



HAL
open science

Mesure et simulation acoustiques en milieu urbain.

Inès de Bort

► **To cite this version:**

Inès de Bort. Mesure et simulation acoustiques en milieu urbain.. Génie civil. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2023. Français. NNT : 2023PAUU3037 . tel-04583983

HAL Id: tel-04583983

<https://theses.hal.science/tel-04583983>

Submitted on 22 May 2024

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

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

Urban Physics Joint Laboratory
Université de Pau et des Pays de l'Adour

MESURE ET SIMULATION ACOUSTIQUES EN MILIEU URBAIN

Thèse de doctorat

Présentée et soutenue par

Inès de Bort

Le 29 septembre 2023 à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour

Anglet, France

Membres du jury :

Raphaël Compagnon – Président du jury
Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg, Suisse

Benoit Beckers – Directeur de thèse
*Urban Physics Joint Laboratory
Université de Pau et des Pays de l'Adour, France*

Maarten Hornikx – Rapporteur
*Building Acoustics Chair of Unit Building Physics and Services
Eindhoven University of Technology, Pays-Bas*

Judicaël Picaut – Rapporteur
*Unité Mixte de Recherche en Acoustique Environnementale
Université Gustave Eiffel, France*

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Nomenclature | i |
| Glossaire | iv |
| Résumé..... | vii |
| Français | vii |
| Anglais..... | ix |
| Espagnol | xi |
| Introduction générale..... | xiii |
| Français | xiii |
| Anglais..... | xvii |
| CHAPITRE 1 – Etat de l’art | 1 |
| 1.1 <i>La Physique Urbaine</i> | 1 |
| 1.1.1. Les précurseurs | 1 |
| 1.1.2. La révolution des techniques de mesure et de simulation | 2 |
| 1.1.3. Les nouvelles dynamiques | 3 |
| 1.2. <i>La mesure acoustique</i> | 5 |
| 1.2.1. La mesure acoustique en milieu urbain..... | 5 |
| 1.2.2. Les nouvelles mesures spatiales du champ sonore..... | 6 |
| 1.3. <i>De la perception sonore à la conception acoustique</i> | 9 |
| 1.3.1. Les paramètres de l’acoustique des salles | 9 |
| 1.3.2. Les outils de la simulation | 12 |
| CHAPITRE 2 – Méthode | 17 |
| 2.1. <i>Le programme de simulation par lancer de rayons Simonetta</i> | 18 |
| 2.1.1. Tir par la méthode de Monte Carlo à échantillonnage stratifié | 19 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 2.1.2. | Calcul d'intersection avec <i>Embree</i> | 20 |
| 2.1.3. | Réflexion spéculaire et absorption | 21 |
| 2.1.4. | Calcul d'intensité au récepteur par la loi de la sécante | 22 |
| 2.2. | <i>Paramétrage de la simulation dans les enceintes prismatiques</i> | 26 |
| 2.2.1. | Méthode de paramétrage par la recherche de convergence..... | 26 |
| 2.2.2. | Erreurs de détection liées à la taille du récepteur..... | 31 |
| 2.2.3. | Critère d'arrêt des rayons | 33 |
| 2.2.4. | Comparaison des résultats avec la méthode des images | 34 |
| 2.3. | <i>Etude des surfaces courbes discrétisées</i> | 38 |
| 2.3.1. | Construction des géométries | 38 |
| 2.3.2. | Calcul géométrique du niveau sonore au point de focalisation | 41 |
| 2.3.3. | Position des images sur la courbe orthotomique | 46 |
| 2.3.4. | Forme idéale d'un plafond acoustique | 48 |
| 2.3.5. | Caustiques d'ordre supérieur | 52 |
| CHAPITRE 3 – Représentation graphique des réflexions multiples pour l'aide à la conception acoustique sur l'ensemble du public..... | | 55 |
| 3.1. | <i>Construction de la représentation graphique</i> | 57 |
| 3.2. | <i>Emplacement idéal de panneaux absorbants à l'intérieur d'une salle de classe</i> | 62 |
| 3.2.1. | Présentation du cas d'étude..... | 62 |
| 3.2.2. | Paramétrage de la simulation..... | 63 |
| 3.2.3. | Résultats..... | 64 |
| 3.3. | <i>Conception d'un plafond réflecteur à l'intérieur d'une chapelle</i> | 68 |
| 3.3.1. | Présentation du cas d'étude..... | 68 |
| 3.3.2. | Paramétrage de la simulation..... | 68 |
| 3.3.3. | Résultats..... | 71 |
| 3.3.4. | Extension de la méthode à l'étude du paramètre du paramètre d'énergie latérale..... | 77 |
| 3.4. | <i>Conclusions du chapitre 3</i> | 82 |
| CHAPITRE 4 – Des salles de concert aux rues de la ville : le passage de l'acoustique des salles à l'acoustique urbaine..... | | 85 |

| | | |
|--------|--|------------|
| 4.1 | <i>Etude acoustique à l'échelle de la rue</i> | 87 |
| 4.1.1. | Simplification de la forme urbaine en trois configurations : 1P, 2P et 3P+ | 87 |
| 4.1.2. | Résultats de la mesure et de la simulation dans les trois configurations | 89 |
| 4.2. | <i>Etude acoustique à l'échelle de la ville</i> | 95 |
| 4.2.1. | Première campagne de mesure par caméra acoustique en milieu urbain..... | 95 |
| 4.2.2. | Première simulation acoustique à l'échelle de la ville | 97 |
| 4.2.3. | Deuxième campagne de mesure par caméra acoustique | 100 |
| 4.2.4. | Mesure et simulation du bruit extérieur depuis l'intérieur..... | 102 |
| 4.3. | <i>Conclusions du chapitre 4</i> | 106 |
| | Conclusions générales et perspectives | 108 |
| | Français | 108 |
| | Anglais..... | 110 |
| | Bibliographie | 113 |
| | Liste des tableaux | 126 |
| | Annexes | 133 |
| | <i>Annexe 1 – Tir des rayons par Monte Carlo Stratifié</i> | 133 |
| | <i>Annexe 2 – Chargement de l'OBJ</i> | 136 |

Nomenclature

| | | |
|----------------------|--|-------------------|
| α | Coefficient d'absorption d'une surface | Adimensionnel |
| c | Célérité du son dans l'air (340 m s^{-1}) | m s^{-1} |
| d | Distance parcourue par un rayon | m |
| d_i | Distance parcourue entre la $(i-1)^{\text{ème}}$ réflexion et la $i^{\text{ème}}$ réflexion | m |
| d_{far} | Longueur du rayon entre son origine et le point d'intersection avec la géométrie | m |
| d_{r1} et d_{r2} | Distance entre le dernier point d'origine du rayon et le point d'intersection avec le récepteur (1 : à l'entrée de la sphère, et 2 : en sortie de la sphère) | m |
| E_0 | Energie initiale d'un rayon lors du tir | W |
| φ | Angle d'incidence d'une réflexion par rapport à l'axe entre les deux oreilles de l'auditeur | rad |
| i | Nombre de réflexions | adimensionnel |
| j | Nombre de segments issus de la discrétisation d'une courbe | adimensionnel |
| I | Intensité sonore | W m^{-2} |
| I_0 | Seuil d'intensité perceptible ($I_0 = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}$) | W m^{-2} |

| | | |
|------------|--|----------------|
| L_I | Niveau sonore en intensité du récepteur | dB |
| L_w | Niveau sonore en puissance de la source | dB |
| N | Nombre de rayons tirés | adimensionnel |
| n | Nombre de rayons interceptés | adimensionnel |
| n_{rec} | Nombre de récepteurs | adimensionnel |
| n_s | Nombre de sources | adimensionnel |
| P_n | Proportion d'énergie transportée par le $n^{ième}$ rayon (vaut 1 au moment du tir) | adimensionnel |
| r | Rayon de la sphère du récepteur | m |
| s | Sécante au récepteur | m |
| t_{step} | Intervalle de temps de l'échogramme simulé | ms |
| t_r | Retard du rayon | ms |
| t_{max} | Durée de l'échogramme simulé (critère d'arrêt des rayons) | ms |
| t_{CPU} | Temps de calcul * | s |
| V_r | Volume du récepteur sphérique | m ³ |
| W | Puissance sonore de la source | W |

W_0

Seuil de puissance perceptible ($W_0=10^{-12}$ W)

W

* Tous les temps de calcul présentés ont été obtenu à l'aide d'un PC contenant un processeur Intel® Core™ i-9-9880 H CPU @ 2.3 GHz 2.30 GHz.

Glossaire

| | |
|---------------------------------|---|
| Bande d'octave | Bande de fréquence où la fréquence la plus aiguë correspond au double de la fréquence la plus basse. En acoustique des salles, les bandes de 125 Hz et de 250 Hz correspondent aux basses fréquences, celles de 500 Hz et 1000 Hz aux moyennes fréquences, et celles de 2000 Hz et 4000 Hz aux hautes fréquences. |
| Caméra acoustique | Dispositif de mesure composé d'un ensemble de sonomètres permettant la localisation, la visualisation et la caractérisation des sources sonores dans l'espace. |
| Champ libre | Situation ou espace dans lequel aucune réflexion sonore ne se produit. |
| CPU | La CPU (Central Processing Unit en anglais) est un microprocesseur installé sur la carte mère de l'ordinateur. |
| C_{50} [dB] | Paramètre de clarté de la parole : rapport entre l'énergie sonore qui arrive avant 50 ms et toute l'énergie sonore reçue. |
| C_{80} [dB] | Paramètre de clarté de la musique : rapport entre l'énergie sonore qui arrive avant 80 ms et toute l'énergie sonore reçue. |
| <i>EDT</i> [ms] | Temps de première décroissance (<i>Early Decay Time</i> en anglais) qui correspond au temps nécessaire pour diminuer le niveau sonore de 60 dB après l'arrêt de la source. |
| GPU | La GPU (Graphics Processing Unit en anglais) est un microprocesseur installé sur la carte graphique de l'ordinateur. |
| <i>INR</i> [dB] | Décrit la capacité d'une source sonore à dépasser le niveau de bruit ambiant (<i>Impulse to Noise Ratio</i> en anglais). |

| | |
|---|--|
| JND | Décrit la plus petite différence perceptible pour un paramètre (<i>Just Noticeable Difference</i> en anglais). |
| LF [%] | Paramètre de Fraction d'Énergie Latérale, qui donne le pourcentage d'énergie latérale transportée par les premières réflexions (entre 5 et 80 ms) et qui permet d'évaluer la sensation d'enveloppement. |
| Méthode géométrique (acoustique) | Idéalisation de la propagation du son où les rayons sonores se comportent comme des rayons lumineux. |
| Méthode des images | Méthode de simulation acoustique permettant la reconstruction géométrique de tous les chemins reliant par réflexion spéculaire un point source à un point récepteur. |
| Mollweide (projection de) | Projection complète de la sphère sur le plan qui conserve les surfaces publiée pour la première fois en 1805 par le mathématicien et astronome Carl Brandan Mollweide. |
| OBJ | Format de fichier objet qui contient l'information géométrique d'un modèle 3D. |
| Schlieren (imagerie) | Méthode permettant la visualisation des mouvements de flux (gaz, air, front d'onde) à l'aide de systèmes de miroirs et d'appareils photographiques à grande vitesse. |
| Réponse impulsionnelle (mesurée) | Mesure temporelle de la pression sonore au récepteur après l'émission d'une impulsion depuis un point source. Elle permet de décrire la réponse acoustique de la scène étudiée, et le calcul de paramètres objectifs courants tels que la clarté, le temps de réverbération etc. |

Résumé

Dans cette thèse, nous proposons une méthode d'aide à la conception acoustique applicable à plusieurs échelles, allant de la salle de cours à la ville entière. Pour ce faire, nous avons développé une méthode de lancer de rayons qui permet de suivre les réflexions multiples du son dans des scènes 3D complexes.

En acoustique des salles, les deux enjeux les plus courants consistent à déterminer la disposition idéale d'une certaine quantité d'absorbant acoustique et à orienter des panneaux réfléchissants dans les salles trop réverbérantes. Les paramètres acoustiques historiquement utilisés (niveau sonore, temps de réverbération, clarté) permettent de détecter les zones du public où le confort acoustique n'est pas assuré. En revanche, ils ne permettent pas toujours d'identifier les surfaces de la scène qu'il faut modifier. Dans la première application de la thèse (chapitre 3), nous proposons un nouveau graphique panoramique qui synthétise les directions d'arrivée des réflexions multiples, sur l'ensemble des récepteurs qui constituent l'audience. Ce graphique a permis de trouver l'emplacement idéal de panneaux absorbants dans une salle de cours, et d'améliorer la forme d'un faux plafond acoustique à l'intérieur d'une chapelle. Les résultats montrent que les solutions identifiées améliorent significativement les valeurs de clarté dans les deux cas. Dans la salle de cours, le résultat a été vérifié par la mesure en présence d'un public. Dans la chapelle, un autre graphique basé sur le même principe a été utilisé pour étudier l'effet d'enveloppement acoustique (énergie latérale).

En milieu urbain, les nuisances sonores ont un impact très important sur le confort et la santé des habitants. Outre la présence de nombreuses sources de bruit, les réflexions multiples entre les façades des bâtiments contribuent à l'augmentation du niveau sonore ambiant. Dans la seconde application de la thèse (chapitre 4), nous proposons de traiter la conception d'une ville comme celle d'une salle de concert, en étudiant le rôle de la forme des bâtiments sur la propagation des réflexions sonores. Pour cela, nous inversons la construction de la représentation graphique proposée dans la première application afin de représenter la multiplicité, non plus des récepteurs, mais des sources sonores. Le résultat est comparé à la mesure du champ par caméra acoustique. L'étude porte sur Pasaia, une petite ville portuaire du pays basque espagnol qui présente différents motifs urbains : un centre historique, de hautes tours, un port, des rues piétonnes étroites et de grandes voies de circulation. La mesure par caméra acoustique et la simulation par lancer de rayons ont permis d'identifier trois configurations urbaines distinctes. A partir de ce constat, la simulation est utilisée pour proposer un scénario de modification de la forme de la ville afin de réduire le niveau sonore sur les façades les plus exposées. Grâce à la simulation par lancer de rayons et à la représentation spatiale des réflexions multiples, soit sur plusieurs récepteurs soit à partir de plusieurs sources, il est possible de guider la conception de la forme et des matériaux, quelle que soit la géométrie de la scène, et de contribuer à l'approche pluridisciplinaire de la Physique Urbaine.

Summary

In this thesis, we propose a method to guide the acoustic design process at different scales, from a classroom to an entire city. For this purpose, we have developed a raytracing method designed to track the multiple reflections of sound in complex 3D scenes.

In room acoustics, the two most usual challenges are to determine the ideal layout for a given amount of acoustic absorber, and to orient reflective panels in excessively reverberant rooms. Traditionally, acoustic parameters (sound level, reverberation time, clarity) have been used to detect areas of the audience where acoustic comfort is not guaranteed. However, they do not systematically identify which areas of the stage need to be modified. For the first application (chapter 3), we propose a panoramic image that synthesizes the arrival directions of multiple reflections, on all the receivers that make up the audience. This graphic is used to find the ideal location for absorbent panels in a classroom, and to improve the shape of an acoustic false ceiling inside a chapel. The results show significant improvements in clarity values in both cases. In the classroom, the result was verified by measurement in the presence of a live audience. In the chapel, another graphic based on the same principle was used to study the acoustic envelopment effect (lateral energy).

In urban environments, noise pollution has a considerable impact on the comfort and health of residents. In addition to the presence of numerous noise sources, multiple reflections between building façades contribute to increasing ambient noise levels. For the second application (chapter 4), we propose to treat the design of a city like that of a concert hall, by studying the role of the buildings' shape on the propagation of sound reflections. Here, we invert the panoramic graph proposed in the first application to represent the multiplicity not of receivers, but of sound sources. The results are compared with field measurements taken with an acoustic camera. The study will examine Pasaia, a small port town in the Spanish Basque Country, which features a variety of urban patterns: a historic center, tall towers, a harbor, narrow pedestrian streets and major roadways. Acoustic camera measurements and raytracing simulation revealed three distinctive urban configurations. Based on these findings, the simulation is used to propose a scenario for modifying the shape of the city in order to reduce noise levels on the most exposed façades.

Raytracing simulation and spatial representation of multiple reflections, either on multiple receivers or from multiple sources, provide guidance for the shape and material design, regardless of the geometry of the scene and contribute to the multidisciplinary approach of Urban Physics.

Resumen

En esta tesis, se propone un método para guiar el proceso de diseño acústico a diferentes escalas, desde un aula hasta una ciudad entera. Para ello, se ha desarrollado un método de trazado de rayos diseñado para detectar las múltiples reflexiones del sonido en escenas tridimensionales complejas.

En acústica de salas, los dos retos más comunes son determinar la disposición ideal de una cantidad determinada de absorbente acústico y orientar los paneles reflectores en salas excesivamente reverberantes. Tradicionalmente, los parámetros acústicos (nivel sonoro, tiempo de reverberación, claridad) se han utilizado para detectar las zonas de la sala en las que el confort acústico no está garantizado. Sin embargo, estos, no identifican sistemáticamente qué zonas del escenario deben modificarse. Para la primera aplicación, se propone una imagen panorámica que sintetiza las direcciones de llegada de múltiples reflexiones, sobre todos los receptores que conforman el público. Este gráfico se utiliza para encontrar la ubicación ideal de paneles absorbentes en un aula, y para mejorar la forma de un falso techo acústico en el interior de una capilla. Los resultados muestran mejoras significativas en los valores de claridad en ambos casos. En el aula, el resultado se verificó mediante mediciones en presencia de un público. En la capilla, se utilizó una variación de este gráfico para estudiar el efecto de envolvente acústica (energía lateral).

En los entornos urbanos, la contaminación acústica repercute considerablemente en el confort y la salud de los residentes. Además de la presencia de numerosas fuentes de ruido, las múltiples reflexiones entre las fachadas de los edificios contribuyen a aumentar los niveles de ruido ambiente. Para la segunda aplicación, se propone tratar el diseño de una ciudad como el de una sala de conciertos, estudiando el papel de la forma de los edificios en la propagación de las reflexiones sonoras. En este caso, se invierte el gráfico panorámico propuesto en la primera aplicación para representar la multiplicidad no de receptores, sino de fuentes sonoras. A continuación, el resultado es comparado con las mediciones sobre el terreno realizadas con una cámara acústica. El estudio examinará Pasaia, una pequeña ciudad portuaria del País Vasco español, que presenta una gran variedad de patrones urbanos: un centro histórico, altas torres, un puerto, estrechas calles peatonales y grandes ejes viales. Las mediciones con cámaras acústicas y la simulación de trazado de rayos revelan tres configuraciones urbanas distintas. A partir de estos resultados, se utiliza la simulación para proponer un escenario de modificación de la forma de la ciudad con el fin de reducir los niveles de ruido en las fachadas más expuestas. La simulación de trazado de rayos y la representación espacial de múltiples reflexiones, ya sea en numerosos receptores o procedentes de diversas fuentes, proporcionan directrices para el diseño de la forma y los materiales, independientemente de la geometría de la escena, y contribuyen al conocimiento multidisciplinar de la Física Urbana.

Introduction générale

Aux échelles du bâtiment et de la ville, et pour les moyennes fréquences¹, la propagation du son peut être considérée comme un phénomène de rayonnement. Sa simulation peut alors être réalisée par des techniques de lancer de rayons, lesquelles sont particulièrement bien adaptées pour l'étude des géométries complexes. Or, pour étudier et guider la conception de la forme et des matériaux des façades, des rues et des quartiers urbains, il est nécessaire de conserver toute l'information géométrique. Cette thèse s'inscrit dans cette logique, et prend comme point de départ une idéalisation du modèle physique, en ne considérant que les réflexions spéculaires multiples qui se produisent entre les surfaces de la scène, laquelle peut représenter une petite salle, une salle de concert, une rue, un quartier, voire une ville entière.

Pour cela, le lancer de rayons par Monte Carlo, est particulièrement adapté dès lors qu'une quantité suffisamment élevée de rayons est tirée. Aujourd'hui, les techniques de lancer de rayons ont atteint une certaine maturité, et les performances des ordinateurs permettent aux concepteurs de manipuler de grandes quantités de rayons dans des temps de calcul qui étaient encore inimaginables il y a 20 ans. Au cours de la thèse, nous avons profité des performances d'*Embree*, une bibliothèque de fonctions qui optimise le calcul de lancer de rayons à l'intérieur de la CPU, pour étudier un large éventail de scènes, en commençant par une salle de classe, puis une chapelle, une rue de Bayonne et enfin un quartier entier de Pasaia.

L'idéalisation du modèle physique est soutenue tout au long de la thèse par la mesure, et notamment par l'emploi de la caméra acoustique, un appareil récemment introduit sur le marché et qui fournit une vue spatialisée du champ sonore. Deux campagnes de mesure réalisées à Bayonne et à Pasaia permettent pour la première fois d'observer les phénomènes de réflexions multiples qui se produisent à l'intérieur des rues et sont comparées à des images acoustiques simulées par lancer de rayons. Comme en acoustique des salles, les réflexions multiples contribuent à augmenter le niveau sonore en ville dont nous donnons quelques ordres de grandeur.

L'utilisation de la simulation pour la création d'images du champ sonore nous a aussi conduit à chercher une représentation graphique synthétique, capable de guider la conception acoustique à l'intérieur de n'importe quelle scène. L'outil que nous avons mis au point nous a permis de répondre à deux grands problèmes de l'acoustique des salles : la répartition optimale d'une certaine quantité d'absorbant à l'intérieur d'une salle de cours, et la conception d'un dispositif réfléchissant, à la manière d'une « boîte dans la boîte », afin de transformer une ancienne chapelle en auditorium. Les résultats très satisfaisants nous ont alors conduit à étudier la ville à la

¹ Les bandes d'octave de 500 et 1000 Hz, celles qui correspondent, en particulier, à la voix humaine.

manière d'une salle de concert, en identifiant les zones critiques et en proposant des solutions locales pour améliorer le confort.

La thèse comporte quatre chapitres : un état de l'art, une méthode et deux applications. **L'état de l'art** présente le contexte plus global de la Physique Urbaine, discipline à l'intérieur de laquelle s'inscrit cette thèse, en présentant chronologiquement les travaux précurseurs, la révolution des techniques de mesure et de simulation des vingt dernières années et les nouvelles dynamiques de recherche qui sont menées dans les différents domaines qui s'y rattachent. Puis, nous présentons les travaux de mesure qui ont été menés en acoustique urbaine, et les nouvelles opportunités qu'offre le développement récent des caméras acoustiques. Enfin, nous abordons les différents paramètres de confort en acoustique des salles, et comment les méthodes de simulation acoustique peuvent s'inscrire dans une démarche d'aide à la conception.

Le chapitre **Méthode** s'articule exclusivement autour de l'outil de lancer de rayons *Simonetta*, que nous avons développé en visant l'acoustique urbaine. Nous présentons dans un premier volet le programme en lui-même à travers la description du tir de rayons par la méthode de Monte Carlo à échantillonnage stratifié, l'utilisation de la bibliothèque *Embree*, et le calcul des niveaux sonores au récepteur. Puis, nous développons la démarche suivie pour le paramétrage des simulations (nombre de rayons, taille du récepteur et critère d'arrêt des rayons) à l'aide de tests de convergence. Enfin, nous montrons quelques premiers résultats de calculs, en comparant la méthode des images et le lancer de rayons pour l'étude de surfaces courbes et des focalisations.

La première application présente une nouvelle représentation graphique des réflexions multiples pour l'aide à la conception acoustique sur l'ensemble d'un public à travers deux cas. Dans le premier, elle est utilisée pour détecter l'emplacement idéal d'une certaine quantité d'absorbant à l'intérieur d'une salle de classe, et les résultats sont validés par la mesure de réponses impulsionnelles en présence d'un public. Dans le second, la représentation graphique est utilisée pour concevoir un dispositif réfléchissant à l'intérieur d'une chapelle afin de la transformer en auditorium.

La seconde application introduit l'étude acoustique à l'échelle urbaine. Une première partie propose une classification des scènes urbaines en trois catégories, et les résultats sont validés par la même chaîne de mesure qu'en acoustique des salles. La deuxième partie propose une approche plus globale de la ville entière à travers l'étude de deux quartiers de la ville de Pasaia. L'utilisation conjointe de la mesure et de la simulation permettra d'étudier un scénario de réhabilitation acoustique de la ville. Ce dernier chapitre de la thèse s'achève sur une comparaison entre l'image mesurée par la caméra acoustique, et l'image simulée par le lancer de rayons.

Après les conclusions générales, deux **annexes** présentent les codes des fonctions C++ développés pour *Simonetta* qui sont mentionnées au cours du chapitre Méthode.

