'énergie déterminée par la distance de propagation de l'onde dans le milieu.

La conséquence sur l'échogramme est représentée sur la *Figure 6*.



**Figure 6 :** Réponse impulsionnelle montrant l'onde directe et l'onde réfléchie spéculairement

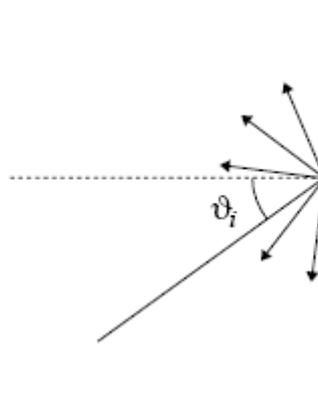
### 1.2.2 Les réflexions diffuses

Si la surface est irrégulière alors la loi de Snell, citée précédemment, ne peut pas être appliquée. Comme pour la lumière, lorsque la surface n'est pas lisse comme un miroir, elle disperse l'onde incidente dans de multiples directions.

Dans ce cas, c'est la loi de Lambert [5] qui décrit le mieux ce phénomène. Elle stipule que dans le cas d'un diffuseur, l'intensité de l'onde réfléchie est proportionnelle au cosinus de l'angle incident :

$$I_r = I_i \cos(\nu_i) \quad [5]$$

Où,  $I_r$  et  $I_i$  sont les intensités respectives des ondes réfléchies et incidentes.

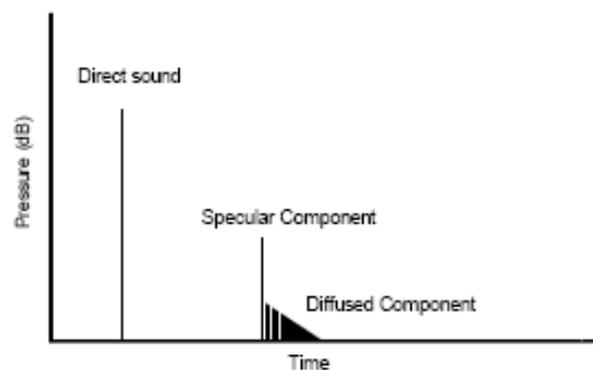


**Figure 7 :** Relation entre les multiples angles de l'onde réfléchie pour une unique onde incidente

Du point de vue du récepteur, la partie réfléchie est distribuée à la fois dans l'espace et dans le temps et varie suivant les fréquences. Dans le cas d'une réflexion parfaitement spéculaire les composantes fréquentielles de la résultante réfléchie forment une copie parfaite de l'onde incidente. Alors qu'un diffuseur modifie les caractéristiques fréquentielles en fonction des particularités géométriques et absorbantes de la surface. Au final, les réflexions sont plus largement distribuées à partir de la surface et le champ réverbéré se rapproche plus rapidement du champ théorique diffus parfait.

Dans le cas d'une réflexion spéculaire la plus grande partie de l'énergie est concentrée dans un laps de temps très court alors que dans le cas d'une réflexion diffuse la distribution s'effectue sur une période de temps plus longue.

La conséquence sur l'échogramme est la suivante :



**Figure 8 :** Réponse impulsionnelle du son direct, d'une réflexion spéculaire et d'une réflexion diffuse

### 1.2.3 La loi de Lambert

Détaillons quelque peu le fonctionnement d'une distribution du son suivant la loi de Lambert. Supposons un petit élément d'aire  $dS$  « frappé » par des rayons parallèles, ou quasiment parallèles, inclinés d'un angle  $\nu_0$  par rapport à la normale à  $dS$  et d'intensité  $I_0$ .

L'intensité du son qui est réfléchié dans une direction caractérisée par l'angle  $\nu$ , mesurée à une distance  $r$  de  $dS$ , est donnée par la relation [6].

$$I(r) = I_0 dS \frac{\cos \nu \cos \nu_0}{\pi r^2} = B_0 dS \frac{\cos \nu}{\pi r^2} \quad [6]$$

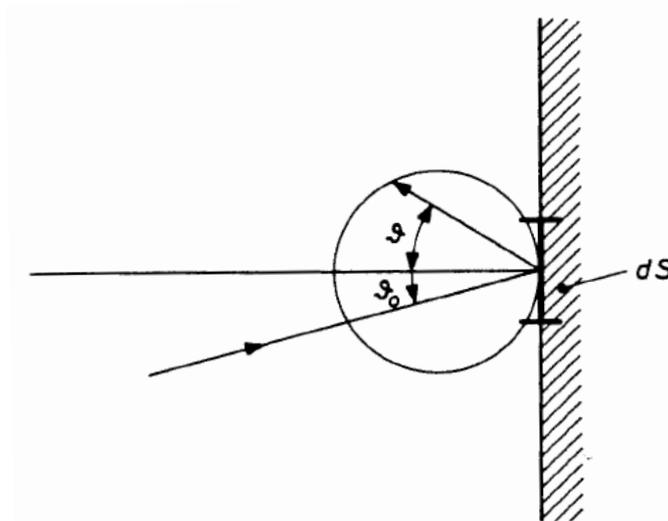
$B_0$  est le terme désignant l'énergie incidente sur une unité de surface du mur, par seconde.

Cette formule suppose qu'il n'y a pas d'absorption, c'est-à-dire que l'énergie est complètement réémise.

Si ce n'est pas le cas,  $I(r, \nu)$  doit être multiplié par un facteur approprié  $1 - \alpha(\nu)$ , où  $\alpha$  est le coefficient d'absorption.

La distribution de l'énergie du son diffusé peut être modélisée par un cercle comme sur la *Figure 9*.

La longueur de la flèche pointant vers l'extérieur du cercle est proportionnelle à  $\cos \nu$ .



**Figure 9 :** Modélisation de la distribution circulaire des réflexions diffuses sur une surface

Selon l'équation [6], chaque surface élémentaire peut être considérée comme une source secondaire. La distance  $r$ , qui détermine la perte d'énergie du son due à la propagation (absorption de l'air), doit être mesurée à partir de la surface  $dS$ .

### 1.2.4 Comportement de l'onde réfléchié

Afin de résumer et de bien comprendre le résultat des phénomènes liés aux réflexions d'une onde sonore, voici deux schémas explicatifs.

Sur la *Figure 10*, on peut observer l'impact de l'absorption, de la réflexion spéculaire et de la diffusion sur la réponse impulsionnelle. On remarque aisément que la distribution temporelle est plus étalée dans le cas d'une paroi diffusante avec des pics d'énergie plus faibles. De la même manière, on note l'impact sur la distribution spatiale en observant les graphiques polaires. La réflexion spéculaire réémet une énergie importante mais de manière quasi unidirectionnelle alors que la diffusion permet une distribution spatiale circulaire et donc homogène.

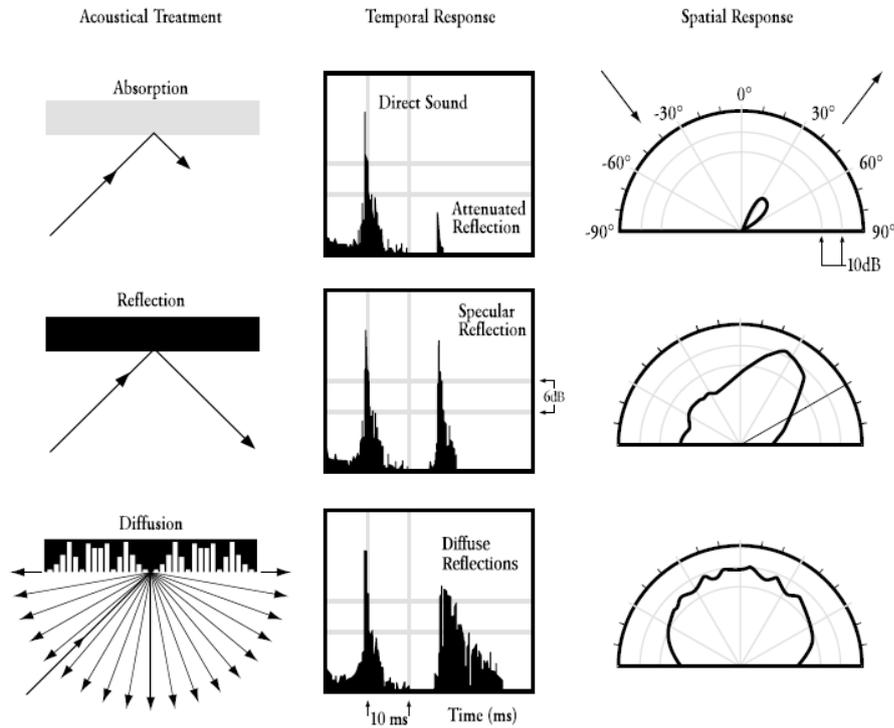


Figure 10 : Réponse spatiale et temporelle pour une surface absorbante, réfléchissante et diffusante

Sur la Figure 11, on constate que le comportement d'une onde sur une surface irrégulière est différent selon la longueur d'onde et donc la fréquence.

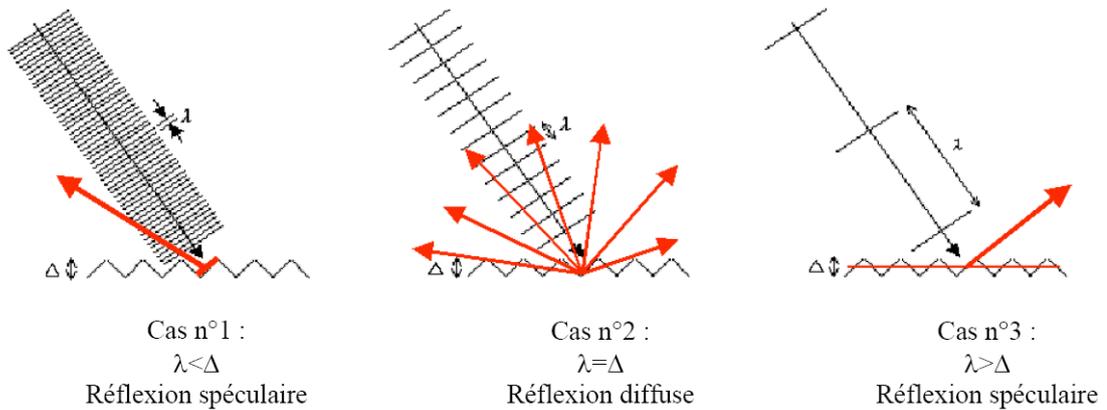


Figure 11 : Illustration du type de réflexion sur une surface irrégulière suivant la longueur d'onde

### 1.2.5 Perception de la diffusion

L'impact des réflexions diffuses dans un environnement acoustique s'observe de deux façons. La première, est l'aspect qualitatif du signal sonore reçu par le récepteur. La seconde, plus analytique, est l'aspect quantitatif du niveau de puissance à différentes positions de la salle, qui dépend des propriétés réfléchissantes des surfaces.

### ***i. Aspect qualitatif***

Les propriétés des réflexions ont une grande influence sur la perception du son émis et sur la qualité de l'environnement sonore. En 1974, une étude comparant un grand nombre de salles de concert européennes montra qu'une baisse de la cohérence binaurale (i.e la différence de perception entre les deux oreilles) liée à l'augmentation du nombre de réflexions diffuses donnait une meilleure appréciation de la salle et de la musique aux auditeurs.

Plus récemment, Hann et Fricke ont démontré qu'il y avait un haut degré de corrélation entre le SDI (Surface Diffusivity Index), une mesure de la rugosité des surfaces diffusantes basée sur une simple analyse visuelle (photos + plans), et l'AQI (Acoustic Quality Index) (indice compris entre 0 et 1 définissant la qualité d'une salle basée sur une étude de l'opinion de spécialistes (chefs d'orchestre, musiciens, « aficionados »,...)) dans un grand nombre de salles de concert reconnues.

*« Surface diffusivity appears to be largely responsible for the difference between halls which are rated as excellent as opposed to those rated as good or mediocre » - C.H. Hann et F.R. Fricke*

Beraneck soutient que cette déclaration est très arbitraire, mais il ne discute pas le fait que les qualités diffusantes ou réfléchissantes des surfaces sont parmi les plus importantes caractéristiques qui déterminent les qualités acoustiques d'une salle de concert.

*« Diffusivity is an architectural feature that must not be underestimated » - L. Beraneck*

Cette déclaration n'est pas pour le moins une idée nouvelle. Il est reconnu depuis au moins 100 ans que les irrégularités des surfaces ont un effet positif sur la qualité du son.

Il y a un certain nombre de caractéristiques physiques mesurables liées à l'augmentation de la diffusion dans un espace réverbérant qui peuvent être corrélées avec les préférences des auditeurs.

M. Schroeder remarqua que l'augmentation du nombre de surfaces diffusantes entraînait la diminution de l'IACC (InterAural Cross Correlation).

Depuis, des acousticiens ont trouvé des relations entre l'augmentation de l'impression de spatialité (et donc une meilleure appréciation du lieu) et la baisse de l'IACC. Ce résultat est lié à l'augmentation des réflexions et donc à la densification de la réponse impulsionnelle.

De plus, la diffusion permet d'éviter la présence de certains états stationnaires à basses fréquences, suivant les longueurs d'onde traitées par le diffuseur. En d'autres termes, la diffusion permet d'éviter certaines résonances de la salle, en évitant les superpositions entre le son direct et les premières réflexions.

La diffusion permet également de maintenir une énergie acoustique dans le local sur une période plus longue de la réponse impulsionnelle sans causer des interférences gênantes générées par les réflexions spéculaires (échos, flutter,...).

### ***ii. Aspect quantitatif***

B-I. Dalenbäck a réalisé une étude illustrant les effets spécifiques de la diffusion et des réflexions spéculaires sur l'énergie reçue à différentes positions d'un local.

Deux modèles ont été étudiés, le premier est un local parfaitement réfléchissant et l'autre avec des diffuseurs.

Dans le cas du local parfaitement réfléchissant, la plus grande partie de l'audience reçoit un haut niveau d'énergie réfléchi. Cependant, il en résulte un manque de réflexions précoces au niveau du récepteur.

Dans le cas du local diffusant, le plus haut niveau d'énergie reçu est inférieur à celui du local réfléchissant, mais chaque récepteur placé dans le local reçoit une quantité d'énergie similaire. En effet, la réponse impulsionnelle est plus dense et le récepteur « perçoit » plus de réflexions. On pourrait comparer ce phénomène à celui de la salle totalement réfléchissante mais après un nombre important de réflexions (ordre de réflexion très élevé).

### 1.3 Mesure de la diffusion

#### 1.3.1 Terminologie

Le besoin de pouvoir mesurer la diffusion s'est fait ressentir pour les fabricants de diffuseurs afin de garantir la qualité et l'utilité de leurs produits mais aussi pour les acousticiens dans le but de pouvoir affiner les modélisations et notamment lors de l'utilisation de logiciels de prédiction.

Mais, un seul coefficient par tiers d'octave n'est pas suffisant pour décrire le phénomène de diffusion. C'est pourquoi, à l'heure actuelle, il existe deux coefficients faisant l'objet de normes internationales.

*i. « Diffusion coefficient » - Coefficient de diffusion :*

Il mesure l'uniformité du son subissant une dispersion à la réflexion (distribution spatiale de l'énergie acoustique diffuse réfléchi), c'est-à-dire l'uniformité du champ sonore diffusé.

L'objectif de ce coefficient est d'autoriser la comparaison entre des diffuseurs de conceptions différentes.

La méthode de mesure est définie par la norme AES-4id-2001, JAES 49(3), 149-165, 2001 et est basée sur des techniques développées par T. J. Cox et P. D'Antonio.

*ii. « Scattering coefficient » - Coefficient de dispersion :*

Le coefficient de dispersion est la proportion d'énergie non réfléchi de manière spéculaire.

Il mesure l'énergie totale du son réfléchi de manière diffuse sous une incidence aléatoire (mesure en chambre réverbérante) par rapport à l'énergie réfléchi spéculairement. L'objectif de ce coefficient est d'améliorer la prise en compte de la composante diffuse de la réflexion dans les logiciels de modélisations et de prédictions acoustiques.

La méthode de mesure est définie par la norme ISO/CD 17497 :2000 et est basée sur des techniques développées par M. Vorländer et E. Mommertz.

#### 1.3.2 Mesure du « Diffusion coefficient » - coefficient de diffusion (d)

La procédure, voir *Figure 12*, consiste à mesurer, en chambre anéchoïque (totalement absorbante), la pression sonore du son diffusé en fonction de l'angle. La mesure est réalisée grâce au système MLS (Maximum Length Sequence).



**Figure 12 :** Vue du mode opératoire utilisé pour mesurer le coefficient de diffusion

Pour une position fixe de la source, le coefficient d'autocorrélation de la diffusion,  $d_{\psi}$  se calcule par la formule [7]

$$d_{\psi} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10}\right)^2 - \sum_{i=1}^n \left(10^{L_i/10}\right)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \left(10^{L_i/10}\right)^2}$$

[7]

Où,

$L_i$  est le niveau de pression sonore [dB]

$\psi$  est l'angle d'incidence

n est le nombre de récepteurs

**Note :** L'autocorrélation est la corrélation croisée d'un signal par lui-même. L'autocorrélation permet de détecter les régularités des profils répétés dans un signal.

Sur la *Figure 13*, est détaillé le mode opératoire pour obtenir la courbe du « diffusion coefficient » en fonction de la fréquence.

37 microphones d'une résolution angulaire de 5° sont placés sur les 180 ° et enregistrent 37 stimuli MLS afin d'obtenir la *Courbe A*.

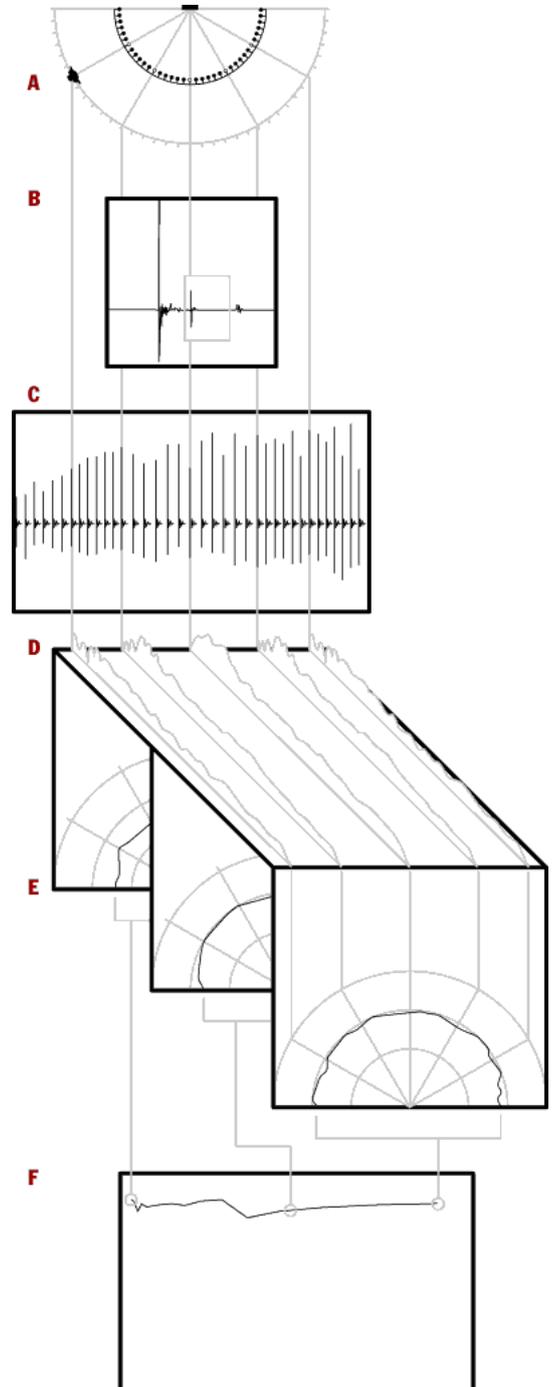
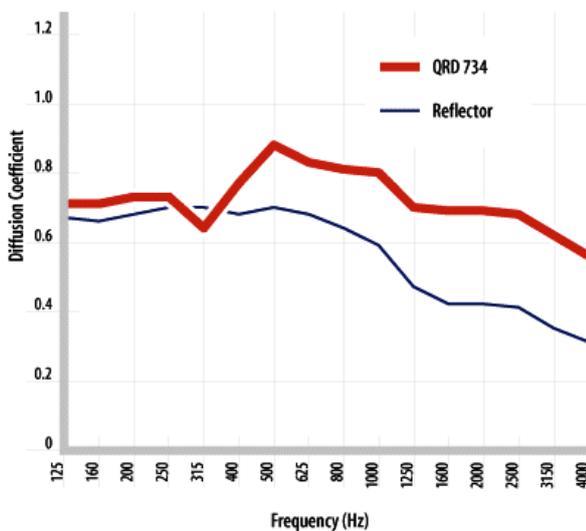
Le champ direct et les diverses interférences présentes sur la *Courbe B* sont retirés afin d'obtenir le graphique de la figure C qui présente les résultats pour chaque angle et ce dans le domaine temporel.

Chaque réponse impulsionnelle est transformée en sa réponse fréquentielle (*Courbe D*).

Les réponses sous forme de graphique polaire par tiers d'octaves sont obtenues (*Courbe E*).

L'autocorrélation de ces réponses polaires se définit comme un coefficient de diffusion métrique et est tracé en fonction de la fréquence pour obtenir la courbe de diffusion (*Courbe F*).

Un exemple de la courbe « commercialisée » est fourni ci-dessous.

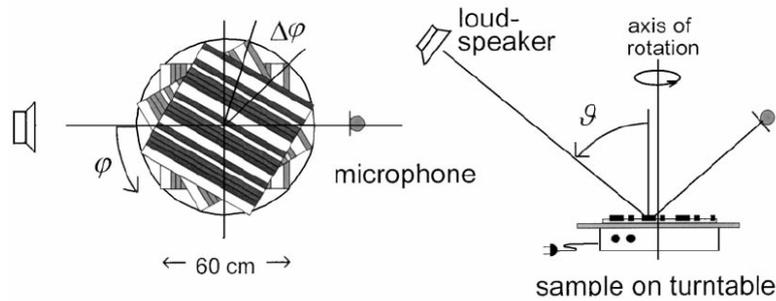


**Figure 13 :** Mode opératoire pour l'obtention de la courbe « commercialisée »

On comprend donc bien que ce coefficient représente uniquement l'homogénéité de la diffusion dans les différentes directions pour les différentes fréquences.

### 1.3.3 Mesure du « Scattering coefficient » - coefficient de dispersion (s)

L'échantillon test est monté sur une table tournante, voir *Figure 14*, et placé dans une chambre réverbérante. La réponse impulsionnelle de la chambre est mesurée pour une position fixe d'un haut parleur et d'un microphone.



**Figure 14** : Schéma de principe du mode opératoire

L'échantillon possède un coefficient d'absorption spéculaire  $\alpha_{\text{spec}}$  qui peut être déterminé grâce à la mesure du temps de réverbération.

Le coefficient d'absorption sous incidence aléatoire  $\alpha_s$  est calculé en utilisant la formule [8].

$$\alpha_s = 55,3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1) \quad [8]$$

Le coefficient d'absorption spéculaire  $\alpha_{\text{spec}}$  est obtenu en utilisant la formule [9].

$$\alpha_{\text{spec}} = 55,3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_4 T_4} - \frac{1}{c_3 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3) \quad [9]$$

Où,

V est le volume de la chambre réverbérante [ $\text{m}^3$ ]

S est l'aire de l'échantillon [ $\text{m}^2$ ]

$c_1, c_2, c_3, c_4$  est la célérité du son dans l'air [ $\text{m/s}$ ] durant les mesures respectives de  $T_1, T_2, T_3$  et  $T_4$

$m_1, m_2, m_3, m_4$  est le coefficient d'absorption énergétique de l'air [ $\text{m}^{-1}$ ] durant les mesures respectives de  $T_1, T_2, T_3$  et  $T_4$

$T_1, T_2, T_3, T_4$  les temps de réverbération [ $\text{s}$ ] mesurés en respectant la configuration suivante :

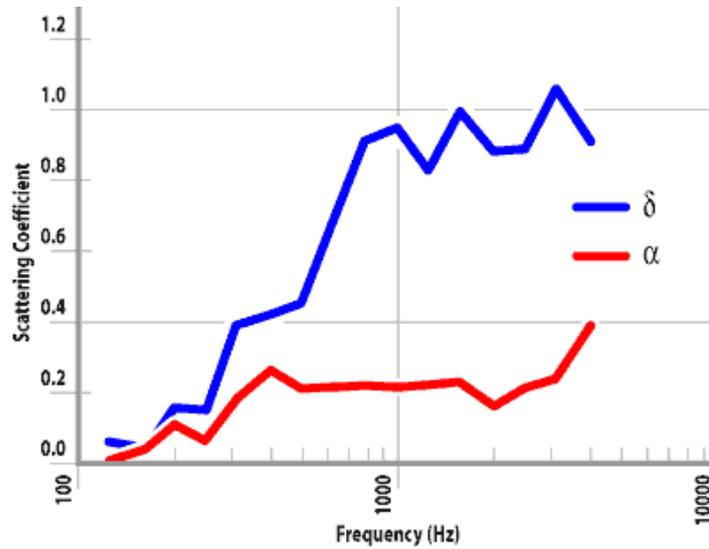
Temps de Réverbération	Echantillon Test	Table Tournante
$T_1$	non présent	Fixe
$T_2$	présent	Fixe
$T_3$	non présent	en rotation
$T_4$	présent	en rotation

Le coefficient de dispersion (« scattering coefficient »),  $s$  est calculé grâce à la formule [10].

$$s = 1 - \frac{1 - \alpha_{\text{spec}}}{1 - \alpha_s} = \frac{\alpha_{\text{spec}} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} \quad [10]$$

Ce coefficient distingue donc la part de l'énergie réfléchi de manière diffuse par rapport à celle réfléchi de manière spéculaire.