General introduction

For medium frequencies², at building and city scales, sound propagation can be considered a radiative phenomenon. Its simulation can therefore be carried out using raytracing techniques, which are particularly well-suited to the study of complex geometries. Indeed, to guide the design of the shape and materials of façades, streets, and urban districts, it is necessary to retain all geometric information. This thesis builds on this approach and takes as its starting point an idealization of the physical model, considering only the multiple specular reflections that occur between the surfaces of the scene, which could be a classroom, a concert hall, a street, a neighborhood, or even an entire city.

Monte Carlo raytracing is particularly well-suited to this task, as long as a sufficient number of rays can be fired. Today, raytracing techniques have reached a certain maturity, and computer performance allows designers to handle large quantities of rays in computation times that were unimaginable 20 years ago. Throughout this thesis, we leveraged the performance of *Embree*, a library of functions that optimizes raytracing inside the CPU, to study a wide range of scenes, starting with a classroom, then a chapel, a street in Bayonne, and finally an entire district of Pasaia.

The idealization of the physical model is supported throughout the thesis by measurements, and in particular, by the use of the acoustic camera, a device recently introduced on the market which provides a spatialized view of the sound field. Two measurement campaigns carried out in Bayonne and Pasaia enabled us to observe for the first time the phenomena of multiple reflections occurring within the streets. The measured images are compared with simulated ones. In the same way, as in room acoustics, multiple reflections contribute to increasing noise levels in the city. Here, we will provide more details on the orders of magnitude.

Simulating images of the sound field led us to seek a synthetic graphical representation capable of guiding acoustic design within any scene. The simulation tool we developed enabled us to address two major problems in room acoustics: the optimal distribution of a certain quantity of absorber inside a classroom, and the design of a reflective device, in the manner of a "box within a box", to transform a former chapel into an auditorium. Satisfactory results then prompted us to study the city as a concert hall, combining measurement, simulation, and post-processing to identify critical urban spaces and improve local acoustics.

The thesis comprises four chapters: a state-of-the-art, a method, and two applications. The *state-of-the-art* presents a broader context of urban physics, the discipline within which this thesis is embedded, by

² The 500 and 1000 Hz octave bands, which correspond, in particular, to the human voice.

chronologically outlining pioneering work, the revolution in measurement and simulation techniques undertaken over the last twenty years, and the new research dynamics being pursued in the various related fields. Next, we present the measurement research that has been carried out in urban acoustics, and the new opportunities offered by the recent development of acoustic cameras. Finally, we look at the different comfort parameters in room acoustics, and how acoustic simulation methods are helping in the design process.

The **Method** chapter focuses exclusively on the *Simonetta* raytracing tool, which we developed to address urban acoustics. First, we present the program itself, describing the stratified-sampling Monte Carlo raytracing process, the use of the *Embrée* library, and the calculation of sound levels at the receiver. We then develop the approach used to parameterize the simulations (number of rays, receiver size, and ray-stopping criterion) based on convergence tests. Finally, we show some preliminary computational results, comparing the image method and raytracing for the study of curved surfaces and focalizations.

The **first application** presents a new graphical representation of multiple reflections to aid acoustic design over an entire auditorium based on two scenarios. First, it is used to determine the ideal location for a certain amount of absorber inside a classroom, validating the results by measuring impulse responses in the presence of a live audience. Second, the graphical representation is used to design a reflective device inside a former chapel to transform it into an auditorium.

The **second application** introduces the acoustic study at the urban scale. The first part classifies urban scenes into three categories, validating the results by the same measurement setup used in room acoustics. The second part proposes a more comprehensive approach to the city through the study of two districts of Pasaia. The joint use of measurement and simulation enables us to explore a scenario for the acoustic rehabilitation of the city. This final chapter of the thesis concludes with a comparison between acoustic camera images and simulated raytracing images.

After the **general conclusions**, two **appendices** present the C++ code developed for *Simonetta* and mentioned in the Method chapter.

CHAPITRE 1 – Etat de l'art

1.1. La Physique Urbaine

1.1.1. Les précurseurs

La Physique Urbaine est un domaine interdisciplinaire qui s'appuie sur la physique environnementale (Monteith, 1974), (Campbell, 1977). Elle étudie les phénomènes physiques qui se produisent dans les environnements urbains en examinant les interactions complexes entre les infrastructures, l'environnement bâti, les systèmes de transport, la météorologie urbaine, la pollution atmosphérique et bien d'autres facteurs.

Aujourd'hui, partout dans le monde, les grandes villes posent des problèmes semblables à leurs habitants, à leur environnement et aux autorités publiques : utilisation mal contrôlée du sol (étalement urbain) et des ressources (en particulier de l'énergie), pollution chimique, thermique, sonore et lumineuse, difficulté de préparer l'avenir dans des sociétés qui ont perdu le sens de la durée et de la planification, alors même que les décisions sur le plan de la ville ont des effets qui se mesurent en siècles, voire en millénaires. Cette expansion rapide des zones urbaines a des implications significatives pour le climat, car elle modifie les propriétés du sol, la couverture végétale, la circulation de l'air et l'utilisation de l'énergie (Oke, 1982).

Le plus connu de ces effets est celui de l'augmentation de la température observée dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales environnantes, l'îlot de chaleur urbain (Oke, 1987). Ce phénomène, qui s'avère plus intense dans des géométries urbaines très enclavées à cause du piégeage radiatif, est principalement dû aux caractéristiques physiques des villes, telles que la forme et les matériaux de construction, l'asphalte, le béton et le manque de végétation (Changnon, 1996).

Cela signifie que la ville génère son propre climat en modifiant localement les conditions environnementales. Le premier traité à ce sujet a été publié il y a 140 ans par Luke Howard (1833), qui a mesuré la différence de température entre la ville et ses alentours en comparant les relevés des mesures ponctuelles de thermomètres situés à l'intérieur et à l'extérieur de Londres. Le rôle de la conception urbaine est donc très important. Dès les années 60, une nouvelle forme de conception, appelée conception bioclimatique, propose d'intégrer les conditions climatiques locales dans le processus architectural afin d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment et le confort thermique de ses habitants (Olgyay 1963)(Figure 1). La conception bioclimatique prend

en compte des éléments tels que l'orientation solaire, la ventilation naturelle, l'isolation thermique, la végétation et l'utilisation de matériaux adaptés pour maximiser les avantages climatiques (Givoni, 1998).

L'analyse du climat urbain s'est par la suite enrichi avec l'évolution des dispositifs et des techniques de mesure dont les résultats ont permis de préciser les défis que les villes doivent aujourd'hui relever et d'orienter les décisions politiques en matière d'urbanisme.

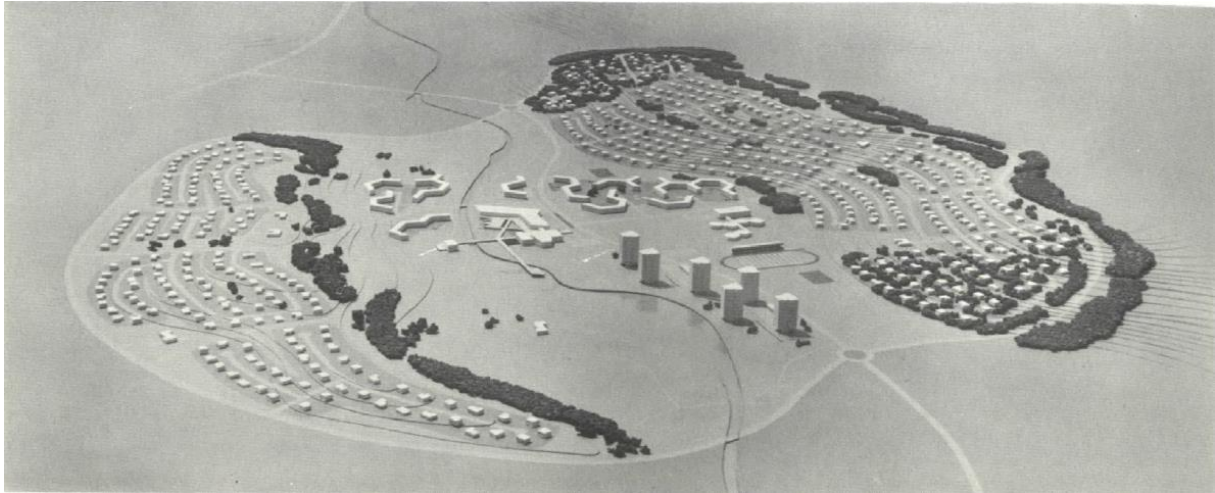


Figure 1 : Maquette de différents motifs architecturaux urbains étudiés sous différents climats (d'après Olgyay (1963)).

1.1.2. La révolution des techniques de mesure et de simulation

Au début des années 1980, lorsque les chercheurs ont reconnu l'impact des villes sur le climat, les stations météorologiques situées dans les zones urbaines se sont multipliées, passant de 3000 à 9000 en l'espace de quelques années (Edwards, 2006). Elles ont été utilisées pour recueillir des données sur les variables climatiques telles que la température, l'humidité, la pression atmosphérique, les précipitations (Tanner, 1990), ce qui a permis de caractériser la climatologie urbaine. Cependant, les stations météorologiques ont une couverture spatiale restreinte.

Au cours de la dernière décennie, le développement des techniques d'imagerie, en particulier le déploiement des satellites, a permis d'adopter un autre point de vue. Les données sont recueillies à partir de capteurs embarqués sur des satellites en orbite autour de la Terre (Campbell, 2011). Ces capteurs, notamment optiques, thermiques et radars (Lillesand, 2014), mesurent les propriétés du rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par la surface terrestre dans différentes bandes spectrales, ce qui permet d'obtenir des informations sur les propriétés physiques générales des grandes surfaces urbaines (Jensen, 2009). Cependant, cela peut rendre

difficile la caractérisation précise des conditions climatiques à l'échelle locale, notamment dans les zones urbaines, où les conditions peuvent varier considérablement sur de courtes distances, ou à des intervalles de temps rapprochés.

Naguère, plusieurs campagnes de mesure *in-situ* à travers de grands programmes comme ESCOMPTE à Marseille (Mestayer 2005, Cros 2004), BUBBLE à Bâle (Rotach, 2005) et CAPITOU à Toulouse (Masson, 2008) ont cherché à approfondir l'étude du climat urbain en combinant des mesures locales et des mesures par satellite.

A partir des années 80, l'industrie informatique a connu une avancée significative, avec le développement d'ordinateurs et de techniques infographiques de plus en plus sophistiqués. Parmi ces techniques, le lancer de rayons a émergé comme une méthode prometteuse pour générer des images de synthèse, en simulant le comportement des rayons lumineux lorsqu'ils interagissent avec les objets d'une scène selon les lois de l'optique géométrique (Shirley, 2008). Dès son apparition, les concepteurs architecturaux et urbains ont utilisé le lancer de rayons comme un outil pour la modélisation et la visualisation des environnements construits (Bouville, 1985). Les architectes ont pu simuler l'impact de la lumière naturelle sur les espaces intérieurs, en tenant compte de facteurs tels que l'orientation du bâtiment et les matériaux de construction (Tregenza, 1993), (Mardaljevic, 2004).

Dans le domaine de l'urbanisme, le lancer de rayons a été utilisé pour simuler l'ombre projetée par les projets de nouveaux bâtiments sur les bâtiments existants (Compagnon, 2004). Cependant, les grandes dimensions urbaines impliquent le tir de grandes quantités de rayons, ce qui a longtemps alourdi les temps de calcul (Vanegas, 2010). Depuis les années 2000, les microprocesseurs plus rapides et les améliorations de l'architecture des ordinateurs ont contribué à accroître la puissance de calcul. Au cours de la dernière décennie, Ingo Wald et son équipe ont développé *Embree*, une bibliothèque de fonctions en C++ qui permet d'optimiser le lancer de rayons à l'intérieur des processeurs modernes d'Intel (Wald, 2014). L'utilisation de techniques avancées, telles qu'*Embree* dans le rendu d'images de synthèse réalistes, a permis de surmonter les limitations de calcul, ouvrant ainsi de nouvelles opportunités pour la Physique Urbaine.

1.1.3. Les nouvelles dynamiques

Depuis 2016, le Laboratoire d'Architecture et de Physique Urbaine utilise la mesure et la simulation des échanges électromagnétiques pour guider la conception architecturale à l'échelle urbaine (Beckers, 2016a). Les travaux ont notamment permis de proposer des principes de conception de voiles solaires pour protéger les piétons dans les rues chaudes des villes Méditerranéennes (Garcia-Nevado, 2021), de concevoir des dispositifs

réfléchissants pour augmenter les apports en lumière naturelle dans les espaces très enclavés des centres historiques urbains (Bugeat, 2020a), et de répartir l'inertie thermique à l'échelle du quartier en fonction des trajets solaires (Duport, 2021). Pour comprendre l'effet de la ville, par sa forme et ses matériaux, sur les différents champs physiques, la géométrie doit être conservée tout au long des études. En simulation, cela se traduit par l'utilisation de grands modèles 3D urbains : ils sont étudiés en thermique à l'aide de la méthode des éléments finis (Acuña Paz y Miño, 2021) (Figure 2), et en lumière, à l'aide des méthodes de radiosité et de lancer de rayons (Bugeat, 2020b). En mesure, les capteurs ponctuels laissent progressivement place à la mesure spatiale du champ physique. A l'aide de caméras et de filtres, il est dorénavant possible de visualiser n'importe quelle scène urbaine dans le spectre électromagnétique, de l'ultraviolet à l'infrarouge thermique, en passant par le domaine du visible et de l'infrarouge proche (Acuña Paz y Miño, 2020a) (Figure 3). Ces nouvelles images, sous la forme de panoramas urbains, apportent de nouvelles informations sur la distribution spatiale et temporelle des champs physiques et orientent la conception de solutions urbaines (Acuña Paz y Miño, 2019) (Acuña Paz y Miño, 2023).

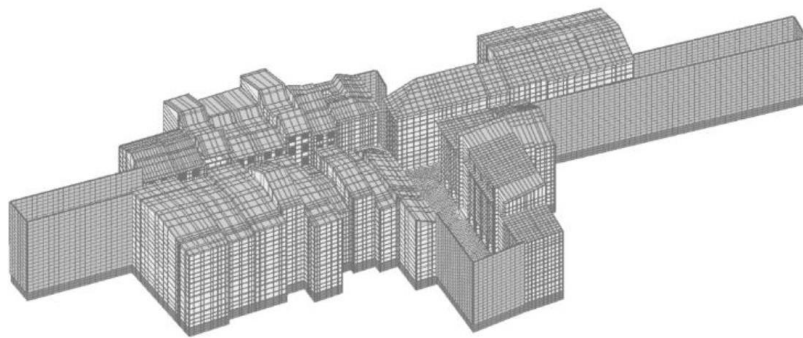


Figure 2 : Modèle 3D pour l'étude thermique par éléments finis d'une rue de Bayonne (d'après Acuña Paz y Miño (2021)).

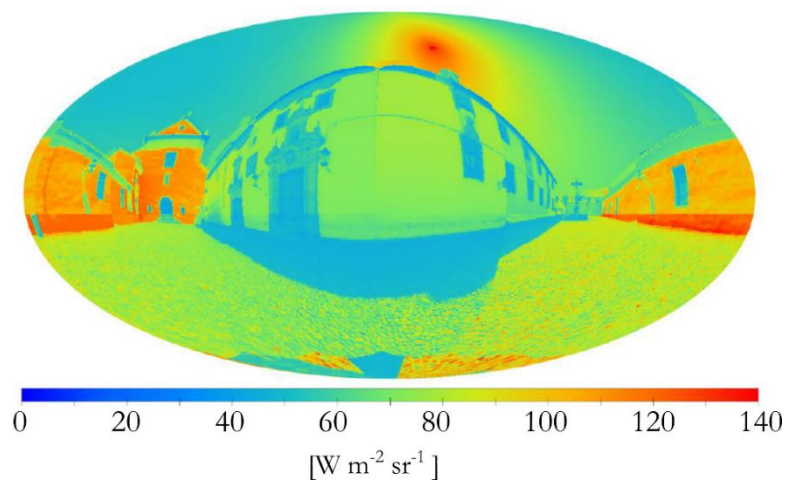


Figure 3 : Rayonnement incident en un point mesuré par superposition d'images photographiques et thermographiques (d'après Acuña Paz y Miño (2020b)).

1.2. La mesure acoustique

1.2.1. La mesure acoustique en milieu urbain

Mesurer l'influence des bâtiments sur la propagation du son est complexe, car il faut pouvoir enregistrer un son connu émis à l'aide de sources sonores suffisamment puissantes pour pouvoir couvrir le bruit ambiant de la ville. Les premières mesures ont été réalisées dans les années 60, à l'aide de haut-parleurs géants montés sur des camions (Wiener, 1965) (Figure 4 a-b). Une autre stratégie de mesure consiste à utiliser les sources sonores locales connues, comme par exemple le son régulier d'un clocher (Trikootam, 2019). La mesure de réponses impulsionnelles en milieu urbain nécessite des conditions d'études particulières comme la fermeture temporaire d'une rue (Picaut, 2005) (Figure 4c) et la suppression des sources sonores locales (Yang, 2017), ou l'accès à une zone isolée comme un village artificiel militaire (Albert, 2010) ou un grand complexe vide (Thomas, 2013), car l'émission du signal d'excitation doit pouvoir surpasser le niveau de bruit ambiant. Dans tous les travaux cités, les résultats montrent le rôle prédominant des réflexions multiples entre les façades sur la propagation du son en milieu urbain.

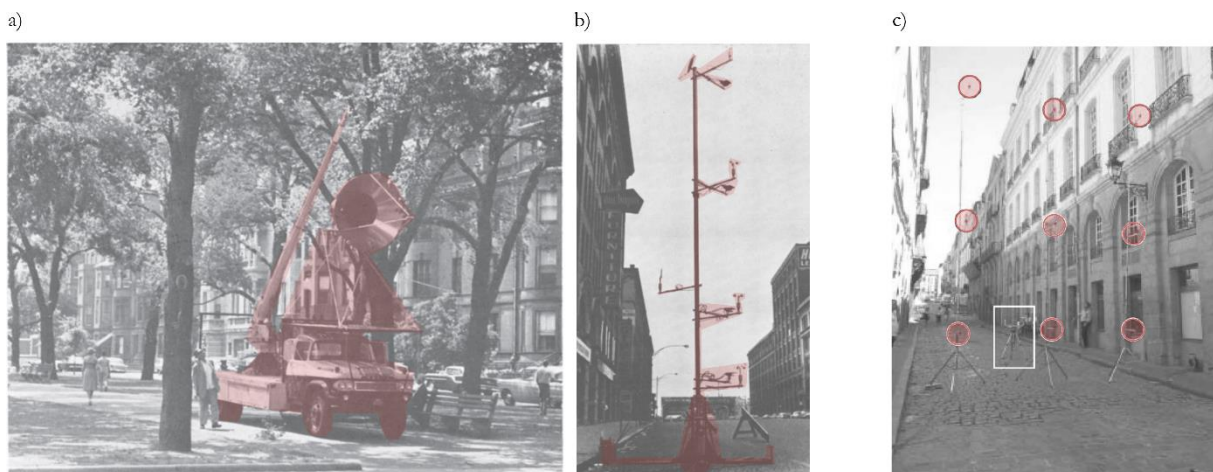


Figure 4 : (a) Source sonore et (b) tour de capteurs ponctuels utilisés lors des premières mesures urbaines (d'après Wiener (1965)) (c) tours de sonomètres utilisés lors de la campagne de mesure de Picaut (2005).

Pour s'affranchir des difficultés logistiques de la mesure en milieu urbain, plusieurs travaux ont été menés sur des maquettes de la ville. Les maquettes sont souvent limitées à des études soit très spécifiques – comme l'étude d'un échangeur d'autoroute (Yamashita, 1990) (Figure 5a) ou la résonance d'une cour intérieure (Molerón,

2014) – soit très simplifiées d’architectures urbaines (Iu, 2002), (Picaut, 2001), (Figure 5b). L’étude d’Ismail (2005) sur différentes maquettes a permis de montrer que la réflexion est principalement spéculaire sur les façades urbaines y compris sur les façades ornementées. Les résultats accompagnent souvent des simulations, soit pour leur fournir des données d’entrée (Ismail, 2005), soit pour valider les résultats numériques (Molerón, 2012).

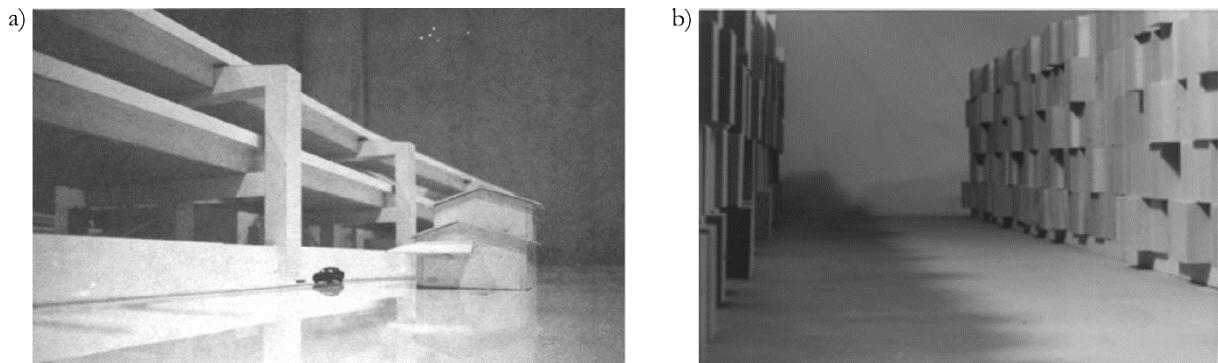


Figure 5 : Maquettes pour l’étude de la propagation sonore (a) aux abords d’une autoroute à deux étages (Yamashita, 1990), (b) dans une rue Haussmannienne (Picaut, 2001).

1.2.2. Les nouvelles mesures spatiales du champ sonore

Les premières visualisations du champ sonore ont été créées à partir de techniques d’optique. Au début du XX^{ème} siècle, Sabine (1927) utilise des méthodes de *Schlieren* et d’ombroscopie pour observer la propagation d’une onde sonore en 2D à l’intérieur d’une maquette salle de concert (Figure 6). Les résultats ont permis d’observer les différents phénomènes ondulatoires comme la réflexion, les interférences et la réverbération.

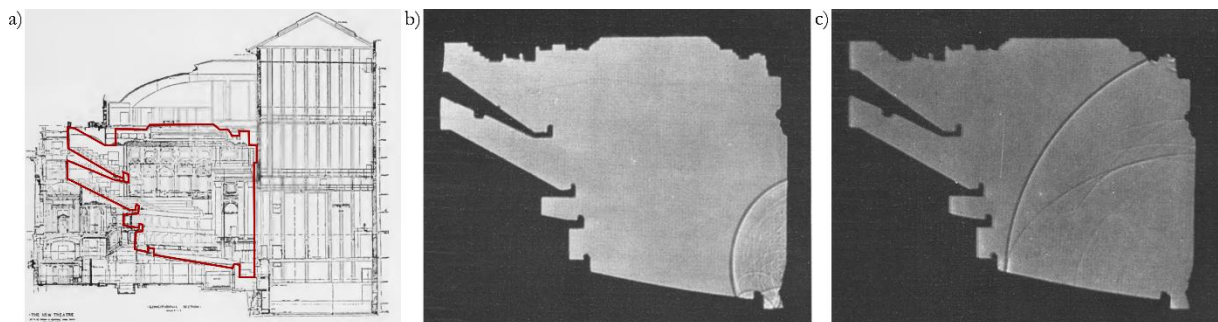


Figure 6 : (a) Section du Théâtre de New York et (b, c) photographies de l’onde sonore prises à l’aide la méthode de Schlieren (d’après Sabine (1927)).

En 1959, Junius (1959) mesure la répartition directionnelle des réflexions incidentes en un point (Figure 7). Le résultat est représenté sous la forme d'un diagramme en hérissos où chaque réflexion identifiée est représentée par un pic dont la direction et la longueur correspondent respectivement à l'origine et à l'intensité de la réflexion. Ce diagramme a été utilisé à la fois en mesure (Abdou, 1996), (Pätynen, 2013) (Campos, 2021), et en simulation (Stettner, 1989), (Lim, 2016), (Galindo, 2020), mais devient rapidement illisible pour l'étude en 3D des réflexions multiples (Bassuet, 2011).

Une caméra acoustique désigne tout système associant une vidéo de la scène étudiée avec une carte d'intensité sonore (McCormack, 2017). En acoustique environnementale et industrielles, les caméras acoustiques sont utilisées pour localiser les machines les plus bruyantes (Liptai, 2010). En milieu urbain, elles permettent de caractériser le bruit de différents engins de chantier afin d'adapter les propriétés acoustiques des barrières anti-bruit temporaires (Lee, 2017). En acoustique du bâtiment, les résultats permettent de détecter, à la manière d'une caméra thermique, les ponts acoustiques entre deux espaces et guider les scénarii de rénovation (Comesaña, 2013).

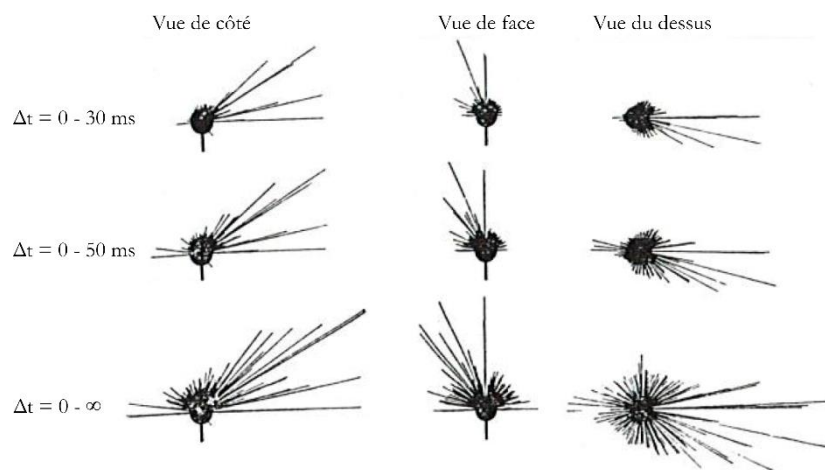


Figure 7 : Distribution des directions des réflexions mesurées sur un siège une salle de concert (d'après Junius (1959)).

En acoustique des salles, la caméra acoustique permet d'identifier l'origine des réflexions sonores (Figure 8) (O'Donovan, 2008) (Farina, 2011) et d'interpréter la réponse impulsionnelle (Lim, 2016). Il est possible d'observer l'effet de modifications des propriétés matériaux sur les réflexions sonores (Ortiz, 2015) et d'aider la conception de panneaux réflecteurs (Thomson, 2019) ou diffusants (Kümmritz, 2019) à l'intérieur de salles existantes. Les images acoustiques permettent aussi de caractériser le champ sonore. Izumi (2021) a montré qu'il est possible de retrouver la mesure prise par caméra acoustique à l'aide d'un lancer de rayons purement spéculaire, y compris pour les champs sonores réverbéré tardif.



Figure 8: Identification des réflexions sonores à l'intérieur d'une salle de concert (d'après O'Donovan (2008)).

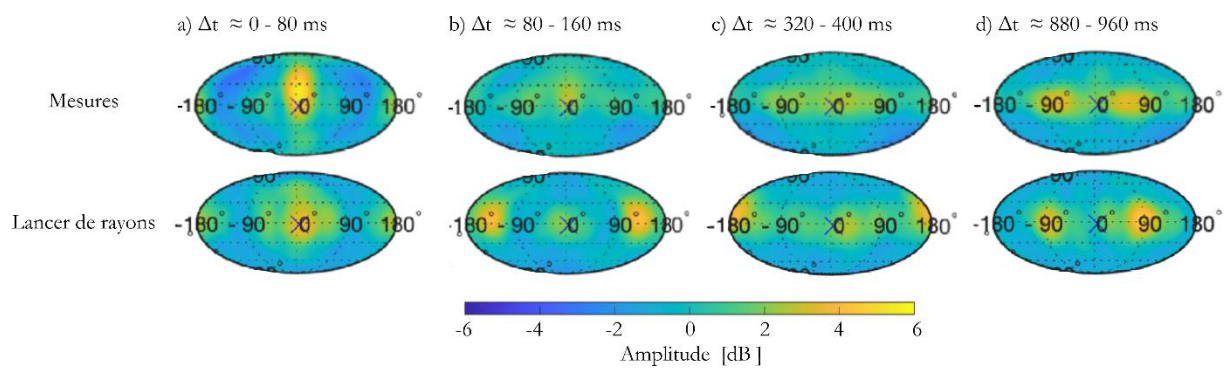


Figure 9: Comparaison entre la mesure par caméra acoustique sphérique et la simulation par lancer de rayons.

1.3. De la perception sonore à la conception acoustique

1.3.1. Les paramètres de l'acoustique des salles

L'énergie sonore à l'intérieur de n'importe quelle scène est composée d'une énergie directe et de réflexions qui arrivent avec un certain retard (Barron, 2009). La mesure d'une réponse impulsionnelle permet d'enregistrer toute l'information temporelle et spectrale de ces réflexions entre une source et un récepteur.

En théorie, la source est une impulsion de Dirac, un signal qui vaut toujours zéro sauf au moment de l'impulsion où il prend la valeur de l'infini sur toutes les fréquences. En pratique, il est nécessaire d'utiliser une source sonore omnidirectionnelle, émettant un signal bref, reproductible, égal sur le spectre en fréquence, avec un niveau sonore suffisamment élevé pour surpasser le bruit ambiant (Papadakis, 2019). L'indicateur INR (*Impulse to Noise Ratio* en anglais), obtenu à partir de la réponse impulsionnelle, donne une indication sur la capacité de la source sonore à surpasser le niveau de bruit ambiant (Hak, 2008). Une réponse impulsionnelle peut être exploitable à partir d'une valeur d'INR d'environ 35 dB.

Pour créer une impulsion, on peut utiliser des sources impulsives comme l'explosion de ballons (Fazenda, 2013), de pétards (Berardi, 2016) ou le déclenchement d'un pistolet d'alerte (Van Renterghem, 2011). Ces techniques ne sont cependant pas reproductibles à l'identique car elles sont souvent inégales sur les fréquences et les directions de propagation (Horvat, 2008). Aujourd'hui, les mesures standardisées utilisent plutôt des signaux temporels calibrés. Ces signaux, qui ne sonnent pas comme des impulsions, impliquent un post-traitement de la mesure par un produit de déconvolution pour extraire la réponse impulsionnelle (Schroeder, 1979). Les principaux avantages de ces signaux sont qu'ils préservent la réponse impulsionnelle des variations de bruit ambiant lors de la mesure et qu'ils sont reproductibles (Guidorzi, 2015). Ils sont émis par des haut-parleurs omnidirectionnels pour assurer une propagation sonore homogène dans toutes les directions.

Il existe différents types de signaux dont les signaux à balayage (*sweep signals* en anglais) qui consistent à émettre les fréquences les unes à la suite des autres, des graves aux aigues. La succession des fréquences peut être linéaire (*ln-sweep*) ou exponentielle (*e-sweep*) dans le temps. La durée du balayage et la durée de la marge d'arrêt (c'est-à-dire la durée entre l'émission de la fréquence la plus aigüe et l'arrêt de la mesure) doivent être paramétrées afin d'assurer une mesure à la fois suffisamment longue pour enregistrer la décroissance sonore, et suffisamment courte pour limiter l'enregistrement de bruits parasites (Müller-Trapet, 2020). Nous suivrons les recommandations de paramétrage de Müller-Trapet (2020) et nous utiliserons exclusivement le balayage

exponentiel *e-sweep* lors de nos mesures, car c'est celui qui a donné les meilleurs résultats lors des tests réalisés en extérieur par Georgious (2018).

Il existe quatre grands groupes de paramètres utilisés pour l'évaluation de la qualité acoustique d'une salle : les paramètres de décroissance, de force, de clarté, et d'impression spatiale (Bradley, 2011). A l'intérieur de chaque groupe, plusieurs paramètres ont été établis (Tableau 1). Leur variation devient perceptible à partir d'un changement supérieur à leur JND (*Just Noticeable Difference*) (Cox, 1993).

Tableau 1 : Différents paramètres pour évaluer la qualité acoustique d'une salle (Bradley (2011) et Cox (1993)).

| Groupe | Paramètre | Notation | Unité | JND | Objectif pour un auditorium |
|-----------------------|--|----------------|-------|-------|---|
| Temps de décroissance | Temps de réverbération | T_{60} | s | 5 % | Variable |
| | Temps de première décroissance | EDT | s | 5 % | Parole : 0.8–1 s Musique : 2.2–4.2 s |
| Force sonore | Force | G | dB | 1 dB | Parole : > 0 dB Musique : > 3 dB |
| Clarté | Clarté de la parole | C_{50} | dB | 1 dB | Figure 10 |
| | Clarté de la musique | C_{80} | dB | 1 dB | Figure 10 |
| | Temps central | T_5 | s | 10 ms | Parole : < 150 ms Musique : < 300 ms |
| Impression spatiale | Fraction d'énergie latérale précoce | LF_{early} | % | 5 % | Parole : > 20 % Musique : > 25 % |
| | Energie latérale tardive | LG | dB | 1 dB | Variable |
| | Corrélacion croisée inter-aurale précoce | $IACC_{early}$ | % | 7.5 % | 35 % |

Les paramètres de clarté, qui seront utilisés dans le chapitre 3 de la thèse, donnent une indication sur l'intelligibilité du son dans une salle, et peuvent être évalués grâce aux échelles de Marshall (1995) (Figure 10). Leur valeur se calcule directement sur la réponse impulsionnelle et correspondent aux rapports entre l'intensité des premières réflexions et des réflexions tardives, avec une limite temporelle fixée à 50 ms pour la parole (notée C_{50} [dB]) (Eq. 1) et 80 ms pour la musique (notée C_{80} [dB]) (Eq. 2).

$$C_{50} = 10 \log_{10} \frac{I_0^{50}}{I_{50}^{\infty}} \quad (1)$$

$$C_{80} = 10 \log_{10} \frac{I_0^{80}}{I_{80}^{\infty}} \quad (2)$$

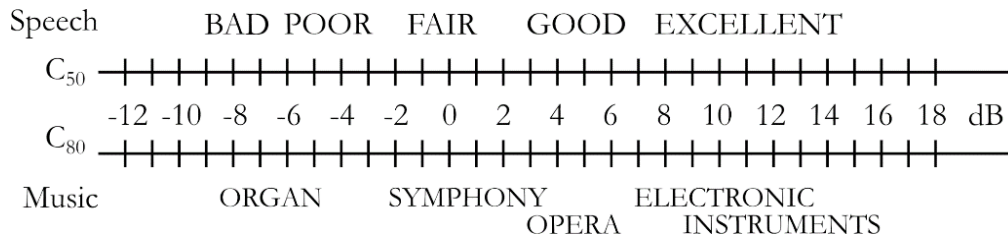


Figure 10 : Echelles de Marshall pour l'évaluation des paramètres C_{50} et C_{80} d'après Marshall (1995).

Pour créer une sensation d'enveloppement acoustique dans une salle de concert, il est important que l'énergie sonore des premières réflexions arrive de façon latérale sur l'audience (Marshall, 1967). Le paramètre LF [%] (Eq. 3) donne le pourcentage d'énergie latérale transportée par les premières réflexions (entre 5 et 80 ms).

$$LF = \frac{\int_5^{80} I \cos^2 \varphi}{\int_0^{80} I} \quad (3)$$

Avec :

- I , l'intensité sonore reçue au récepteur [W m^{-2}];
- φ , l'angle formé entre la réflexion incidente et l'axe d'écoute [rad] (Figure 11).

Que ce soit sur des maquettes ou à l'intérieur de salles de concert, les paramètres sont mesurés ponctuellement à l'aide de sonomètres. Il est possible de compléter cette information ponctuelle et quantitative avec une mesure spatialisée du champ sonore. Ces mesures se démocratisent de plus en plus avec le développement récent des caméras acoustiques.

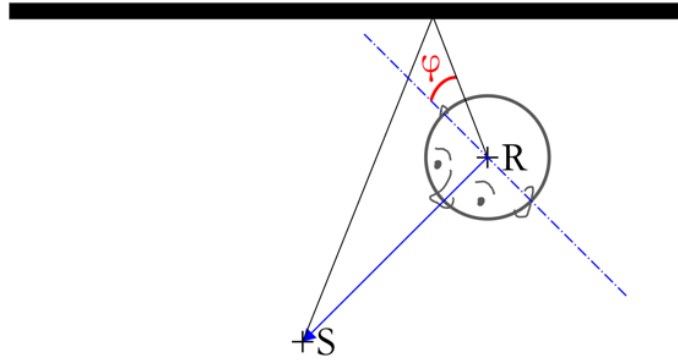


Figure 11 : Angle utilisé pour le calcul du LF.

1.3.2. Les outils de la simulation

Les simulations pour l'acoustique des salles ont initialement été développées avec trois grands objectifs : s'affranchir de l'utilisation souvent lourde et coûteuse de maquettes, pouvoir tester beaucoup plus facilement différentes configurations architecturales et proposer de nouvelles représentations graphiques du champ sonore (Krokstad, 1968), (Kulowski, 1985).

A partir des années 90, de nombreux programmes de simulation pour l'acoustique des salles ont été développés, tels *EASE* (1990), *ODEON* (1993) ou *CATT-Acoustic* (1998). La majorité fonctionne sur les principes de l'acoustique géométrique et propose le calcul de la réponse impulsionnelle à l'aide de méthodes hybrides, c'est-à-dire un couplage de différentes méthodes de calcul (Savioja, 2015).

Ce couplage, qui varie selon les programmes, repose le plus souvent sur un calcul de l'échogramme en trois étapes : les premières réflexions sont d'abord calculées par la méthode des images (Vorländer, 1989), les réflexions suivantes sont obtenues par un tir de Monte Carlo (de rayons, de cônes ou de pyramides (Farina, 1995)) ou par un calcul de radiosité (Kuttruff, 1971) et la fin de l'échogramme est estimé par une méthode statistique (Lehnert 1993). D'autres méthodes complémentaires sont parfois rajoutées pour prendre en compte l'effet de la diffraction (Freniere, 1999) et de la diffusion (Valeau, 2006).

Les méthodes hybrides ont historiquement permis de réduire les temps de calcul en profitant des avantages algorithmiques des différentes méthodes : précision de la méthode des images, simplicité du tir de Monte Carlo et rapidité de la statistique (Heinz, 1993), (Rindel, 2000). Cependant, les différents assemblages de méthodes rendent souvent illisible le contenu des programmes. Il devient alors difficile de les comparer et d'expliquer l'origine des différences obtenues (Hodgson, 2008), (Torres, 2018).

En acoustique des salles, l'aide à la conception consiste à modifier la forme et les matériaux de la salle pour atteindre des valeurs objectives fixées sur différents paramètres. La simulation permet de calculer ces paramètres en plusieurs points pour former des cartes d'indicateurs (Rindel, 2000). Ces cartes permettent de détecter les espaces où les paramètres n'atteignent pas les valeurs souhaitées. Malgré les nombreuses études d'analyses menées sur l'influence de la disposition de panneaux absorbants dans une pièce, aucune d'entre elles n'a fourni de méthode pour déterminer l'emplacement idéal pour une géométrie donnée (Cucharero, 2019). Il est possible d'utiliser des moteurs de calcul d'optimisation pour trouver une disposition adaptée de panneaux absorbants (Saksela, 2015) ou la forme d'un plafond acoustique (Sato, 2004). Dans le Chapitre 3, nous proposons un support d'aide à la conception basé sur la création d'images des réflexions sonores, pour guider la décision.

Il y a vingt ans, le logiciel *Radit2D* (2002) a été développé avec l'objectif d'apporter un support d'aide à la conception pour l'acoustique des salles (Beckers, 2005). Il se présente comme un outil interactif basé sur la méthode des images et permet d'étudier l'effet de la première réflexion sur une salle étudiée en coupe. Farina (1992) et Fausti (1992) utilisent tous deux la première réflexion donnée par la méthode des images pour concevoir la forme d'un dispositif réfléchissant à l'intérieur d'une salle trop réverbérante. Leur ouvrage est ensuite validé par un calcul par lancer de rayons. La méthode des images permet aussi d'observer rapidement l'effet des surfaces courbes (discrétisées en segments de droite) sur la focalisation ou la diffusion des réflexions sonores. Nous l'utiliserons dans le Chapitre 2 de la Méthode pour déterminer la forme concave adaptée à la redirection des réflexions sonores vers l'arrière d'une audience.

La modélisation complète du champ sonore en milieu urbain nécessite la prise en compte de phénomènes souvent négligés en acoustique des salles (Hornikx, 2010) tels que l'effet du vent (Hornikx, 2018), de la température, ou de l'absorption atmosphérique. Le projet de logiciel libre *OpenPSTD* développé depuis 2012 par l'équipe du *Building Acoustics Research Group* de l'Université d'Eindhoven a pour objectif de résoudre l'équation de propagation sur des cas urbains en intégrant tous ces phénomènes (Krijnen, 2014). Grâce à cet outil, il est possible de visualiser l'onde sonore et ses interactions avec les surfaces urbaines (Hornikx, 2016) (Figure 12).

Les méthodes ondulatoires peuvent être utilisées pour l'analyse architecturale et la conception acoustique assistée à l'échelle de la ville. Elles permettent de montrer que la forme d'un canyon urbain a une influence très importante sur le niveau sonore obtenu aux fenêtres des appartements de la ville et que les profils de rue qui limitent l'exposition sonore des fenêtres sont ceux qui redirigent les réflexions sonores multiples vers le ciel (Echevarria Sanchez, 2016). Cependant, de tels calculs impliquent une discrétisation très fine de l'espace, qui, appliquée aux grands modèles urbains, nécessite le sacrifice d'une partie de la géométrie, alors limitée aux études

en 2D ou 2D et demi (Hornikxs, 2016). Dans certains cas, la géométrie 3D est conservée, mais le calcul se limite à l'étude des basses fréquences (< 100 Hz) (Molerón, 2014).

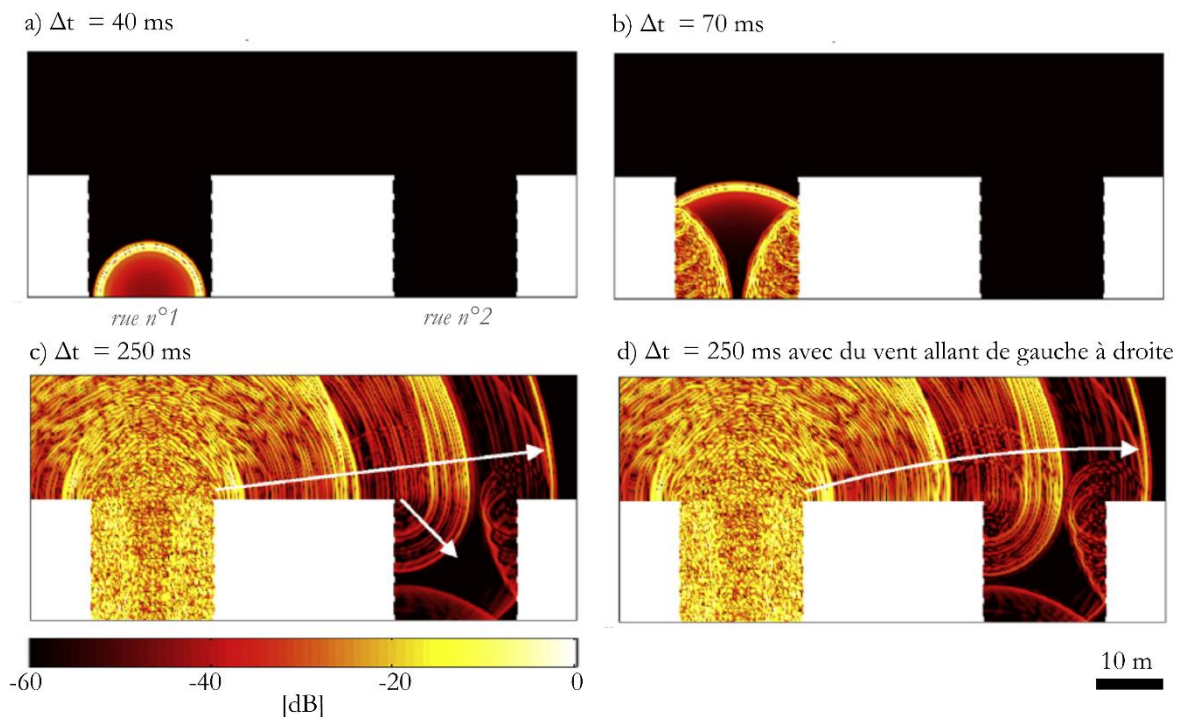


Figure 12 : Prises de vue de l'onde sonore sur une section urbaine (d'après Hornikx (2016)).

De nombreux travaux récents, synthétisés par Yildirim en 2023, ont montré que la forme de la ville a une influence importante sur la propagation du son en milieu urbain. Plusieurs stratégies de conception des façades urbaines pour limiter les nuisances sonores dans les habitations ont été proposées (Yang, 2020). La plupart des logiciels commerciaux utilisés pour l'étude acoustique en milieu urbain utilisent des moteurs de calcul développés pour l'acoustique des salles et sont basés sur l'acoustique géométrique (Balderrama, 2021), comme *I-Simpa* (Picaut, 2012). A l'aide d'un lancer de rayons, Lee (2015) montre comment les rues étroites favorisent l'augmentation du niveau sonore à cause des réflexions multiples et comment les rues très hautes ou très larges augmentent la réverbération. A l'échelle de la rue, Paini (2005) a montré qu'une place avec des arcades augmente la réverbération à hauteur d'homme. A l'échelle de la façade, Badino (2019) observe comment la forme et la composition des balcons permet de limiter le niveau sonore aux fenêtres d'un bâtiment et du bâtiment d'en face. A l'échelle de l'habitation, Hou (2017) utilise le lancer de rayons et un modèle de diffraction pour la modélisation dynamique du bruit de la circulation qui pénètre à l'intérieur des bâtiments par les fenêtres ouvertes. La représentation des résultats se fait souvent en plan sous la forme de cartes d'indicateurs en 2D ou de graphiques, ce qui masque une partie de l'information (Stoter, 2008).

Une étude menée à Manchester a montré que, dans les quartiers bruyants où les fenêtres sont davantage maintenues fermées, les consommations énergétiques pour le rafraîchissement des bâtiments sont jusqu'à 45% plus élevées que dans les quartiers calmes (Barclay, 2012). Du point de vue de la Physique Urbaine, l'isolation phonique des façades empêche la ventilation naturelle des bâtiments (Ghiaus, 2006). Le problème de l'isolation, thermique et acoustique, peut être anticipé par une approche multiphysique lors de la conception des façades de la rue. Par exemple, la forme des balcons peut être adaptée pour créer à la fois une protection solaire et acoustique (Knopf-Lenoir, 2016).

Les méthodes géométriques permettent l'étude des réflexions multiples en contexte urbain et l'étude de géométries aussi détaillées qu'on le souhaite. La validation par la mesure sur le terrain ou par les maquettes est complexe. Un programme d'aide à la conception acoustique doit reposer sur un calcul simple, fiable et rapide. Il doit être enrichi par des représentations claires et synthétiques permettant de prendre une décision sur la forme et les matériaux mis en jeu.

Le Chapitre 2 propose une approche novatrice pour l'acoustique urbaine en utilisant la méthode de lancer de rayons par Monte Carlo. Le modèle développé, appelé *Simonetta*, se concentre sur la réflexion entièrement spéculaire.

CHAPITRE 2 – Méthode

Introduction

En acoustique des salles, comme en acoustique urbaine, le champ sonore est dominé par les réflexions spéculaires multiples, qui peuvent être simulées par les méthodes géométriques. La méthode des images consiste à reconstruire géométriquement tous les chemins reliant la source au récepteur. Cette méthode présente un inconvénient majeur, celui de devoir éliminer tous les chemins invalides, qui restreint souvent le calcul aux premières réflexions. Nous avons donc choisi d'utiliser une autre méthode géométrique, la méthode de lancer de rayons, qui a pour principal avantage d'être peu sensible à la complexité géométrique du modèle étudié. Il est cependant nécessaire de tirer un très grand nombre de rayons pour assurer la convergence des résultats.

Dans notre programme, nous utilisons *Embree*, un outil permettant de traiter d'importantes quantités de rayons en optimisant le calcul à l'intérieur de la CPU de l'ordinateur, et, d'utiliser un tir aléatoire par une méthode de Monte Carlo qui permet d'assurer un tir homogène dans toutes les directions et d'étudier la convergence de la solution grâce au calcul d'erreur. La première partie du document décrit plus précisément les différents éléments du calcul, que nous avons réunis au sein d'un seul programme développé en C++ sous le nom de *Simonetta*. Cette première partie s'achève sur la démonstration du calcul de l'intensité sonore au récepteur par lancer de rayons à partir du calcul des sécantes de la sphère réceptrice.

En utilisant les propriétés du tir par Monte Carlo, nous proposons, dans la deuxième partie, l'utilisation d'un test de convergence pour déterminer les paramètres principaux de la simulation (nombre de rayons, taille du récepteur et critère d'arrêt). Le test consiste à mesurer l'écart-type obtenu entre 10 simulations sur un groupe de récepteurs. Appliqués à différentes géométries, les résultats montrent que la convergence dépend de plusieurs facteurs (taille du modèle, matériaux, durée de propagation...) et qu'il est nécessaire d'effectuer le test à chaque nouvelle étude. En plus de pouvoir s'adapter au calcul de n'importe quel paramètre acoustique (niveau sonore, temps de réverbération, clarté), le test de convergence permet aussi d'obtenir une estimation de l'erreur de la simulation. Une fois paramétrée, la simulation permet d'obtenir les valeurs de paramètres acoustiques aussi précises que celles obtenues par la méthode des images, dans des temps de calcul bien plus courts.