Un exemple de courbe obtenue pour un diffuseur de type QRD de la marque RPG (modèle QRD 734) est fourni en *Figure 15*.



**Figure 15** : Exemple d'une courbe du « scattering coefficient » pour un diffuseur de type QRD

#### 1.3.4 Relation entre coefficient de diffusion et coefficient de dispersion

Le coefficient de dispersion  $s$  et le coefficient de diffusion  $d$  n'ont pas de lien direct.

Par contre, une valeur élevée de  $d$  implique que  $s$  soit également élevé alors qu'une valeur élevée de  $s$  peut engendrée n'importe quelle valeur de  $d$ .

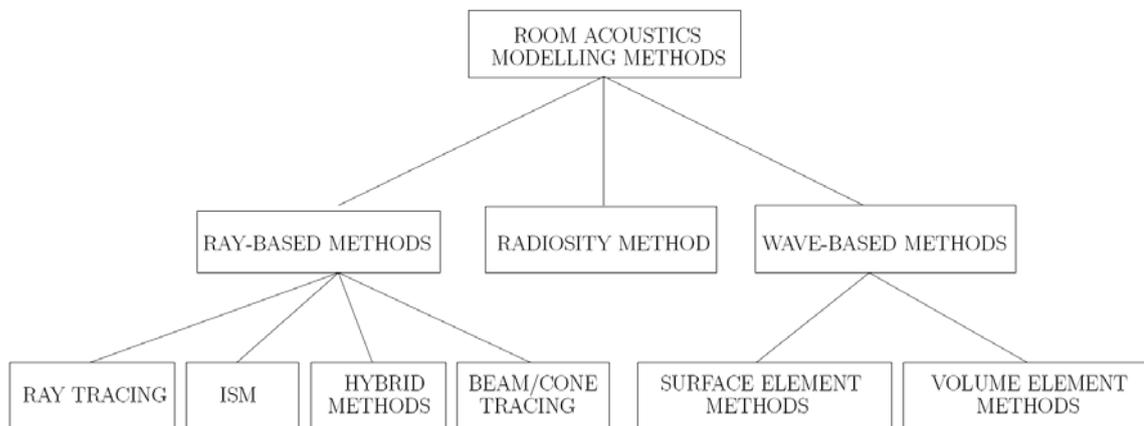
## 1.4 Les différentes méthodes de modélisation en acoustique

Le principe de base lorsque l'on veut étudier le comportement d'une salle est de s'intéresser à sa réponse impulsionnelle. Plusieurs méthodes différentes ont été développées pour prédire la réponse impulsionnelle.

Ces méthodes peuvent être divisées en trois groupes, voir *Figure 16* :

1. Méthode basée sur le concept du rayon sonore.
2. La méthode dite « radiosity method » basée sur les éléments finis.
3. Méthodes basées sur les équations de propagation des ondes.

Dans la suite nous ne détaillerons que les méthodes utilisant les rayons (méthodes dites géométriques) car ce sont celles utilisées dans les logiciels de prédiction en acoustique des salles.



**Figure 16** : Organigramme montrant les différentes méthodes de modélisation acoustique

La modélisation de l'acoustique d'une salle peut être réalisée dans différents buts. Par exemple, lorsque l'on modélise un espace comme une salle de concert, la modélisation permet de connaître à l'avance certains paramètres de la salle. Grâce à la réponse impulsionnelle, on peut définir les caractéristiques de la salle comme le Temps de Réverbération (TR), Early Decay Time (EDT), la Clarté (C), la Définition (D), la Force Sonore (G), la Fraction d'Energie Latérale (LF) et l'InterAural Cross Correlation (IACC). Ces paramètres caractérisent l'acoustique de l'espace modélisé.

Parfois, il peut être utile de pouvoir entendre à l'avance comment réagira la salle à un son émis à l'intérieur. Pour cela, la réponse impulsionnelle doit être traitée par un procédé d'auralisation qui permet de se mettre à la place d'un auditeur avant même que la salle soit construite.

Le choix de la méthode adéquate pour prédire la réponse impulsionnelle n'est pas une chose simple. De nombreux paramètres doivent être pris en compte.

Avant tout, le but de la modélisation doit être bien défini, quelle précision désirons-nous avoir ? De combien de temps disposons-nous ?

Quels paramètres désirons-nous connaître ? Quelles sont les particularités de la salle ?

L'avantage de la modélisation est que la première et la seconde partie de la réponse impulsionnelle peuvent être calculées séparément avec des méthodes différentes. La deuxième partie étant généralement plus difficile à modéliser mais moins importante d'un point de vue perceptuel.

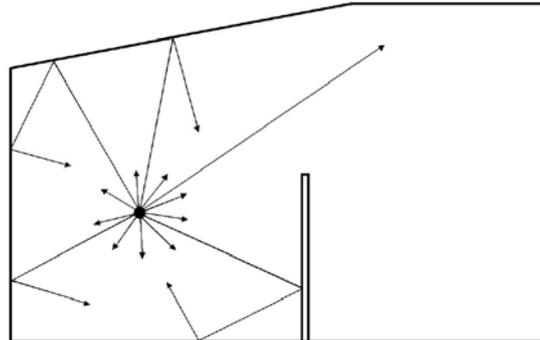
La perception des qualités du son se fait surtout au niveau du son direct et des premières réflexions. Il est donc difficile d'appliquer la même méthode pour les deux cas sur le spectre entier des fréquences.

### 1.4.1 Méthodes basées sur les rayons

Cette méthode est basée sur le fait que l'onde est remplacée par un faisceau de rayons. Les ondes sonores sont considérées comme des rayons analogues à des rayons lumineux. Ces rayons, perpendiculaires au front d'onde, sont porteurs de l'énergie acoustique et d'une indication en fréquence.

**a. Méthode dite « Ray-tracing » ou tracé de rayons**

Cette méthode très simple est représentée en 2D sur la *Figure 17*, suivante :



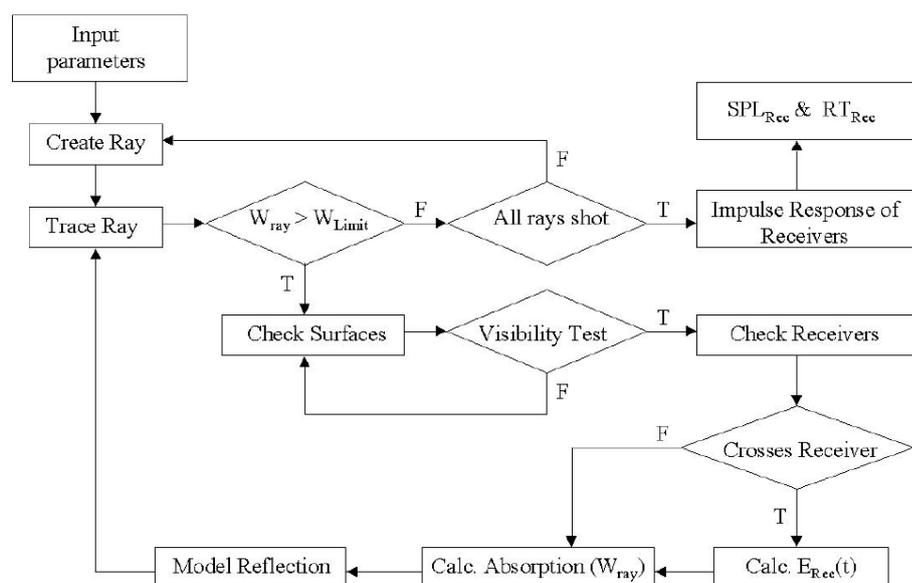
**Figure 17 :** Représentation en 2-dimensions du tracé de rayons sonores

La puissance sonore émise par une source est représentée par un nombre fini de rayons porteurs d'énergie. Ces rayons parcourent l'espace à la vitesse du son et sont réfléchis à chaque collision avec un obstacle. Durant ce temps, leur énergie décroît à cause de l'absorption de l'air (surtout en hautes fréquences) et des parois. Quand le rayon entre en contact avec le volume prédéfini (sphère, cube) comme étant le récepteur, le calcul de l'énergie est lancé et les données sont stockées. A la fin, la réponse impulsionnelle est construite pour chaque récepteur et les paramètres acoustiques sont calculés.

Il est ainsi possible d'étudier comment et où une surface donnée a été « frappée » par des rayons. On peut donc repérer les surfaces qui ont une grande importance dans l'acoustique de la salle. L'énergie reçue par le récepteur dépend de la longueur du trajet parcouru et cette énergie est enregistrée dans le domaine temporel, avec le délai correspondant. Les réflexions peuvent être spéculaires, selon la loi de Snell, ou diffuses en suivant une autre direction que la réflexion spéculaire. L'opération est répétée jusqu'à ce que l'énergie de chaque rayon soit inférieure à une certaine valeur, à définir par l'utilisateur. Le procédé est répété pour chaque bande de fréquence car la valeur de l'absorption varie suivant la fréquence.

Ce procédé est précis pour déterminer les niveaux de bruits bien que la précision soit aléatoire pour les basses fréquences. En effet, la nature ondulatoire de l'onde n'est pas prise en compte et certains effets (diffraction, interférences) sont négligés.

L'algorithme de calcul utilisé par les logiciels est présenté en *Figure 18*.



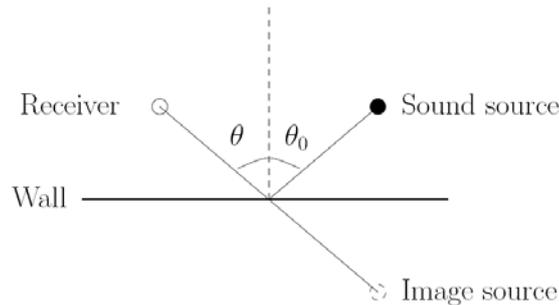
**Figure 18 :** Algorithme de calcul de la méthode du tir de rayons (« Ray tracing »)

**b. Méthode dite « Image source » ou source-image**

Pour modéliser une réponse impulsionnelle idéale, tous les trajets que peut emprunter un rayon, après réflexions, doivent être pris en compte. Cette méthode possède un degré élevé de précision en termes de niveau de puissance, de temps de parcours et de direction. Elle permet ainsi d’être précis au niveau des premières réflexions, élément primordial pour la perception subjective de l’auditeur.

Le problème de cette méthode est qu’elle requiert de longs temps de calcul pour les degrés de réflexion élevés, surtout pour les salles possédant des formes particulières.

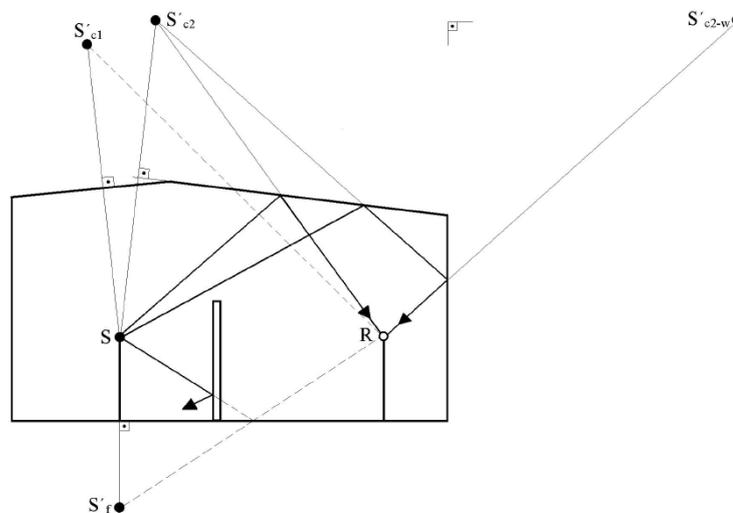
Dans cette méthode, le chemin du rayon réfléchi provenant de la source réelle est remplacé par un chemin direct provenant d’une source fictive qui est le symétrique de la source réelle par rapport à la paroi, voir *Figure 19*.



**Figure 19 :** Schéma de principe de la méthode source-image

Il faut aussi vérifier que le chemin emprunté existe vraiment. Un test de visibilité est donc pratiqué. La première partie vérifie si le point d’intersection entre le chemin virtuel et la surface est à l’intérieur ou non de la surface. Par exemple, sur la *Figure 20*, on peut voir que la source virtuelle  $S'_{c1}$  ne peut pas « voir » directement le récepteur contrairement à  $S'_{c2}$ . La deuxième partie étudie l’existence d’un obstacle pouvant bloquer le chemin. Une reconstruction du parcours en commençant par le récepteur pour remonter jusqu’à la source par toutes les parois pouvant contribuer aux réflexions est effectuée. De cette manière, il est possible de voir que la source virtuelle ne peut pas contribuer à l’élaboration de la réponse impulsionnelle. Les multiples réflexions sont obtenues en réalisant le même principe mais en utilisant l’image de la précédente source image comme avec la source  $S'_{c2-w}$ .

De la même manière, il existe la méthode « particle-tracing » qui est une version simplifiée de la méthode précédente mais utilisant des particules au lieu de rayons.

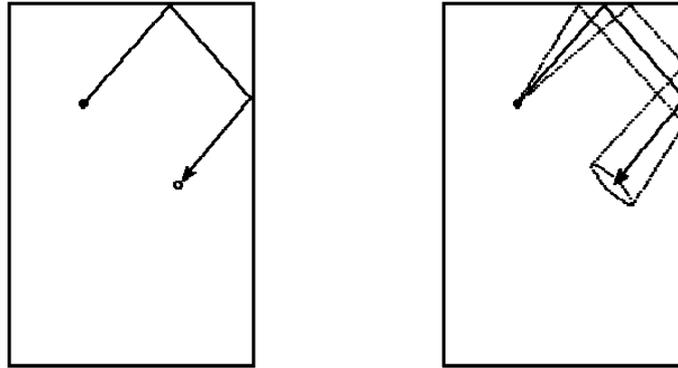


**Figure 20 :** Schéma de principe du test de visibilité d'une source-image

**c. Méthode dite « Cones or pyramids tracing » ou tracé de cônes**

Cette méthode est une évolution de la méthode du tracé de rayons. Elle a été développée pour simplifier la méthode du tracé de rayon pour les ordres de réflexions élevés. Dans cette méthode, au lieu d'utiliser des rayons discrets émanant d'une source à des angles spécifiques, une série de cônes se chevauchants sont modélisés avec une puissance qui dépend de la relation entre l'angle d'ouverture du cône et de la localisation du récepteur

L'axe central des cônes est défini par la méthode du tracé de rayon (« ray-tracing method »), voir *Figure 21*.



**Figure 21 :** Différence entre le tracé de rayons (figure de gauche) et le tracé de cônes (figure de droite)

**d. Méthode dite « Hybrid » ou hybride**

Il est possible de combiner les caractéristiques propres aux différentes méthodes. Par exemple, la méthode des sources images peut être utilisée pour calculer avec précision la première partie (premières réflexions) de la réponse impulsionnelle et le tracé de rayons peut être utilisé pour la seconde partie. Ou encore, la combinaison d'une méthode plus rigoureuse pour les basses fréquences basée sur les équations d'ondes avec la méthode du tracé de rayons pour les hautes fréquences.

**1.4.2 Prise en compte de la diffusion**

Il est admis que la prise en compte de la diffusion permet d'améliorer la prédiction des paramètres acoustiques. Les différentes études menées par Kuttruff, Hodgson, Lam et d'autres ont montrés que les calculs uniquement basés sur les réflexions spéculaires surestiment les valeurs du temps de réverbération.

La diffusion est souvent modélisée de manière rudimentaire. La difficulté principale est de connaître les propriétés des angles de diffusion des surfaces (le schéma de directivité de la dispersion du son).

La quantification de ce phénomène nécessite de réaliser des mesures précises en laboratoire et le fait que chaque fréquence possède un comportement diffusant différent pour chaque angle d'incidence, rend la quantité de données difficile à traiter. Par conséquent, il est accepté de modéliser la diffusion par des méthodes simplifiées.

Une première approximation dans le modèle « ray-tracing » est de supposer quatre types de combinaison, comme indiqué sur la *Figure 22*.

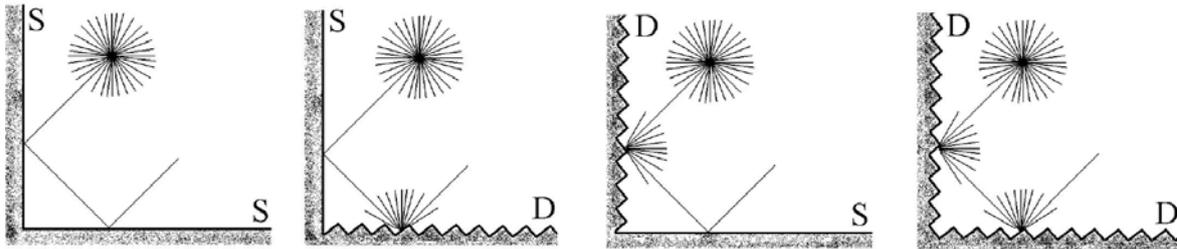


Figure 22 : Schéma de principe des 4 combinaisons possibles au niveau des réflexions

S : surface lisse

D : surface diffusante

a) Réflexion spéculaire – Réflexion spéculaire

b) Réflexion spéculaire – Réflexion diffuse

c) Réflexion diffuse – Réflexion spéculaire

d) Réflexion diffuse – Réflexion diffuse

L'utilisation d'un coefficient de dispersion est la méthode la plus utilisée pour pondérer la relation entre les réflexions spéculaires et diffuses dans l'acoustique géométrique.

Ce coefficient de dispersion,  $\delta$ , est défini par la formule [11] comme étant le ratio entre la puissance sonore dans les directions non spéculaires et la puissance sonore totale.

$$\delta = \frac{W_{ref.Non-specular}}{W_{ref.Non-specular} + W_{ref.specular}} \quad [11]$$

Par conséquent, pour chaque surface et pour chaque octave deux facteurs différents sont attribués, un coefficient d'absorption,  $\alpha$ , et un coefficient de dispersion,  $\delta$ . La relation entre ces paramètres est illustrée graphiquement Figure 23 et est décrite par l'équation [12] dont les termes traduisent la part du son absorbée, réfléchi spéculairement et dispersée :

$$\alpha + \delta(1 - \alpha) + (1 - \delta)(1 - \alpha) = 1 \quad [12]$$

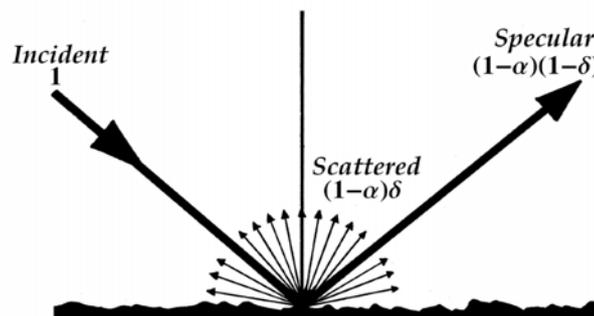


Figure 23 : Schéma de répartition des rayons réfléchis

Le choix de  $\delta$  se fait selon les caractéristiques géométriques de chaque surface.

Lorsqu'un rayon rencontre une surface diffusante, un nombre aléatoire compris entre 0 et 1 inclus est généré. Si ce nombre est plus petit que  $\delta$  la direction du rayon est choisie aléatoirement pour simuler la réflexion diffuse, sinon la réflexion est spéculaire. En principe, la nature aléatoire de l'algorithme a besoin d'un calcul pour chaque bande de fréquence car le coefficient de diffusion est dépendant de la fréquence.

Cependant, certains chercheurs pensent qu'un seul coefficient constant pour toutes les fréquences est suffisant pour caractériser la diffusion si l'on prend en compte, simultanément, l'effet de bord et la rugosité des surfaces, comme le montre le graphique de la Figure 24.

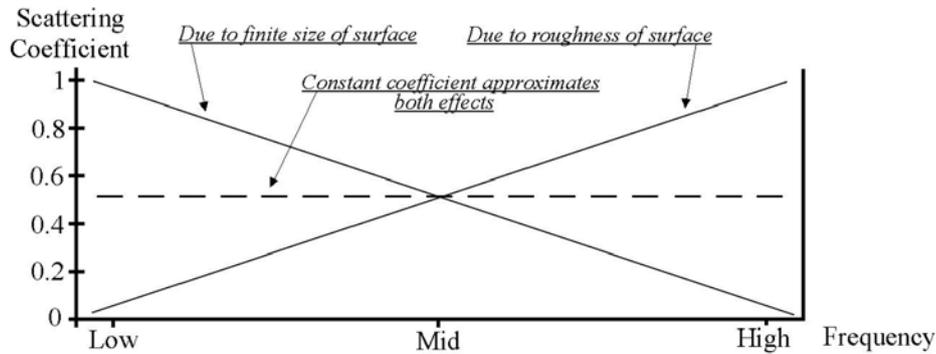


Figure 24 : Evolution du coefficient de diffusion suivant les fréquences

A la vue de ce graphique, on peut en conclure que si l'on ne se sait pas exactement quel coefficient employer pour chaque fréquence ou si l'on manque de temps pour la modélisation, il est tout à fait possible d'approximer la diffusion à un seul coefficient (exemple 20 ou 30% pour chaque fréquence).

Un autre problème du coefficient de dispersion  $\delta$  est qu'il ne dépend pas seulement de la fréquence mais aussi de l'angle d'incidence de l'onde.

Une approche différente a été formulée par B-I Dalenbäck. Cet algorithme, voir Figure 25, est basé sur l'approximation du tracé de cônes (« approximation cone tracing »), où la contribution des réflexions purement spéculaires est traitée dans un premier calcul. Lorsqu'un rayon « frappe » une surface, un carré formant une surface élémentaire est créé. Lors de ce premier calcul, l'énergie dispersée par réflexion diffuse est stockée au niveau des surfaces élémentaires découpées dans la paroi et l'énergie réfléchie de manière spéculaire continue sa propagation. Durant le second et les suivants calculs, les surfaces élémentaires jouent le rôle de sources élémentaires qui émettent le son diffusé. L'énergie diffusée est de nouveau séparée (en réflexion diffuse et spéculaire) et stockée dans une nouvelle surface élémentaire.

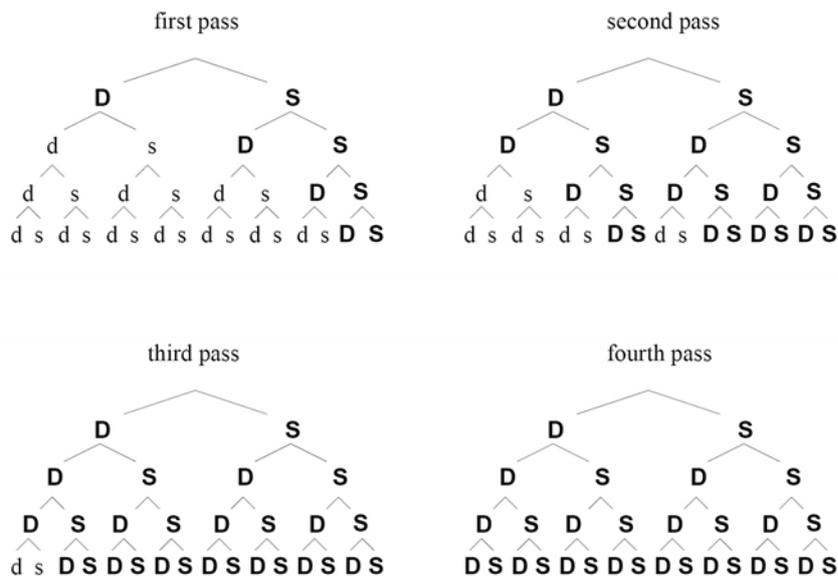


Figure 25 : Traitement des réflexions en plusieurs calculs

Le schéma est en principe récurrent, mais en utilisant un nombre fini de surfaces élémentaires et en utilisant les propriétés diffusantes des surfaces, la récurrence est abolie. Une liste de données est assignée à chaque surface. Lorsqu'un premier rayon rencontre une surface élémentaire, sur la liste s'inscrivent le temps d'arrivée et la fraction d'énergie diffuse  $\delta(1-\alpha)$ . Ainsi, lorsque le rayon rencontre le récepteur la liste entière des réflexions, associées aux surfaces élémentaires, est ajoutée à l'échogramme.

La densité des surfaces élémentaires dépend du facteur  $\delta(1-\alpha)$ , plus la surface est diffusante et moins elle est absorbante, plus la densité sera élevée.

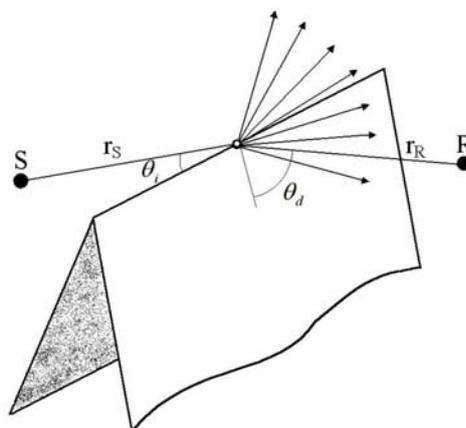
Cependant, la mise en équation de l'algorithme de séparation de ces rayons va engendrer une augmentation exponentielle du temps de calcul. Les détails du son deviennent moins audibles avec le temps. Donc, il n'est pas nécessaire d'étendre les calculs pour prendre en compte la fin de la réponse impulsionnelle. Le principe est de conserver la création de sources secondaires à chaque point d'impact, mais en regroupant toute l'énergie dans un seul rayon émis dans une seule direction. La direction du rayon réfléchi est définie en choisissant un nombre de manière aléatoire et en le comparant au coefficient  $\delta$  pour déterminer si la réflexion sera diffuse ou spéculaire. De cette façon, une densité importante de réflexions est perçue par le récepteur sans avoir besoin de tracer beaucoup de rayons. Les rayons perdent de l'énergie uniquement par l'absorption de l'air et des matériaux et leur direction de réflexion est aléatoire pour les parois diffusantes.