La méthode des images permet d'obtenir des éléments supplémentaires à la simulation par lancer de rayons, notamment la position des images de la source, qui, pour l'étude des surfaces courbes en coupe (c'est-à-dire en

2D), offre un point de vue très didactique pour la compréhension des phénomènes de focalisation. Cependant, le calcul du niveau sonore par la méthode des images est conditionné par la discrétisation de la courbe. En lancer de rayons, nous démontrerons les limites du calcul géométrique du niveau sonore au point de focalisation d'un ellipsoïde de révolution. L'étude combinée par la méthode des images en 2D et le lancer de rayons en 3D des surfaces courbes élémentaires permettra, en fin de chapitre, de déterminer la courbe la plus adaptée pour la conception d'un plafond acoustique. Elle sera, par la suite, utilisée dans la première application (chapitre 3).

2.1. Le programme de simulation par lancer de rayons *Simonetta*

Au cours des XVII et XVIII^{ème} siècles, au nord de la ville de Milan, on se presse à la Villa Simonetta pour écouter les trente échos de sa propre voix depuis la fenêtre du troisième étage (Dal Re, 1726)(Figure 13). Sous les bombardements de l'offensive menée par les Alliés au printemps de 1945, une partie de la structure de la villa s'écroule. Les échos disparaissent et ne réapparaîtront pas après sa reconstruction en 1959 à cause de modifications apportées à l'architecture originelle. En référence à cette villa des échos disparus, nous avons appelé *Simonetta* l'outil de calcul par lancer de rayons conçu pour l'aide à la conception acoustique des salles et des villes.



Figure 13: Villa Simonetta par Athanasius Kircher et Tobias Nislen en 1684 (Deutsche Digitale Bibliothek, 2008).

2.1.1. Tir par la méthode de Monte Carlo à échantillonnage stratifié

La façon de lancer les rayons est un point très important de la simulation car il faut assurer une distribution uniforme de rayons sur la sphère unitaire (Krokstad, 1968). Pour obtenir cette distribution, il est possible d'utiliser des méthodes déterministes ou aléatoires (Kulowski, 1985). En principe, un tir déterministe (Figure 14a) est plus précis, mais il peut entraîner des problèmes d'artefacts (Beckers, 2014). De plus, un tir déterministe ne permet pas d'effectuer une étude de convergence de la solution, car il reste identique à chaque nouvelle simulation. Nous utiliserons donc une méthode aléatoire. Lorsque le tir est purement aléatoire et est effectué à partir des coordonnées géographiques : longitude et colatitude (méthode de Monte Carlo standard (Figure 14b)), davantage de rayons sont tirés vers les pôles de la sphère (Beckers, 2014). Il est donc préférable d'utiliser une méthode de Monte Carlo à échantillonnage stratifié, à condition que les cellules de base aient la même aire. Cela consiste à créer un maillage uniforme de la sphère unitaire, puis, à tirer aléatoirement un ou plusieurs rayons à l'intérieur de chaque cellule.

Nous utiliserons le maillage proposé par Beckers (2012) pour lequel toutes les cellules ont le même angle solide et le meilleur rapport d'aspect possible. D'après les tests de Beckers (2019), il s'agit de la méthode la plus adaptée pour lancer des rayons en acoustique, car c'est elle qui donne les meilleurs résultats sur les tests géométriques, la recherche des chemins de réflexion et l'évaluation des paramètres acoustiques. Avec cette méthode, on peut tirer n'importe quel nombre de rayons (490 cellules à la Figure 14c).

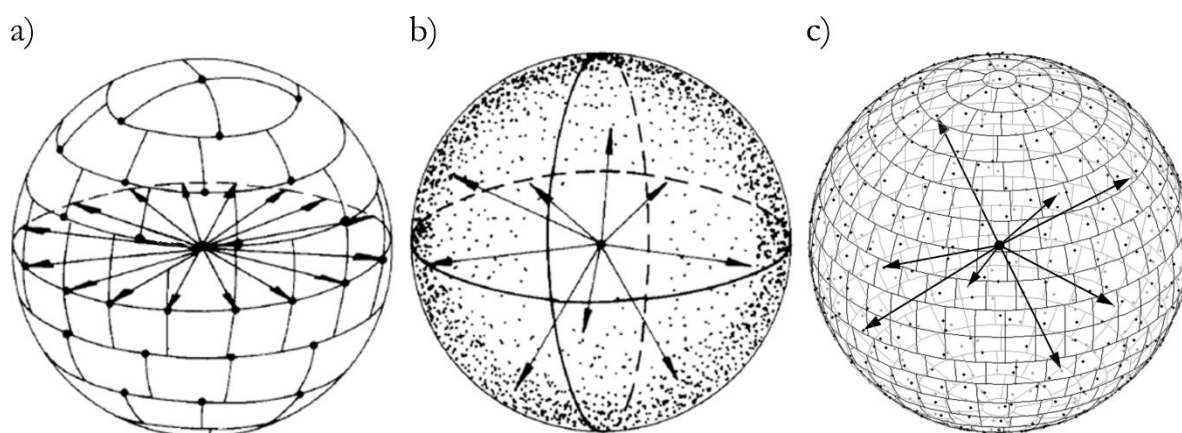


Figure 14 : Tir (a) déterministe, (b) aléatoire d'après Kulowski (1985) et (c) par la méthode de Monte Carlo à échantillonnage stratifié avec un maillage à angles solides égaux (490 divisions).

Cette partition de la sphère est obtenue avec la fonction *Matlab*[®] « *Bsams.m* » (Beckers, 2016b). Nous l'avons traduite et adaptée en langage C++ pour pouvoir l'intégrer au code *Simonetta*, en divisant sa structure originale en deux fonctions :

- La fonction *spherePartitionDimension.cpp* (annexe 1) divise en anneaux la surface de la sphère au niveau de ses latitudes ;
- La fonction *spherePartitionSequence.cpp* divise en cellules les anneaux de la sphère au niveau de ses longitudes (annexe 1).

L'annexe 1 montre comment utiliser ces fonctions pour générer la partition de la sphère et tirer un rayon aléatoirement à l'intérieur de chaque cellule.

2.1.2. Calcul d'intersection avec *Embree*

Historiquement, le calcul d'intersection entre un rayon et la géométrie est la partie algorithmique du lancer de rayons qui consomme le plus de temps de calcul (Weghorst, 1984). Il peut être réalisé à l'intérieur de la CPU (processeur) ou de la GPU (carte graphique) de l'ordinateur, et optimisé à l'aide de structures logicielles.

La plupart des ordinateurs sont équipés d'une CPU d'Intel[®], qui, depuis quelques années, développe sa propre structure logicielle open-source Embree, dédiée à l'optimisation du calcul par lancer de rayons. A l'origine, Embree a été conçu pour des applications de rendu réaliste et d'infographie (Computer Graphics) (Wald, 2014). Plus récemment, Embree a été utilisé dans le cadre de travaux de recherche pour le calcul des facteurs de vue étendus en lumière, avec des résultats très satisfaisants (Bugeat, 2020b).

La bibliothèque Embree se présente comme un ensemble de fonctions et de structures prédéfinies auxquelles il suffit de faire appel à l'intérieur d'un éditeur de code C++ (ici Visual Studio Community). Nous utilisons la fonction « *rtcIntersect* » qui prend comme donnée d'entrée une structure appelée rayon « *ray* » et une structure géométrique « *SCENE* » qui calcule le premier point d'intersection entre les deux.

Toutes nos géométries sont modélisées en externe avec des logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) (type Sketchup ou Blender) et prises par *Simonetta* comme données d'entrée au format « OBJ ». Nous avons développé deux fonctions pour traduire l'information contenue dans « OBJ » en structure « *SCENE* » :

- La fonction *loadOBJnumVnumF.cpp* (annexe 2) permet d'extraire la dimension de la géométrie ;
- La fonction *loadOBJ.cpp* (annexe 2) permet d'obtenir la « *SCENE* » correspondante.

Les « *SCENE* » prises en charge par *Embree* doivent être composées de géométries à éléments identiques. Plusieurs formats peuvent être pris en charge, ici, nous utilisons exclusivement des géométries composées d'éléments triangulaires. Grâce aux performances d'*Embree*, le programme *Simonetta* peut calculer l'intersection d'environ 22 millions de rayons par seconde avec la géométrie.

2.1.3. Réflexion spéculaire et absorption

Lors du tir, on attribue à chaque rayon une puissance initiale E_0 [W] (Eq. 4) :

$$E_0 = \frac{10^{\frac{L_w}{10}}}{N W_0} \quad (4)$$

avec :

- L_w , le niveau sonore de la source, exprimé en puissance [dB] ;
- N , le nombre de rayons tirés ;
- $W_0 = 10^{-12}$ W le seuil de puissance perceptible.

Nous considérons toutes les surfaces comme acoustiquement « opaques », c'est-à-dire qu'elles ne transmettent pas d'énergie. Lorsqu'un rayon rencontre une surface du modèle, une partie de son énergie est absorbée proportionnellement au coefficient d'absorption α de la face du modèle rencontrée.

Les coefficients α sont estimés à partir des données disponibles dans la littérature pour la bande d'octave centrée à 1 kHz. Ils sont fournis en donnée d'entrée du calcul sous la forme d'un fichier texte à une colonne, dont le nombre de lignes correspond au nombre de faces du modèle.

Pour l'étude acoustique des salles, l'absorption sonore causée par la présence d'une audience doit être prise en compte. Dans les simulations de la première application (chapitre 3), nous avons ajouté une surface plane absorbante au sol, à l'emplacement du public, avec un coefficient d'absorption $\alpha = 0.9$.

Comme nous l'avons présenté dans l'état de l'art, l'énergie qui n'est pas absorbée est réfléchiée de façon spéculaire.

2.1.4. Calcul d'intensité au récepteur par la loi de la sécante

La méthode de lancer de rayons de Monte Carlo consiste à discrétiser le front d'onde en un nombre fini de rayons et à les laisser se propager jusqu'à ce qu'ils intersectent un récepteur. A la différence de la méthode des images, ce récepteur ne peut pas être ponctuel. Dans nos simulations, comme dans la littérature et dans la plupart des logiciels, le récepteur est sphérique.

Pour calculer l'intensité sonore au récepteur, il faut repartir du calcul du volume d'une sphère par lancer de rayons. Lorsque l'on tire des rayons depuis un point source extérieur, le volume de la sphère (Eq. 5) peut être calculé par la somme des volumes des cônes tronqués créés par les rayons sécants en deux points (Figure 15) (Beckers, 2019).

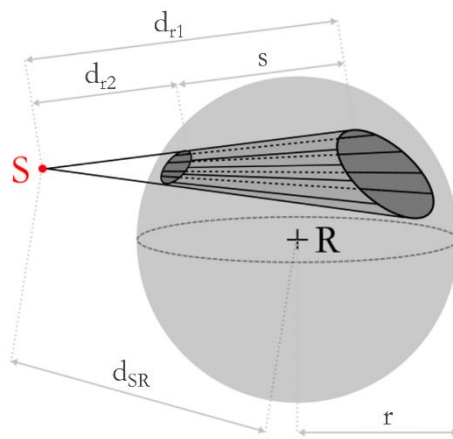


Figure 15 : Pyramide tronquée construite par un lancer de rayons depuis S , d'après Beckers (2019).

$$V_r = \frac{4\pi}{3N} \sum_1^n (d_{r2}^3 - d_{r1}^3) \quad (5)$$

avec :

- V_r , le volume de la sphère [m³];
- N , le nombre de rayons tirés;
- n , le nombre de rayons interceptés;
- d_{r1} , la distance de la première intersection du rayon avec la sphère [m];
- d_{r2} , la distance de la seconde intersection du rayon avec la sphère [m].

En développant le terme de la somme on obtient (Eq. 6) :

$$V_r = \frac{4 \pi}{3N} \sum_1^n (d_{r2} - d_{r1}) (d_{r1}^2 + d_{r1} d_{r2} + d_{r2}^2) \quad (6)$$

Puisque la sphère est petite et la source lointaine, on peut considérer que $d_{r1} \approx d_{r2} \approx d_{SR}$ donc $d_{r1}^2 = d_{r2}^2 = d_{SR}^2$. On obtient alors (Eq. 7) :

$$V_r = \frac{4 \pi}{3N} \sum_1^n (d_{r2} - d_{r1}) 3 d_{SR}^2 \quad (7)$$

avec :

- d_{SR} , la distance entre la source et le centre de la sphère [m].

L'expression se simplifie ainsi (Eq. 8) :

$$V_r = \frac{4 \pi d_{SR}^2}{N} \sum_1^n s_n \quad (8)$$

avec :

- s_n , la longueur de la sécante du rayon n avec le récepteur [m].

L'intensité I d'une source ponctuelle omnidirectionnelle décroît avec le carré de la distance à celle-ci (Eq. 9) :

$$I = \frac{W}{4 \pi d_{SR}^2} \quad (9)$$

avec :

- I , l'intensité sonore [$W m^{-2}$];
- W , la puissance sonore de la source [W].

En combinant l'Eq. 8 et l'Eq. 9, on obtient l'intensité sonore au récepteur (Eq. 10) :

$$I = \frac{1}{V_r} \frac{W}{N} \sum_1^n s_n \quad (10)$$

Le volume du récepteur est connu (Eq. 11) :

$$V_r = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (11)$$

avec :

- r , le rayon de la sphère du récepteur [m].

Jusqu'ici, on a considéré que tous les rayons interceptés proviennent de la source. En réalité, les rayons se propagent à l'intérieur d'une géométrie et peuvent être interceptés après un certain nombre de réflexions. A chaque réflexion, une partie de l'énergie transportée par le rayon est absorbée. La diminution de l'énergie est proportionnelle aux coefficients d'absorption α des surfaces rencontrées (Eq. 12) :

$$P_n = \prod_i (1 - \alpha_i) \quad (12)$$

avec :

- P_n , la proportion d'énergie transportée par le $n^{ième}$ rayon intercepté, elle vaut 1 au moment du tir ;
- i , le nombre de réflexions subies par le rayon ;
- α_i , le coefficient d'absorption de la surface interceptée à la $i^{ième}$ réflexion.

A partir de l'Eq. 10, l'Eq. 11 et l'Eq. 12 on obtient l'intensité reçue au récepteur (Eq. 13) :

$$I = \frac{3}{4\pi r^3} \frac{W}{N} \sum_1^n s_n P_n \quad (13)$$

Le calcul d'intensité est très facile à implanter dans le code, car il ne faut stocker qu'une seule valeur : la somme successive des sécantes pondérées par l'énergie des rayons interceptés. Le résultat peut être exprimé en niveau sonore fonction de l'intensité (Eq. 14) :

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (14)$$

avec :

- L_I , le niveau sonore en intensité [dB] ;
- $I_0 = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}$ le seuil d'intensité perceptible.

Pour obtenir le graphique temporel des réflexions au récepteur, il est nécessaire de prendre en compte les délais d'arrivée des rayons au récepteur (Eq. 15) :

$$t_r = \frac{d}{c} \quad (15)$$

avec :

- t_r , le retard du rayon [s] ;
- d , la distance parcourue par le rayon [m] ;
- $c = 340 \text{ m s}^{-1}$ la célérité du son dans l'air.

La distance de parcours d considérée prend en compte la demi-sécante à l'intérieur du récepteur (Eq. 16) :

$$d = d_1 + d_2 + \dots + d_i + d_{r1} + \frac{1}{2} s \quad (16)$$

Avec :

- $d_1 + d_2 + \dots + d_i$, la somme des distances parcourues jusqu'à la $i^{\text{ème}}$ intersection [m] ;
- d_{r1} , la distance entre le dernier point d'origine du rayon et la surface du récepteur [m] ;
- s , la sécante au récepteur [m].

2.2. Paramétrage de la simulation dans les enceintes prismatiques

2.2.1. Méthode de paramétrage par la recherche de convergence

La convergence du résultat par lancer de rayons est fonction du nombre de rayons tirés (N) et de la taille du récepteur (r). Pour illustrer ce phénomène, on calcule le niveau sonore en champ libre (c'est-à-dire sans obstacle aux alentours) sur 10 200 récepteurs répartis sur une zone de 50 m autour de la source. Les récepteurs sont distribués régulièrement en suivant une grille autour de la source, un récepteur est placé tous les 2 m. Les valeurs de niveau sonore obtenues sont ensuite interpolées de façon linéaire pour créer une carte de couleurs continue. Dans ce premier test (Figure 16 a-c), la taille du récepteur (notée r) est fixée (0.5 m de rayon) et on fait varier le nombre de rayons (noté N) tirés depuis la source. Les résultats montrent qu'avec l'augmentation du nombre de rayons le résultat converge et que cette convergence est plus rapide près de la source, là où la densité des rayons est la plus grande. Le temps de calcul augmente avec le nombre de rayons, il est de 5 secondes pour 10^5 rayons contre 9 minutes pour 10^7 . De plus, il faut s'assurer que le récepteur soit assez grand pour intercepter une densité suffisante de rayons : la Figure 16 d-f montre que la simulation réalisée sur 10^7 rayons se dégrade à mesure que la taille des récepteurs diminue.

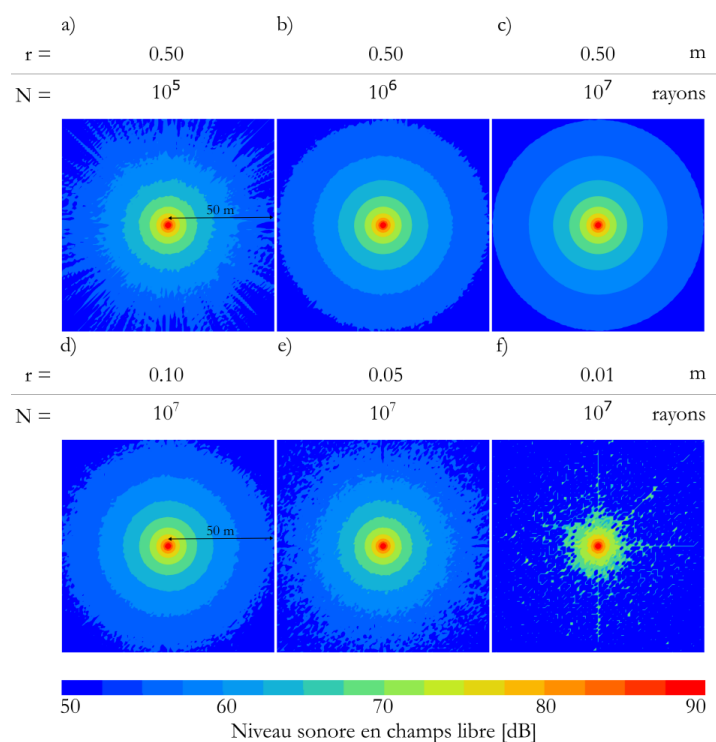


Figure 16: Effet du nombre de rayons sur le niveau sonore calculé en champ libre.

Le bon équilibre de la simulation doit donc permettre de trouver le meilleur compromis entre le nombre de rayons, la taille des récepteurs et le temps de calcul. Pour cela, nous utilisons un test de convergence basé sur la mesure de l'écart obtenu entre plusieurs répétitions d'une même simulation. On retrouve cette technique sous le nom de *run-to-run* en anglais, car il s'agit d'une méthode basée sur la mesure de la différence entre plusieurs répétitions d'une même simulation (Kulowski, 1982), (Dalenbäck, 2010), (Postma, 2015).

Le test que nous proposons repose sur l'étude de la convergence du résultat à partir de 10 simulations réalisées dans les mêmes conditions, sur un groupe de récepteurs. La convergence est évaluée à partir des écarts types σ obtenus entre les 10 simulations (Eq. 17) :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} \quad (17)$$

avec :

- σ , l'écart-type obtenu pour un récepteur sur 10 simulations ;
- x_i , le paramètre acoustique étudié ;
- \bar{x} , la moyenne obtenue sur le paramètre acoustique entre les 10 simulations (Eq. 18).

$$\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i \quad (18)$$

Les résultats des tests sont présentés sous la forme d'un diagramme en boîte (Figure 17) qui permet de visualiser très rapidement le comportement d'une série statistique et qui s'adapte bien à la recherche de convergence.

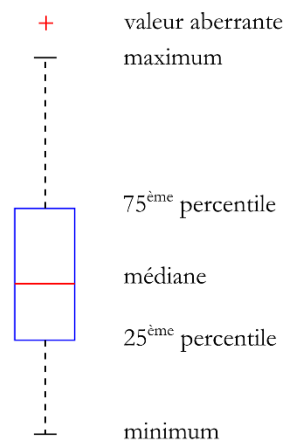


Figure 17: Diagramme en boîte des écarts-types entre les 100 récepteurs.

Nous présentons ici différents résultats de tests, résumés en fin de chapitre dans la Tableau 2. Pour comparer les vitesses de convergence entre les différents tests, nous donnerons les valeurs obtenues sur 1M et 10M de rayons. Dans le test n°1, on s'intéresse à une grande salle rectangulaire (52 m de long, 20 m de large et 18 m de haut) avec un coefficient d'absorption unique $\alpha = 0.10$. On place une source et un groupe de 100 récepteurs de rayon $r = 0.05$ m dans la salle et on effectue le lancer de rayons avec un temps de propagation des rayons de 1 s (soit 340 m de parcours). Le paramètre calculé et sur lequel on réalise le test est le niveau sonore (L_i [dB]). Dans les graphiques suivants, nous présentons les écart-types de niveaux sonores obtenus entre les 10 simulations réalisées sur 100 récepteurs. Un écart-type de 1 dB signifie donc que le niveau sonore simulé est obtenu avec un écart de ± 1 dB entre les simulations. La Figure 18a montre le diagramme en boîte obtenu lors du test n°1, et la Figure 18b montre le temps de calcul d'une simulation correspondante. Grâce à ces représentations, on observe comment la simulation converge à mesure que le nombre de rayons augmente et l'impact sur la durée du calcul : à 1M de rayons, tous les récepteurs sont à ± 0.75 dB avec un temps de calcul d'environ 20 s, et à partir de 10M de rayons, tous les récepteurs sont à ± 0.17 dB avec un temps de calcul d'environ 2 min 30.

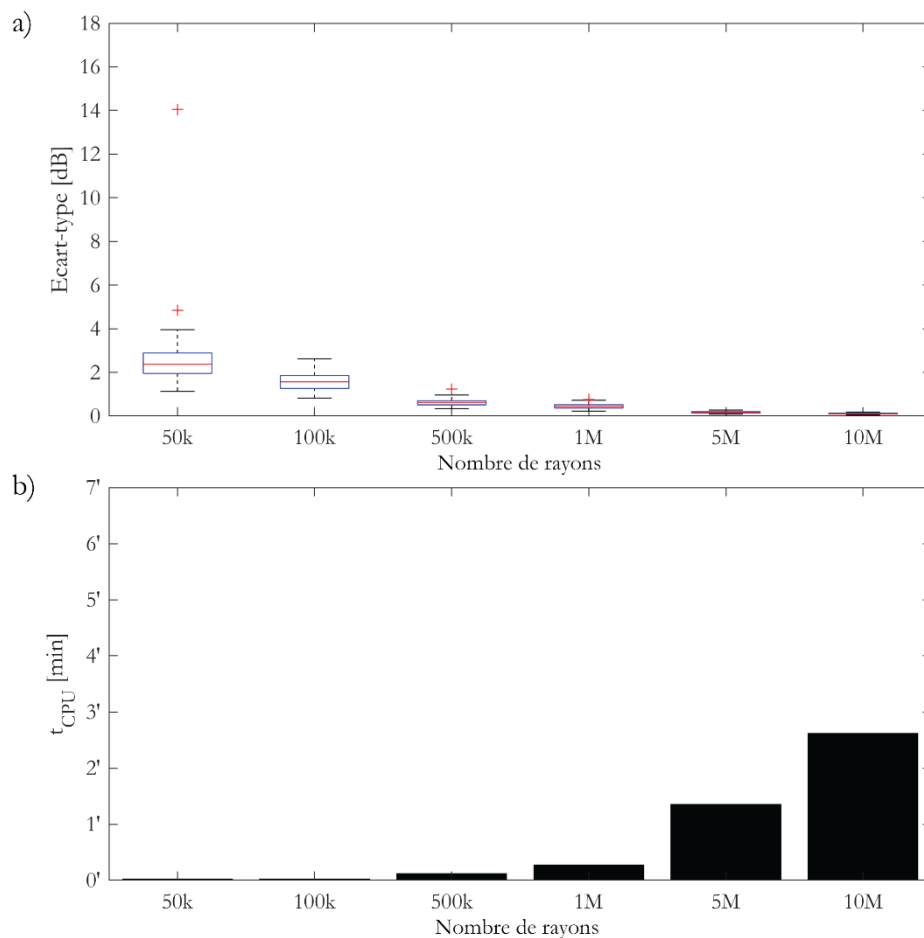


Figure 18: Test n°1 - (a) diagramme de convergence (b) temps de calcul dans une salle rectangulaire.

Pour obtenir plus rapidement la convergence, on propose dans le test n°2 d'agrandir la taille du récepteur (on passe d'un rayon de 0.05 m à 0.10 m) pour augmenter la probabilité d'intersecter les rayons. La Figure 19 montre que le résultat converge en effet beaucoup plus vite : à 1M de rayons, tous les récepteurs sont à ± 0.30 dB, et à 10M, tous les récepteurs sont à ± 0.07 dB et le temps de calcul reste identique à celui du test n°1.

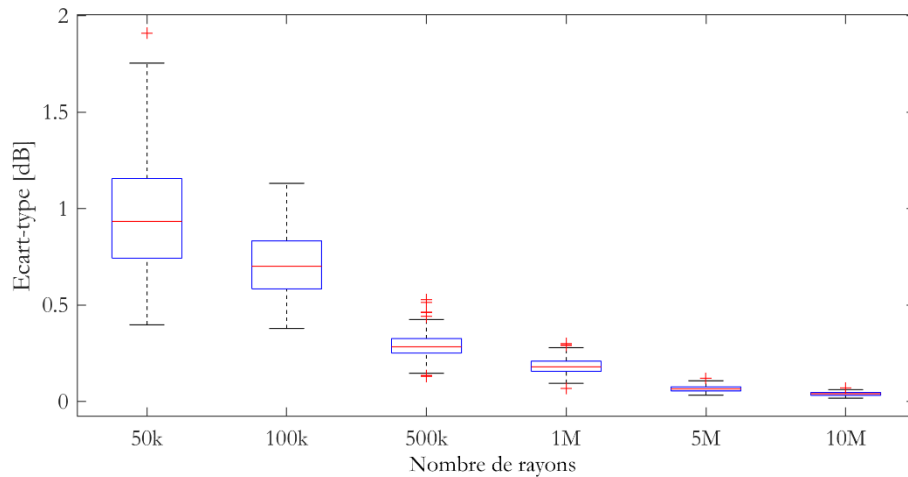


Figure 19: Test n°2 - diagramme de convergence de la même salle avec un récepteur plus grand.

Les tests n°1 et n°2 ont montré que la convergence du calcul augmente avec le nombre de rayons et la taille du récepteur. Jusqu'ici, la géométrie étudiée est simple, il s'agit d'une salle rectangulaire. Pour le test n°3, nous prenons une salle de même volume (environ 18 000 m³) avec une géométrie plus complexe (nous utilisons ici le modèle de la chapelle présenté dans la première application de la thèse (voir chapitre 3)). La simulation est identique (coefficient d'absorption, distance des récepteurs à la source, ...).

D'après la Figure 20, tous les récepteurs sont à ± 1.14 dB avec un temps de calcul d'environ 40 s, et à partir de 10M de rayons, tous les récepteurs sont à ± 0.28 dB avec un temps de calcul d'environ 6 min. Ce test montre que, pour un même volume, le calcul converge moins vite lorsque la géométrie est complexe. En effet, les réflexions sur certaines irrégularités du modèle peuvent disparaître d'une simulation à l'autre si la densité de rayons n'est pas suffisante.

Pour pouvoir se comparer au test n°2, le test n°3 a été effectué avec le même coefficient d'absorption unique $\alpha = 0.1$ pour toutes les surfaces. En réalité, la chapelle contient plusieurs matériaux et donc plusieurs coefficients d'absorption, dont l'effet sur le paramétrage est illustré par la Figure 21 (le détail exhaustif des coefficients d'absorption est disponible dans la première application de la thèse (chapitre 3)). D'après la Figure 21 l'ajout des coefficients d'absorption ralentit la convergence du calcul : tous les récepteurs sont à ± 1.34 dB pour 1M de rayons et à ± 0.32 dB pour 10M.

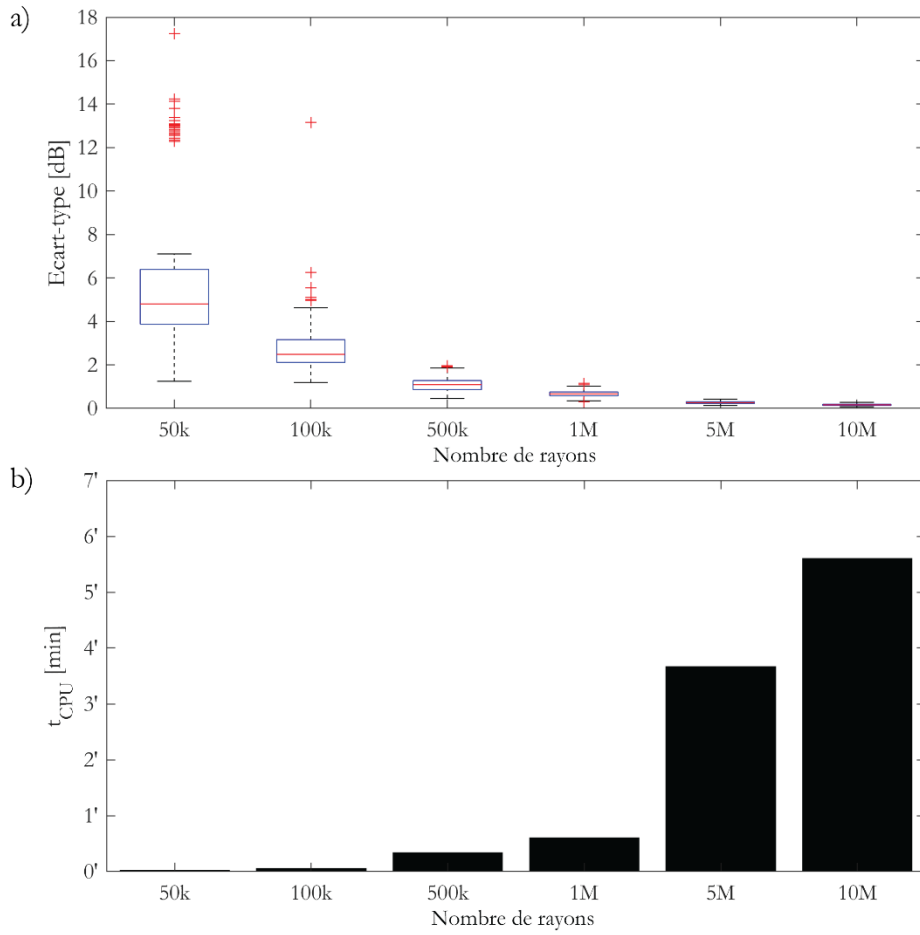


Figure 20: Test n°3 - (a) diagramme de convergence (b) temps de calcul dans une chapelle.

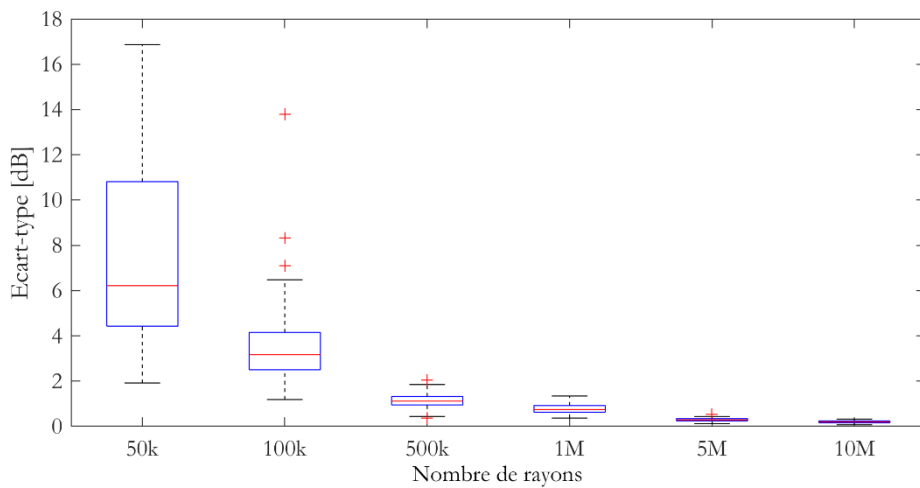


Figure 21: Test n°4 - diagramme de convergence dans la chapelle avec des matériaux variés.

L'ensemble de ces tests (résumés dans le Tableau 2) montre que la convergence du résultat dépend de plusieurs facteurs : la forme de la salle, les coefficients d'absorption, la taille des récepteurs et le nombre de rayons.

Tableau 2 : Résumé des tests.

| Test | Volume | Géométrie | r | α | Convergence à 1M de rayons | Fig. |
|------|-------------------------|---------------------|------|----------|----------------------------|------|
| 1 | 18 000 m ³ | Salle rectangulaire | 0.05 | 0.10 | ±0.75 dB | 18 |
| 2 | 18 000 m ³ | Salle rectangulaire | 0.10 | 0.10 | ±0.30 dB | 19 |
| 3 | ~ 18 000 m ³ | Chapelle | 0.05 | 0.10 | ±1.14 dB | 20 |
| 4 | ~ 18 000 m ³ | Chapelle | 0.05 | variés | ±1.34 dB | 21 |

Grâce aux tests de convergence, il est possible d'évaluer rapidement la vitesse de convergence du calcul et de choisir le meilleur compromis entre les différents paramètres de la simulation et le temps de calcul. Nous avons appliqué la méthode sur le paramètre du niveau sonore, et la valeur convergée du calcul est ici exprimée en dB, mais il est possible d'adapter le test à n'importe quel paramètre. La convergence du résultat s'exprime alors dans l'unité du paramètre étudié. Dans la première application (chapitre 3), par exemple, le paramétrage sera effectué sur le paramètre C_{50} . Pour déterminer si la convergence est suffisante, il suffit que le résultat soit inférieur à la JND (*Just Noticeable Difference* en anglais) du paramètre étudié, c'est-à-dire à la plus petite différence perceptible (Martellotta, 2010). Comme nous l'avons présenté dans le chapitre de l'état de l'art, la JND des paramètres de réverbération est d'environ 5% et celle des paramètres de Clarté et de niveau sonore est de 1 dB.

2.2.2. Erreurs de détection liées à la taille du récepteur

Lors du test n°2, nous avons montré que l'augmentation de la taille du récepteur permettait de converger plus rapidement. En présence d'une géométrie, puisque les récepteurs ne sont pas ponctuels, ils peuvent intersecter des rayons qui ne correspondent pas à un chemin valide. Il existe principalement trois types d'erreur de détection possibles en lancer de rayons (Lehnert, 1993) (Figure 22) : le récepteur est « à l'ombre » de la source mais un rayon direct intersecte le récepteur (erreur A), la réflexion sur le mur ne devrait pas intersecter le récepteur car le point de contact n'appartient pas au mur (erreur B), le récepteur est situé derrière la paroi (erreur C).

Dans ce dernier test, nous étudions l'effet de la taille du récepteur sur l'apparition de ces différentes erreurs. Pour cela, nous construisons une salle cubique de 6 m de côté séparée en deux par une demi cloison intermédiaire. Cette séparation permet de créer à l'intérieur de la pièce une zone dans le champ de vision de la

source (appelée zone éclairée) et une zone à l'ombre de la source. On calcule le niveau sonore direct (L_{direct} [dB]) sur 2500 récepteurs en prenant des sphères de 0.05 m de rayon puis de 0.50 m (Figure 23). Sur la Figure 23b, les erreurs de type A se concentrent principalement sur la diagonale de séparation entre la zone éclairée et la zone à l'ombre. Les erreurs de type C se retrouvent non seulement derrière la cloison intermédiaire, mais aussi sur tout le pourtour de la géométrie. On remarque aussi une zone bleue autour de la source. Elle correspond aux récepteurs qui « contiennent » la source et pour lesquels il n'est pas possible de calculer une sécante. Pour éviter l'apparition de telles erreurs, on s'assure que les récepteurs soient suffisamment éloignés de la source, des parois de la géométrie et que leur taille soit petite par rapport à l'espace étudié.

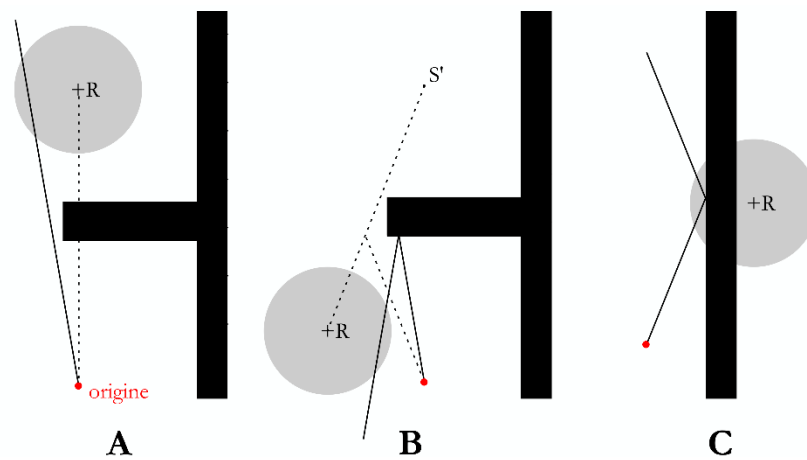


Figure 22 : Détections de chemins invalides pour les récepteurs non ponctuels d'après Lehnert (1993).

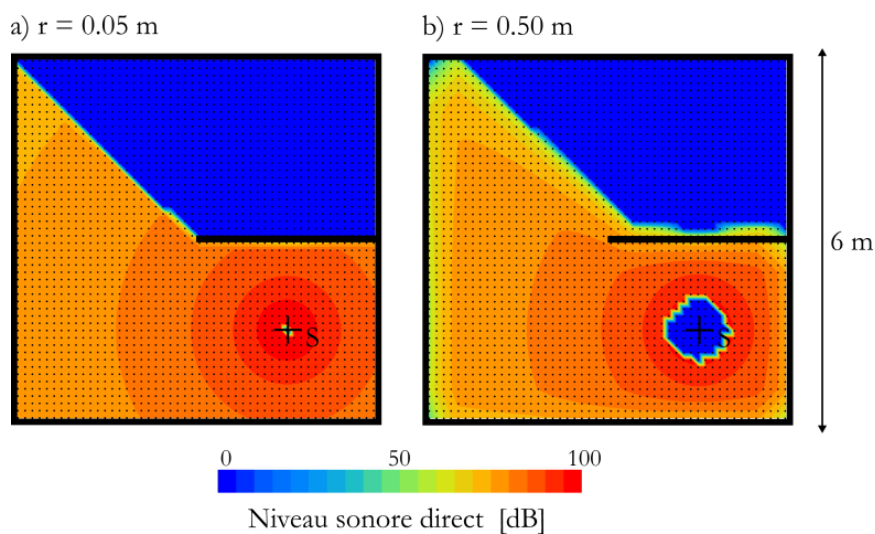


Figure 23 : Niveau sonore champ direct pour des récepteur de rayon (a) $r = 0.05$ m et (b) $r = 0.50$ m.

2.2.3. Critère d'arrêt des rayons

Le critère d'arrêt des rayons varie selon l'exigence du calcul. La simulation du paramètre C_{50} par exemple, repose sur le calcul des réflexions sur un temps infini. En pratique, on choisit un temps de propagation t_{max} [ms] au-delà duquel on estime que les réflexions n'ont plus d'effet, ce qui dépend à la fois de la taille de la géométrie, de la distance entre le récepteur et la source, mais aussi du coefficient d'absorption des surfaces. La Figure 24 et la Figure 25 montrent respectivement le calcul du paramètre du clarté de la parole (C_{50}) et du temps de première décroissance (EDT) en un point, à l'intérieur d'une salle rectangulaire, avec différents coefficients d'absorption des surfaces. Les résultats montrent que plus les surfaces sont absorbantes, plus vite le résultat converge. La vitesse de convergence varie selon le paramètre que l'on souhaite étudier. Ici, pour $\alpha=0.05$, la valeur de C_{50} se stabilise à partir 0.6 s de propagation tandis que la valeur de l'EDT se stabilise à partir de 1.2 s. Un test en amont de la simulation sur les récepteurs les plus éloignés de la source permet d'établir un temps de propagation minimum pour assurer la convergence du résultat.

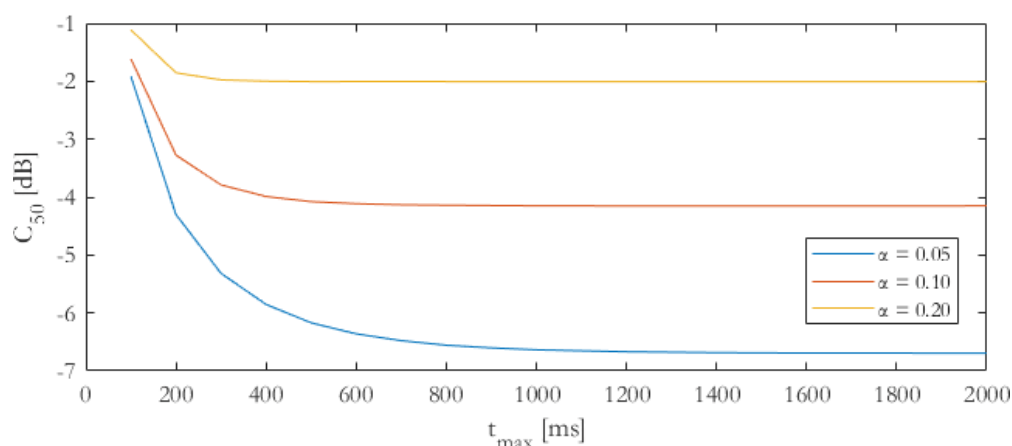


Figure 24 : Valeur de C_{50} en fonction du temps de propagation des rayons.

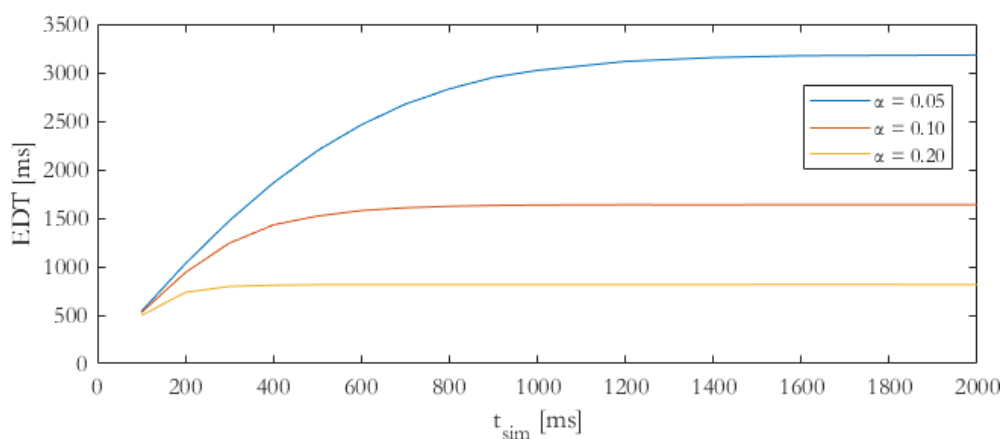


Figure 25 : Valeur d'EDT en fonction du temps de propagation des rayons.

Dans la première application (chapitre 3), on construit des images panoramiques des réflexions multiples, jusqu'à la dixième réflexion. Le calcul est alors effectué avec cette condition d'arrêt. Au cours de nos différents tests, nous avons constaté qu'il était nécessaire d'inclure systématiquement un critère d'arrêt sur le nombre de réflexions comme critère de sécurité pour arrêter les rayons qui ne se propagent plus que dans des petits espaces restreints et qui pénalisent le temps de calcul. Le critère d'arrêt de sécurité est arbitrairement fixé à 100 réflexions.

En conclusion :

- La convergence et la précision du résultat varient selon la taille du récepteur, le nombre de rayons, le temps de propagation des rayons, le volume et les matériaux de la géométrie ;
- Un test de convergence permet de déterminer rapidement le meilleur compromis entre le temps de calcul et la convergence du résultat obtenu ;
- Les tests ont montré qu'il est nécessaire de donner un temps de propagation plus long si les coefficients d'absorption sont faibles pour arriver à la convergence du résultat ;
- Pour éviter les erreurs de détection, il faut veiller à ce que les récepteurs n'interceptent pas des éléments de la géométrie.

2.2.4. Comparaison des résultats avec la méthode des images

La méthode des images permet de calculer géométriquement tous les chemins reliant un point source à un point récepteur. Elle consiste à construire les images du point source par rapport à toutes les parois d'une enceinte, puis, à identifier celles qui sont visibles depuis le récepteur. Avec la méthode des images, chaque image visible correspond à un pic discret sur le graphique temporel (réponse impulsionnelle). Lorsque deux images visibles de la source sont à une distance égale du récepteur (c'est-à-dire que deux réflexions arrivent en même temps), une opération supplémentaire est cependant nécessaire pour additionner l'énergie des deux réflexions coïncidentes.

Dans cette partie, nous comparons les graphiques temporels calculés par la méthode des images et par le code de lancer de rayons *Simonetta* sur le cas simple d'une salle rectangulaire (Tableau 3). L'objectif est de vérifier que le lancer de rayons permet de reconstituer le graphique temporel obtenue par la méthode des images et de calculer avec précision les paramètres acoustiques courants.

La simulation par la méthode des images a été réalisée à l'aide de la procédure *Matlab*[®] « *Proprim.m* » (Beckers, 2017) modifiée pour reconstituer le graphique temporel, traiter la superposition des images et prendre en compte le coefficient d'absorption des parois. La simulation par lancer de rayons a été réalisée par *Simonetta*,

avec un tir de 100 millions de rayons et un récepteur de 0.05 m de rayon avec un intervalle de temps $t_{step} = 1$ ms. Avec ce paramétrage, le test de convergence (voir chapitre précédent) donne une convergence du résultat à 0.002 dB. Les réponses impulsionnelles sont calculées par les deux méthodes pour 1 réflexion (Figure 26) et dix réflexions (Figure 27) des rayons.

Tableau 3 : Dimensions de la géométrie étudiée.

| | |
|--|-----------|
| Dimensions de la salle rectangulaire | 8×7×3 m |
| Coordonnées de la source par rapport au centre de la pièce | 0 -3 -0.1 |
| Coordonnées du récepteur par rapport au centre de la pièce | 1 1 -0.3 |
| Coefficient d'absorption des parois | 0.05 |

Les résultats montrent que le lancer de rayons permet d'obtenir un échogramme très ressemblant à celui de la méthode des images. Certains pics présentent un léger décalage temporel (comme les pics n° 2, 5 et 6 de la Figure 26). Cela est dû, pour le lancer de rayons, à la taille du récepteur, qui génère une imprécision sur le temps d'arrivée des réflexions. Ici, comme les récepteurs sont très petits et le nombre de rayons très important, le décalage n'exécède pas une milliseconde.

Ce décalage peut générer des erreurs sur l'estimation de paramètres acoustiques. Le Tableau 4 montre les paramètres calculés à partir des graphiques temporels de la Figure 27. A chaque fois, les résultats montrent une très bonne concordance entre les deux méthodes. Les tests complémentaires ont été réalisés autour du paramètre C_{50} , en étudiant les variations obtenues sur les valeurs du C_{49} et C_{51} (Tableau 5). Les variations obtenues dans la méthode des images se retrouvent aussi dans le lancer de rayons et les écarts entre les deux méthodes sont inférieures à 0.05 dB. Ces écarts très faibles peuvent être dû aux arrondis effectués sur les distances de parcours à l'intérieur de chaque programme.