### 1.4.3 Prise en compte de la diffraction et de la réfraction

Lors d'une modélisation, les critères de l'environnement acoustique sont définis pour le local étudié (température, humidité,...) et sont identiques pour chaque position dans le local. Cependant, dans la réalité, il existe une multitude de gradients thermiques liés à la présence de sources de chaleur, de flux d'air,... L'hypothèse par laquelle l'onde sonore est simplifiée par un rayon rectiligne, ne prend pas en compte les déviations et les courbes que peut subir le son dans un milieu hétérogène.

La plupart des algorithmes utilisés dans la prédiction des critères acoustiques se basent sur l'acoustique géométrique et négligent ainsi les phénomènes de diffraction. Ce problème vient du fait que les lois de l'acoustique proviennent à l'origine de l'optique, où les longueurs d'onde sont très petites par rapport aux dimensions des obstacles.

Selon la théorie de la diffraction géométrique « Geometrical Theory of Diffraction », proposée par Keller en 1962, le champ acoustique frappant une arête formée par deux plans non-coplanaires, crée une onde diffractée qui se propage à partir de cette arête sous la forme d'un cône, voir *Figure 26*.



**Figure 26** : Théorie de la diffraction géométrique

De ce fait, les ondes frappant l'arête de l'écran contribuent à diminuer l'efficacité de l'écran, comme le montre la *Figure 27*.

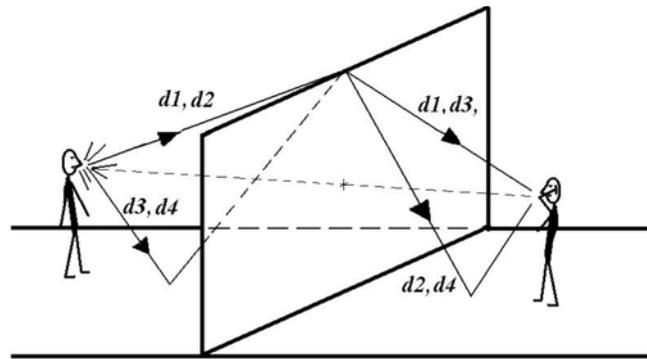


Figure 27 : trajet d'une onde frappant le bord d'un écran

#### 1.4.4 Les limites du tracé de rayons

- Les longueurs d'onde et les fréquences ne sont pas nécessairement associées dans la méthode du tracé de rayons. Les seuls paramètres dépendant de la fréquence sont généralement les coefficients d'absorption et de diffusion.
- La nature ondulatoire (prise en compte de l'amplitude et des phases) des ondes est négligée, les résultats sont donc plus précis en hautes fréquences qu'en basses fréquences. Et, les effets liés aux interférences (problèmes de superposition d'ondes,...) et à la diffraction sont donc mal pris en compte.
- Toutes les approximations faites sur la distribution angulaire des réflexions : soit spéculaire, soit diffuse, soit une combinaison des deux.
- Lorsque l'on modélise une salle, il faut définir le degré de précision des détails et trouver un bon compromis entre temps de calcul et la précision des résultats.
- Les méthodes de mesure du coefficient de dispersion sont difficiles à mettre en œuvre. Donc, il n'est pas possible de réaliser une bibliothèque de données pour tous les matériaux existants et pour chaque bande de fréquence. L'approximation du coefficient de dispersion est donc obligatoire. La qualité de la modélisation dépend donc fortement du jugement de l'acousticien. De plus, certains phénomènes comme la réfraction et la diffraction ne sont pas pris en compte.
- Cette méthode impose un nombre fini de rayons pour représenter le champ sonore. Comme l'angle entre les rayons émis par la source est à peu près constant, l'imprécision grandit plus l'on augmente le parcours des rayons. L'augmentation du nombre de rayons engendre la croissance du temps de calcul, mais un nombre insuffisant de rayons peut causer le manque de détection des réflexions.

#### CONCLUSION :

Au vu de la théorie qui vient d'être développée et des limites des méthodes basées sur les rayons, particulièrement en ce qui concerne la modélisation des phénomènes qui génèrent de la diffusion, on s'aperçoit que la confrontation entre modélisation et mesures est nécessaire pour affiner le réglage des paramètres utilisés dans ces méthodes de modélisation.

Dans la suite de l'exposé, nous allons donc nous intéresser à définir une procédure de modélisation et d'utilisation des paramètres de prise en compte du phénomène de la diffusion dans le logiciel CATT Acoustic, utilisé par le LASA, de manière à fiabiliser autant que possible les résultats obtenus.

**Note :** Par la suite, et particulièrement lors de l'étude du fonctionnement du logiciel, nous utiliserons de manière abusive le terme de diffusion au lieu de dispersion, même si les conditions de diffraction et de réfraction ne sont pas correctement remplies. De même, nous simplifierons le terme anglais « scattering coefficient » par coefficient de diffusion dans le sens de celui mesuré par la norme ISO/CD 17497 :2000, citée précédemment, établie par M. Vorländer et E. Mommertz et développée au paragraphe 1.3.1.

## 2 Le logiciel de modélisation CATT Acoustic

### 2.1 Présentation du logiciel

Le logiciel Catt-Acoustic a été conçu en 1988 par la société CATT (Computer Aided Theatre Technique) dirigée par Bengt-Inge Dalenbäck. A l'origine, ce logiciel était destiné à l'étude des salles à caractère musical, mais très vite, l'utilisation s'est généralisée à tous les locaux fermés ou partiellement ouverts de type plateaux de bureaux, locaux sportifs, bibliothèques, halls, gares et aéroports...

Le but de ce logiciel est de calculer, pour une salle, des critères acoustiques permettant de caractériser la qualité acoustique de celle-ci. Il permet également d'étudier le trajet parcouru par le son afin de déterminer les zones nécessitant un traitement acoustique approprié.

Il permet, grâce à son propre langage interne, de dessiner la géométrie d'une salle ouverte ou fermée.

De manière brève, la méthodologie pour modéliser un espace est la suivante :

Il faut entrer les coordonnées (x, y, z) de tous les points d'intersection de la géométrie, puis déterminer des facettes, c'est-à-dire les différents plans qui composent la géométrie. Ensuite, il faut définir les propriétés acoustiques des matériaux en entrant les coefficients d'absorption et de diffusion. Toutes ces données sont entrées dans un fichier communément nommé « master ».

Enfin, on crée deux fichiers, dans l'un est défini les positions et les caractéristiques (directivités, puissances, ...) des sources et dans l'autre celles des récepteurs.

Une fois la géométrie définie, on lance un calcul qui nous fournit les résultats sous forme de tableaux, graphiques, ... dans différentes fenêtres du logiciel. Des fichiers annexes récapitulatifs des données sont également créés et stockés dans un répertoire défini.

**Note :** *Beaucoup d'options sont elles aussi paramétrables telles que la température, l'humidité, ...*

A partir de ces différentes données, le logiciel peut calculer, par le biais de plusieurs méthodes, les critères géométrique et mathématiques qui définissent les qualités acoustiques d'un espace.

Les critères étudiés par CATT sont :

- Le libre parcours moyen (Mean Free path [MFP])
- Le coefficient d'absorption moyen (Mean Absorption Coefficient [ $\alpha_m$ ])
- Le temps de réverbération (Reverberation Time [RT])
- La clarté (Clarity [C])
- La définition (Distinctness [D])
- L'indice de transmission de la parole (Speech Transmission Index [STI])
- Le RASTI (Rapid Speech Transmission Index)
- L'efficacité latérale ou la fraction d'énergie latérale (Lateral Fraction [LF ou LFC])
- La force sonore (Strenght [G])
- Le temps de décroissance précoce (Early Decay Time [EDT])
- Le critère de "support" (Stage Support Factor [ST])

Le logiciel réalise ces prédictions pour une plage de fréquences allant de 125 à 4000 Hz, et fournit les résultats par bandes d'octaves. Il peut également extrapoler les valeurs pour les octaves centrées sur les fréquences 8000 et 16000 Hz.

Des cartographies, voir *Figure 28*, peuvent être réalisées illustrant la valeur du critère choisi suivant la position dans le local et son évolution dans le temps, en respectant un code de couleur approprié. Ce mode permet de repérer rapidement les zones qui doivent subir un traitement particulier ou une étude plus approfondie.

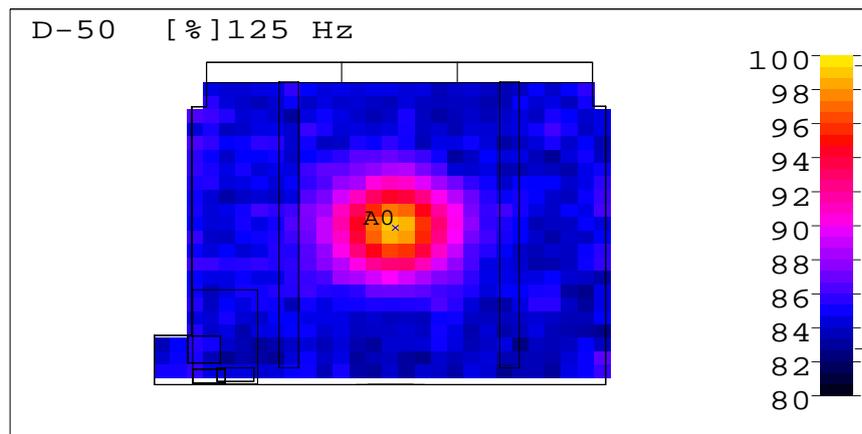


Figure 28 : Exemple d'une cartographie couleur pour une source (A0) placée au centre d'un local

Un module optionnel de CATT permet l'auralisation via un procédé d'écoute binaurale, cela veut dire qu'après avoir modélisé le local on peut écouter via un casque ou des hauts parleurs le rendu d'une musique ou de la parole émis à l'intérieur de ce local. Ce procédé distingue les parties du son arrivant à chacune des deux oreilles du récepteur, il permet ainsi une transcription des impressions de spatialité du local. Cette technique est en constante évolution et amélioration.

## 2.2 Les différents modes de simulation

Le logiciel dispose de trois modes de calculs pour réaliser les prédictions des critères acoustiques. Ces modes sont paramétrables via la fenêtre du menu « Prediction » présentée dans la Figure 29.

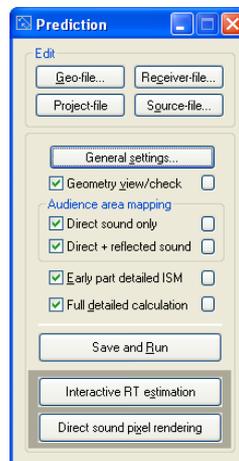


Figure 29 : Fenêtre du menu contextuel des prédictions du logiciel CATT

Voici une description du fonctionnement de ces trois modes :

### ✓ Audience area mapping :

Cette méthode utilise l'approche classique par lancer de rayons avec des récepteurs sphériques de diamètre constant. Cette méthode robuste pour le calcul de paramètres acoustiques présente des limitations, pour l'auralisation, sur la qualité des échogrammes calculés car la densité de réflexions augmente de manière non naturelle avec le temps. La méthode par lancer de rayons acoustiques propage l'énergie acoustique par des rayons dont l'énergie est collectée sur une grille de récepteurs sphériques de taille constante. Ces récepteurs sont disposés sur une grille formant un plan. La composante de réflexion diffuse est prise en compte par l'introduction d'une direction de réémission aléatoire sur les parois assignées d'un coefficient de diffusion. Celui-ci détermine la probabilité de réémission selon une direction aléatoire, c'est la composante diffuse.

Afin de maintenir une valeur de pression acoustique cohérente en fonction de la résolution des cellules de réception et du temps de parcours (condition d'échantillonnage statistique insuffisante) pris en compte, le modèle ajuste la puissance acoustique assignée à chaque rayon pour compenser l'erreur introduite par une densité de rayons insuffisante. La composante directe du son n'est pas affectée par le nombre de rayons (calcul du trajet direct).

✓ **Early part detailed ISM :**

Ce mode utilise la méthode des sources-images à laquelle est ajoutée de la diffusion pour le premier ordre uniquement. Ce mode est utilisé pour étudier l'aspect qualitatif des réflexions, c'est à dire pour étudier le trajet des rayons et leurs réflexions mais ne peut pas être utilisé pour calculer les différents critères acoustiques (hormis le SPL (Sound Pressure Level)).

La raison est que la diffusion est très difficile à modéliser avec la méthode ISM. Cette méthode peut être utilisée pour étudier des cas spéciaux qui requièrent plus de détails au niveau des premières réflexions telles que les parties de salles ouvertes ou la détection de la présence d'écho.

La méthode ISM (modèle source image) peut déterminer toutes les réflexions spéculaires entre un point source et un point récepteur.

Elle calcule les sources images de premier ordre qui déterminent les sources images de 2ème ordre et ainsi de suite jusqu'à l'ordre maximal souhaité ou bien que le temps de parcours fixé soit dépassé.

La diffusion est prise en compte en décomposant les parois en mailles rectangulaires qui réémettent l'énergie acoustique répartie comme autant de sources élémentaires selon la loi de Lambert (distribution en cosinus).

Cette répartition de l'énergie acoustique diffuse est limitée aux réflexions d'ordre 1. Pour des ordres de réflexion supérieurs, la composante diffuse est négligée (hypothèse de réflexion spéculaire).

✓ **Full detailed calculation :**

Cette méthode de calcul dénommée Randomized Tail-corrected Cone-tracing (acronyme RTC) a fait l'objet d'amples développements dans la thèse de doctorat de Bengt-Inge Dalenbäck soutenue à Chalmers University.

Ce mode est utilisé pour prédire les valeurs des différents critères acoustiques et pour créer des échogrammes qui seront utilisés pour l'auralisation.

L'objectif de cette méthode est de créer une méthode unifiée qui limite les présupposés sur les propriétés statistiques de la salle analysée.

La méthode RTC considère que la densité de réflexions croît de manière quadratique. Pour les salles ouvertes, cette hypothèse n'est pas prise en compte.

La méthode RTC utilise un algorithme similaire pour la partie précoce et tardive de l'échogramme. Ce qui est considéré comme partie précoce dans l'algorithme RTC est conditionné par la divergence des cônes (typiquement 300-500 ms, plafonné à 1 seconde).

Elle prend en compte les réflexions diffuses pour l'ordre de réflexion égal à 1 en créant un nombre de sources élémentaires sur chaque surface diffusante (la densité est conditionnée par le produit  $\delta(1-\alpha)$ ). La puissance rayonnée selon la loi de Lambert est proportionnelle à ce produit.

Pour les ordres de réflexion supérieurs à 1, l'approche est similaire à la méthode par lancer de rayons : un tirage aléatoire est effectué en appliquant la loi de Lambert sur l'énergie réémise. La dépendance du coefficient de diffusion en fonction des fréquences, entraîne le tirage d'un nombre de cônes multiplié par le nombre de bandes fréquences étudiées.

### 2.3 Prise en compte de la diffusion dans le logiciel

**Note :** Dans cette partie, le coefficient de dispersion ou « scattering coefficient »,  $\delta$ , cité précédemment et utilisé dans le logiciel CATT Acoustic est noté « S ».

Etant donnée la description faite précédemment des différents modes de simulation, nous étudierons seulement la prise en compte de la diffusion pour le mode « Full Detailed Calculation ». De plus, c'est le mode préconisé par B-I Dalenbäck (concepteur de CATT) pour calculer les différents critères.

### 2.3.1 Algorithme de modélisation de la diffusion

Voici l'algorithme de modélisation, voir *Figure 30*, de la diffusion utilisé dans la méthode RTC :

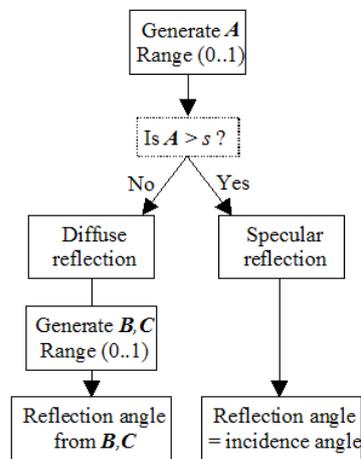
✓ **Pour les ordres de réflexions supérieurs à 1 :**

La méthode RTC traite les réflexions diffuses de la même manière que la méthode du tracé de rayons.

Pour chaque réflexion, un nombre est généré de manière aléatoire dans l'intervalle  $[0,1[$ . Si ce nombre est inférieur au coefficient de dispersion  $S$  de la surface, la direction du rayon est choisie de manière aléatoire en accord avec la loi de Lambert (diffusion idéale) sinon la réflexion est spéculaire.

Par exemple, si le coefficient de dispersion est 0,3 alors 30% des rayons qui frapperont la surface seront diffusés et 70% seront réfléchis de manière spéculaire.

Si le nombre choisi implique une réflexion diffuse alors deux autres nombres seront choisis de manière aléatoire pour décider dans quelle direction le rayon sera redirigé. Ceci implique que la méthode soit appliquée pour chaque bande d'octave indépendamment. Par exemple, lorsqu'il a été choisi de tirer 10000 rayons,  $8 \times 10000$  rayons sont en réalité tirés pour traiter les 8 bandes d'octaves.



**Figure 30 :** Algorithme de calcul de la diffusion dans la méthode RTC pour les ordres supérieurs à 1

✓ **Pour les premier ordre de réflexion :**

La méthode RTC traite les réflexions diffuses en créant un nombre de sources élémentaires pour chaque surface diffusante (la densité de ces sources est fonction du facteur  $S(1-\alpha)$ , ce qui implique que plus la surface est diffusante plus la densité est importante).

La puissance radiée est fonction de la loi de Lambert et est proportionnelle à  $S(1-\alpha)$  ou  $S$  est le coefficient de dispersion et  $\alpha$  le coefficient d'absorption de la surface. La puissance radiée est calculée pour chaque source élémentaire visible vers chaque récepteur visible, puis ajoutée à l'échogramme.

De manière similaire, les réflexions spéculaires du premier et second ordre (traitées par la méthode source-image) sont diminuées de  $(1-s)(1-\alpha)$ . Cette procédure génère un très grand nombre de faibles réflexions diffuses du premier ordre.

### 2.3.2 Présentation des différentes fonctions permettant de modéliser la diffusion

Le logiciel CATT Acoustic dispose de plusieurs fonctions pour gérer la diffusion :

1. Pas de diffusion
2. La diffusion dite « par défaut »
3. La diffusion entrée manuellement
4. La fonction « *auto\_edge* »
5. La fonction « *estimate* »

La diffusion dite « par défaut » permet tout simplement de rentrer une valeur forfaitaire pour chaque bande d’octave qui sera appliquée à toutes les surfaces pour lesquelles aucune autre valeur n’a été programmée.

En revanche, la diffusion entrée manuellement permet d’attribuer un coefficient de diffusion différent pour chaque matériau.

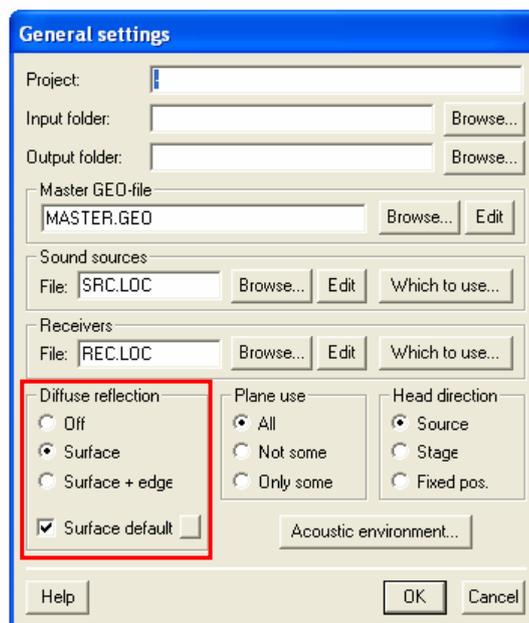
La fonction « auto\_edge » permet d’attribuer de la diffusion particulièrement sur les bords des obstacles.

Enfin, la fonction « estimate » est une fonction basée sur une formule qui, en entrant l’ordre de grandeur de l’aspérité, crée une série de coefficients pour chacune des bandes d’octaves du matériau.

### 2.3.3 Combinaisons des fonctions pour gérer la diffusion dans CATT

**Note :** Cette partie est destinée aux utilisateurs du logiciel CATT Acoustic. Ne pouvant pas détailler toutes les lignes de codes utilisés dans le fichier master, je considère les bases du fonctionnement connues et donc admises.

Les combinaisons possibles pour prendre en compte la diffusion sont résumées dans le *Tableau 2* et sont paramétrables via le menu « Diffuse reflection » de « General settings » de la *Figure 31*.



**Figure 31 :** Fenêtre du menu « General Settings »

#### Abréviations des fonctions paramétrables dans « Diffuse reflection »:

O : **Off**, la composante diffuse n’est pas prise en compte

D : **Surface Default**, diffusion par défaut

S : **Surface**, diffusion entrée manuellement pour chaque matériau

S+E: **Surface + Edge**, diffusion entrée manuellement + fonction « auto\_edge »

#### Abréviations du type de diffusion

e : **edge**, effet de bord. Cette fonction est activée pour les plans définis avec « \* » à la fin.

s : **surface**, diffusion attribuée à un type de surface

d : **default**, diffusion par défaut

#### Définition des matériaux :

ABS nondiff

= <...>

ABS diff

= <...> L <...>

Type de diffusion prise en compte en fonction des paramètres cochés dans "General settings"					
Définition des plans	O	S activé, D désactivé	S+E activé, D désactivé	S activé, D activé	S+E activé, D activé
[ ... / ... / nondiff]	aucune diffusion	aucune diffusion	aucune diffusion	d	d
[ ... / ... / nondiff*]	aucune diffusion	aucune diffusion	e	d	d + e
[ ... / ... / diff]	aucune diffusion	s	s	s	s
[ ... / ... / diff*]	aucune diffusion	s	s + e	s	s + e

Tableau 2 : Combinaison des différentes fonctions pour modéliser la diffusion

### 2.3.4 Effet de bord : fonction « auto\_edge »

Le phénomène de diffraction n'est pas traité dans ce logiciel. Mais, une fonction permet d'augmenter la diffusion sur les bords des obstacles en fonction de la longueur de l'onde. Cependant, elle ne permet pas d'avoir un rayonnement du son derrière un écran comme le ferait la diffraction.

CATT Acoustic applique cette fonction optionnelle sur un contour de la surface considérée, de largeur égale au quart de la longueur d'onde, voir Figure 32.

Pour cela, un coefficient de diffusion est assigné aux bords :

$$S_{\text{bord}} = 0,5 \text{ (50\%)}$$

- Pour le premier ordre, les réflexions de bord sont traitées comme des réflexions diffuses supplémentaires sur les bords. De ce fait, les réflexions spéculaires sont multipliées par  $(1 - s_{\text{bord}})$  et les réflexions diffuses sont multipliées par  $S_{\text{bord}}$ .
- Pour les ordres supérieurs à 1 dans la méthode RTC comme dans la méthode du tracé de rayons, la surface diffusante effective s'exprime par la formule [13] :

$$S_{\text{effective}} = S_{\text{surface}} + S_{\text{bord}} \frac{S_{\text{bord}}}{S_{\text{surface}}} \quad [13]$$

Où,

$S_{\text{surface}}$  est le coefficient de dispersion de la surface

$S_{\text{bord}}$  est la surface autour du matériau de largeur le quart de la longueur d'onde

$S_{\text{surface}}$  la surface du matériau

$S_{\text{effective}}$  est tronquée à 100% si la valeur excède les 100%.

Lorsque les dimensions des surfaces sont petites par rapport à la longueur d'onde, cas des basses fréquences, alors elles sont entièrement traitées comme un bord et agissent comme un diffuseur.

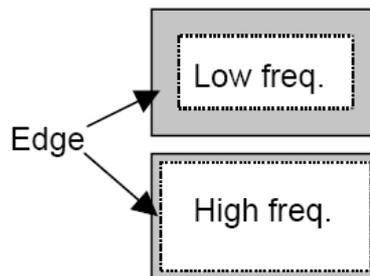


Figure 32 : Contour pris en compte dans la fonction « auto\_edge » en fonction de la fréquence

### 2.3.5 Estimation de la diffusion : fonction « Estimate »

Cette fonction est le résultat de l'expérience du concepteur du logiciel. Il propose cette formule afin d'aider l'acousticien lorsqu'il se pose la question de savoir quel coefficient de diffusion il doit entrer. Cette fonction n'a pas été créée pour remplacer les autres modes de prise en compte de la diffusion dans CATT, mais pour faciliter, par une approche plus intuitive, certains choix de coefficients. Elle permet ainsi une démarche plus pragmatique en raisonnant sur les profondeurs des aspérités et non sur les longueurs d'onde. Effectivement, l'utilisateur entre l'ordre de grandeur de l'aspérité, en mètre, à la suite de la fonction. Grâce à la formule [14] suivante, une suite de coefficients est créée en fonction de la fréquence :

$$s[f] = 100 \times \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{d}{\lambda[f]}} \quad [14]$$

Où,

s est le coefficient de diffusion en [%], dépendant de la fréquence f

d la dimension caractéristique de l'aspérité en [m]

$\lambda$  la longueur d'onde dépendant de la fréquence f

La valeur du coefficient de diffusion obtenue par la formule est tronquée à 100% si le résultat dépasse les 100%.

Dalénbäck caractérise cette formule comme donnant des résultats raisonnables et dépendants de plage de fréquences raisonnables, soit 125 à 4 kHz.