Tableau 4 : Valeurs de paramètres acoustiques obtenus à l'intérieur d'une salle rectangulaire.

| Paramètre | Méthode des images (10 réflexions) | Lancer de rayons (100M) (10 réflexions) |
|---------------|---------------------------------------|--|
| LI total [dB] | 91.74 | 91.75 |
| C_{50} [dB] | -2.32 | -2.37 |
| C_{80} [dB] | -0.71 | -0.74 |
| EDT [ms] | 648 | 650 |

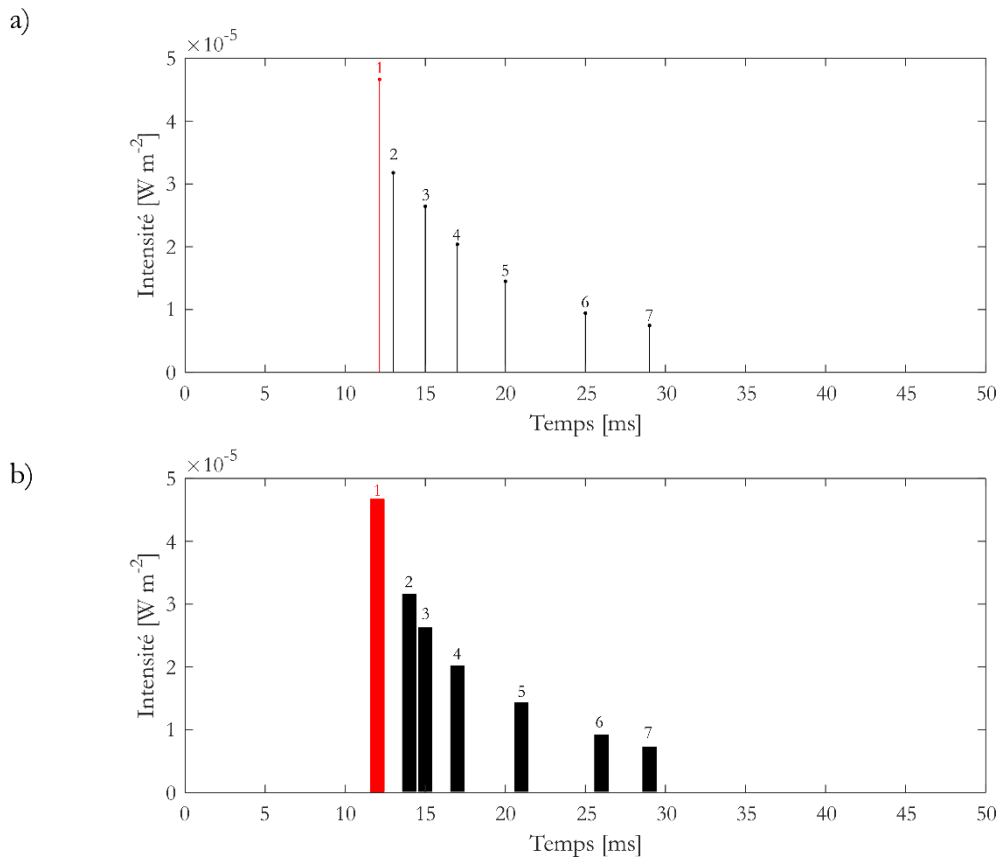


Figure 26: Graphique temporel avec 1 réflexion calculées par (a) la méthode des images et (b) par lancer de rayons.

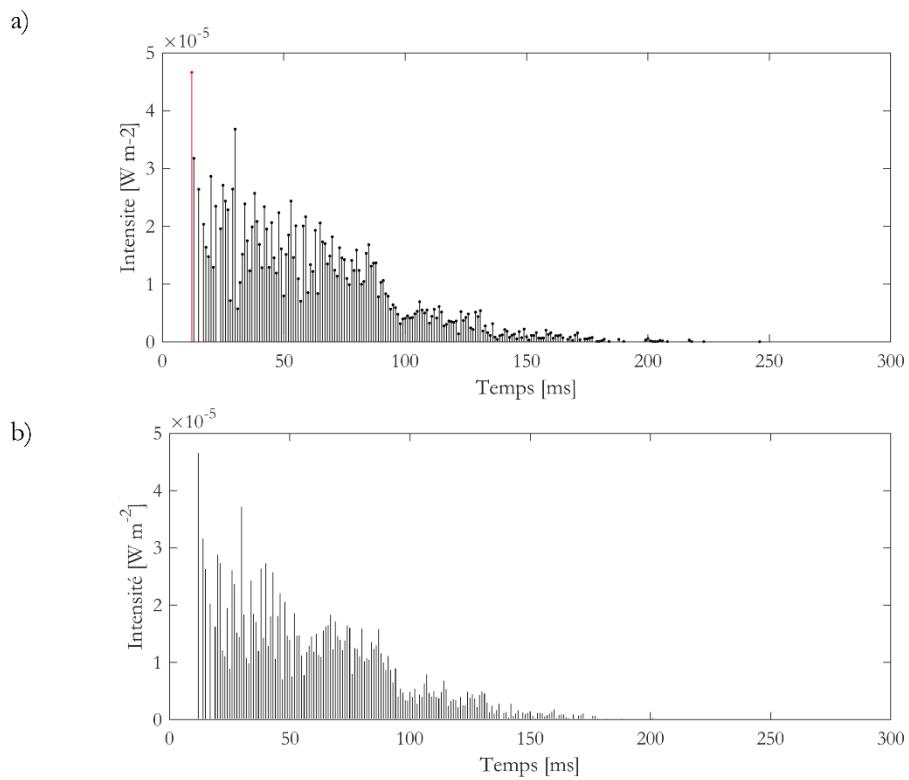


Figure 27: Graphique temporel avec 10 réflexions calculées par (a) la méthode des images et (b) par lancer de rayons.

Tableau 5: Variations autour du paramètre C_{50} .

| | C_{49} [dB] | C_{50} [dB] | C_{51} [dB] |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| Méthode des images | -2.41 | -2.32 | -2.28 |
| Lancer de rayons | -2.43 | -2.37 | -2.31 |

Ces résultats ont été obtenus avec deux méthodes exécutées sur deux logiciels différents (une procédure *Matlab*[®], et un code C++), il est donc difficile de savoir ce qui, dans les écarts de temps de calcul observés, est relatif à la méthode ou au logiciel. Pour les deux méthodes, plus le nombre de réflexions à calculer est élevé, plus le temps de calcul augmente (Tableau 6). Cependant, dans le cas du lancer de rayons, l'augmentation du temps de calcul en fonction du nombre de réflexions est linéaire, ce qui rend la simulation beaucoup plus facile à gérer. De plus, il est possible d'appliquer un critère d'arrêt sur la distance de parcours des rayons au lieu du nombre de réflexions, ce qui permet de restreindre le calcul à la durée de propagation que l'on souhaite étudier.

Tableau 6: Temps de calcul pour la salle rectangulaire.

| Nombre de réflexions | Méthode des images | Lancer de rayons | Lancer de rayons |
|----------------------|--------------------|------------------|------------------|
| | | (1M) | (10M) |
| 1 | 0.023 seconde | 0.325 seconde | 3.146 secondes |
| 10 | 8 minutes | 1.333 secondes | 13.518 secondes |

Rappel:

Tous les temps de calcul ont été obtenus sur un PC disposant d'un processeur Intel[®] Core[™] i-9-9880 H CPU @ 2.3 GHz 2.30 GHz.

2.3. Etude des surfaces courbes discrétisées

2.3.1. Construction des géométries

Dans cette dernière partie du chapitre concernant la méthode, nous étudions l'effet des surfaces courbes sur les réflexions sonores calculées à l'aide des méthodes géométriques (la méthode des images et le lancer de rayons). Tous les résultats de la méthode des images ont été obtenus à l'aide de *Radii2D*, qui comporte dans son interface, la construction de courbes élémentaires (parabole, ellipse, cercle, et spirale logarithmique) paramétrées par leurs dimensions et un nombre d'éléments de discrétisation de la courbe (limité à 360). La Figure 28 montre les cartes de réflexions obtenues sur *Radii2D* avec un cercle discrétisé en 30, 100 et 360 segments.

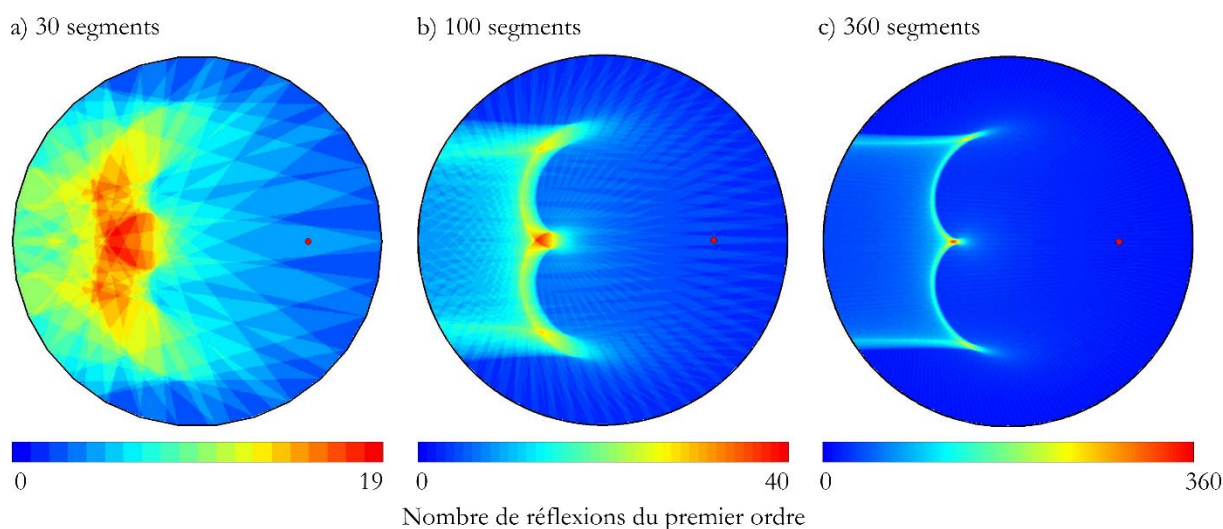


Figure 28: Construction d'un cercle avec *Radii2D*.

Pour pouvoir se comparer aux images de *Radii2D*, et, par la suite, étudier les surfaces courbes en 3D avec le lancer de rayons, il est nécessaire de construire un modèle en 3D des surfaces étudiées. Pour cela, nous utilisons l'outil « *Math Function* » du logiciel de création 3D libre Blender qui transforme une fonction mathématique définie par l'utilisateur en un objet 3D. La fonctionnalité « *XYZ Function* » permet de séparer la modélisation du maillage structuré en trois équations X , Y , et Z qui correspondent à la paramétrisation des courbes en coordonnées cartésiennes. Elles peuvent prendre en compte jusqu'à deux variables u et v dont on définit les limites (*min* et *max*) et le nombre d'intervalles de discrétisation (variable « *step* »). Pour se comparer aux images

de *Radit2D*, les modèles doivent correspondre à la courbe, extrudée sur une grande longueur : le cercle devient un cylindre, l'ellipse devient un cylindre elliptique etc. La Figure 29 montre les cylindres correspondant aux cercles de la Figure 28, modélisés à l'aide de l'outil « *XYZ Function* » et de l'Eq. 19 :

$$\begin{cases} x = a \cos(u) \\ y = a \sin(u) \\ z = v \end{cases} \quad (19)$$

avec :

- a : le rayon du cylindre (10 m dans la Figure 29);
- u : angle au centre dans l'intervalle $[-\pi ; \pi]$ avec une discrétisation u_{step} (variable)
- v : la hauteur du cylindre (10 m dans la Figure 29) avec une discrétisation v_{step} (10 dans la Figure 29).

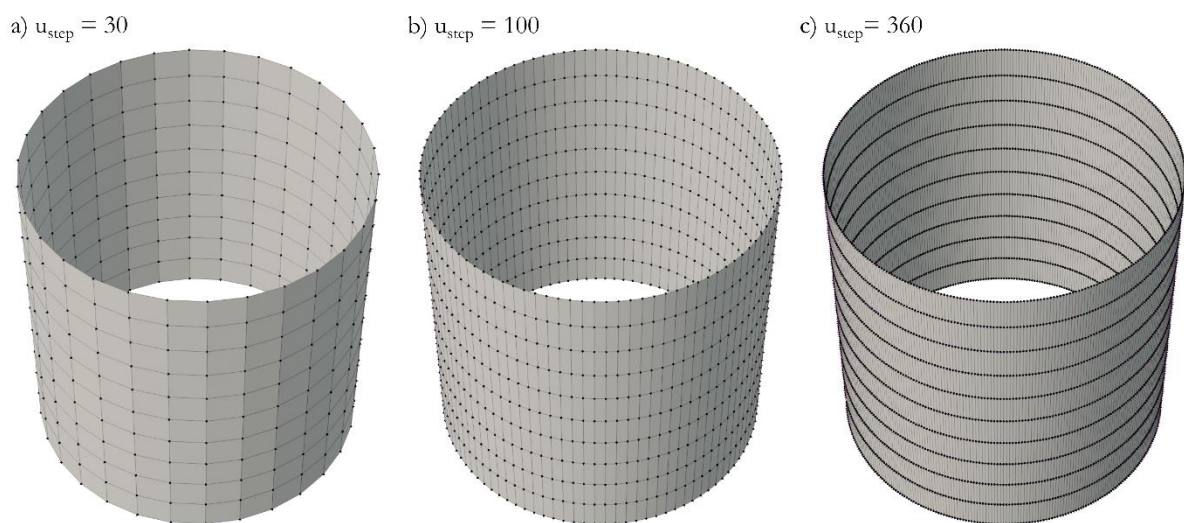


Figure 29: Construction d'un cylindre avec Blender.

Grâce à cet outil, il est possible d'obtenir des surfaces courbes discrétisées aussi complexes et lisses qu'on le souhaite. Pour lisser d'avantage la surface, on peut augmenter le nombre d'intervalles de discrétisation (variable « *step* ») (et donc le nombre de faces).

L'un des premiers aspects à prendre en compte lors de la simulation par les méthodes géométriques est donc la discrétisation de la courbe. Aux points de focalisation, ou le long des caustiques, les récepteurs sont soumis à un grand nombre de réflexions. En négligeant les effets ondulatoires, ce phénomène se traduit géométriquement par l'augmentation locale du niveau sonore. Pour calculer le niveau sonore avec la méthode des images, il suffit d'additionner l'énergie apportée par chaque image visible de la source. Le résultat sur le niveau sonore à l'intérieur de l'ellipse dépend donc de la discrétisation de la courbe, (Figure 30). On retrouve cet effet en simulation par lancer de rayons (Figure 31). On remarque dans les deux cas que la discrétisation de l'ellipse a un effet très important sur le niveau sonore au second foyer de l'ellipse.

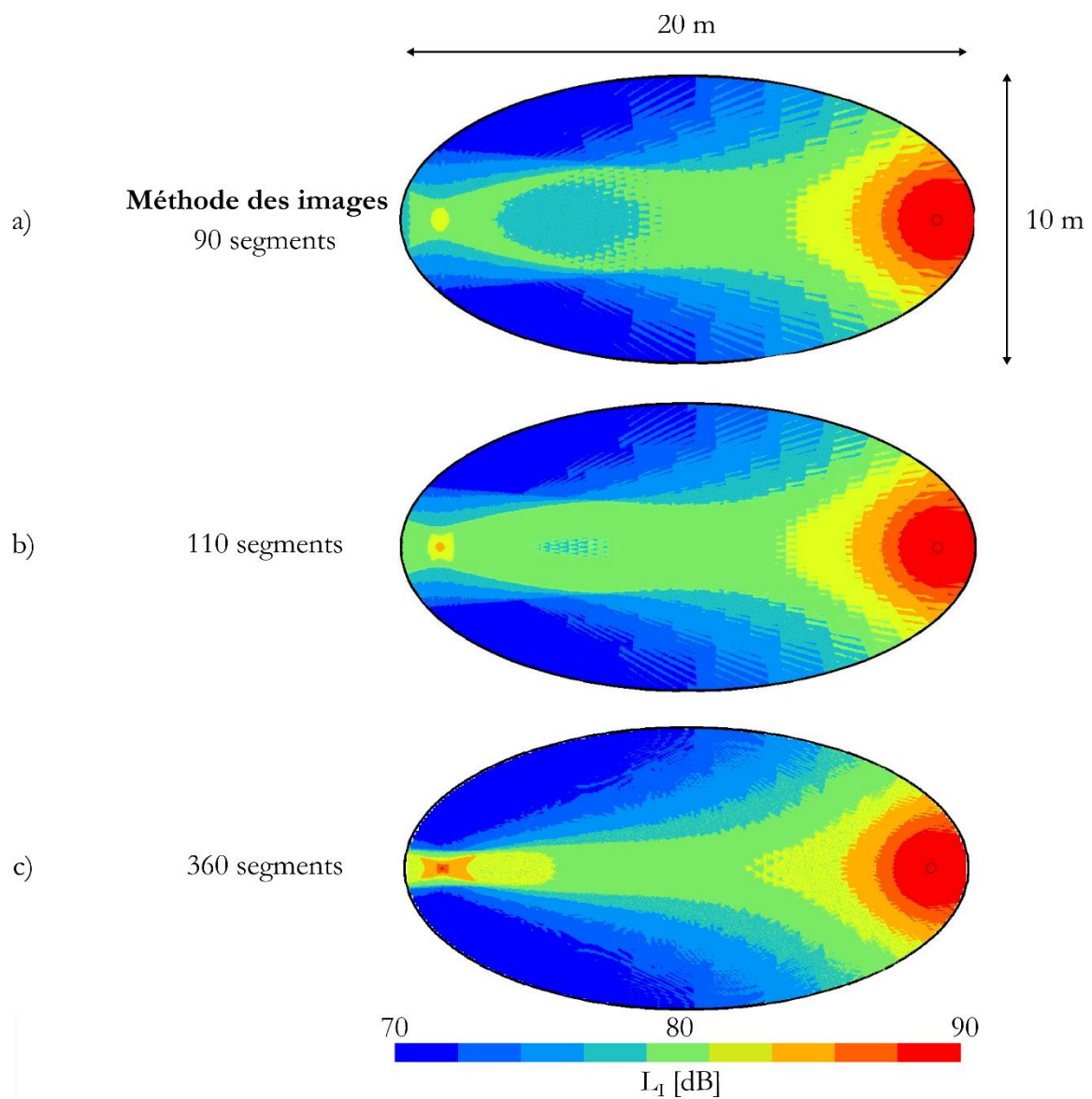


Figure 30 : Niveau sonore après 1 réflexion à l'intérieur d'une ellipse, méthode des images.

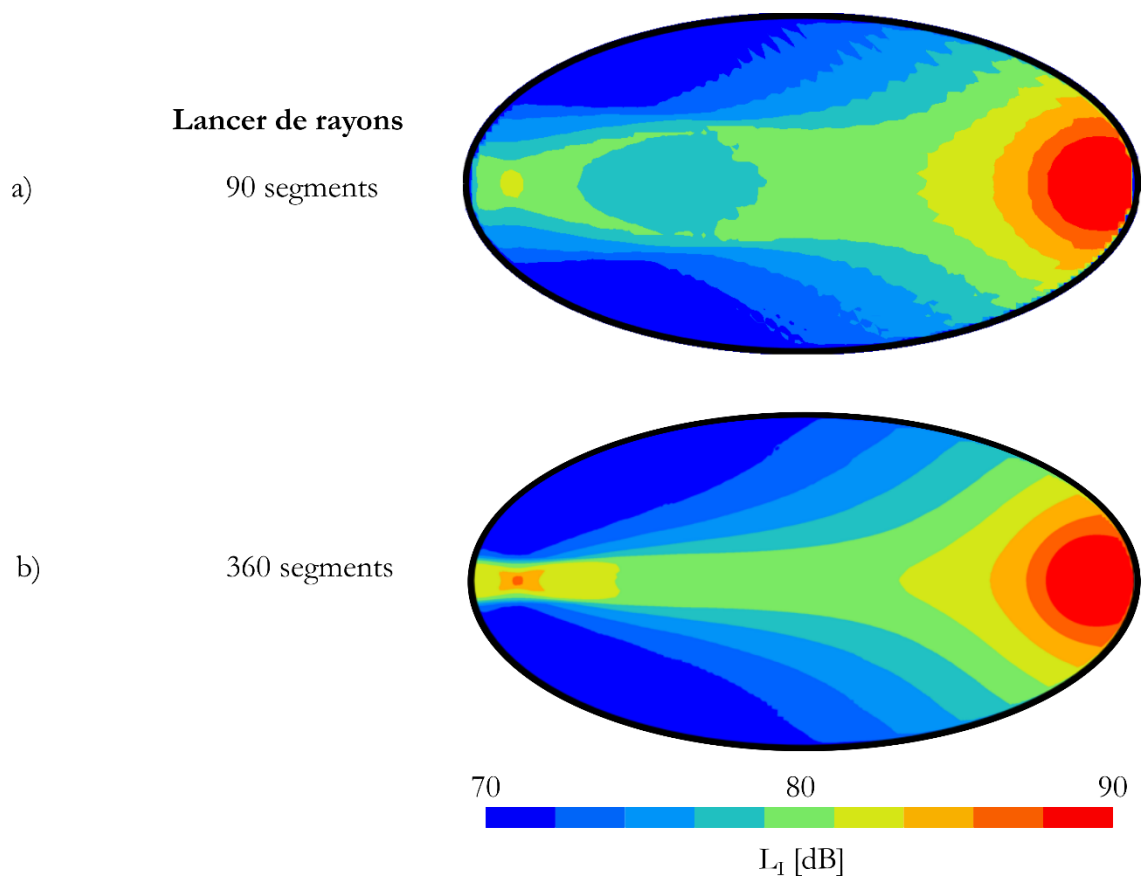


Figure 31: Niveau sonore après 1 réflexion à l'intérieur d'une ellipse calculé par lancer de rayons.

2.3.2. Calcul géométrique du niveau sonore au point de focalisation

Nous démontrons ici, dans le cas de l'ellipse, la formule qui permet d'obtenir le niveau sonore au point de focalisation en fonction de la discrétisation de la courbe par la méthode des images. L'équation d'une ellipse est donnée en (Eq. 20) :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (20)$$

avec :

- a , le demi grand axe de l'ellipse [m] ;
- b , le demi petit axe de l'ellipse [m].

Tout point $P(x_p, y_p)$ appartenant à l'ellipse vérifie la relation (Eq. 21) dans laquelle S et R sont ses foyers.

$$SP + PR = 2a \quad (21)$$

En considérant une absorption nulle de la surface, chaque image de la source par rapport aux segments de l'ellipse apporte alors un niveau sonore égal à (Eq. 22) :

$$L_{reflection} = L_w - 11 - 20 \log_{10} 2a \quad (22)$$

avec :

- L_w , le niveau sonore de la source [dB].

Exprimée en énergie, on obtient pour chaque image une intensité (Eq. 23) :

$$I_{reflection} = I_0 10^{\frac{L_{reflection}}{10}} \quad (23)$$

avec :

- $I_0 = 10^{-12}$ [W m⁻²] le seuil d'intensité perceptible.

Le nombre de réflexions incidentes, noté j , dépend alors du nombre d'images de la source, c'est-à-dire de la discrétisation de l'ellipse. En combinant les expressions précédentes, on obtient alors l'Eq. 24 qui donne le niveau sonore au point de focalisation de l'ellipse. La Figure 32 montre le résultat obtenu par l'Eq.24 à l'intérieur d'une ellipse de paramètre $a = 5$ m et avec $L_w = 100$ dB.

$$L_{foyer\ ellipse\ image} = L_w - 11 - 20 \log_{10} 2a + 10 \log_{10}(j) \quad (24)$$

avec :

- j , le nombre de segments qui composent l'ellipse.

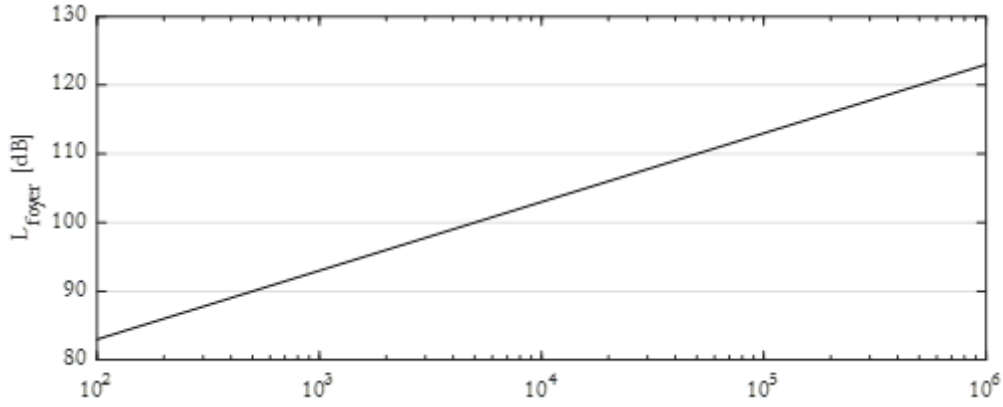


Figure 32 : Niveau sonore au point de focalisation ellipse, fonction discrétisation courbe, méthode des images.

L'Eq. 24 est aussi valable pour un ellipsoïde de révolution (Eq. 25) où $c = b$. Pour le lancer de rayons, l'ellipsoïde de révolution est un cas particulier intéressant car d'après ses propriétés géométriques, tous les rayons émis depuis le premier foyer interceptent simultanément le deuxième foyer après la première réflexion. En négligeant les effets ondulatoires sur le point de focalisation et en considérant une absorption nulle de la surface, cette propriété géométrique de l'ellipsoïde suppose qu'une source placée au premier foyer, de niveau sonore L_w , engendre un niveau sonore en intensité équivalent sur le deuxième foyer $L_{\text{foyer}} = L_w$.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (25)$$

avec :

- a , le demi-grand axe de l'ellipsoïde de révolution [m] ;
- b , le demi-petit axe de l'ellipsoïde de révolution [m] ;
- c , le troisième demi-axe de l'ellipsoïde [m], pour un ellipsoïde de révolution $c = a$ ou $c = b$.