Quelques exemples de résultats fournis par cette formule figurent dans le *Tableau 3* suivant :

Profondeur d en [m]	S[f] en [%]					
	125	250	500	1000	2000	4000
0,001	1	1	2	3	4	5
0,01	3	4	6	9	12	17
0,1	10	13	19	27	38	54
0,5	21	30	43	60	85	100
1	30	43	60	85	100	100

**Tableau 3 :** Différentes valeurs du coefficient de diffusion donné par la fonction « estimate »

Ce tableau montre que pour une surface dont la dimension caractéristique des aspérités est inférieure à 10 cm (relief assez prononcé), le coefficient de diffusion, s, peut descendre en dessous de 10%. Or, Dalénbäck propose d'appliquer un minimum de 10 à 20% pour tous les matériaux et d'appliquer 8 à 10% sur les matériaux extrêmement lisses de type verre, bois peint, ... De plus, Dalénbäck conseil de surestimer les coefficients de diffusion plutôt que l'inverse.

Les résultats figurants dans ce tableau nous laissent penser que cette formule nécessite de petites adaptations, sous-estimant probablement la diffusion pour des parois de dimension caractéristique inférieure à 10 cm. Nous proposons dans ce cas, de modifier les coefficients pour que les valeurs ne soient pas inférieures à 10%.

### 2.3.6 Les limites de la modélisation dans ce logiciel

Les conditions atmosphériques comme la température et l'humidité de l'air sont paramétrables dans le logiciel, pour l'ensemble du local et sont donc similaires pour toute la durée d'une simulation.

Les phénomènes de réfraction liés au caractère hétérogène de l'air sont donc négligés dans les calculs réalisés par CATT.

Les phénomènes de diffraction ne sont pas pris en compte dans CATT, il y a seulement de la réflexion spéculaire et de la réflexion sous incidence aléatoire.

En ce qui concerne la précision de la modélisation, il n'y a pas de règle générale. Cela dépend du jugement de l'acousticien, parfois il est bon de modéliser certains détails pour pouvoir modéliser les effets de bords (exemple des tables dans une salle de classe) et d'autres fois des détails peuvent être simplifiés par l'utilisation de coefficients (exemple de l'audience dans une salle).

Souvent la modélisation de nombreux détails permet d'augmenter la précision dans les hautes et moyennes fréquences mais les formes simples donnent de meilleurs résultats dans les basses fréquences.

D'une manière générale, il est préférable de modéliser la diffusion des parois par un coefficient bien étudié plutôt que de faire figurer de nombreux détails (temps de calcul et de modélisation réduit). En revanche, les éléments générateurs d'encombrement, dispersés dans le local (mobilier, étagères de bibliothèque,...) peuvent fortement influencer la propagation du son dans le local pour les sources considérées, ils doivent donc de préférence être modélisés si l'on veut obtenir un modèle plus fiable. Pour simplifier la modélisation, le mobilier peut être modélisé par des formes géométriques simples sur lesquelles est attribué un coefficient de diffusion.

### 2.3.7 Méthodologie proposée pour prendre en compte la diffusion

Voici la méthode donnée par le concepteur du logiciel CATT pour modéliser la diffusion :

1. Estimer l'absorption aussi bien que possible.
2. Mettre en place la diffusion de l'audience.
3. Utiliser la fonction « auto\_edge » pour tous les petits objets, écrans, réflecteurs et sur les surfaces possédant des impédances présentant des disparités (exemple d'un tapis sur un sol en béton).
4. Assigner de la diffusion sur les surfaces irrégulières.
5. Affiner les combinaisons en commençant par les valeurs recommandées

De la même manière, certaines valeurs sont conseillées pour compléter la méthode :

- ✓ 0,10 à 0,20 minimum sur toutes les surfaces (0,08 à 0,010 sur les surfaces vraiment lisses).
- ✓ 0,30 à 125 Hz jusqu'à 0,70 à 4kHz pour une audience.
- ✓ Pour les surfaces irrégulières : 0,80 pour la fréquence de l'ordre de la longueur d'onde ( $c = \lambda \cdot f$ ) et pour celles au-dessus. Et une décroissance linéaire pour celle en-dessous.  
Par exemple pour une rugosité de l'ordre de 0,3 m les valeurs rentrées seront 0,80 pour les fréquences 1 à 4 kHz, 0,60 à 500 Hz, 0,30 à 250 Hz et 0,15 à 125 Hz.
- ✓ La fonction « auto\_edge » est appliquée pour les phénomènes de bords sur les réflecteurs, vitres, mobilier,... mais aussi sur les tapis.
- ✓ La fonction « Estimate() » en précisant l'ordre de grandeur de la rugosité en mètre.
- ✓ De manière générale, il vaut mieux surestimer la diffusion que l'inverse.

## 2.4 La modélisation du local de mesures

### 2.4.1 Le local de mesures

Pour pouvoir comparer les résultats des modélisations fournies par le logiciel CATT, il faut pouvoir obtenir des mesures acoustiques in-situ d'un local dont on connaît les caractéristiques qui le composent.

A cet effet, l'agence de Lyon dispose d'un local inoccupé qui peut servir à la réalisation de mesures.

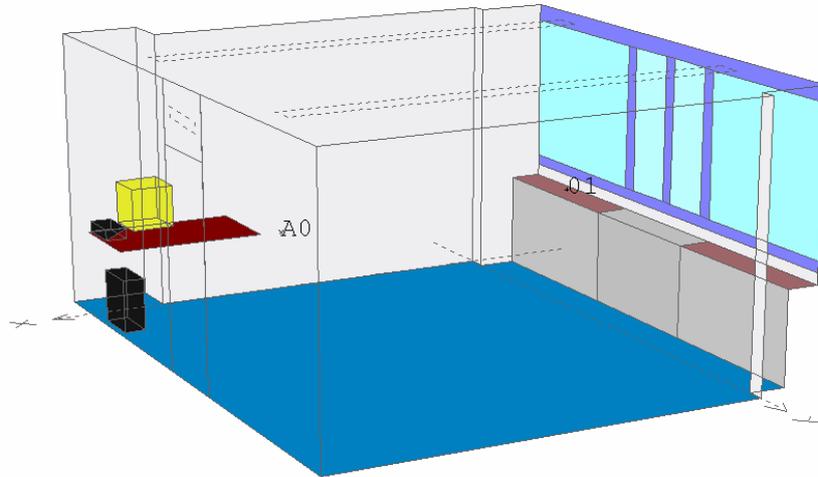
Les dimensions de ce local sont :

Longueur moyenne :	5,15 m
Largeur moyenne :	4,65 m
Hauteur :	2,62 m
Surface au sol :	23 m <sup>2</sup>
Volume total :	62 m <sup>3</sup>

Ce local est composé :

- d'une moquette au sol,
- d'un faux-plafond fibre,
- d'un mur de façade composé d'une partie haute vitrée et d'une partie basse avec des ventilo-convecteurs en allège,
- de trois cloisons amovibles composées d'un complexe [plaque de bois aggloméré (12 mm) + laine minérale (50-60 mm) + plaque de bois aggloméré (12 mm)].

Voici, en *Figure 33*, la vue du local modélisé :



**Figure 33** : Modélisation de la géométrie du local de mesure par le logiciel CATT Acoustic

**Note** : Une partie du mobilier (serveur informatique) n'a pu être déplacé pour la réalisation des mesures, il a donc été intégré dans la modélisation.

#### 2.4.2 Détermination des coefficients d'absorption

Une fois la géométrie dessinée et pour pouvoir ajuster le modèle sur les résultats de la mesure, il nous faut connaître précisément les paramètres du local. Dans notre cas, il s'agit de déterminer les coefficients d'absorption des différentes surfaces présentes.

Pour la moquette et les dalles de faux-plafond, les valeurs sont fournies par le fabricant sous forme de rapports d'essais réalisés en laboratoire. Mais, pour le vitrage, la porte, les caissons de la climatisation et les cloisons, il nous faut déterminer les coefficients in-situ.

Il n'est pas aisé de mesurer in-situ le coefficient d'absorption d'une surface. Il faut donc concilier mesures et théorie pour obtenir la courbe d'absorption supposée.

Une attention particulière a été portée aux cloisons, d'une part parce qu'elles représentent la plus grande surface du local mais aussi car leur mise en œuvre a abouti à la création d'éléments se comportant comme des résonateurs à membranes. Autrement dit, des diaphragmes.

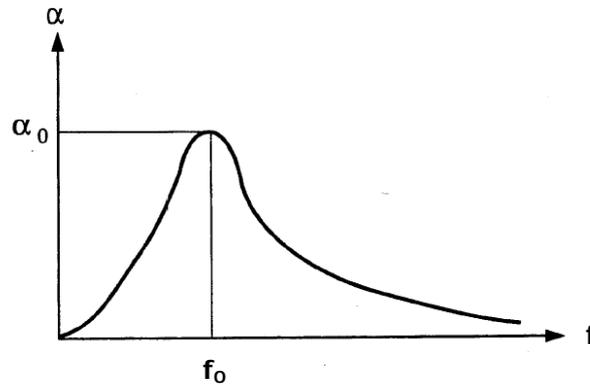
Les résonateurs à membranes sont constitués de panneaux fléchissants, c'est-à-dire de plaques de grandes dimensions susceptibles de se déformer sous l'effet d'une onde incidente. En d'autres termes, le panneau vibre par transformation de l'énergie acoustique en énergie cinétique. Cette énergie se dégrade avec les frottements internes créant ainsi de l'absorption. Cette technique est généralement utilisée dans les lieux musicaux, studios d'enregistrement,... en disposant les panneaux à une certaine distance du mur du local de façon à créer une cavité arrière dont le but est double : introduire une raideur ajustable permettant de régler la fréquence de résonance du panneau et disposer le matériau nécessaire à l'amortissement derrière le diaphragme. En agissant comme un oscillateur amorti (système masse-ressort), le diaphragme et la lame d'air derrière peuvent créer de l'absorption en basses fréquences ou corriger des problèmes liés aux modes propres dans un local.

Dans notre cas, il est important de tenir compte de ce phénomène car autrement, on peut facilement sous estimer l'absorption aux basses fréquences.

De plus, les cloisons sont composées de panneaux de 1,20 m de large dont les conditions aux bords sont pour certains loin d'être des encastresments parfaits.

En théorie, un diaphragme possède un maximum d'absorption ( $\alpha_0 = 1$ ) à sa fréquence propre ( $f_0$ ). En pratique, on considère que cette absorption ne dépasse pas  $\alpha_0 = 0,7$ .

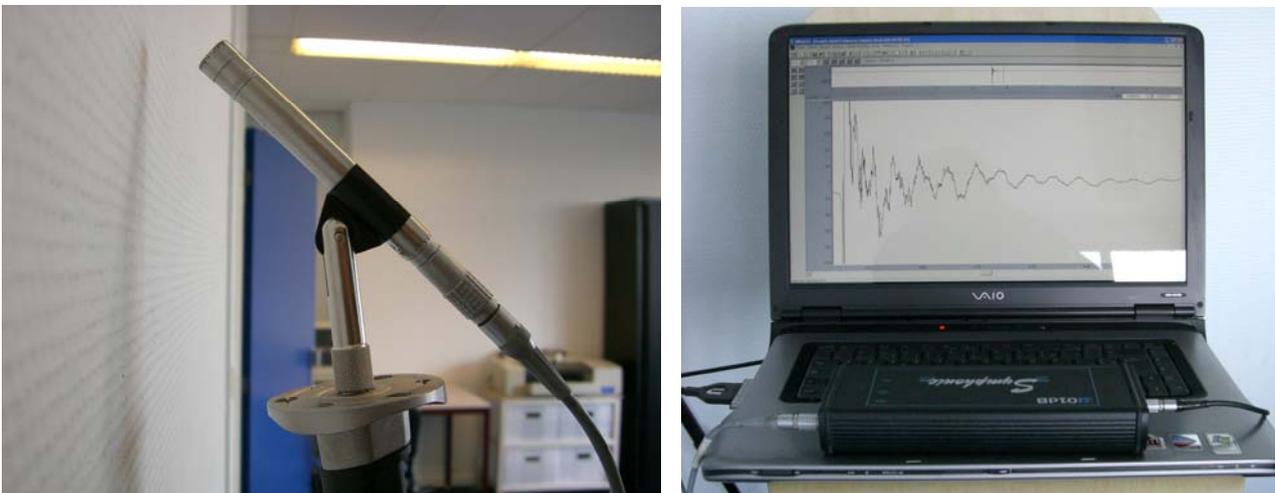
Dans un premier temps, il faut obtenir la fréquence propre de la surface. Cette fréquence nous donne le point de départ du gabarit de la courbe d'absorption (Voir *Figure 34*). Pour construire le reste de la courbe, on divise la valeur du coefficient d'absorption par deux à chaque fois que l'on double la fréquence propre.



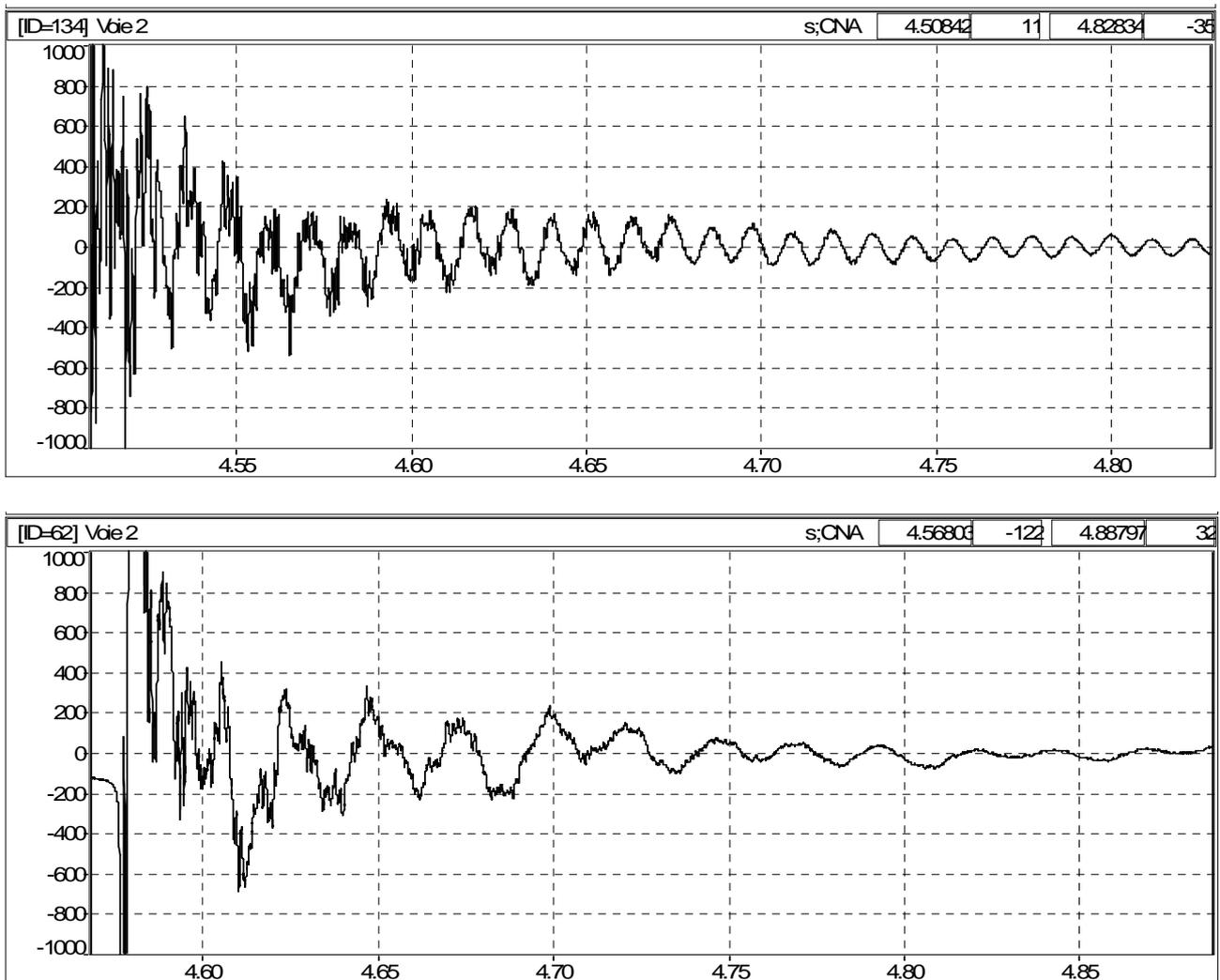
**Figure 34 :** Allure type de la courbe d'absorption pour une membrane

Pour mesurer la fréquence propre, on place un micro devant la paroi à étudier (voir *Figure 35*) puis on fait osciller la paroi en lui faisant subir un choc (à l'image d'un batteur frappant sur sa cymbale). On enregistre la variation de pression dans l'air, induite par le mouvement de la paroi, en fonction du temps via une carte d'acquisition et un logiciel adéquat (voir *Figure 35*). Enfin, la courbe obtenue (voir *Figure 36*) permet de déterminer la pseudo-période des oscillations et donc la fréquence propre du système.

L'opération a été répétée pour chaque élément dont le comportement vibratoire paraissait différent (chaque panneau de la cloison, chaque vitre,...).



**Figure 35 :** Micro positionné proche de la cloison (à gauche) et système d'acquisition (à droite)



**Figure 36 :** Réponse obtenue en fonction du temps permettant de déterminer la fréquence propre de la porte (partie haute) et d'une cloison (partie basse)

### 2.4.3 Réalisation des mesures dans le local vide, non meublé

Les mesures du temps de réverbération et des critères de salle ont été réalisées grâce à un système classique (voir Figure 37), composé d'une source de bruit omnidirectionnelle pour l'émission et d'un microphone avec système d'acquisition pour la réception.

**Matériel utilisé :**

- Source de bruit : Lautsprecher Type 223 Nr20857 possédant 12 haut parleurs
- Amplificateur de puissance : Norsonic power amplifier 260
- Microphones : 01 dB MCE + Préampli 01 dB PRE12N
- Carte d'acquisition : Symphonie 01 dB + carte PCMCIA
- Logiciel de traitement des données : dBbati, dBTrig et dBFA



**Figure 37 :** *Photo du matériel de mesure (Amplificateur + Carte d'Acquisition + Source + Microphone)*

**Mode opératoire :**

La source de bruit omnidirectionnelle émet un signal M.L.S. (Maximum Length Sequence). Le signal M.L.S. est une séquence pseudo aléatoire. Il a comme propriété de donner une impulsion de Dirac lorsque l'on effectue son auto corrélation et de donner la réponse impulsionnelle d'un système lorsque l'on effectue la corrélation entre la séquence originale et la séquence ayant été enregistrée dans le local étudié.

Sans rentrer dans le détail, cette méthode possède l'avantage de s'affranchir du bruit de fond présent lors de la mesure (fonctionnement du serveur informatique dans notre cas) et possède une meilleure répétabilité de la mesure qu'un système plus traditionnel, comme la mesure avec impulsion provoquée par un pistolet d'alarme. Pour augmenter la comparabilité des résultats, les positions des micros et de la source sont marquées au sol afin de toujours utiliser exactement les mêmes.

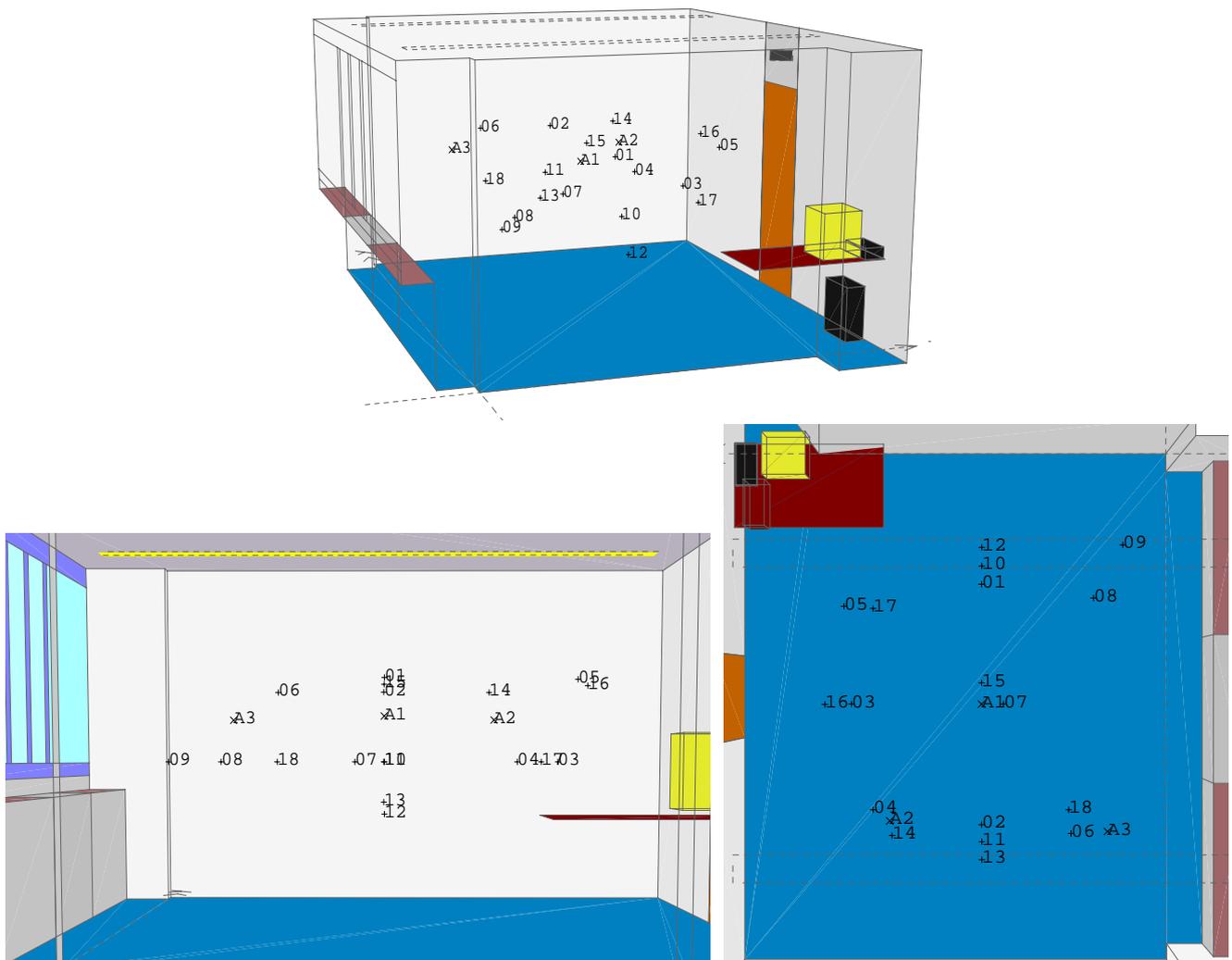
Le signal est émis pendant une durée paramétrable, dans notre cas pendant deux minutes, et la réponse de la salle est enregistrée par un ou plusieurs microphones situés à une distance suffisante de la source et des parois. Après traitement du logiciel, l'échogramme est tracé et les différents paramètres sont calculés.

La mesure est réalisée pour les octaves centrées sur les fréquences 125, 250, 500, 1000, 2000 et 4000 Hz car c'est la plage de fréquence utilisée par le logiciel CATT Acoustic.

Afin de constituer une base de données et de pouvoir moyenner les résultats, de nombreuses mesures à différents points ont été réalisées.

Pour le local vide, 3 positions de sources ont été définies pour une hauteur prise au centre de la source de  $h_s=1,40$  m. Pour chaque source, une combinaison de mesures basée sur 18 positions de microphones avec 3 hauteurs différentes suivant les points ( $h_R=1,60$  m,  $h_R=1,10$  m et  $h_R=0,80$  m) a été réalisée. Chaque mesure a été répétée 5 fois pour augmenter la fiabilité des résultats.

Les positions des sources et des microphones sont définies comme suit :



**Figure 38 :** Positions des sources (A1, A2 et A3) et des récepteurs (1,2, ..., 18) définies dans le local de mesure

Lors d'une mesure, seuls la réponse impulsionnelle et le signal audio sont enregistrés. Les critères acoustiques fournis par la suite ne sont que l'interprétation de l'échogramme par les mathématiques (calcul d'intégrales,...)

Les critères calculés à partir de la mesure sont :

- Le temps de réverbération (TR)
- La clarté à 80 millisecondes ( $C_{80}$ )
- La définition à 50 millisecondes ( $C_{50}$ )
- L'EDT
- Le STI
- Le RASTI

La comparaison entre le modèle CATT Acoustic et la mesure se fera donc uniquement sur ces paramètres.

#### 2.4.4 Les limites de la mesure

##### i. Au niveau du local

Le fait que ce ne soit pas une chambre réverbérante ou anéchoïque permet de se détacher des mesures réalisées en laboratoire et ainsi de se retrouver dans le cas d'un local quelconque. En revanche, d'autres problèmes subsistent :

✓ Modes propres et ondes stationnaires :

Lorsqu'une onde sonore peut se réfléchir aux deux extrémités d'un segment de propagation, il y a une superposition de pressions de l'air, différentes en phase et identiques en valeur. S'il y a parfaite opposition de phase, cela se traduit par l'existence de « ventres » ou valeur maxi, et « nœuds » ou valeurs mini de pression, donc de niveau sonore. Ces ondes sont appelées ondes stationnaires.

L'inconvénient de la présence des ondes stationnaires est la création d'inégalités de répartition de l'énergie qui favorise certaines places au détriment des autres.

Dans tous les cas les ondes stationnaires sont à proscrire. En effet, quand ces ondes subsistent, il n'est guère possible de mesurer correctement les principaux paramètres caractéristiques du local. Dans ce cas, la réponse de la salle dépend étroitement de la position de la source et du microphone.