Or, dans le calcul par lancer de rayons, si l'on place le récepteur sur le deuxième foyer, tous les rayons tirés sont interceptés ($n = N$) et passent par le centre du récepteur. Toutes les sécantes sont alors égales (Eq. 26).

$$\sum_1^n s_n = N 2r \quad (26)$$

Pour rappel, l'intensité au récepteur vaut :

$$I = \frac{3}{4\pi r^3} \frac{W}{N} \sum_1^n s_n P_n \quad (27)$$

Dans le calcul de l'intensité (Eq. 27), et en considérant que l'ellipsoïde est parfaitement réfléchissant, on obtient alors une valeur d'intensité au récepteur égale à l'Eq. 28 :

$$I = \frac{6W}{4\pi r^2} \quad (28)$$

On obtient alors la valeur du niveau sonore au foyer (Eq. 29). Notons qu'elle est indépendante des dimensions de l'ellipsoïde :

$$L_{\text{foyer ellipse rayons}} = L_W + 10 \log_{10} \frac{3}{2\pi} - 20 \log_{10} r \quad (29)$$

La Figure 33 compare le résultat de l'Eq. 29 et le résultat obtenu par simulation dans un ellipsoïde de révolution. Le niveau sonore théorique obtenu est concordant avec les résultats des simulations. Les différences observées pour les tailles de récepteurs inférieures à 0.3 m sont dues à la discrétisation géométrique de l'ellipsoïde qui fait que tous les rayons ne passent pas exactement au centre du récepteur. Certains d'entre eux peuvent ne pas être détectés par le récepteur lorsqu'il est trop petit.

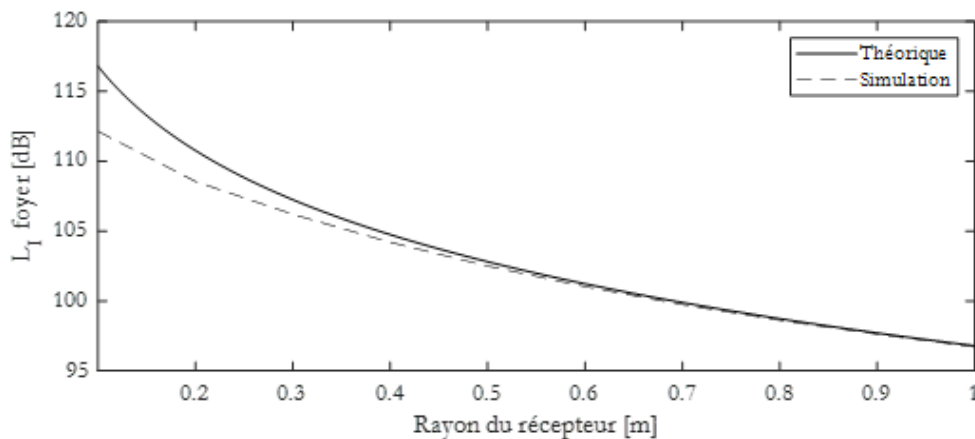


Figure 33 : Niveau sonore calculé après 1 réflexion au second foyer d'un ellipsoïde de révolution par lancer de rayons.

Pour obtenir le résultat théorique $L_{foyer} = L_w$, il faut que le récepteur sphérique ait la dimension :

$$r = \sqrt{\frac{3}{2\pi}} \approx 0.70 \text{ m} \quad (30)$$

Dans les paragraphes suivants, nous utiliserons cette taille du récepteur. Après la première réflexion, tous les rayons sont passés par le récepteur, qui devient alors, en quelque sorte, la nouvelle source de l'ellipsoïde. En négligeant l'atténuation dans l'air et l'absorption de la surface, on obtient alors un graphique temporel en ping-pong (Figure 34). On remarque que les pics s'étalent de plus en plus avec le temps : ceci est dû à la discrétisation de la surface qui fait perdre un peu de précision sur le trajet et donc sur les délais d'arrivée des rayons. Le problème du calcul du niveau sonore au point de focalisation en va de même pour un ellipsoïde quelconque ($c < b$). La seule différence réside dans les délais d'arrivée des rayons, qui focalisent au deuxième foyer avec un certain retard, certains rayons arrivent plus tôt, et les pics s'étalent vers la gauche (Figure 35).

Nous avons montré que le calcul du niveau sonore au point de focalisation n'est pas immédiat. Dans le cas de l'ellipsoïde de révolution, on connaît la solution analytique, ce qui ne sera plus le cas pour l'étude de courbes plus complexes. Cependant, le calcul du niveau sonore par les méthodes géométriques sur les caustiques dépend principalement de la phase et de la fréquence de l'onde étudiée, ce qui n'est pas pris en compte par les méthodes géométriques. En revanche, les méthodes géométriques permettent d'identifier rapidement l'apparition des caustiques. Dans la partie suivante, nous montrons l'intérêt de l'étude des surfaces courbes en 2D par la méthode des images, et en 3D par le lancer de rayons.

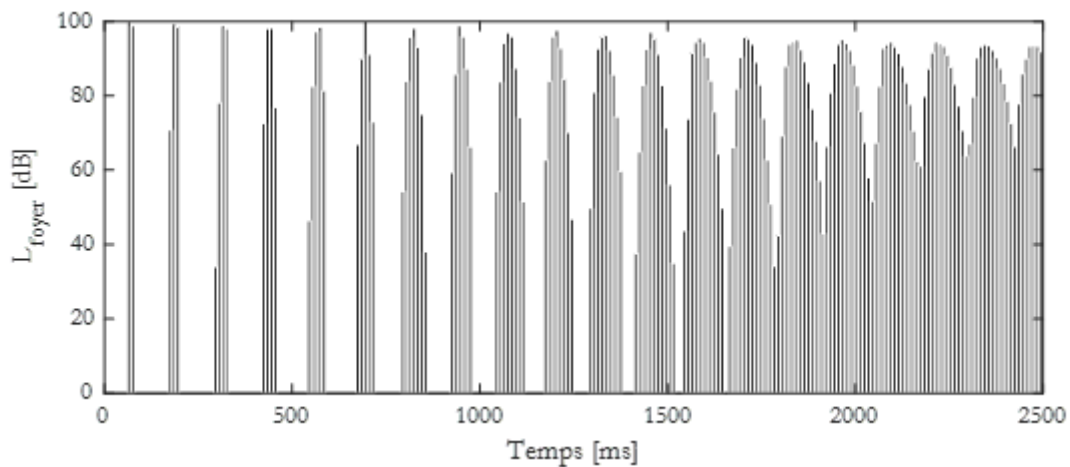


Figure 34 : Graphique temporel à l'intérieur d'un ellipsoïde de révolution.

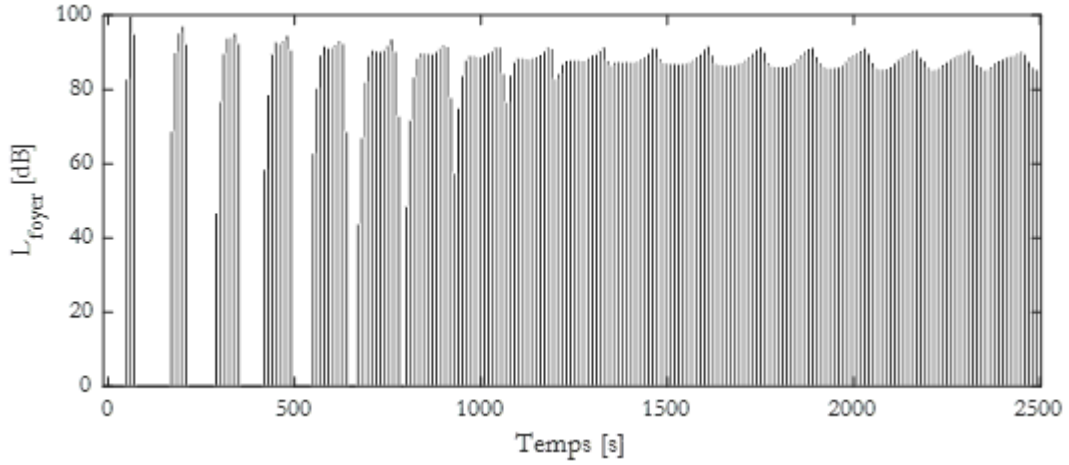


Figure 35: Graphique temporel à l'intérieur de l'ellipsoïde avec $c = 0.40 b$.

2.3.3. Position des images sur la courbe orthotomique

La méthode des images permet de reconstruire géométriquement tous les chemins qui relient la source au récepteur en construisant toutes les images de la source par rapport aux plans de l'enceinte, et à éliminer celles qui ne sont pas visibles depuis le récepteur. En plus du résultat, on obtient alors une information supplémentaire qui est la position des images. Lorsque l'enceinte est constituée de surfaces courbes, les images de la source s'alignent suivant une nouvelle courbe : la courbe orthotomique (Beckers, 2014). L'orthotomie d'une courbe C par rapport à un point P correspond au lieu géométrique des symétriques de P par rapport aux tangentes à la courbe C .

Pour une ellipse, par exemple, l'orthotomie de la courbe par rapport à un foyer correspond à un cercle centré sur le second foyer (Ferréol, 2020). Nous utilisons ici le programme *Radit2D* qui permet de calculer la première réflexion dans une enceinte vue en coupe, et de visualiser les images de la source. La Figure 36a montre l'alignement des images de la source (point rouge à droite) sur le cercle orthotomique de l'ellipse et la focalisation des réflexions sur le second foyer. L'ellipse a été discrétisée en 360 éléments, chacun d'entre eux engendrant une image de la source. Toutes les images de la source sont donc placées à une distance égale du second foyer, et toutes les réflexions arrivent au second foyer avec un retard égal Δt (Eq. 31).

$$\Delta t = \frac{2(a-f)}{c} \quad (31)$$

Avec :

- Δt , le délai d'arrivée des réflexions au second foyer [s] ;
- a , le grand demi axe de l'ellipse [m] ;
- f , la distance entre les deux foyers [m] ;
- c , la vitesse du son dans l'air [m s^{-1}] .

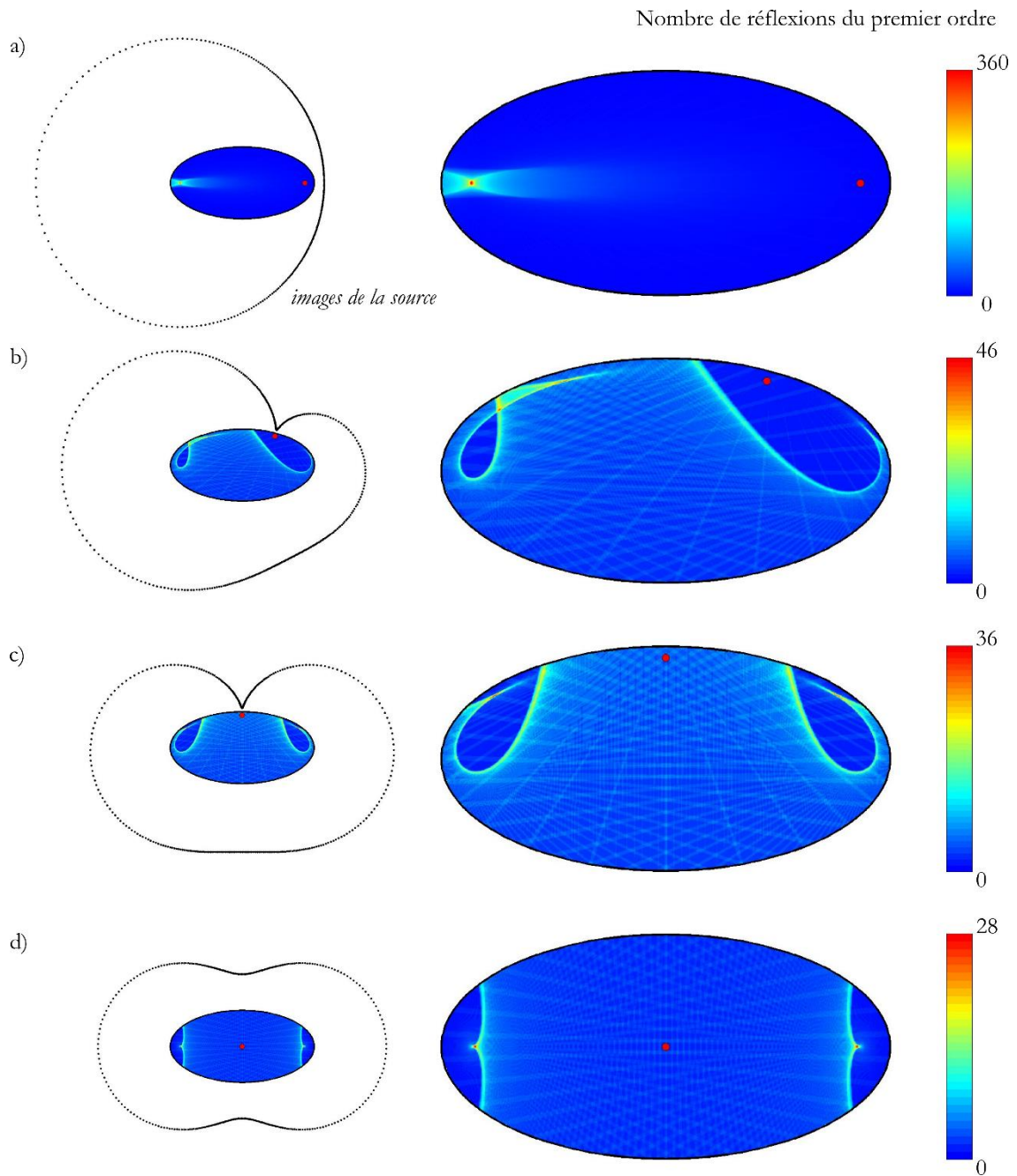


Figure 36 : (a) Focalisation des réflexions au deuxième foyer de l'ellipse, (b, c, d) caustiques à l'intérieur de l'ellipse.

Lorsque la source quitte le foyer de l'ellipse, le cercle orthotomique se déforme et la focalisation se modifie (Figure 36). Les réflexions s'entrecroisent le long de nouvelles courbes appelées caustiques. Quelle que soit la position de la source, les caustiques sont présentes, ce qui signifie que certaines zones à l'intérieur de l'ellipse reçoivent beaucoup plus de réflexions que d'autres. L'ellipse a été discrétisée en 360 segments de droites, et la focalisation la plus forte se produit à la Figure 36a où les 360 réflexions se rejoignent au second foyer.

On retrouve une orthotomie circulaire à l'intérieur du cercle lorsque la source est placée en son centre (Figure 37a). La focalisation se produit alors à l'endroit même où se situe la source. De la même manière que dans l'ellipse, des caustiques apparaissent lorsque la source quitte le point d'apparition de la focalisation, on retrouve de nouvelles caustiques à l'intérieur du cercle et l'orthotomie prend la forme d'un limaçon de Pascal (Ferréol, 2020). Lorsque la source atteint la surface du cercle, l'orthotomie comme la caustique, se déforment jusqu'à atteindre la forme d'une cardioïde. Sur la Figure 37d, on identifie très clairement les deux cardioïdes en homothétie avec une symétrie axiale.

2.3.4. Forme idéale d'un plafond acoustique

L'ellipse et le cercle sont donc deux courbes qui focalisent. Lorsque la source se déplace, les caustiques changent brutalement d'aspect. Pour le concepteur de l'acoustique d'une salle qui souhaite travailler avec des formes courbes, il s'agit donc de trouver celle qui lui permette de rediriger les réflexions sonores sans les focaliser. Dans la littérature, on retrouve beaucoup l'utilisation de plafond parabolique. L'architecte Le Corbusier, par exemple a conçu un plafond en demi parabole couchée dans sa proposition pour la Salle des Nations à Genève (Figure 38) (Barron, 2009).

La parabole est intéressante, car elle réfléchit parallèlement les rayons divergents émis depuis son foyer (Figure 39a). Dans ce cas là, l'énergie sonore est renvoyée dans une seule direction, la courbe orthotomique des images est une ligne droite. Avec cette configuration, autant de réflexions arrivent aux derniers qu'aux premiers rangs, là où elles ne sont pas forcément nécessaires. Sur la Figure 39, on remarque qu'en déplaçant la source, la courbe orthotomique des images devient une cubique circulaire (Ferréol, 2020) et qu'une grande partie des réflexions sont redirigées vers la partie opposée de l'enceinte. Cette propriété géométrique permet donc d'apporter d'avantage de réflexions aux derniers rangs de la salle. Cependant, les surfaces autour de la source (c'est-à-dire les surfaces qui vont recevoir d'avantage d'énergie) redirigent principalement les réflexions vers les premiers rangs.

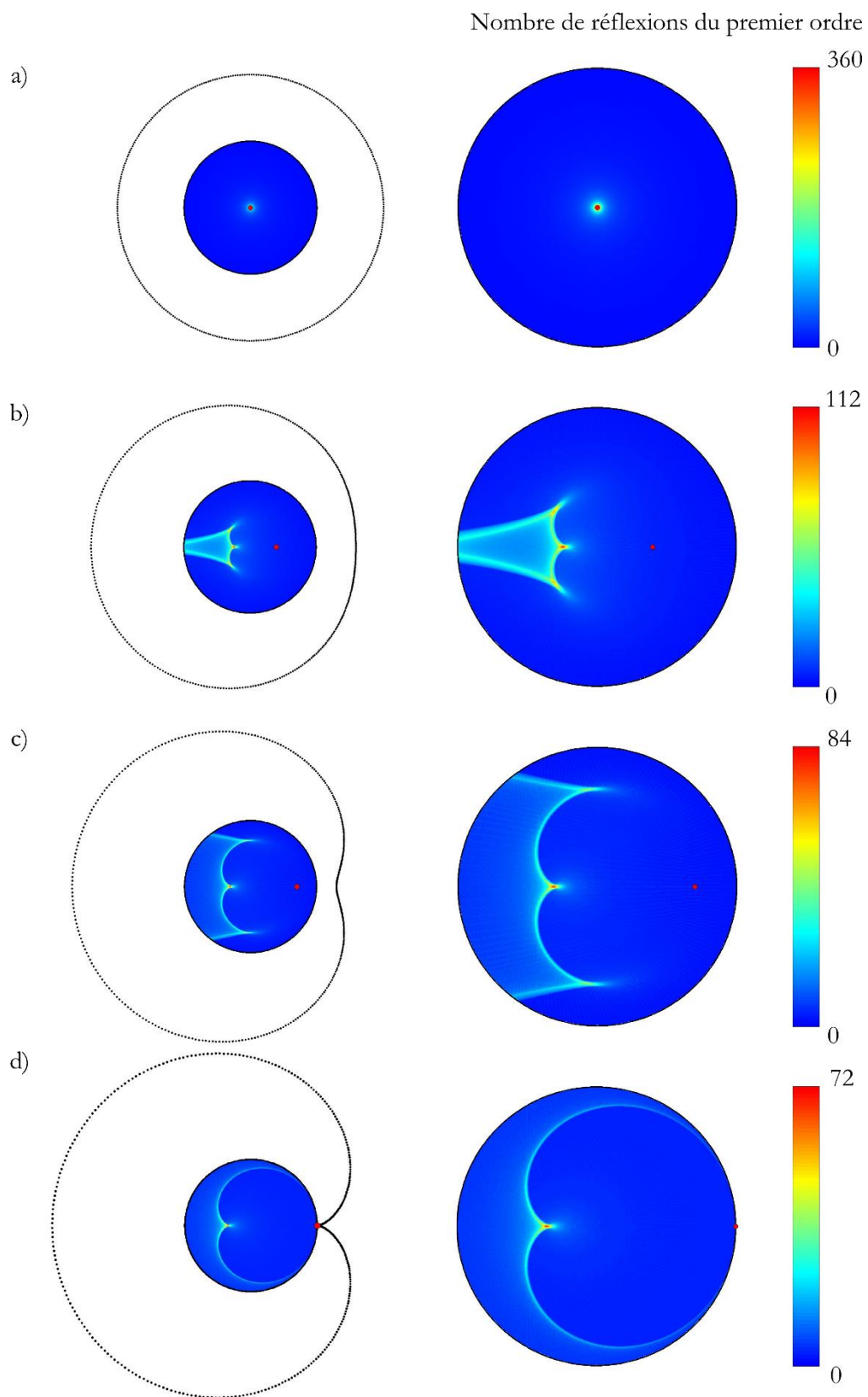


Figure 37: Focalisation des réflexions dans le cercle.

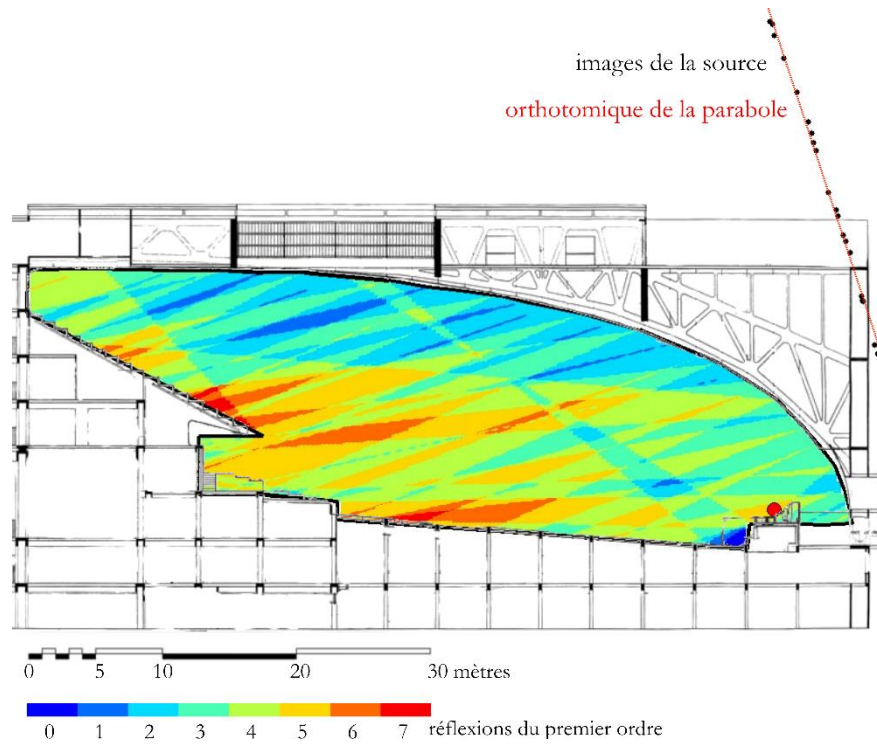


Figure 38: Salle des Nations conçue par Le Corbusier d'après un plan de Barron (2009) étudiée avec Radit2D.

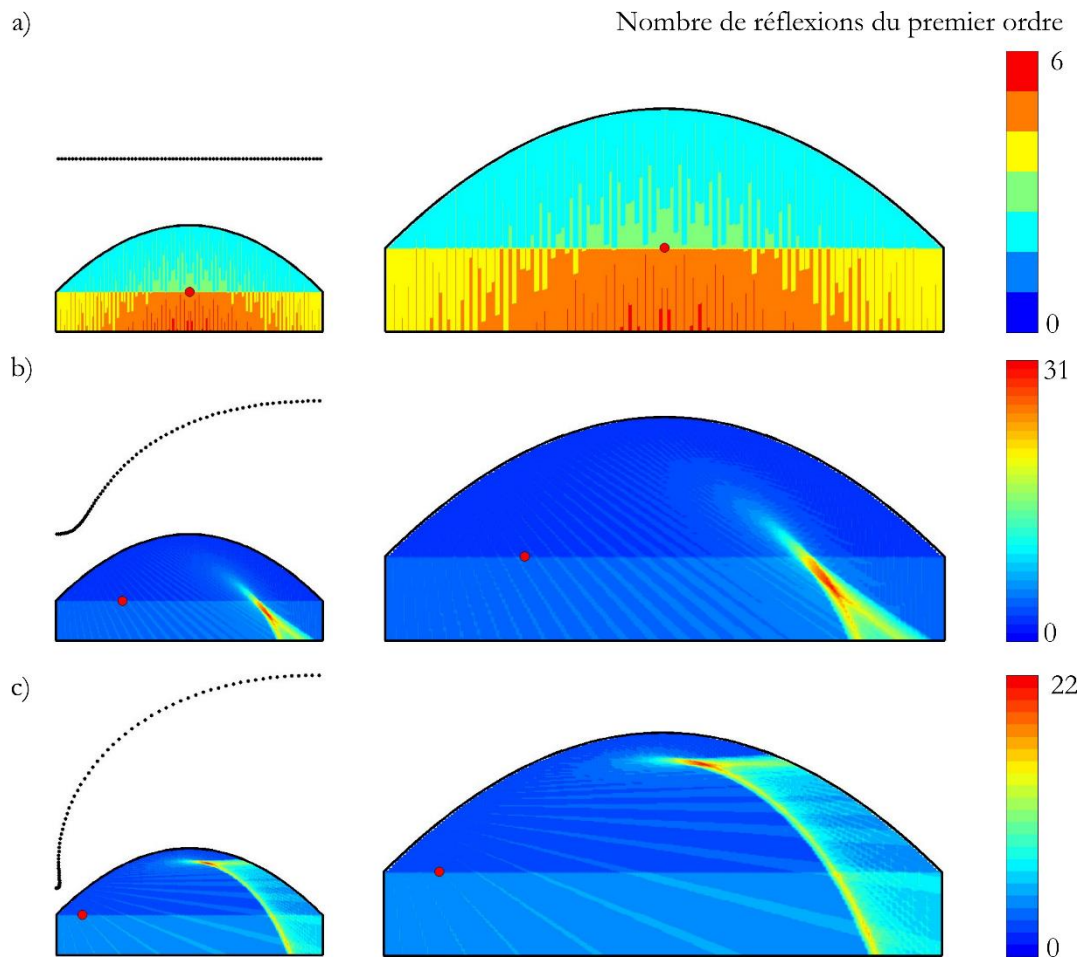


Figure 39: Réflexions du premier ordre à l'intérieur d'une parabole.