Ces ondes stationnaires existent aux fréquences propres de la salle et sont générées par la présence de deux parois parallèles. Les fréquences propres sont données par la formule [15] suivante :

$$f_n = \frac{c}{2L} n \quad [15]$$

Où,

$L$  est la distance entre les deux murs en [m]

$n$  est un nombre entier

$c$  la célérité du son dans l'air du local en [m/s]

Dans une salle parallélépipédique de dimension XYZ, la formule [15] devient :

$$f_{lmn} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{l^2}{X^2} + \frac{m^2}{Y^2} + \frac{n^2}{Z^2}} \quad [16]$$

Où,

$l, m, n$  prennent la valeur 1 ou 0 suivant le mode étudié

$X, Y, Z$  sont les dimensions du local en [m]

$c$  la célérité du son dans l'air du local en [m/s]

Ainsi, les modes propres d'une salle rectangulaire comprennent :

- ✓ Les modes propres fondamentaux des 3 systèmes que constituent les parois parallèles  $f_{100}, f_{010}, f_{001}$  ainsi que leurs harmoniques  $f_{100}, f_{0m0}, f_{00n}$ . Ce sont les modes axiaux.
- ✓ Les modes combinés correspondant aux systèmes d'ondes stationnaires perpendiculaires à l'une des parois. Soit  $f_{lm0}, f_{0mn}, f_{l0n}$ . Ce sont les modes tangentiels.
- ✓ Les modes obliques pour lesquels  $l, m$  et  $n$  sont différents de 0.

Tous ces modes ont une importance en basse fréquence car ils constituent un réseau de raies discrètes qui peuvent donner à la salle, suivant les places, une coloration difficilement acceptable sur le plan « perceptif ». Les raies trop importantes ou trop « isolées » sont en effet toujours perçues comme gênantes dans le domaine des basses fréquences où elles génèrent des sons sourds, parfois masquant.

Les principales conséquences de cet effet sont :

- le déséquilibre de la balance spectrale,
- la redondance temporelle qui induit un effet de bourdonnement désagréable (effet de tonneau),
- le masquage des régions moyennes du spectre.

Dans notre local de petites dimensions, le plan « perceptif » n'est pas pénalisant du fait que nous nous plaçons dans un champ direct prépondérant. En revanche, le problème peut survenir pour comparer les mesures et notamment les échogrammes.

✓ Fréquence de coupure de la salle :

Le fait que le local ne soit pas de grand volume et que les parois soient parallèles pose certains problèmes en particulier au niveau des fréquences basses.

En effet, la réponse d'une salle parallélépipédique présente une suite de pics d'amplitudes qui correspondent aux fréquences propres de la salle. Leur densité croît avec la fréquence. Comme pour la distribution temporelle des réflexions de la réponse impulsionnelle, la distribution fréquentielle des modes propres comprend :

- Une suite de valeurs discrètes en basse fréquence.
- Une partie « diffuse » quand la fréquence devient supérieure à une certaine valeur que l'on appelle « fréquence de coupure de la salle ».

Les modèles fondés sur des lois statistiques définissant le champ réverbéré (Sabine, Eyring, ...) sont d'autant plus précis que l'on se rapproche des conditions idéales correspondant au champ parfaitement diffus. L'intérêt de ces lois devient médiocre dès que le nombre de réflexions prises en compte tombe en dessous d'une certaine valeur. Il est primordial de pouvoir établir une limite de validité des relations utilisées à la fois pour le domaine temporel et le domaine fréquentiel. La grandeur la mieux adaptée pour définir cette limite est le nombre de réflexions comprises dans un intervalle de temps donné. Ce nombre est la densité temporelle. Il trouve son équivalence dans le domaine fréquentiel avec la densité modale qui s'écrit :

$$m(f) = \frac{4\pi V}{c^3} f^2 + \frac{\pi S}{2c^2} f + \frac{L}{8c} \quad [17]$$

Où,

f est la fréquence en [Hz]

V le volume du local en [m<sup>3</sup>]

S la surface totale des parois de la salle en [m<sup>2</sup>]

L la longueur totale des arrêtes de la salle en [m]

c la célérité du son dans l'air du local en [m/s]

Elle est donc sensiblement proportionnelle au carré de la fréquence. Sa valeur devient trop faible en basses fréquences pour que l'on puisse admettre la validité des hypothèses de la diffusion homogène.

C'est pourquoi, l'approche statistique ne peut s'appliquer que lorsque la densité modale (fréquentielle) de réflexions est suffisante, c'est-à-dire pour des fréquences supérieures à la fréquence de coupure de la salle.

Schroeder a proposé une expression pour déterminer la fréquence de coupure d'un local :

$$f_s = 3 \frac{c}{L} \quad [18]$$

Ou

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}} \quad [19]$$

Où,

V le volume du local en [m<sup>3</sup>]

L la plus grande dimension de la salle en [m]

c la célérité du son dans l'air du local en [m/s]

RT<sub>60</sub> le temps de réverbération du local en [s]

La transition entre le modèle statistique et les modes propres n'est pas une ligne distincte. La fréquence de Schroeder (de coupure) permet de distinguer approximativement la différence entre ces comportements. Au dessus de cette fréquence, il est approprié d'utiliser la méthode statistique pour analyser le local et ce sans tenir compte des modes propres. Cette expression montre l'importance que peut prendre la fréquence de coupure dans les petites salles peu amorties.

Une **étude du comportement du local aux basses fréquences** a donc été entreprise en étudiant la fréquence de coupure et les modes propres fondamentaux, combinés et obliques.

➤ Au niveau des densités modales :

F en [Hz]	Densité modale de la bande d'octave centrée sur la fréquence F
63	12
125	56
250	373
500	2661
1000	20052
2000	155542
4000	1225005

**Tableau 4 :** Calcul de la densité modale dans le local de mesure

On peut constater que le nombre de modes propres est assez faible pour l'octave 63 Hz mais commence à être significatif à partir de l'octave 125 Hz, compte tenu des faibles dimensions du local.

➤ Au niveau des modes propres :

Modes Axiaux				Modes Tangentiels				Modes Obliques			
<i>l</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	$f_{lmn}$	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	$f_{lmn}$	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	$f_{lmn}$
1	0	0	33	1	1	0	50	1	1	1	82
0	1	0	37	1	0	1	74	2	2	2	117
0	0	1	66	0	1	1	75	3	3	3	143
2	0	0	47	2	2	0	70	4	4	4	165
0	2	0	52	2	0	2	104	5	5	5	184
0	0	2	93	0	2	2	107	6	6	6	202
3	0	0	58	3	3	0	86	7	7	7	218
0	3	0	64	3	0	3	128	8	8	8	233
0	0	3	114	0	3	3	131	9	9	9	247
4	0	0	67	4	4	0	100	10	10	10	261
0	4	0	74	4	0	4	147				
0	0	4	131	0	4	4	151				
5	0	0	75								
0	5	0	83	2	1	0	60				
0	0	5	147	1	2	0	62				
6	0	0	82	2	0	1	81				
0	6	0	91	1	0	2	99				
0	0	6	161	0	2	1	84				
7	0	0	88	0	1	2	100				
0	7	0	98								
0	0	7	174	3	1	0	69				
8	0	0	94	1	3	0	72				
0	8	0	105	3	0	1	87				
0	0	8	186	1	0	3	119				
9	0	0	100	0	3	1	92				
0	9	0	111	0	1	3	120				
0	0	9	197								
10	0	0	106								
0	10	0	117								
0	0	10	208								

**Tableau 5 :** Calcul des premiers modes propres dans le local de mesure

Brièvement, on peut dire qu'au niveau des modes propres fondamentaux (les plus gênants) il n'y a pas de réel problème étant donné notre plage de fréquences étudiée (125 – 4000 Hz).

En effet, le mode propre fondamental le plus bas est  $f_{100} = 33\text{Hz}$ . Les premières harmoniques supérieures à 125 Hz sont  $f_{004}, f_{005}, f_{006}$ . Cela veut dire que les ondes stationnaires de fréquences supérieures à 125 Hz présentes sur la hauteur de la salle possèdent au moins 4 creux et 4 ventres. De même, les ondes stationnaires présentes sur la longueur possèdent plus de 14 nœuds et 14 ventres.

Pour les modes propres combinés, le plus bas est  $f_{110} = 50\text{Hz}$  et les premiers supérieurs à 125 Hz sont  $f_{303}, f_{033}, f_{404}$ .

Enfin, pour les modes propres obliques le plus bas est  $f_{111} = 82\text{Hz}$  et le premier au dessus de 125 Hz est  $f_{333}$ .

Les différentes positions de microphones utilisées lors de mesures doivent donc permettre d'obtenir une moyenne statistique viable.

➤ Au niveau de la fréquence de coupure :

La fréquence de coupure théorique du local de mesure vaut approximativement :

$$f_s = 180 \text{ Hz}$$

On peut donc supposer qu'en dessous de cette valeur, les résultats donnés par la mesure et par les lois théoriques (Sabine,...) ne sont pas fiables. Cependant, on peut émettre l'hypothèse, pour la mesure et uniquement pour la mesure, qu'en réalisant un nombre de points de mesures important et à des positions variées, l'on puisse s'affranchir des irrégularités du niveau de pression acoustique due aux ondes stationnaires.

Les faibles dimensions du local imposent nécessairement une proximité de la source, des micros et des parois entre elles lors de la réalisation des mesures. Ce qui implique une prédominance du champ direct comparé à des mesures qui seraient réalisées dans une salle de concert par exemple. Les mesures ne sont donc pas réellement effectuées en champs réverbérés.

## ii. Au niveau de la chaîne d'acquisition

Un entretien avec le responsable développement produit du matériel de mesures utilisé a permis de pouvoir fixer les limites techniques de la chaîne d'acquisition.

Sans entrer dans de longs et fastidieux calculs d'incertitudes de mesures, nous pouvons dire qu'à priori la partie numérique (carte d'acquisition + PC) n'est pas sources d'incertitudes, la partie mécanique (microphones + câbles) possède une incertitude de mesure élargie de  $\pm 2 \text{ dB}$  (précision en directivité de  $\pm 0,2 \text{ dB}$  de 1 à 500 Hz,  $\pm 0,7 \text{ dB}$  de 500 à 2000 Hz et  $\pm 1 \text{ dB}$  au-delà de 2 kHz et une précision en linéarité de  $\pm 0,7 \text{ dB}$ ).

La directivité et la puissance de la source n'ont pas pu être vérifiées mais un contrôle au sonomètre a été effectué devant chaque haut parleur qui a montré une homogénéité du spectre révélant, à priori, la qualité omnidirectionnelle de la source.

## iii. Conclusion

En ce qui concerne les incertitudes relatives entre deux résultats, nous pouvons conclure qu'il existe une plus grande probabilité qu'elles proviennent d'une modification sensible de la position du récepteur ou de l'émetteur entre deux mesures plutôt que d'un problème de fiabilité de la chaîne d'émission ou d'acquisition.

Nous avons délimité l'intervalle de validité de nos mesures. Certains problèmes peuvent être présents aux basses fréquences. Mais, rappelons le, nous cherchons à caractériser l'impact des diffuseurs sur des critères acoustiques mesurés et sur les résultats fournis par le logiciel CATT Acoustic. Il s'agit donc de mesurer un écart par rapport à une situation initiale. A partir du moment où les mesures sont réalisées de la même manière (positions et mode opératoire identiques) dans le local vide et après l'apport d'éléments diffusants, on peut tolérer ces incertitudes en basses fréquences. En effet, ces incertitudes liées aux ondes stationnaires et donc à la position des microphones n'interviendront pas dans le résultat final, égal à la différence entre les deux situations, à condition de conserver strictement les mêmes positions.

### 2.4.5 Calage de la modélisation sur les résultats de mesures du local sans diffuseurs

➤ Influence des principaux paramètres :

Lors du choix du mode de calcul dans le logiciel CATT Acoustic, deux paramètres essentiels sont à définir. La valeur de ces paramètres influence fortement les résultats de la modélisation.

- « Number of rays per octaves ». Cette valeur dépend de la complexité de la géométrie et des dimensions du local. Une estimation trop faible du nombre de rayons à lancer donne des résultats aléatoires. Par contre, une valeur importante du nombre de rayons augmente considérablement le temps de calcul. Il s'agit donc de trouver le bon compromis entre la stabilité des résultats et le temps de calcul disponible. Il est conseillé d'utiliser un minimum de 100 000 rayons pour obtenir des résultats fiables. Cependant, il est possible de lancer un test avec 5 000 rayons pour connaître rapidement les premières tendances des résultats.
- « Truncation time ». Cette valeur correspond au temps de suivi des rayons, en millisecondes. Il est conseillé d'adopter une dynamique de 60 dB. En d'autres termes, il faut choisir cette valeur au moins égale au temps de réverbération estimé, afin de repérer les doubles pentes éventuelles liées aux phénomènes de couplage par exemple. Dans un local simple et pour une première approximation, on peut choisir le « truncation time » égal à la moitié du temps de réverbération.

➤ Etude de l'influence des différentes fonctions modélisant la diffusion :

Le cheminement pour le calage de la modélisation sur les mesures in-situ s'est déroulé pas à pas. Plusieurs tests ont été réalisés en ajoutant à chaque fois une des fonctions détaillées dans le *paragraphe 2.3.1* afin de s'approcher au plus près de la réalité.

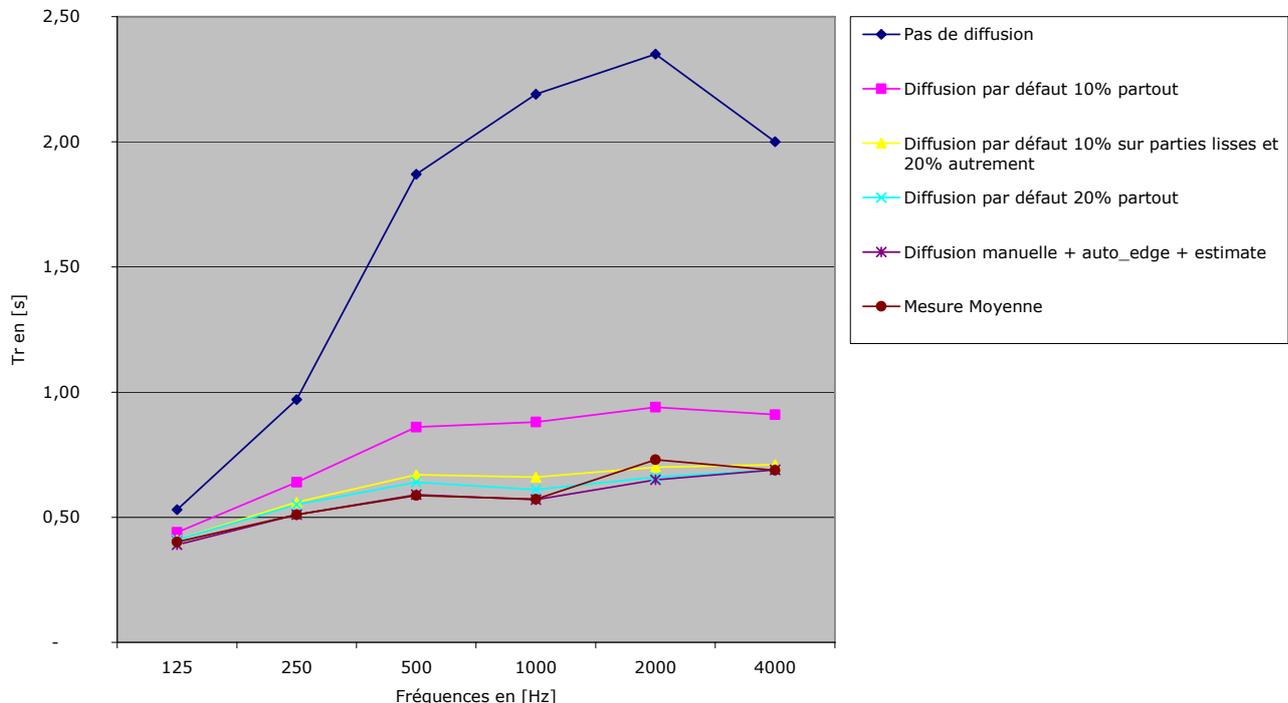


Figure 39 : Courbes comparatives des différentes modélisations avec la mesure in-situ

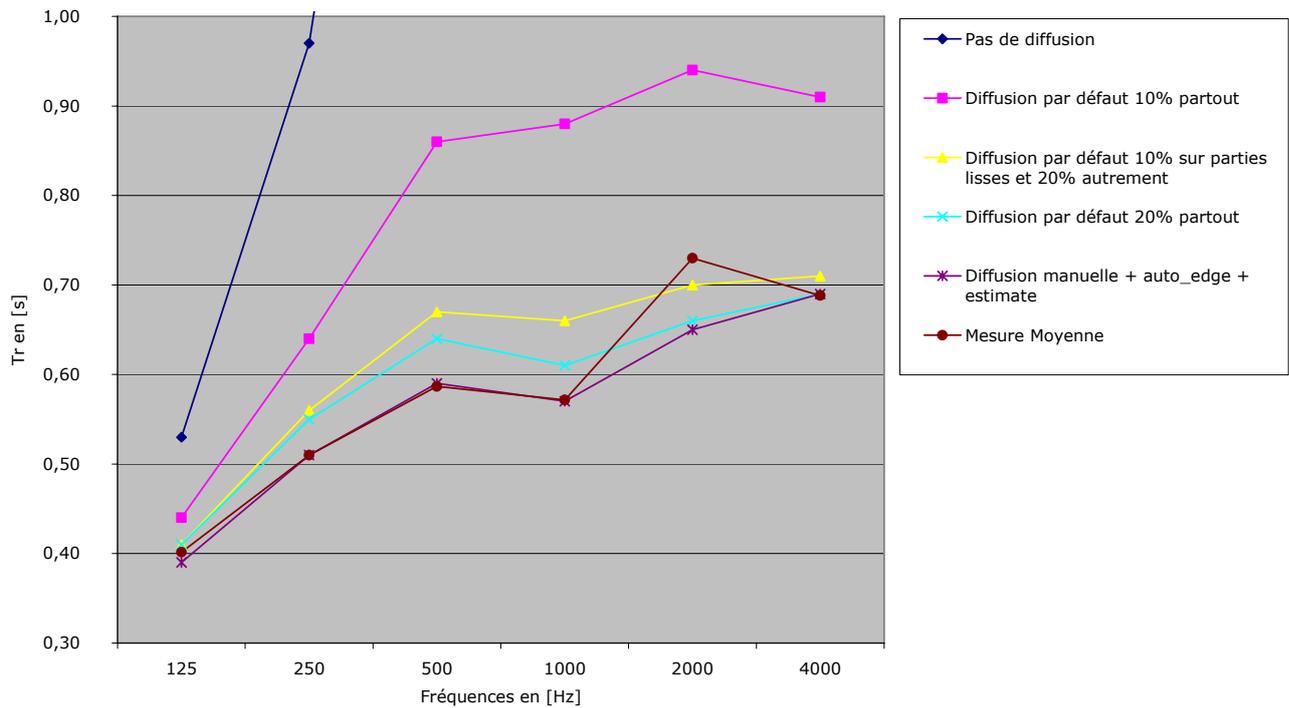


Figure 40 : Agrandissement de la Figure 39

En appliquant les résultats trouvés pour la détermination des coefficients d'absorption et la méthode élaborée pour définir les coefficients de diffusion. On obtient sensiblement les mêmes résultats que pour la mesure. Les coefficients d'absorption des matériaux les moins bien maîtrisés (cloisons amovibles, vitrages,...) ont été légèrement ajustés pour caler parfaitement la courbe mesurée.

La courbe du temps de réverbération mesurée montre l'existence d'un « pic » à 2000 Hz. L'hypothèse d'un écho flottant (« flutter echo ») se produisant dans la longueur ou la largeur de la pièce est privilégiée à un manque d'absorbant à cette fréquence. En effet, le plafond et le sol sont absorbants mais les cloisons sont lisses avec, en plus, la présence de vitrages et d'une porte en bois peint. L'onde sonore peut donc réaliser plus d'une trentaine d'allers-retours en une seconde. Ce qui provoque une impression de « claquement coloré » lorsque l'on émet une impulsion dans le local. Ce phénomène est d'ailleurs parfaitement perceptible à l'oreille.

D'après les courbes de la Figure 39 et de la Figure 40, on remarque que si l'on ne modélise pas le phénomène de diffusion, les résultats sont aberrants. On remarque également qu'avec une diffusion standard de 20%, on obtient des résultats proches de la réalité. Ceci n'est pas forcément le cas à chaque fois. Ici, la géométrie du local est simple et les matériaux sont peu absorbants, les hypothèses de validité de la formule de Sabine sont respectées. Si l'on applique une diffusion de manière homogène, on se rapproche d'autant plus des hypothèses de validité des lois statistiques (Sabine, Eyring,...) et on se place donc dans le cas d'une répartition parfaitement homogène du champ réverbéré. La courbe aura tendance à tendre vers la courbe de Sabine. Pour s'en persuader, il suffit d'observer la Figure 41 suivante :

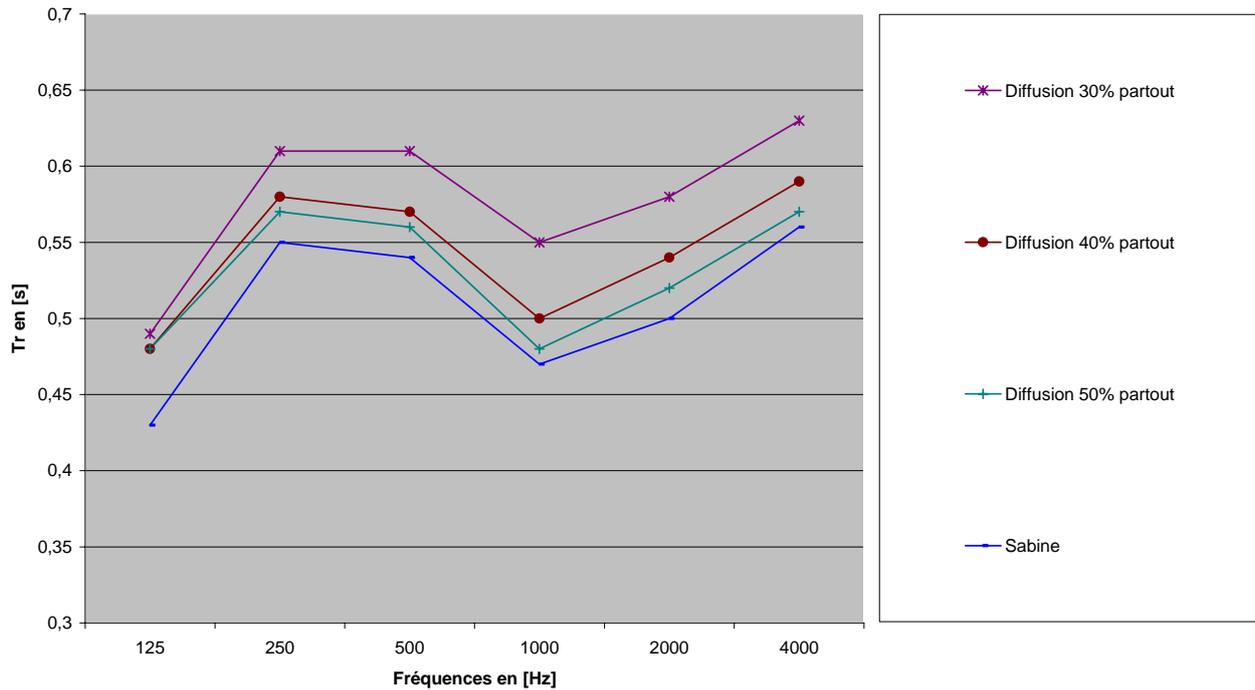


Figure 41 : Courbes montrant l'impact de la diffusion homogène

La diffusion à donc un impact non négligeable sur les prédictions, il convient donc de paramétrer avec soin les coefficients de diffusion.

**CONCLUSION :**

Cette partie a permis de découvrir le fonctionnement pratique et théorique du logiciel CATT Acoustic en ce qui concerne la diffusion. Nous avons pu comprendre l'intérêt des différents modes de calculs ainsi que les différentes méthodes de prise en compte de la composante diffuse du son réfléchi. Nous avons également abordé les limites du logiciel concernant la modélisation de la diffusion.

Enfin, nous avons pu, par le biais de mesures, ajuster le modèle afin d'obtenir une base pour l'étude de l'optimisation de la méthode de modélisation, fondée sur la comparaison entre les mesures et les prédictions. Et, l'analyse des conditions de mesure a permis de fixer l'intervalle de validité de l'étude.

### 3 Application à un cas concret : la salle de spectacle de Sens

#### 3.1 Cahier des charges

##### 3.1.1 Le projet

<b>Projet :</b>	Salle de spectacle du complexe intercommunal de Sens
<b>Client :</b>	Communauté des communes du Sénonais
<b>Architecte :</b>	MONCEYRON Architectes
<b>Enveloppe budgétaire :</b>	8 millions d'euros pour le complexe en entier
<b>Jauge :</b>	1200 places assises

##### 3.1.2 Contraintes du projet

Voici quelques passages extraits du Dossier de Consultation des Concepteurs (D.C.C.) :

« Cependant, soucieux du respect du budget – exigé également par la Collectivité – le programmiste doit, à regret, souligner que l'ouvrage projeté ne pourra être réalisé qu'à la condition de mettre en œuvre des procédés constructifs très économiques et de renoncer à toutes conceptions « ouvragées », forme, courbe, ligne complexe etc. Génératrices de surcoûts. »

**« Le parti constructif à mettre en œuvre doit donc s'apparenter à celui utilisé dans le cadre de la réalisation de bâtiments industriels »**

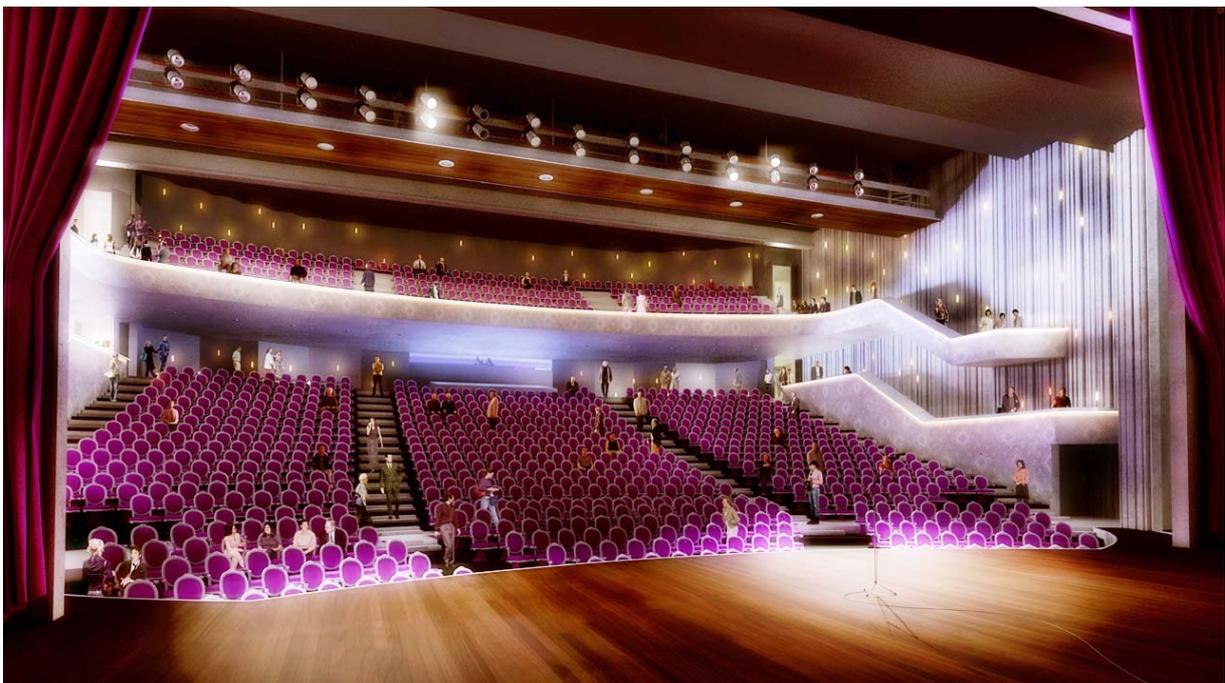
« Les concepteurs auront ainsi à cœur de faire exister un vrai théâtre en ayant à l'esprit une célèbre boutade de Calderon sur le lieu de spectacle :

" 3 planches, 2 personnages et 1 passion " »

« La Collectivité a insisté pour qu'en aucun cas la configuration de la salle ne soit comparable à celles des salles du multiplexe voisin.

Sans reconstituer l'architecture en fer à cheval des salles à l'italienne et du théâtre historique de Sens, la configuration des gradins de la mezzanine et surtout des bergeries, doit marquer la différence, l'originalité, tout en procurant une bonne visibilité de la zone centrale de l'espace scénique. »

Voici, en *Figure 42*, un premier aperçu, en image de synthèse, de l'intérieur de la salle :



**Figure 42 :** Image de synthèse représentant l'intérieure de la future salle

Voici un tableau résumant les modes d'utilisation de la salle par genre :

Genres présentés	Pourcentage des manifestations par an	Amplification électro-acoustique
Spectacles dramatiques	15%	sans
Comédies musicales, opérettes	8%	avec
Spectacles lyriques	2%	sans
Spectacles chorégraphiques	10%	avec
Récitals	4%	sans
Concerts	6%	sans
Spectacles de variétés	35%	avec
Conventions, congrès	20%	avec

**Tableau 6** : Destinations futures de la salle

**Note** : La Collectivité souhaite que l'intelligibilité de la parole non amplifiée soit privilégiée dans cette salle à l'occasion des spectacles dramatiques.

### 3.1.3 Solution envisagée

Pour répondre à la contrainte d'une architecture « brute » et économique aux lignes industrielles tout en proposant un traitement acoustique adéquat de la salle, il a été envisagé par le LASA et le cabinet d'architecture MONCEYRON Architectes de mettre en place des diffuseurs sur les murs latéraux de la salle de spectacle. L'originalité de cette idée demeure dans l'envie de réaliser les diffuseurs en béton coulé en place en même temps que l'enveloppe structurelle de la salle. Ceci, afin d'éviter tout élément rapporté et de permettre d'intégrer un traitement acoustique efficace dans une enveloppe budgétaire restreinte.

Etant donné la largeur importante de la salle, un traitement des murs latéraux est nécessaire pour prévenir tout risque de création d'écho franc et permettre d'obtenir une énergie sonore bien répartie dans toute la salle ainsi qu'une impression de spatialité, même au centre de la salle.

Pour cela, il faut donc dimensionner un diffuseur respectant certaines contraintes :

- ✓ Les formes doivent permettre un coulage vertical du béton en même temps que l'enveloppe structurelle, le béton préfabriqué étant proscrit dans le concept envisagé pour des raisons budgétaires.
- ✓ Les dimensions et la précision doivent être réalisables en béton
- ✓ Les formes doivent permettre un décoffrage aisé et permettre un coffrage glissant
- ✓ Le mélange de béton ne doit pas être différent de celui utilisé pour le voile

En tenant compte de ces contraintes (en particulier le problème du coulage vertical), nous nous sommes naturellement orientés vers un diffuseur de type QRD (Quadratic Residue Diffusor) développé par Schroeder.

## 3.2 Conception d'un diffuseur et réalisation d'un prototype

### 3.2.1 Etude de la théorie de Schroeder

#### i. Historique

Depuis approximativement 1000 ans et jusqu'au 20<sup>ème</sup> siècle les tendances architecturales étaient de favoriser un style « fleuri » comprenant divers éléments de décoration comme des statuetstes, moulures colonnes sculptées,... Ces formes irrégulières aléatoires et parfois périodiques participaient à rendre le champ plus diffus (à augmenter le nombre de réflexions diffuses) selon leurs formes, dimension et propriétés absorbantes. La naissance du « style international » au début des années 1900 engendra la disparition de ces surfaces irrégulières pour laisser place à une utilisation abondante de surfaces lisses en béton, verre et autres matériaux acoustiquement réfléchissants.

Ce mouvement fut ensuite soutenu pour les avantages économiques de son design et de ces techniques de construction.

**Note :** Le *Style international* est un courant en architecture qui s'est épanoui entre les années 1920 et la fin des années 1980 dans le monde entier. Ce courant est issu d'un autre mouvement, le Mouvement moderne. Ses caractéristiques principales sont de construire des bâtiments en rupture totale avec les traditions du passé. Ses architectes décident de mettre en valeur les volumes par des surfaces extérieures lisses et sans ornementation. Ils souhaitent appliquer le principe de régularité et utiliser pour cela toutes les possibilités offertes par le béton. Le Style international se présente donc comme une tendance résolument moderniste et recherche le dépouillement dans la décoration.)

L'irrégularité des surfaces pour des éléments diffusants n'est pas une condition suffisante pour créer un champ acoustique homogène. De plus, leur implantation cause des problèmes d'ordre esthétique et économique, particulièrement pour les espaces plus réduits comme les studios d'enregistrement. Les contraintes architecturales imposent la création de cellules diffusantes plus performantes. Comment augmenter l'homogénéité du champ sonore d'une salle de concert, d'un studio d'enregistrement ou tout simplement d'un espace sonore quelconque ? Bien sûr, on peut imaginer d'appliquer des formes encore plus extravagantes sur les murs afin d'obtenir une dispersion plus importante de l'onde sonore. L'inconvénient majeur de ce type d'approche, est que l'on ne maîtrise pas réellement le problème : quelles sont les directions exactes de diffusion, leur densité leur énergie attachée à chaque direction ? Autant de questions où l'intuition ne suffisait plus. Des physiciens ont donc été conduits à suivre une démarche plus rationnelle, à la recherche de la forme optimale d'un mur dans le cas où un son le frapperait sous un angle d'incidence quelconque, afin qu'il puisse disperser l'onde sonore aussi largement que possible.

En 1979, l'acousticien M.R. Schroeder découvrit un type nouveau de diffuseur basé sur la théorie des nombres aléatoires et qui avait la faculté de renvoyer une même quantité d'énergie dans toutes les directions, baptisé « Quadratic Residue Diffusor » ou plus communément diffuseur QRD ou diffuseur de Schroeder.

## ii. Dimensionnement :

Dans un esprit de clarté et pour mieux comprendre les mécanismes de base, raisonnons dans un premier temps avec une seule fréquence, bien que la généralisation de la théorie s'étende à l'ensemble du spectre audible. Schroeder a démontré qu'il était possible de disperser une onde sonore dans toutes les directions à la fois tant dans le plan vertical que horizontal. La surface du diffuseur, dont les dimensions géométriques sont proportionnelles à la longueur d'onde, doit être établie de manière à diffuser l'énergie sonore dans des directions aléatoires.

Il est possible de définir des séquences répétées périodiquement un nombre infini de fois mais on peut très bien restreindre la démonstration de leur effet à une séquence unique. L'exemple sur la *Figure 43* montre le profil d'un diffuseur calculé avec une séquence de longueur  $N=15$ . En fait, il existe une fonction spatiale mathématique représentative des coefficients de réflexion de l'onde sonore. Le modèle de réflexion est intimement lié à la théorie de la transformée de Fourier, c'est-à-dire de la puissance spectrale de cette séquence.

Sans entrer plus en avant dans la théorie, nous pouvons dire que, si nous sculptons un mur dont le profil ressemble à la séquence pseudo aléatoire  $N=15$ , pour une onde acoustique frappant le mur dans une seule direction, on peut s'attendre à la diffusion de près de 15 angles de réflexion différents, mais canalisant tous la même intensité.

Comme on peut le constater sur la *Figure 43*, le profil du diffuseur est proportionnel à une certaine longueur d'onde  $\lambda$ . Il

n'est donc efficace qu'à la fréquence déterminée par le rapport  $\frac{c}{\lambda}$ . Ainsi, pour une fréquence donnée, nous obtenons une surface optimale, nous garantissant une diffusion maximum.

Pour la généralisation à toutes les fréquences, le profil de la surface diffusante n'est plus de profondeur fixe mais aléatoirement distribué.

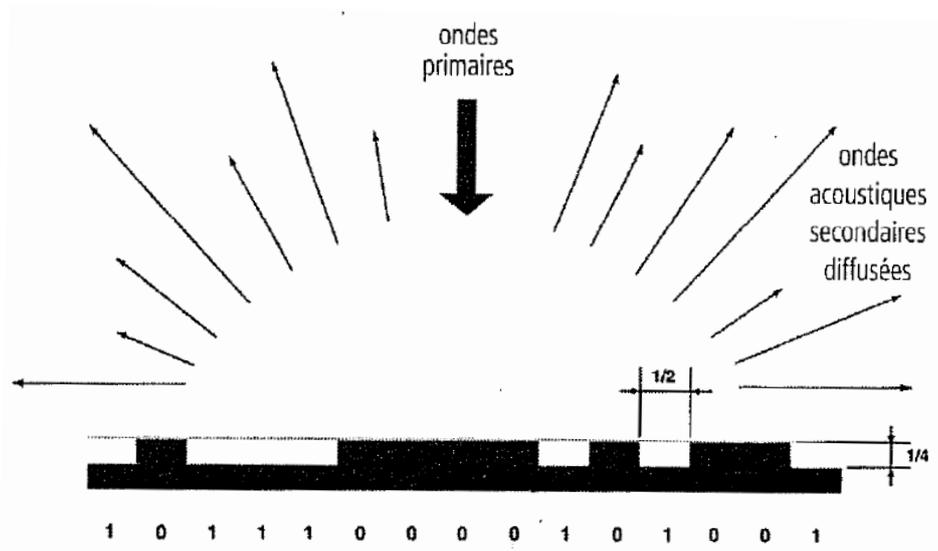


Figure 43 : Séquence diffusante de nombre aléatoire N=15

Pour obtenir une séquence originale architecturalement, on se base sur le modèle de diffuseur défini en Figure 43 dans lequel, on intègre des diffuseurs de type QRD dans les parties pleines.

Le concept du diffuseur de Schroeder, voir Figure 44, est de construire une surface plate réfléchissante avec des parties possédant des impédances variables connues.

Ceci est réalisé en disposant une série de cellules (ou rainures) de différentes profondeurs spécifiques respectant une séquence périodique basée sur les résidus (restes) de la fonction quadratique suivante :

$$s_n = n^2 \text{ mod}(N) \quad [20]$$

Où,

$s_n$  est la séquence des profondeurs relatives des puits

$n$  est un nombre entier positif  $\{0, 1, 2, 3, \dots\}$  représentant un puits

$N$  est un nombre premier positif

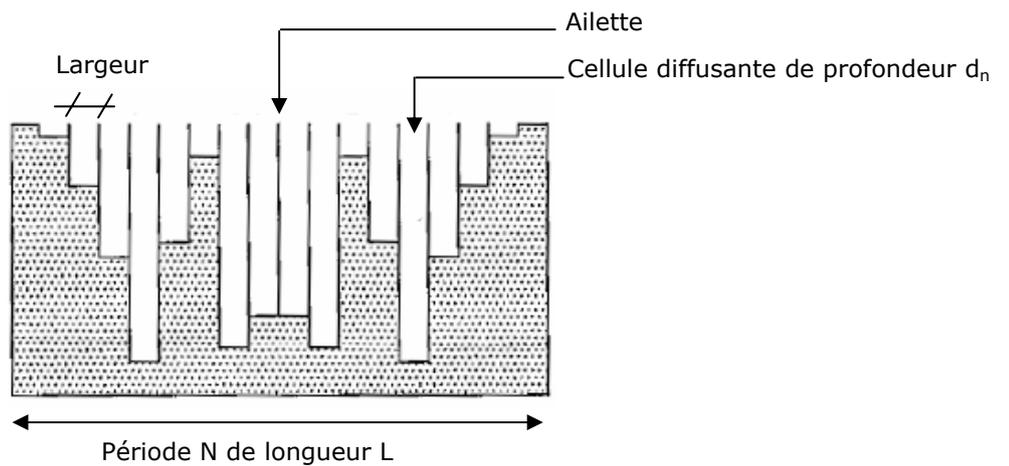


Figure 44 : Vue en coupe d'un diffuseur QRD

La profondeur,  $d_n$ , de la  $n^{\text{ième}}$  cellule se définit par la formule :

$$d_n = \left( \frac{\lambda}{2N} \right) s_n \quad [21]$$

Où,  $s_n = (n^2 \bmod N)$  pour  $n = 0, 1, 2, \dots$

Et,  $N$  est un nombre premier.

Exemple, pour  $N = 11$  et pour  $n = 0, \dots, 10$ , on obtient la séquence suivante :

$$s_n = [0,1,4,9,5,3,3,5,9,4,1] \quad [22]$$

**La procédure pour dimensionner un QRD est la suivante :**

- i. On définit une plage de fréquence (raisonnable) de  $f_{\text{low}}$  à  $f_{\text{high}}$  à diffuser. La période  $N$  est déterminée par le

$$\text{ratio} \frac{f_{\text{high}}}{f_{\text{low}}}.$$

- ii. La largeur de chaque rainure doit être petite comparée à la longueur d'onde de la plus haute fréquence :

$$W \leq \frac{c_0}{2f_{\text{high}}}$$

- iii. On calcul la profondeur de chaque rainure, avec  $\lambda = \frac{c_0}{f_{\text{low}}}$  appelée longueur d'onde dimensionnante.

Pour choisir la fréquence dimensionnante, une indication peut-être utile, c'est la fréquence de Schroeder. C'est la fréquence qui sépare le comportement « résonnant » et le comportement « réverbérant » de la salle. On doit donc avoir  $f_{\text{low}}$  **supérieure à la fréquence de Schroeder**.

**Note 1 :** Il faut que la largeur des rainures soit constante et que cette largeur n'excède pas la moitié de la longueur d'onde de la fréquence dimensionnante. Schroeder conseille de prendre :  $0,137 * \text{longueur d'onde dimensionnante}$ .

**Note 2 :** Il est préférable, lors du choix du nombre  $N$  que la valeur de  $(N-1)$  se décompose uniquement en produit de nombres premiers à la puissance 1.

On s'impose comme contrainte géométrique, une épaisseur,  $h = 0,15 \text{ m}$  pour la réalisation du diffuseur, en plus de l'épaisseur du voile béton.

Dans ce cas, le modèle défini dans la *Figure 43* possède une diffusion optimale à la fréquence  $f = \frac{c_0}{4 * h} = 570 \text{ Hz}$  pour une période de  $L = 4,5 \text{ m}$ .

Ensuite, pour élargir la plage de fréquence diffusée, on intègre dans chaque bloc de béton d'épaisseur  $0,15 \text{ m}$  un diffuseur de type QRD. Le calcul a été mené en sens inverse de la démarche détaillée précédemment, pour partir de la dimension contraignante et arriver à la plage de fréquence diffusée.

En **Annexe 2**, figure un plan avec les détails des dimensions des différents blocs de diffuseurs. En se basant sur la théorie précédente et sur la dimension contraignante ( $h = 0,15 \text{ m}$ ), on obtient :

- Un bloc (noté *bloc 2*) de largeur  $1,20 \text{ m}$ , défini avec une séquence de 19 cellules de largeur  $6 \text{ cm}$  et possédant une plage de fréquence optimale pour la diffusion allant de  $850$  à  $3000 \text{ Hz}$
- Un bloc (noté *bloc 3*) de largeur  $0,60 \text{ m}$ , défini avec une séquence de 7 cellules de largeur  $7,5 \text{ cm}$  et possédant une plage de fréquence optimale pour la diffusion allant de  $850$  à  $2500 \text{ Hz}$

Cette séquence à l'avantage, pour la salle de Sens, de laisser la possibilité de mettre en place des matériaux absorbants entre les blocs diffusants ou de les laisser réfléchissants. Mais, il permet aussi de laisser des surfaces planes libres pour permettre ultérieurement la fixation de différents appareils.

Plusieurs configurations ont d'abord été dimensionnées mais seule celle retenue sera présentée. Cette solution optimise le nombre de cellules de chaque QRD en tenant compte des plus petites dimensions que l'on peut obtenir en béton.

La solution choisie est présentée en **Annexe 2**.

Dans le but, à la fois de concevoir un modèle de diffuseur pour la salle de spectacle et de perfectionner la méthode de modélisation des résultats fournis par CATT Acoustic en matière de diffusion, il a été entrepris de construire un prototype en bois à l'échelle 1 de cette séquence diffusante.

### 3.2.2 Déroutement de la construction du prototype

Pour la fabrication du prototype, il a fallu définir un mode constructif permettant la réalisation, par nos soins, dans le local de mesure, possédant une certaine modularité afin d'étudier plusieurs configurations et suffisamment léger pour être déplacé et manipulé aisément. Nous avons voulu profiter de la construction de ce modèle pour étudier l'influence de la présence des fines séparations, entre les cellules diffusantes, que nous appellerons désormais ailettes. Nous avons donc pensé le modèle pour qu'il soit modulaire au niveau de la configuration mais aussi pour pouvoir ajouter ou retirer aisément les ailettes.

Le prototype a donc été réalisé en bois MDF (medium) d'épaisseur 10 mm. Afin d'éviter le phénomène de « peau de tambour » il doit être rempli. Pour ce faire, nous l'avons réalisé dans un premier temps en panneaux de mousse polyuréthanes, identiques à ceux utilisés pour l'isolement thermique des dalles de béton. Nous nous en sommes servi comme un modèle sur lequel on a plaqué les panneaux de bois. Cette technique permet un assemblage aisé par collage en évitant les nombreux systèmes d'équerrage qui auraient été nécessaires pour une telle structure. De plus, cela permet un gain important de matière, de poids et une solution économiquement avantageuse.

Le prototype en quelques chiffres :

- Plus de 200 éléments en bois
- Plus de 110 éléments en polyuréthane
- Plus d'un kilogramme de colle
- 10 jours de travail pour la fabrication
- Une surface recouvrant plus de 10 m<sup>2</sup>
- Un poids avoisinant les 250 kg séparés en 10 éléments modulaires
- Un coût total avoisinant les 900 € (fourniture, hors temps de pose)

Sachant qu'un élément diffusant, de type QRD en bois, vendu par les grandes marques comme RPG coûte en moyenne 500 €, pour un bloc de 1,20 m x 0,60 m, il nous en aurait coûté plus de 3800 € pour l'ensemble de la séquence.

Un montage photo de la réalisation du prototype est présenté en **Annexe 3**.

Les ailettes ont été réalisées de manière à être assemblées facilement par vissage sur le pourtour de la structure. Un système de picots fixés sur la tranche des ailettes vient s'encastrent au fond du prototype pour assurer la rigidité des ailettes.

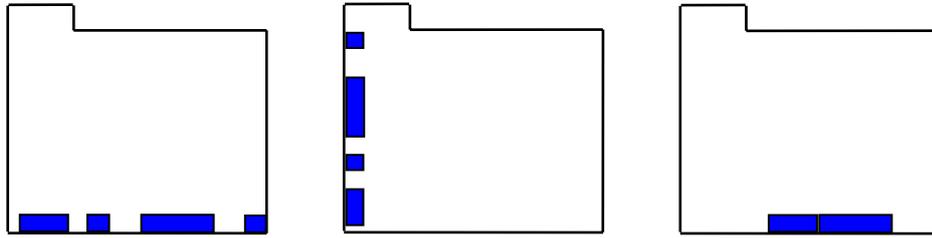
### 3.3 Comparaison des résultats de mesures et des simulations CATT Acoustic

De la même manière que pour les mesures du local vide, nous avons utilisé une source omnidirectionnelle avec un signal MLS pour l'émission et un microphone avec carte d'acquisition pour la réception.

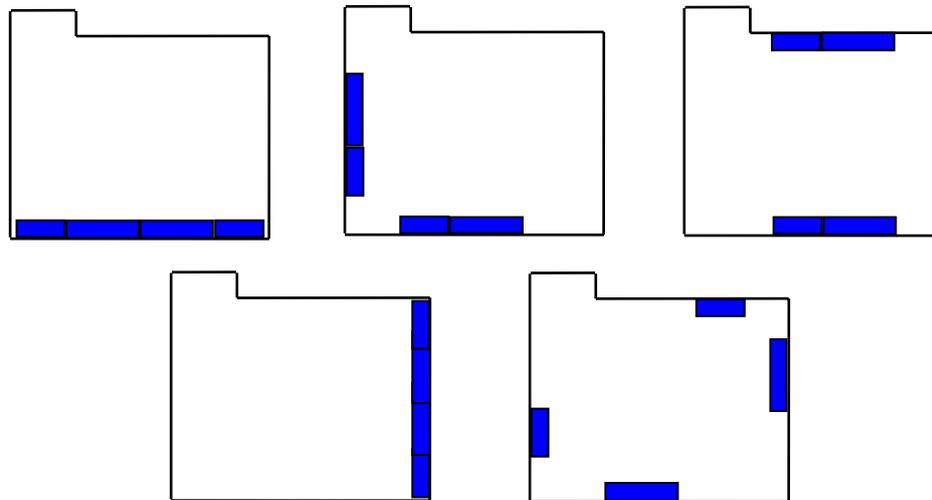
La modularité des éléments diffusants a permis d'étudier plusieurs configurations et pas uniquement celle de la séquence diffusante.

Voici les différentes configurations étudiées :

**Diffuseur hauteur 2,40 m :**



**Diffuseur hauteur 1,20 m :**



**Figure 45 :** *Différentes configurations des diffuseurs utilisées lors de la mesure*

Les mesures ont été réalisées avec, puis sans la présence des ailettes en prenant le soin de conserver exactement les mêmes positions de sources et de microphones.

De nombreux points de mesures ont été réalisés, pour des positions de sources différentes et ce, en répétant chaque mesure plusieurs fois afin d’obtenir un échantillon caractéristique de la réponse du local à la présence des diffuseurs.

Pour la comparaison, ne sont utilisés que les points de mesures identiques à ceux définis pour le local vide. Les mesures ont été réalisées sans déplacer la source et les microphones pour deux configurations successives.

Un montage photo de la réalisation des mesures est présenté en **Annexe 4**.

### 3.3.1 Résultats des mesures réalisées avec diffuseurs dans le local de mesures

➤ **Critères de qualité :**

Les critères de qualité mesurés sont le TR, l'EDT, le  $C_{80}$  et le  $D_{50}$  (voir définitions en **Annexe 1**).

Critères		Ecart mesures avec diffuseur / mesures salle vide					
		125	250	500	1000	2000	4000
TR en [s]	<i>Sans ailettes</i>	- 0,02	- 0,05	- 0,09	- 0,07	- 0,11	- 0,08
	<i>Avec ailettes</i>	0,01	- 0,07	- 0,11	- 0,12	- 0,24	- 0,21
EDT en [s]	<i>Sans ailettes</i>	0,03	0,01	- 0,09	- 0,05	- 0,05	- 0,02
	<i>Avec ailettes</i>	0,07	0,01	- 0,11	- 0,12	- 0,08	- 0,06
C80 en [dB]	<i>Sans ailettes</i>	2	1	1	1	1	1
	<i>Avec ailettes</i>	2	0	2	2	2	2
D50 en [%]	<i>Sans ailettes</i>	- 0	- 1	3	2	2	4
	<i>Avec ailettes</i>	- 3	0	5	5	6	7

**Tableau 7 :** Ecart des mesures entre configuration salle vide et configuration diffuseurs

D'après les courbes présentées en **Annexe 5**, on note l'impact des diffuseurs sur les critères de qualités. La présence des diffuseurs crée de l'absorption ce qui engendre une baisse notable du temps de réverbération et de l'EDT. Cette absorption n'est, à priori, pas créée par le matériau lui-même mais par les phénomènes de diffusion liés à la complexité de la géométrie. Ce qui rejoint les conclusions que l'on peut trouver dans la littérature acoustique. L'absorption introduite est à priori composée d'une contribution liée au diffuseur lui-même (géométrie pouvant se comporter comme des résonateurs à cavités juxtaposées et comme des diaphragmes pour les ailettes) et d'une contribution correspondant au renvoi des ondes sonores vers des surfaces plus absorbantes (sol, plafond,...). A ce jour, la répartition entre ces contributions est encore mal connue et difficilement quantifiable. Ce type de diffuseur peut donc être utilisé pour influencer la distribution directionnelle du son dans un espace fermé mais aussi comme un absorbant. Bien sûr, il trouve sa place uniquement là où l'on souhaite une correction à une certaine plage de fréquences. Ce résultat démontre le caractère indissociable de la diffusion et de l'absorption.

En ce qui concerne les critères de Clarté et de Définition, on note une amélioration prononcée sur toute la largeur du spectre avec la présence des diffuseurs et ce particulièrement à partir de 500 Hz.

Le diffuseur a donc un impact sur les critères énergétiques, déterminés par le rapport entre l'énergie de la réponse impulsionnelle comprise dans l'intervalle défini (80 ms ou 50 ms après l'arrivée de l'onde directe) sur l'énergie après cet intervalle pour la Clarté ou sur l'énergie totale de la réponse pour la Définition. Une augmentation de la Clarté et de la Définition peut avoir deux causes :

- Une augmentation de l'énergie des réflexions précoces alors que l'énergie totale est identique.
- Une diminution de l'énergie totale alors que l'énergie des réflexions précoces est identique.

Par exemple, la clarté est négative quand l'énergie après 80 ms est supérieure à celle comprise entre 0 et 80 ms. Dans notre cas, il est tout à fait normal d'avoir une Clarté très élevée compte tenu du volume du local et du faible temps de réverbération.

L'intervalle de temps considéré pour la Clarté (80 ms) et la Définition (50 ms) détermine l'énergie utile alors qu'après cet intervalle l'énergie est considérée comme secondaire ou même dans certains cas, nuisible.

Sur ces courbes, on remarque très facilement l'impact des ailettes sur la mesure, surtout en moyennes et hautes fréquences, sur la plage d'efficacité maximale du diffuseur.

On note une diminution de l'absorption liée probablement à la simplification de la géométrie et également une diminution des courbes de TR, EDT,  $C_{80}$  et  $D_{50}$  se situant, de ce fait, entre la courbe représentative de la salle vide et celle des diffuseurs avec ailettes.

Dans ces résultats et comme cité dans le *paragraphe 2.4.4*, on peut se poser la question de la fiabilité des résultats aux basses fréquences (octaves 125 et 250 Hz). En effet, pour ces octaves et dans quasiment toutes les mesures, les valeurs sont assez aléatoires. En revanche, la tendance est nettement marquée pour les octaves suivantes. D'un autre point de vu, on peut se demander si l'efficacité du diffuseur aux basses fréquences n'est pas meilleure sans ailettes, compte tenu de la géométrie « ouverte », qu'avec les ailettes.

➤ **Critères d'intelligibilité :**

Les deux critères d'intelligibilité mesurés sont le RASTI et le STI. Les méthodes de calculs sont similaires sauf que le RASTI utilise les bandes de fréquence 500 et 2000 Hz uniquement et le STI un spectre plus large allant de 125 à 8000 Hz. Les valeurs du RASTI et du STI sont comprises entre 70 et 80% avec des valeurs plus élevées pour le RASTI que pour le STI.

Les écarts entre les mesures réalisées avec les diffuseurs et les mesures salle vide sont présentés dans le tableau suivant :

Critères	Sans ailettes	Avec ailettes
RASTI en [%]	de +1 à +2 pt	de +2 à +3 pt
STI en [%]	de +1 à +2 pt	de +2 à +3 pt

**Tableau 8 :** Apport des ailettes sur les critères d'intelligibilité

Dans l'ensemble, on observe une augmentation du STI et du RASTI avec la présence du diffuseur. L'augmentation étant plus importante avec les ailettes que sans.

➤ **Analyse des échogrammes :**

On peut remarquer, à juste titre, que l'on ne peut, au vue de ces mesures, distinguer si l'amélioration de ces différents critères est due à la diffusion, à l'absorption directe et indirecte engendrée par la présence du diffuseur ou aux deux phénomènes cumulés.

Il faut donc s'intéresser à l'étude de l'échogramme pour observer l'impact du diffuseur sur les premières réflexions. Sur les **Annexes 6, 7 et 8** sont tracés des parties d'échogrammes à différentes échelles, pour la mesure effectuée salle vide et avec la présence des diffuseurs. On observe qu'avec la présence de la séquence diffusante, l'échogramme est plus dense donc les réflexions sont plus nombreuses. De plus, les intensités des pics sont moins importantes. Enfin, l'existence de deux parois réfléchissantes opposées et pas trop éloignées dans la salle vide favorise la création d'allers-retours de l'onde qui pourraient constituer un écho flottant. Cependant, les réflexions sont trop rapprochées en temps pour être audibles. Ce phénomène peut être à l'origine de la partie sinusoïdale de l'échogramme figurant en **Annexe 8**. La présence du diffuseur limite ces allers-retours de l'onde en dispersant celle-ci dans plusieurs directions. De ce fait, la présence du diffuseur s'observe par un aplatissement de la sinusoïde.

➤ **Conclusions des mesures :**

Rappelons que l'impact maximum d'un diffuseur se situe en champ lointain (diffus), ce qui est loin d'être le cas dans nos conditions de mesures. Si les tests étaient réalisés dans une salle de grand volume, nous pourrions espérer obtenir une différence plus marquée au niveau de l'impact des diffuseurs sur les critères de salle.

Il faut également garder à l'esprit que l'impact des diffuseurs est nettement marqué sur les courbes mesurées mais que l'amélioration de l'impression subjective ressentie par un auditeur dans notre local de mesure n'est pas discernable. Il faudrait, pour s'intéresser à l'étude de cette dernière, réaliser les tests dans une salle de grand volume, avec une surface de diffuseurs plus importante, une émission de musique ou de parole (plutôt que de bruit blanc) et un panel d'auditeurs possédant une oreille avvertie.

Enfin, les ailettes jouent un rôle non négligeable, leur présence contribue à l'efficacité du diffuseur dans la plage de fréquence pour lequel il a été dimensionné.

### 3.3.2 Modélisation des diffuseurs dans le logiciel CATT Acoustic

Pour la modélisation des diffuseurs, il a été envisagé plusieurs modèles afin d'étudier la configuration la mieux adaptée à la réalité.

Les différents aperçus des modélisations sont présentés en **Annexe 9** et les configurations sont décrites ci-dessous :

#### **Configuration 1 :**

Le diffuseur est modélisé tel qu'il est en réalité. Tous les détails sont représentés.

Dans cette configuration, la diffusion dite « par défaut » a été appliquée sur chaque partie du diffuseur.

Conditions de test :

- Diffusion « par défaut »
- Diffusion « par défaut » + fonction « auto\_edge » sur chaque cellule diffusante.

#### **Configuration 2 :**

Dans cette configuration, les différentes cellules ont la même profondeur. Chaque cellule est repérée par un plan. La forme de la séquence intégrale a été conservée.

Conditions de test :

- Fonction « estimate » sur chaque cellule diffusante en fonction de leur profondeur
- Fonction « estimate » sur chaque cellule diffusante + fonction « auto\_edge » sur chaque cellule

#### **Configuration 3 :**

On retrouve la même configuration que la précédente, à la différence près qu'il n'y a plus de relief. Le diffuseur est à la même profondeur que la paroi.

Conditions de test :

- Fonction « estimate » sur chaque cellule diffusante en fonction de leur profondeur
- Fonction « estimate » sur chaque cellule diffusante + fonction « auto\_edge » sur chaque cellule

#### **Configuration 4 :**

Dans un souci de simplification de la modélisation et afin de gagner du temps à la fois dans la conception du modèle et dans le temps de calcul, seule la séquence intégrale est modélisée, les diffuseurs sont considérés comme des « blocs ».

Conditions de test :

- Diffusion « manuelle » sur chaque bloc modélisant les différents diffuseurs
- Diffusion « manuelle » sur chaque bloc + fonction « auto\_edge » sur chaque bloc diffusant

#### **Configuration 5 :**

De la même manière que pour la configuration 3, on retrouve les mêmes caractéristiques que le modèle précédent mais en éliminant le relief de la séquence diffusante.

Conditions de test :

- Diffusion « manuelle » sur chaque bloc modélisant les différents diffuseurs
- Diffusion « manuelle » sur chaque bloc + fonction « auto\_edge » sur chaque bloc diffusant

**Note :** Les coefficients entrés pour la diffusion dite « manuelle » et pour l'absorption sont ceux donnés par la marque RPG (fabricant de diffuseurs) pour le logiciel CATT Acoustic et correspondent au modèle QRD 734. Les mesures du « scattering coefficient » ont été réalisées en suivant la norme ISO/CD 17497 :2000 détaillée précédemment au paragraphe 1.3.3.

Les coefficients utilisés dans les configurations 4 et 5, pour les 8 octaves sont les suivants :

Fréquence en [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Coefficient de diffusion (s) en [%]	12	25	50	75	85	85

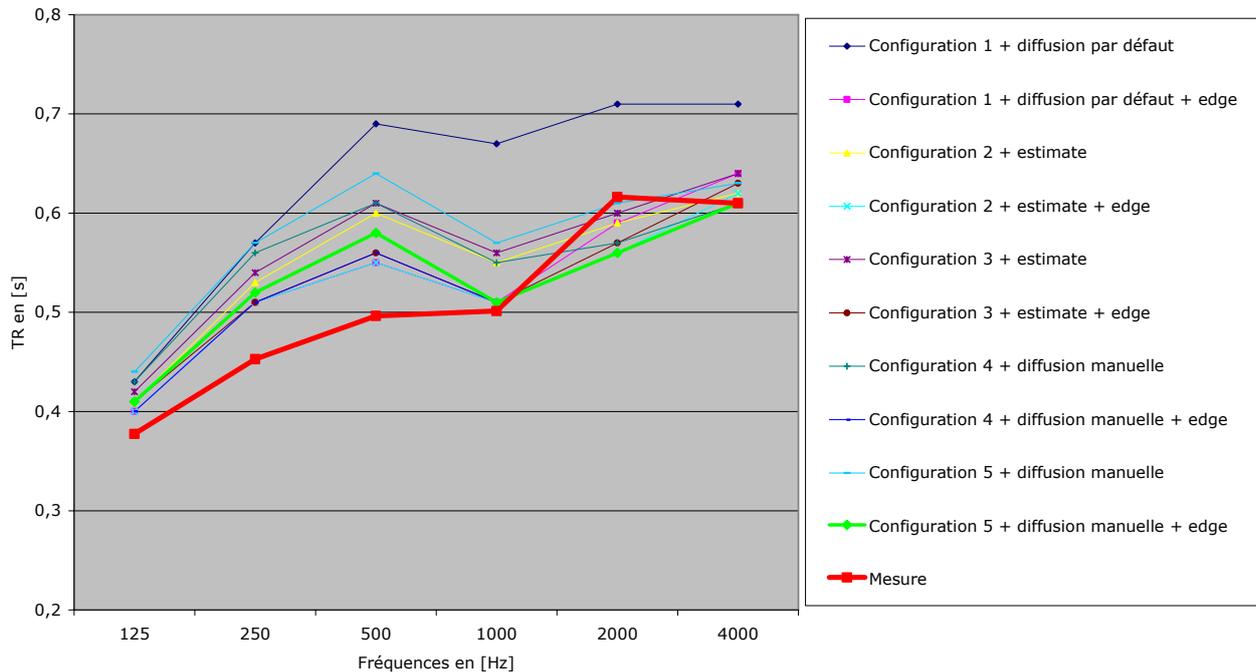


Figure 46 : Test des différentes configurations pour modéliser les diffuseurs

En observant le graphique de la Figure 46, on peut remarquer que toutes les courbes sont proches de celle obtenue par la mesure. La courbe la plus éloignée est celle de la configuration 1, du diffuseur modélisé avec tous ses détails et avec une diffusion standard sur chacune des facettes. On peut ainsi vérifier qu'un nombre important de détails, en plus d'un temps de calcul plus long, n'aide pas pour obtenir une bonne fiabilité des résultats.

Les courbes les plus proches de la courbe mesurée sont pour les configurations 2, 3, 4 et 5 avec l'application de la fonction « auto\_edge ».

De cette remarque, on en déduit l'efficacité de la fonction « estimate ». Comme nous avons pu le voir précédemment (voir paragraphe 2.3.6), l'influence de l'ordre de grandeur dans la formule est importante ce qui entraîne des valeurs du coefficient de diffusion calculé par la fonction « estimate » élevées. L'efficacité de la formule ne serait sans doute pas la même pour des aspérités de l'ordre du millimètre.

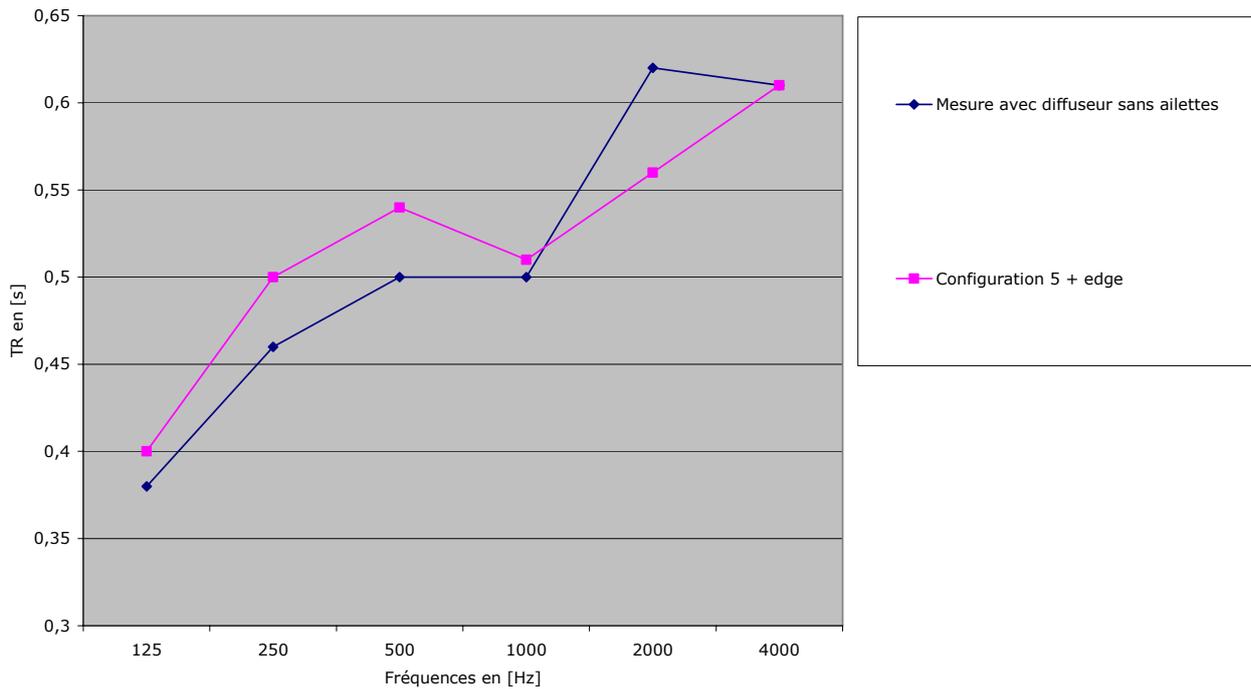
L'avantage de la configuration 5 est qu'elle permet une modification aisée du coefficient de diffusion et permet ainsi une meilleure adaptation du modèle au cas réel. De plus, le temps requis pour la modélisation et pour le calcul est bien plus court car le modèle est plus simple avec un nombre beaucoup plus faible de plans.

Dans la suite, nous allons conserver uniquement la modélisation effectuée à partir de la configuration 5 en modifiant les coefficients de diffusion pour adapter les résultats fournis par CATT Acoustic à ceux mesurés.

Pour se placer dans la même configuration que la séquence diffusante prévue pour la salle de Sens, on cherchera à caler la modélisation sur les résultats obtenus avec les diffuseurs sans ailettes.

### 3.3.3 Réglage des coefficients de diffusion du modèle CATT Acoustic

Afin de pouvoir comparer les différents critères de salle, il faut régler les coefficients de diffusion pour caler la courbe du temps de réverbération prédite avec diffuseurs sur celle mesurée. Si l'on observe les courbes de la Figure 47, on peut remarquer que la courbe de la modélisation s'écarte de la courbe mesurée avec un écart maximum à l'octave centrée sur la fréquence 500 Hz. Cette différence est probablement due au fait que l'on ait tenu compte, dans un premier temps, d'un coefficient de diffusion uniquement sur les blocs diffusants dimensionnés comme des QRD. Ces blocs possèdent une plage de fréquence pour la diffusion allant de 850 à 3000 Hz. Cependant, la forme de la séquence totale diffuse également et possède une fréquence optimum pour la diffusion située entre 500 et 600 Hz.



**Figure 47 :** Courbe montrant l'écart maximum à 500 Hz entre la modélisation et la mesure

Il faut donc tenir compte de cette diffusion supplémentaire dans la modélisation si l'on veut coller à la réalité.

Pour ce faire, on a conservé les coefficients appliqués aux blocs diffusants, cités au *paragraphe 3.3.2*. Puis, on a ajouté de la diffusion sur les parties séparant les blocs. Cette diffusion est maximum à 500 Hz et décroît de part et d'autre de cette valeur.

Voici les coefficients utilisés :

*Pour les blocs diffusants :*

Fréquence en [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Coefficient de diffusion en [%]	12	25	50	75	85	85

*Pour les parties intermédiaires :*

Fréquence en [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Coefficient de diffusion en [%]	50	70	90	50	25	12

On peut donc observer, sur les courbes de la *Figure 48*, un meilleur ajustement de la courbe prenant en compte la diffusion créée par la séquence entière :

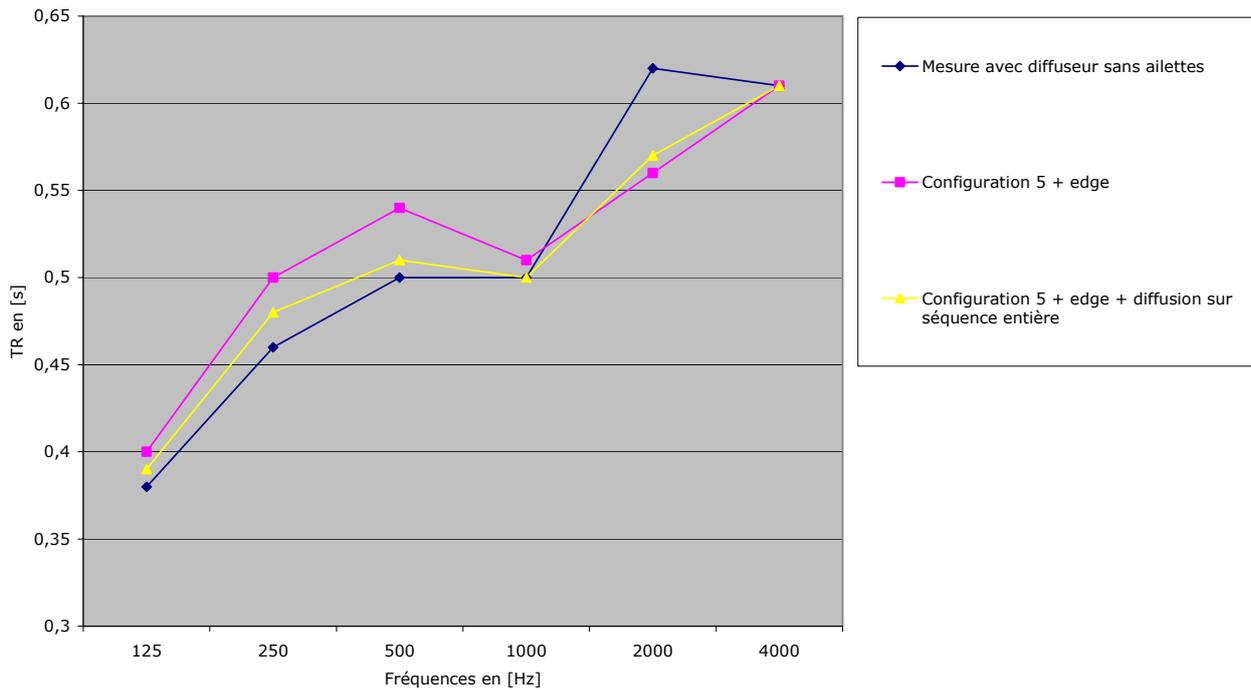


Figure 48 : Test des différentes configurations pour modéliser les diffuseurs

### 3.3.4 Comparaison du modèle avec les résultats de la mesure avec diffuseurs

Maintenant que les courbes des valeurs prédites du temps de réverbération sont ajustées sur celles mesurées, on peut étudier le résultat sur les principaux critères : STI, RASTI, C80 et D50.

#### ➤ Critères de qualité :

Les courbes présentées en **Annexe 10** montrent qu'il existe une bonne corrélation entre les résultats prédits par CATT Acoustic et les mesures in-situ.

Mis à part les problèmes aux basses fréquences, liés aux simplifications faites sur le comportement vibratoire de l'onde, les résultats sont assez précis sur l'ensemble du spectre. Les courbes de la Clarté et de la Définition estimées par le logiciel sont proches de la réalité. Les résultats du logiciel avec la présence des diffuseurs correspondent également au cas réel. Ces courbes sont comprises entre le cas du diffuseur avec ailettes et celui sans ailettes. Compte tenu du faible écart existant entre ces deux configurations (avec ailettes et sans ailettes) on peut considérer que la précision est tout à fait acceptable. Pour s'en convaincre voici un tableau résumant les erreurs relatives :

Critères		Erreurs relatives en [%] modélisations / mesures					
		125	250	500	1000	2000	40000
C80	<i>Salle vide</i>	- 13	- 5	1	0	- 3	5
	<i>Diffuseurs sans ailettes</i>	6	- 2	- 2	- 4	- 8	8
D50	<i>Salle vide</i>	- 7	- 3	1	- 1	- 1	2
	<i>Diffuseurs sans ailettes</i>	- 7	- 7	0	- 2	- 3	3

Tableau 9 : Erreurs relatives entre la modélisation et la mesure

L'erreur relative est dans tous les cas inférieure à 10% et même à 5% pour la modélisation de la salle vide.

En ce qui concerne l'EDT, les résultats ne sont pas significatifs car difficilement exploitables, le critère n'est pas adapté dans ce cas. Car, contrairement au TR (intervalle de temps correspondant à une décroissance de 60 dB du niveau d'intensité acoustique. Ici, estimé entre -5 dB et -35 dB et rapporté à 60 dB) utilisé pour la parole et la musique, l'EDT

(étude de la décroissance de 0 à -10 dB rapporté à 60 dB) est préféré pour la musique. L'idée de limiter la dynamique de la mesure à 10 dB provient du fait que, lors d'un concert, l'oreille n'a que rarement la possibilité d'entendre la décroissance du son sur une grande dynamique.

Sa valeur est à comparer au résultat du TR-60, elle révèle la balance entre l'énergie précoce et l'énergie totale. Plus l'énergie est concentrée dans le début de la réponse (son utile) plus la pente sera forte et donc plus l'EDT correspondant sera court. L'EDT a l'avantage de mieux tenir compte de l'influence des premières réflexions et d'être proche du jugement subjectif des spectateurs.

Pour une même salle, un même volume, on remarque une différence significative entre les valeurs du TR-60 et de l'EDT. Cependant, ces dernières varient beaucoup plus vite en fonction de la position que le TR-60. Le déplacement du microphone dans le local induit une forte variation de l'EDT qui n'est pas forcément observé sur les résultats du logiciel CATT. En simplifiant les ondes sonores par des rayons dans ses méthodes de calculs, le logiciel CATT Acoustic ne tient pas compte de l'état vibratoire du son. Les résultats donnés pour plusieurs positions de récepteurs varient que très sensiblement (de l'ordre de 0,01). Alors qu'en réalité, un déplacement de quelques centimètres du microphone accuse de très nets changements sur les résultats. C'est pourquoi, nous ne pouvons comparer les résultats de l'EDT mesuré à ceux fournis par le logiciel.

On a également cherché à s'intéresser aux résultats de la Clarté et de la Définition pour des intervalles autre que 80 et 50 ms (paramètres définis pour l'étude de salles de grands volumes de type salle de spectacle, auditorium,...) comme par exemple 10 et 20 ms (normalement mieux adaptés aux dimensions du local de mesure).

En effet, ces critères sont basés sur des rapports d'énergie du son réfléchi. Un intervalle de 80 ms correspond à une distance de propagation du son de 28 m et de 17 m pour 50 ms. Ces dimensions sont représentatives des dimensions longitudinales des salles de spectacle, des théâtres et des auditoriums. Etant donné les faibles dimensions de notre local, il est intéressant de s'intéresser à ce qui se passe pour des intervalles plus restreints correspondant aux distances des premières réflexions. Dans notre cas, des intervalles de 10 et 20 ms, correspondant à une distance de propagation du son respectif de 3,5 et 7 m devraient être mieux adaptés. Mais, pour les mêmes raisons que l'EDT, les résultats ne sont pas exploitables car liés à la position du microphone. Nous supposons, que la variation du niveau de pression sonore due aux ondes stationnaires et surtout la proximité des parois ont un impact important sur la typologie des réflexions de la partie précoce de l'échogramme. Ce qui a pour effet de fournir des résultats irréguliers et aléatoires. Le nombre de positions de nos points de mesures reste trop faible pour parvenir à une moyenne concluante.

#### ➤ Critères d'intelligibilité :

Les critères de qualité sont, comme pour la mesure, situés entre 70 et 80%. Mais à l'inverse de la mesure, le STI a tendance à être plus haut que le RASTI. Il faut signaler que le STI se calcule sur une plage de fréquence de 125 à 8 kHz et que dans CATT Acoustic, les valeurs à 8 kHz sont une extrapolation des valeurs à 4 kHz et non calculées à partir de la réponse impulsionnelle.

Il n'est pas évident, pour ces deux valeurs, de comparer les résultats des mesures et de CATT car comme pour l'EDT les valeurs varient beaucoup suivant les points de mesure. En revanche, on peut dire que les ordres de grandeur sont respectés lorsque l'on compare l'écart entre les résultats salle vide et les résultats avec la présence des diffuseurs. Le RASTI suit une augmentation de 2 points et le STI une augmentation de 1 point. De manière générale, le STI et le RASTI valent entre 72 et 74% salle vide et entre 74 et 77% avec les diffuseurs et ce, pour la modélisation et les mesures.

### 3.4 Application à la salle de Sens

Au vu de ces résultats, l'application de ce modèle à une salle de concert semble intéressante. Il est donc envisagé de mettre en place cette séquence sur les murs latéraux et éventuellement sur les bergeries. La séquence sera répétée un nombre suffisant de fois pour couvrir une grande partie de la longueur et de la hauteur de la salle.

D'un point de vue acoustique, cette séquence diffusante semble intéressante pour répondre au cahier des charges imposé. D'un point de vue technique, la construction de ce modèle en béton coulé en place en même temps que l'enveloppe de la structure reste un point à approfondir. Après quelques recherches, nous avons trouvé une entreprise capable de créer des matrices de moulage sur mesure à placer dans un fond de coffrage ou dans une banche pour obtenir le motif souhaité.

Ces matrices sont réalisées à partir d'un élastomère de polyuréthane suffisamment rigide pour éviter les déformations liées au poids du béton lors du coulage et suffisamment élastique pour permettre un décoffrage sans arrachement du béton. Avec cette méthode, on peut normalement réaliser sans problèmes les différentes profondeurs constituant le diffuseur. Par contre, pour de telles profondeurs (maximum 15 cm) un béton vibré n'est pas suffisant, le choix d'un béton autoplaçant doit être fait. Une matrice peut être réutilisée un grand nombre de fois, d'où l'intérêt économique de la solution pour un motif redondant.

Pour appuyer l'idée de ce diffuseur en béton auprès de la maîtrise d'œuvre et pour vérifier que cette solution est adaptée aux exigences du cahier des charges, nous avons réalisé un chiffrage. Nous avons comparé cette solution à d'autres tarifs de traitements acoustiques communément utilisés ou qui devraient être appliqués si l'on ne mettait pas en place ces diffuseurs en béton. Nous avons également fait réaliser un devis pour la fabrication et la pose de diffuseurs en bois massif, vernis et ignifugés selon le même modèle que la séquence diffusante dimensionnée.

Sans entrer dans les détails, voici ce qui ressort de cette étude :

Réalisation des diffuseurs en béton brut de décoffrage (fournis + coulés) :	119 €/m <sup>2</sup>
Réalisation des diffuseurs en bois massif (fournis + posés) :	550 €/m <sup>2</sup>
Tissus tendu + laine minérale (l.m.) (fournis + posé) :	75 €/m <sup>2</sup>
Doublage 2 Ba13 + l.m. sur ossature Mégastil (fournis + posé) :	120 €/m <sup>2</sup>
Surcoût Ba13 perforé :	5 à 6 €/m <sup>2</sup>
Surcoût pour soin à apporter pour la réalisation d'un béton brut de décoffrage :	30 €/m <sup>2</sup>

Notre solution est économiquement intéressante, répond à la demande du cahier des charges en matière de finitions aux lignes brut qualifiée de « style industriel » et apporte une valeur ajoutée à l'acoustique interne du fait de l'absence de doublage, généralement générateurs d'absorption ou résonances mal maîtrisées et non souhaitables en basses fréquences.

Cette solution paraît donc répondre au cahier des charges tout en proposant certaines performances d'un point de vu acoustique.

Appliquons ces données à la salle de Sens et vérifions l'impact des diffuseurs par rapport à un mur en béton lisse, grâce à la modélisation de la salle faite sous le logiciel CATT Acoustic. Etudions si l'impact de ces diffuseurs sur un plus grand volume est significatif.

Voici un aperçu de la modélisation de la salle de spectacle du complexe intercommunal de Sens :

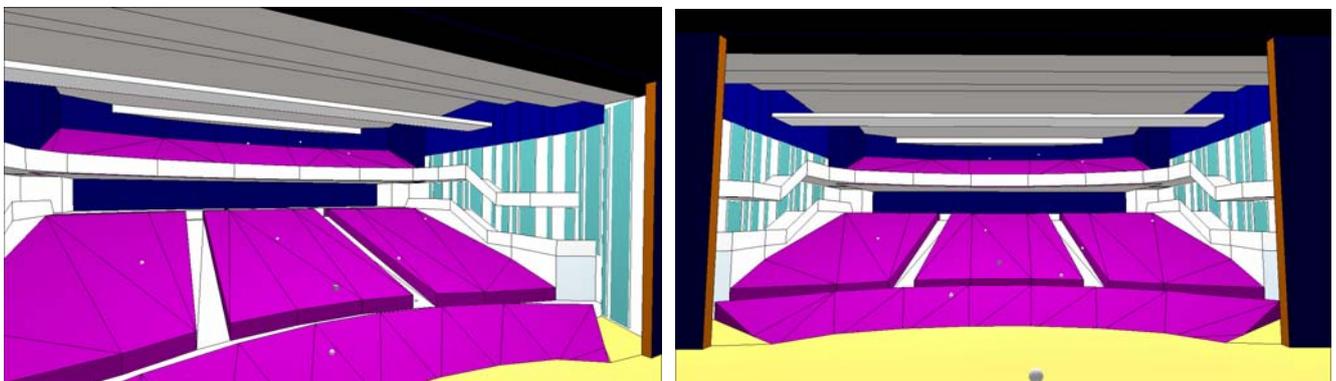
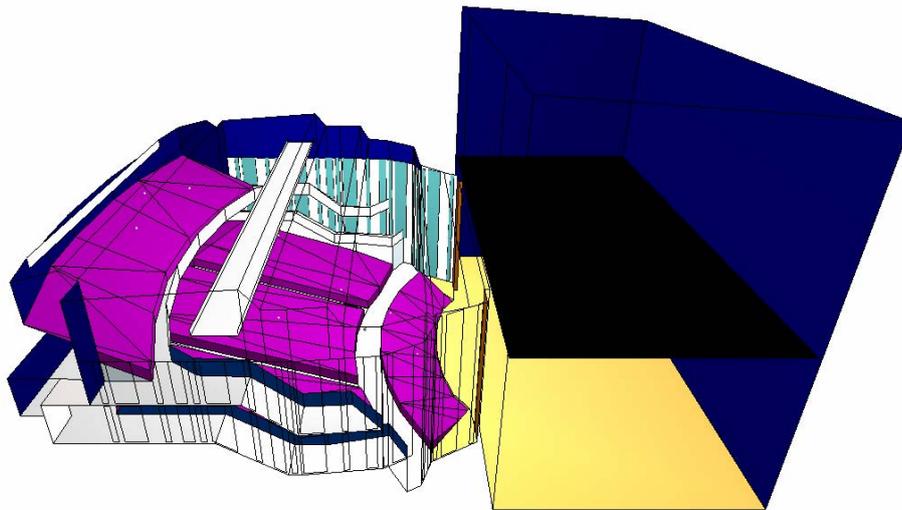


Figure 49 : Aperçus de la modélisation de la salle de Sens

**Note :** Au moment de mon étude la simulation modélisée pour la salle de spectacle n'est pas la solution définitive. Certains coefficients et matériaux ne sont pas encore définis. Les valeurs annoncées ci-dessous sont donc des résultats intermédiaires.

Les positions des points des récepteurs dans la simulation sont nombreuses et à des positions aléatoires afin que les résultats reflètent suffisamment bien le comportement de la salle.

Les résultats de la simulation sont résumés dans les tableaux suivants :

➤ Critères de qualité :

Configuration	Temps de réverbération en [s]					
	125	250	500	1000	2000	4000
<i>Murs lisses</i>	1,50	1,24	0,98	0,92	0,92	0,80
<i>Murs avec diffuseurs</i>	1,39	1,14	0,85	0,79	0,82	0,76
<i>Ecart lisse / diffuseur</i>	- 0,11	- 0,10	- 0,13	- 0,13	- 0,10	- 0,04

Configuration	Clarté C80 en [dB]					
	125	250	500	1000	2000	4000
<i>Murs lisses</i>	3,3	4,6	6,7	6,8	6,6	7,5
<i>Murs avec diffuseurs</i>	3,8	4,7	7,3	7,1	7,0	8,3
<i>Ecart lisse / diffuseur</i>	0,5	0,1	0,6	0,3	0,4	0,8

Configuration	Définition D50 en [%]					
	125	250	500	1000	2000	4000
<i>Murs lisses</i>	53,5	57,2	67,2	68,1	67,2	69,2
<i>Murs avec diffuseurs</i>	55,8	59,8	70,4	71,9	70,5	73,0
<i>Ecart lisse / diffuseur</i>	2,3	2,6	3,2	3,8	3,3	3,8

**Tableau 10 :** Résultats de la modélisation de la salle de Sens pour les critères de qualité

Afin de pouvoir comparer les écarts des résultats des prédictions pour la salle de Sens avec ceux du local de mesure, voici un tableau récapitulatif des écarts pour la modélisation du local de mesure :

Configuration	Ecart salle vide / avec diffuseur local mesure					
	125	250	500	1000	2000	4000
<i>TR en [s]</i>	0	-0,03	-0,08	-0,07	-0,08	-0,08
<i>C80 en [dB]</i>	0,1	0,6	1,4	1,3	1,2	0,9
<i>D50 en [%]</i>	0	2	3,9	3	3,3	2,8

**Tableau 11 :** Ecart modélisation / mesure des critères de qualité pour le local de mesure

Les tendances des résultats pour la salle de Sens sont les mêmes que pour les résultats des tests faits dans le local. Les ordres de grandeur sont également respectés bien que pour la Clarté les écarts observés pour la salle de spectacle sont moins importants.

Même en tenant compte, de la note rédigée au début de ce paragraphe, on constate que pour le TR et la Clarté, on répond déjà aux exigences du cahier des charges. En effet, la destination de la salle est principalement pour des spectacles sonorisés avec une exigence particulière à propos de la possibilité de jouer des pièces de théâtre. La salle doit être assez absorbante avec par conséquent un temps de réverbération assez bas (inférieur à 1 s dans les médiums et aigus) et une clarté assez haute (idéalement autour de 6 dB). Cependant, la salle a une teinte trop sèche pour la musique philharmonique mais cette utilisation reste rare comparée au reste. Idéalement, la salle devrait avoir une Clarté comprise entre -2 dB et +2 dB pour la musique et entre +1 dB et +4 dB pour les opéras.

On peut constater que l'influence d'un grand volume n'est pas significative dans ce cas.

➤ Critères d'intelligibilité :

Configuration	RASTI en [%]	STI en [%]
<i>Murs lisses</i>	67,9	67,7
<i>Murs avec diffuseurs</i>	69,5	69,1
<i>Ecart lisse / diffuseur</i>	+ 1,6 pt	+ 1,4 pt

**Tableau 12** : Résultats de la modélisation de la salle de Sens pour les critères d'intelligibilité

L'impact des diffuseurs sur le RASTI et le STI est dans la moyenne de ceux que l'on a pu observer dans le cas du local de mesure, c'est à dire un apport entre +1 et +2 points entre un mur lisse et un mur avec des diffuseurs.

**CONCLUSION :**

Dans cette étude, les résultats des mesures effectuées ont montré une bonne corrélation avec les résultats prédits par le logiciel CATT Acoustic. Malgré les approximations requises au niveau de la prise en compte de la composante diffuse du son réfléchi, une méthode permettant de modéliser celle-ci au mieux a été définie et permet de fiabiliser les résultats.

Cette étude a également permis de constater que les méthodes fournies par le concepteur du logiciel fonctionnent bien, il faut malgré tout que l'acousticien fasse appel à son intuition pour modéliser les cas particuliers.

Dans le local de mesure, l'efficacité de la séquence diffusante dimensionnée est visible mais n'est pas forcément significative sur les critères de salle mesurés. Ces critères n'ayant que peu de sens dans un tel volume, son impact est très probablement plus marqué sur l'homogénéité du champ sonore dans la salle. Les ailettes, ces fines séparations entre les cellules du diffuseur QRD, ont un impact notable sur les résultats mesurés qui ne doit pas être négligé.

Nous ne pouvons pas certifier que les différences mesurées avec la présence des diffuseurs soient audibles pour un auditeur. Mais en tout cas, la mise en place d'éléments diffusants sera toujours plus favorable que la construction d'un mur complètement lisse, à la fois pour le brassage du champ sonore mais aussi pour éviter la présence de phénomènes nuisibles à la qualité d'un lieu d'écoute tels que les échos.

## CONCLUSION

Il est admis que tout objet agit comme un diffuseur dans la gamme de fréquences dont les longueurs d'onde seront proportionnelles à ses dimensions. Cependant, nous avons pu constater dans cette étude qu'il existe des diffuseurs, basés sur la théorie élaborée par Schroeder, permettant d'obtenir une diffusion spatiale homogène pour une plage de fréquences donnée. La conception et la fabrication d'une séquence diffusante faisant appel à cette théorie m'ont permis d'observer l'effet de la diffusion sur certains critères de salle. Les mesures, d'abord réalisées sans, puis avec la présence de diffuseurs, dans un local de mesures, ont permis d'établir une configuration initiale permettant le calage de la modélisation CATT. En appliquant une procédure bien définie pour modéliser la diffusion, nous avons pu observer la corrélation des prédictions avec les résultats des mesures.

En ce qui concerne l'effet des diffuseurs sur la qualité de l'acoustique de la salle, nous avons pu conclure que l'impact était significatif de manière qualitative sur l'échogramme et de manière quantitative sur les critères de qualité tels que le temps de réverbération, la clarté et la définition et sur les critères d'intelligibilité tels que le STI. Cet impact est plus marqué avec la présence des séparations entre les cellules d'un diffuseur (ailettes). L'étude des limites de la mesure a permis de définir un intervalle de fiabilité de nos résultats. Nos conclusions s'appliquent donc pour la plage de fréquences allant de 500 à 4000 Hz. Pour les bandes d'octaves centrées sur les fréquences 125 et 250 Hz, il est possible que la difficulté de mesurer en basses fréquences, liée à la présence soutenue des ondes stationnaires, ne permettent pas de conclure avec rigueur sur l'efficacité du diffuseur. Rappelons tout de même que la séquence diffusante a été dimensionnée pour diffuser de manière optimale une plage de fréquences allant de 500 à 3000 Hz, l'intérêt de la mesure est donc ciblé sur cet intervalle. Les mesures ont également révélé un effet d'absorption non négligeable dû à la présence des diffuseurs. La dispersion du son causée par la séquence diffusante modifie les directions de propagation du son vers des parois plus absorbantes et peut contribuer à diminuer le temps de réverbération en augmentant l'absorption totale du local. De plus, la géométrie particulière du diffuseur est propice à la création de phénomènes engendrant de la diffusion. Concernant les résultats de la modélisation fournis par le logiciel CATT, il existe une bonne corrélation entre les critères mesurés et ceux prédits. La combinaison de la méthode conseillée par le concepteur du logiciel et les différentes fonctions proposées permettent de modéliser fidèlement les phénomènes de diffusion. Mon étude m'a permis d'avoir un œil critique sur la modélisation de la diffusion et sur l'interprétation des résultats fournis par le logiciel CATT. Malgré la complexité du son et de sa propagation liée à sa nature ondulatoire, les moyens calculatoires permettent de s'approcher suffisamment de la réalité pour utiliser ces prédictions dans le but d'améliorer la qualité de l'acoustique d'un espace fermé.

Cette étude avait pour objectif d'optimiser, pour les acousticiens du LASA, la procédure de modélisation de la diffusion dans le logiciel CATT. La conception de la salle de Sens a, quant à elle, donné un but direct à mon étude en procurant un cahier des charges imposant la mise en place d'éléments diffusants. Elle a ainsi guidé mon étude, à la fois théorique en me permettant d'approfondir la théorie de Schroeder et pratique, en nécessitant la réalisation d'un prototype.

Les différentes fonctions permettant de modéliser la diffusion dans le logiciel ont été passées en revue et les algorithmes de calculs définis. Les limites ont donc pu être mises en avant afin de permettre une meilleure interprétation des résultats prédits par CATT. Cette étude a donc permis d'optimiser la façon d'aborder la diffusion dans le logiciel. Cette étude pourrait être élargie en s'intéressant à la comparaison d'un nombre important de salles, différentes en géométrie et en qualité subjective, et pour un panel plus large de critères de salle. Il serait également intéressant de développer l'impact de la diffusion sur la perception subjective d'une salle en faisant appel à des musiciens professionnels possédant une oreille avertie.

## METHODE PROPOSEE POUR MODELISER LA DIFFUSION DANS LE LOGICEL CATT

### *i. Définition de la géométrie de la salle*

- ✓ La **modélisation des détails** : il n'y a pas de règle générale mais suite aux différents tests effectués les conclusions suivantes peuvent être apportées :
  - ➔ La modélisation de nombreux détails permet d'augmenter la précision dans les hautes et moyennes fréquences et les formes simples donnent de meilleurs résultats dans les basses fréquences.
  - ➔ Mais, les détails augmentent le temps de calcul.
  - ➔ Mieux vaut utiliser des formes simples avec des coefficients de diffusion bien adaptés.
  - ➔ Il est préférable de modéliser la diffusion des parois par un coefficient plutôt que de faire figurer des détails.
  - ➔ En revanche, les éléments (mobilier,...) engendrant de l'encombrement susceptible de modifier la propagation du son doivent être modélisés par des formes simples sur lesquelles est attribué un coefficient de diffusion.
  
- ✓ L'**auditoire** doit être modélisé par un volume pour tenir compte des effets de bords.
  - ➔ Hauteur du volume 0,90 m (hauteur épaule) avec récepteurs placés à 1,10 m (hauteur oreilles).

### *ii. Choix de la méthode de simulation*

- ✓ La méthode « **Full detailed calculation** » doit être utilisée pour le calcul des différents critères  
Paramétrage :
  - ➔ Nombre de rayons au moins égal à 100 000 pour une salle.
  - ➔ « Truncation time » au moins égal au temps de réverbération estimé.
  - ➔ Cocher l'option « Late part ray-trace » pour les cas particuliers : volumes couplés, forme en « L »,...
  
- ✓ La méthode « **Early part detailed ISM** » doit être utilisée uniquement pour l'étude des premières réflexions mais en aucun cas pas pour le calcul des critères.
  - ➔ Détermination de la présence d'échos, cas des salles ouvertes.

### *iii. Choix des coefficients de diffusion*

- ✓ Valeurs **conseillées** :
  - ➔ Utiliser 10% sur chaque fréquence pour un matériau très lisse de type verre, bois peint, métaux polis,...
  - ➔ Utiliser 20% sur chaque fréquence pour un matériau très légèrement rugueux de type moquette, dalles absorbantes,...
  - ➔ Utiliser 30 % à 125 Hz et augmenter linéairement jusqu'à 70% à 4 kHz sur tout le volume définissant un auditoire.
  - ➔ D'une manière générale, il est préférable de surestimer la diffusion.

- ✓ Pour des **surfaces irrégulières** :
  - ➔ Pour une surface irrégulière, utiliser 80% pour la fréquence de l'ordre de la longueur d'onde ( $c = \lambda \cdot f$ ) et pour celles au-dessus. Et une décroissance linéaire pour celles en-dessous.
  - ➔ Exemple, pour une aspérité de grandeur caractéristique de l'ordre de 0,3 m les valeurs rentrées seront 80 % pour les fréquences 1 à 4 kHz, 60% à 500 Hz, 30 % à 250 Hz et 15 % à 125 Hz.
  
- ✓ Pour les **diffuseurs** du commerce :
  - ➔ **Attention** : Bien distinguer le coefficient de diffusion (« diffusion coefficient »),  $d$ , qui correspond à l'homogénéité du champ diffus, du coefficient de dispersion (« scattering coefficient »),  $s$ , qui correspond à la proportion d'énergie réfléchi de manière diffuse. Dans CATT il faut utiliser le « scattering coefficient »,  $s$ , qui n'est pas celui le plus communiqué par les fabricants de diffuseurs.
  - ➔ Ne pas négliger l'**absorption**. Elle peut généralement varier entre 10 et 20 % pour un diffuseur de base (voir les valeurs ci-dessous), mais des systèmes combinés (perforations, résonateurs, ...) peuvent conduire à des absorptions plus importantes sur certaines fréquences.
  - ➔ A titre indicatif, voici des valeurs pour des diffuseurs de la marque RPG :
    - « QRD 734 » : absorption <23 26 33 23 20 20> et diffusion <15 30 60 85 85 85>
    - « Skyline » : absorption <12 10 14 22 6 12> et diffusion <10 10 20 60 80 85>
    - « Flutterfree » : absorption <16 14 12 10 10 10> et diffusion <10 25 30 30 30 70>
  
- ✓ Influences des **aillettes du QRD** (fines séparations entre les cellules diffusantes d'un QRD) :
 

Des mesures réalisées avec et sans les ailettes dans le local test à Lyon ont permis de constater que la courbe du TR sans ailettes se trouve en moyenne au milieu de la courbe salle vide et de la courbe salle avec diffuseur avec ailettes.

La même tendance est observée sur les critères  $D_{50}$  et  $C_{80}$ .

  - ➔ Il semblerait donc que la suppression des ailettes est un impact non négligeable sur l'effet du diffuseur. Sans pouvoir être certain que la relation soit linéaire, il est difficile d'en tirer des conclusions définitives sur la quantification de cette perte d'efficacité, mais il se pourrait qu'elle soit de l'ordre de 20 à 40 %.
  - ➔ Des mesures complémentaires doivent être réalisées sur différentes géométries de diffuseurs pour confirmer ces valeurs.

#### iv. Utilisation des différentes fonctions

- ✓ La case « **Surface + edge** » doit être cochée dans le menu « General settings ».
  - ➔ Pas de diffusion surestime la valeur du TR et des critères.
  
- ✓ La diffusion « **Surface default** » permet d'attribuer un coefficient paramétrable par défaut à tous les matériaux pour lesquels il n'a pas été défini de diffusion.
  - ➔ Régler la diffusion par défaut au moins égal à 10% pour chaque fréquence.
  
- ✓ **Attention** : les phénomènes de réfraction et de diffraction ne sont pas pris en compte dans CATT.
  - ➔ Il n'y a pas présence de rayonnement de l'onde sonore derrière un écran hormis celle liée aux multiples réflexions.
  - ➔ La fonction « auto\_edge » augmente la diffusion liée aux bords mais ne remplace pas le phénomène de diffraction.

- ✓ La **diffusion de bord** doit être appliquée sur le mobilier (tables, ...), sur les écrans, les réflecteurs, sur chaque partie vitrée et sur les matériaux d'impédances très différentes telles qu'un tapis sur un sol en béton.
  - ➔ Pour ajouter de la diffusion de bord il faut mettre un astérisque directement après le nom du matériau (sans espace entre les deux) dans la définition d'un plan. Exemple : [ ... / ... / réflecteur\* ].
- ✓ Appliquer la fonction « **Estimate(...)** » en entrant la dimension caractéristique de la rugosité. Pour une dimension inférieure à 10 cm, un ajustement des coefficients doit être réalisé pour ne pas avoir moins de 10 % de diffusion.

**v. Procédure générale pour modéliser la diffusion**

- ✓ Estimer l'**absorption** aussi bien que possible.
- ✓ Mettre en place la diffusion de l'**audience**.
- ✓ Utiliser la fonction « **Auto\_edge** » pour tous les petits objets, mobilier, écrans, réflecteurs et sur les surfaces possédant des impédances présentant des disparités.
- ✓ Assigner de la diffusion sur les **surfaces irrégulières** en calculant les coefficients ou en utilisant la fonction « Estimate(...) ».
- ✓ Affiner les **combinaisons** en commençant avec les valeurs recommandées.

## BIBLIOGRAPHIE

### Acoustique des salles :

L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses : Music, Acoustic, and Architecture*  
 M. Long, *Architectural Acoustic*  
 H. Kuttruff, *Room Acoustic*  
 J. Jouhaneau, *Acoustique des salles et sonorisation*  
 T. Malet, *Acoustique des salles*  
 EN ISO 3382 Février 2000

### Diffusion :

B.I. Dalenbäck, M. Kleiner et P. Svensson, *A Macroscopic View of Diffuse Reflection*  
 M. Vorländer et E Mommert, *Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients*  
 T.J. Cox et P. D'Antonio, *Surface Characterization for Room Acoustic Modelling and Design*  
 T.J. Cox, *Diffuser Design*  
 G. Martin, P. Depalle, W. Woszczyk, J. Corey et R. Quesnel, *A Hybrid model for Simulating Diffused First Reflections in Two-Dimensional Synthetic Acoustic Environments*  
 P. d'Antonio et T.J. Cox, *Technical Bulletin on the Application of Diffusion in Critical Listening Rooms*  
 CH. Hann et F.R. Fricke, *An Evaluation of the Importance of the Surface Diffusivity in Concert Halls*  
 ISO 17497-1 :2004  
<http://rpginc.com>

### CATT Acoustic :

CATT Acoustic user's Manual v.8  
<http://www.catt.se/users.htm>

## NOTES