Pour déterminer la forme courbe idéale d'un plafond acoustique par rapport à une position de la source, Beckers (2014) propose de commencer par dessiner l'enceinte avec un plafond polygonal, discrétisé en plans de même longueur que l'on oriente successivement de manière à couvrir (ou à « éclairer ») la plus grande partie du public (Figure 40). Pour cela, on commence par orienter les panneaux autour de la source, car c'est sur ces surfaces là que l'énergie incidente sera la plus importante. En refaisant l'exercice de Beckers (2014), la courbe obtenue n'est ni circulaire, ni elliptique, ni parabolique. La courbe orthotomique des images est de même forme que la courbe qui vient d'être dessinée, il s'agit d'une portion de spirale logarithmique (Figure 41). La spirale logarithmique est donc une courbe adaptée à la conception d'un plafond acoustique, elle permet de rediriger les réflexions vers les zones les plus éloignées de la source.

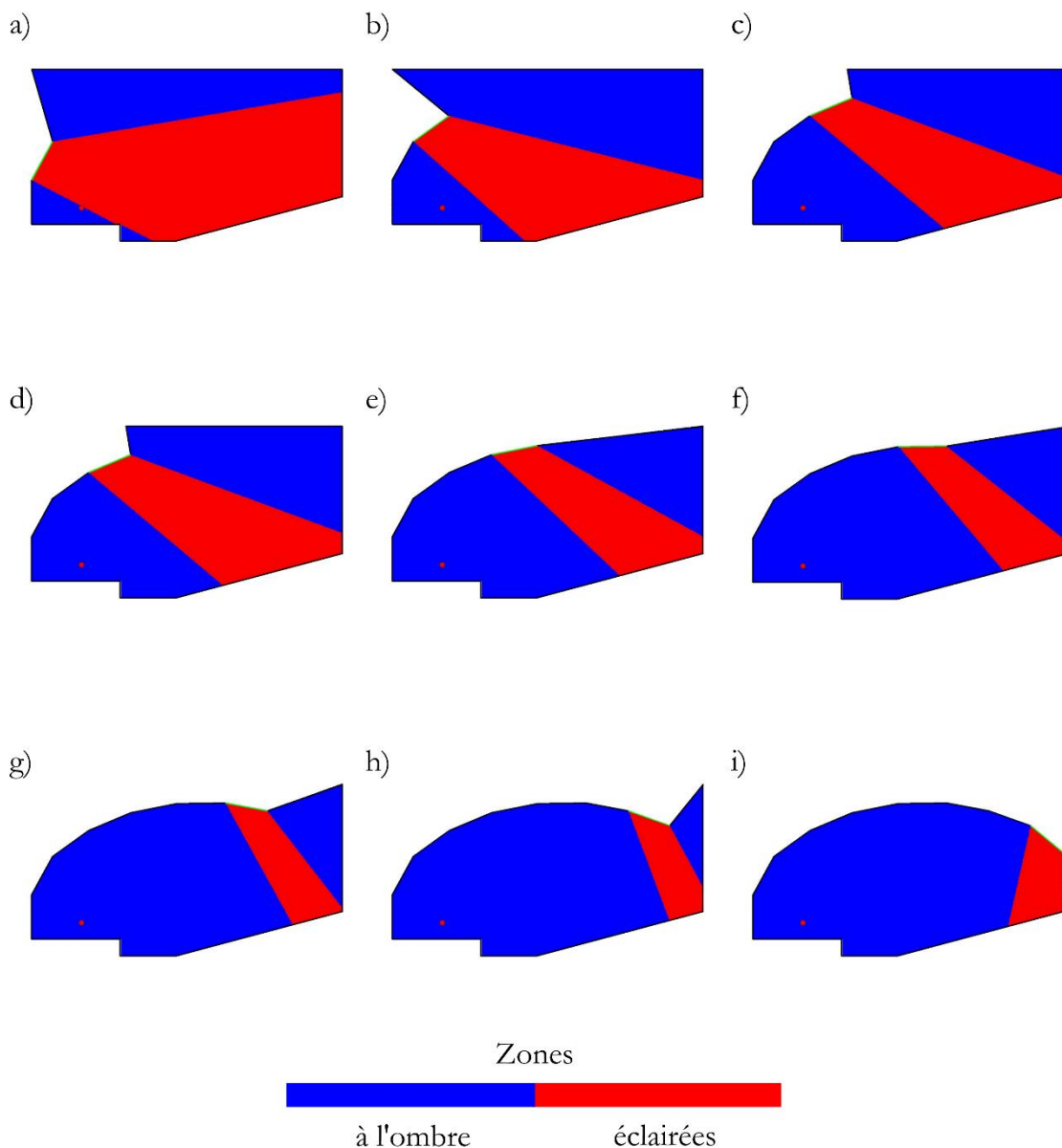


Figure 40 : Construction d'un plafond réflecteur courbe à partir d'éléments de 4m de long.

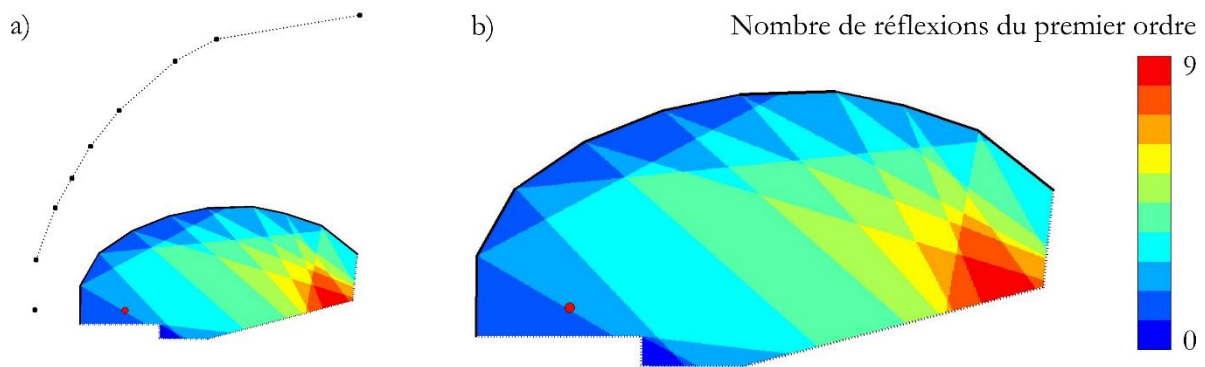


Figure 41 : Réflexions du premier ordre à l'intérieur de la salle dessinée.

2.3.5. Caustiques d'ordre supérieur

Comme nous l'avons mentionné en introduction de la méthode, le champ sonore à l'intérieur des salles de concert ou d'une ville est principalement dominé par les réflexions multiples et spéculaires. Comme montré à la Figure 42, la forme caustique calculée par la méthode des images se retrouve parfaitement en simulation par lancer de rayons. Les différences de gradient sont dû au logiciel *Radit2D* qui impose une échelle à 9 couleurs. Grâce à cette validation, il est possible de calculer les réflexions d'ordre supérieur avec le lancer de rayons et de voir apparaître des nouvelles caustiques. A l'intérieur du cylindre (Figure 42), dès la seconde réflexion, on voit très distinctement apparaître deux nouvelles caustiques : une cardioïde et une cissoïde de Dioclès.

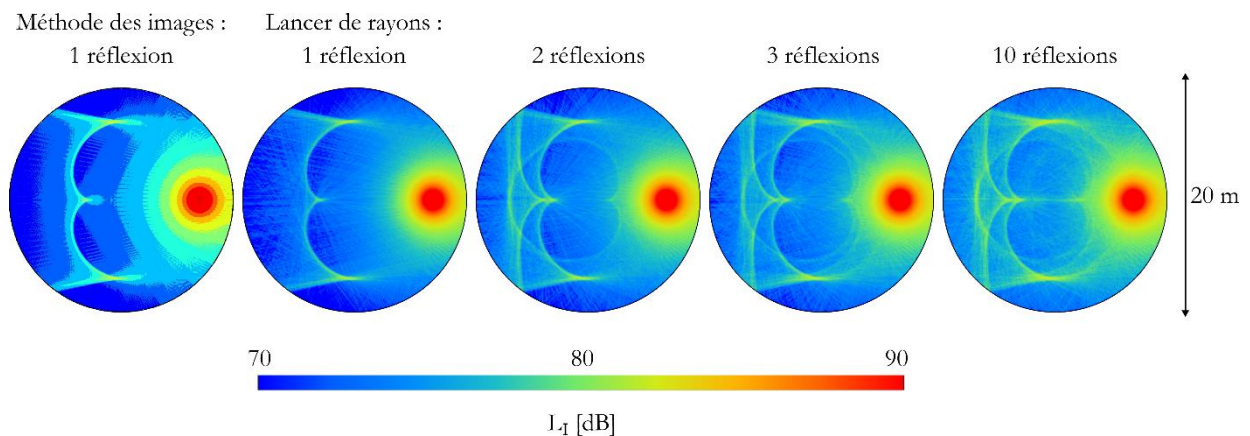


Figure 42 : Niveaux sonores à l'intérieur d'un cylindre ouvert, méthode des images, lancer de rayons.

On observe aussi que les réflexions multiples amplifient les caustiques, qui apparaissent plus brillamment d'une image à l'autre. Les phénomènes de focalisation et de caustiques apparaissent encore plus intensément à l'intérieur des surfaces courbe 3D. La Figure 43 montre l'exemple du niveau sonore obtenu sur une vue en coupe d'une sphère de même dimension. Les caustiques apparaissent de manière beaucoup plus intenses : à la dixième réflexion, il devient impossible de distinguer la source de la focalisation.

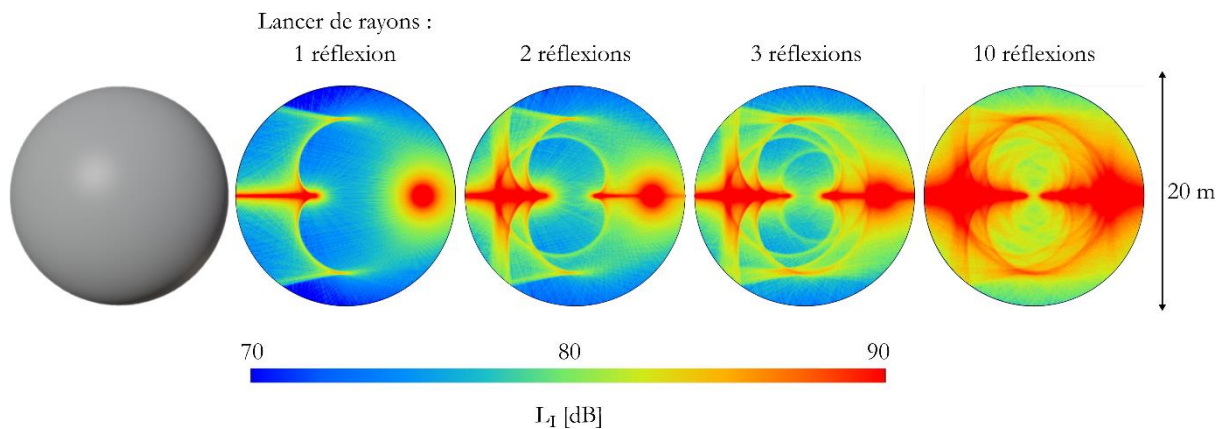


Figure 43 : Niveau sonore à l'intérieur d'une sphère vue en coupe par lancer de rayons.

En conclusion, l'étude des surfaces courbes en 2D par la méthode des images avec une seule réflexion permet de comprendre l'apparition des caustiques du premier ordre grâce à l'analyse de la courbe orthotomiques suivie par les images de la source. Les cartes de niveau sonore obtenues par un lancer de rayons avec *Simonetta*, coïncident avec les résultats obtenus par la méthode des images pour la première réflexion. Le calcul des réflexions d'ordre supérieur (et sur des surfaces courbes 3D) a permis de montrer l'apparition de nouvelles caustiques et leur effet sur l'augmentation géométrique du niveau sonore. Les résultats ont été obtenus avec une discrétisation des surfaces courbes en plans, et constituent une approximation du résultat donné par les équations de courbes (Kuttruff, 1992). En pratique, la concentration des réflexions sonore sur les points de focalisation et les caustiques engendrent des phénomènes ondulatoires perceptibles par interférence ou diffraction et provoquent la coloration locale du son (Kulowski, 2020). Les méthodes géométriques (méthode des images ou lancer de rayons) sont donc très utiles pour identifier la position des caustiques, mais la prédiction du champ sonore nécessite le calcul de propagation d'ondes (Vercammen, 2012). L'étude en 2D a permis d'identifier la spirale logarithmique comme la courbe la plus adaptée à la conception d'un plafond acoustique. Au cours du chapitre suivant, nous utiliserons la forme obtenue dans un modèle 3D pour améliorer la clarté à l'intérieur d'une chapelle. La simulation par lancer de rayons des réflexions multiples permettra de montrer les limites de la conception 2D et d'introduire une nouvelle représentation graphique des réflexions sonores adaptée à la conception acoustique assistée en 3D.

CHAPITRE 3 – Représentation graphique des réflexions multiples pour l'aide à la conception acoustique sur l'ensemble du public

Ce chapitre reprend et complète les articles « Graphical representation of multiple sound reflections as an aid to enhance clarity across a whole audience » publié en mars 2023 dans la revue *Applied Acoustics* (de Bort, 2023), et « Computer aided acoustic design of concert halls » soumis en juin 2023 pour la conférence *I3DA* (Beckers, 2023).

Introduction

Au XX^{ème} siècle, l'idéalisation acoustique des salles de spectacle reposait sur des principes simples, qui étaient mis en pratique au moyen de méthodes graphiques manuelles. Par exemple : un plafond acoustique pouvait être constitué de réflecteurs plans, étudiés en coupe longitudinale, chacun desquels était orienté de manière à réfléchir vers le fond de la salle, de sorte que l'atténuation du niveau sonore avec la distance soit réduite, et le champ sonore résultant sur le public plus uniforme (Farina, 1992). Les parois verticales de la salle étaient ensuite orientées sur la vue en plan, de manière à fournir quelques réflexions très latérales, pour augmenter la sensation d'enveloppement (Barron, 2009). L'acousticien veillait à ce que le retard de ces premières réflexions par rapport au son direct ne dépasse jamais les 50 millisecondes pour le théâtre ou les conférences, les 80 millisecondes pour la musique (Bradley, 1999). Les premiers logiciels basés sur le lancer de rayons étaient très lents, et ne pouvaient guère être utilisés que pour étudier des problèmes théoriques, par exemple pour montrer que les matériaux absorbants réduisaient plus efficacement la réverbération s'ils étaient dispersés dans la salle plutôt que concentrés en un seul lieu (Santon, 1980).

En 2002, le logiciel *Radit2D* a été développé afin d'aider les praticiens à concevoir une salle plus aisément, sur des coupes de celle-ci, en ajustant les formes de manière interactive, grâce à la méthode des images, qui permettait un calcul immédiat de la modification du champ sonore résultant d'une déformation de l'enceinte. La limitation principale du programme est que seules les réflexions du premier ordre sont prises en compte. Avec les capacités actuelles de l'informatique, il serait possible de développer une version 3D du programme,

en prenant en compte les réflexions d'ordre supérieur. Cependant, la méthode des images a un défaut intrinsèque qui est aussi son principal avantage : la source et le récepteur sont ponctuels, les images de la source aussi, ce qui donne des réponses impulsionnelles d'une parfaite précision, mais avec tous les problèmes que posent les représentations discrètes. Par exemple : comment interpréter le diagramme polaire, très clair dans une coupe, mais qui devient, en 3D, une sorte d'oursin aux pointes innombrables ?

Au cours du chapitre Méthode, nous avons montré que les méthodes de lancer de rayons désormais directement calculées dans la CPU ou dans la GPU, permettent une accélération sans précédent des calculs, et sont devenues utilisables pour l'aide à la conception acoustique. Certes, il faut, momentanément, sacrifier l'interactivité, mais le principal défaut des méthodes de Monte Carlo – où la source peut rester ponctuelle, mais pas le récepteur, qui doit être doté d'un volume fini pour avoir quelque chance d'intercepter des rayons eux-mêmes infiniment fins – devient un avantage : l'imprécision sur les temps d'arrivée lisse la peau des oursins, lesquels, en perdant leurs pointes infinitésimales, deviennent bien plus facile à percevoir dans une image.

Dans ce chapitre dédié à la première application de la thèse, nous proposons la construction d'une représentation graphique cumulée de ce que perçoit l'ensemble d'un public (discrétisé en récepteurs finis assez nombreux pour se recouvrir l'un l'autre), qui peut servir au concepteur non seulement pour évaluer les défauts acoustiques de son projet, mais aussi pour repérer où il doit travailler afin d'y remédier efficacement.

Cette représentation a été utilisée pour visualiser les contributions au paramètre de la Clarté de la parole dans une salle de classe (C_{50}) et de la musique dans une chapelle (C_{80}). Dans le premier cas, elle est utilisée pour identifier l'emplacement idéal d'une certaine quantité d'absorbants. Dans le second, elle va permettre d'enrichir la conception d'un plafond acoustique suspendu conçu en 2D sur une coupe à l'aide du logiciel *Radit2D*. Enfin, nous adapterons la représentation graphique pour l'étude du paramètre de la Fraction d'Énergie Latérale (LF). Cette dernière partie permettra de traiter un autre problème courant d'acoustique des salles qui est celui d'optimiser les valeurs de paramètres acoustiques contradictoires, car, en effet, l'augmentation de la Clarté, conduit généralement à réduire la sensation d'enveloppement.

L'ensemble des représentations ici proposées devrait permettre au concepteur acoustique de trouver le meilleur compromis, même dans des salles à la géométrie très complexe, comme les salles en terrasses d'aujourd'hui. En effet, les méthodes de lancer de rayons, tout comme nos représentations graphiques, sont pratiquement insensibles à la complexité géométrique.

3.1. Construction de la représentation graphique

Le point de départ de la représentation graphique consiste à représenter l'origine des réflexions multiples qui atteignent les récepteurs. Comme elles peuvent rapidement devenir très nombreuses, l'objectif consiste dans un premier temps, à ne retenir que les plus importantes. Pour cela, il y a deux possibilités : soit on choisit un critère d'arrêt sur l'énergie des rayons, soit on choisit un critère d'arrêt sur le nombre de réflexions. Nous avons choisi de construire la représentation graphique en calculant la propagation des rayons jusqu'à leur 10^{ème} réflexion, et, pour qualifier l'énergie, d'utiliser une barre de couleurs qualitative. Cette barre de couleurs est divisée en cinq couleurs, les réflexions très faibles apparaissent en bleu tandis que les réflexions très fortes apparaissent en rouge (Figure 44a). Après plusieurs tests, nous avons défini la plage de la barre de couleurs de la manière suivante : la valeur maximale (réflexions très fortes), correspond au 100^{ème} centile de l'énergie des rayons, et la valeur minimale, (réflexions très faibles), correspond au 30^{ème} centile. La Figure 44b montre un diagramme de distribution des intensités des rayons sur un récepteur et la correspondance avec la barre de couleurs. Le calcul est effectué à l'aide du moteur de calcul *Simonetta* présenté dans le chapitre Méthode que l'on a adapté pour obtenir comme données de sortie l'origine $O(x_o, y_o, z_o)$, l'intensité I [$W m^{-2}$] et le retard t [ms] de tous les rayons incidents au récepteur.

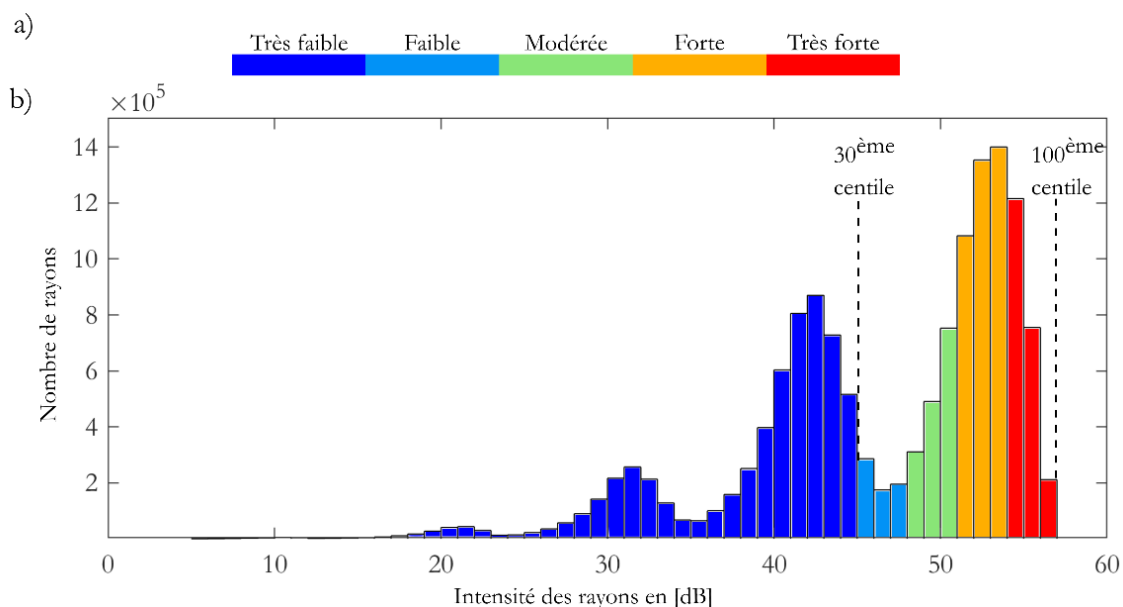


Figure 44 : (a) Echelle des réflexions (b) Distribution des intensités reçues sur les récepteurs.

Tous les rayons incidents en un récepteur proviennent soit de la source, soit d'une surface de l'enceinte étudiée. La Figure 45a montre l'origine des rayons tirés depuis une source (représenté par « +S » sur la Figure 45b) qui ont atteint un récepteur (« +R ») sur une vue dépliée d'une salle rectangulaire. Comme le récepteur est sphérique, on remarque que les rayons se rassemblent sous la forme de taches, ce qui donne un aspect très discontinu.

Sur la Figure 45b, on cumule, sur la vue dépliée de la salle, l'origine des rayons incidents sur tout un auditoire. Pour cela, on utilise un groupe de 2500 récepteurs que l'on répartit sur une zone carrée dont on a représenté l'emplacement du premier (« +R₁ ») et du dernier récepteur du groupe (« +R₂₅₀₀ ») sur la Figure 45b. Pour empêcher l'apparition des taches, il faut que les récepteurs sphériques se superposent les uns les autres. Le résultat est beaucoup plus continu, et permet d'observer rapidement comment les surfaces apportent de l'énergie au public. Par exemple, les réflexions sur le sol sont très faibles, car le coefficient d'absorption dans cette zone est élevé. Au contraire, les réflexions sur le plafond sont les plus fortes, car le coefficient d'absorption est faible.

Les résultats sont présentés sur une vue développée de la géométrie, de manière à ce que toutes les faces soient visibles, ce qui, dans le cas d'une salle rectangulaire, est assez facile à interpréter. Cependant, afin de travailler à l'intérieur de n'importe quelle géométrie, nous avons besoin d'une représentation synthétique permettant de regrouper toute l'information géométrique 3D.

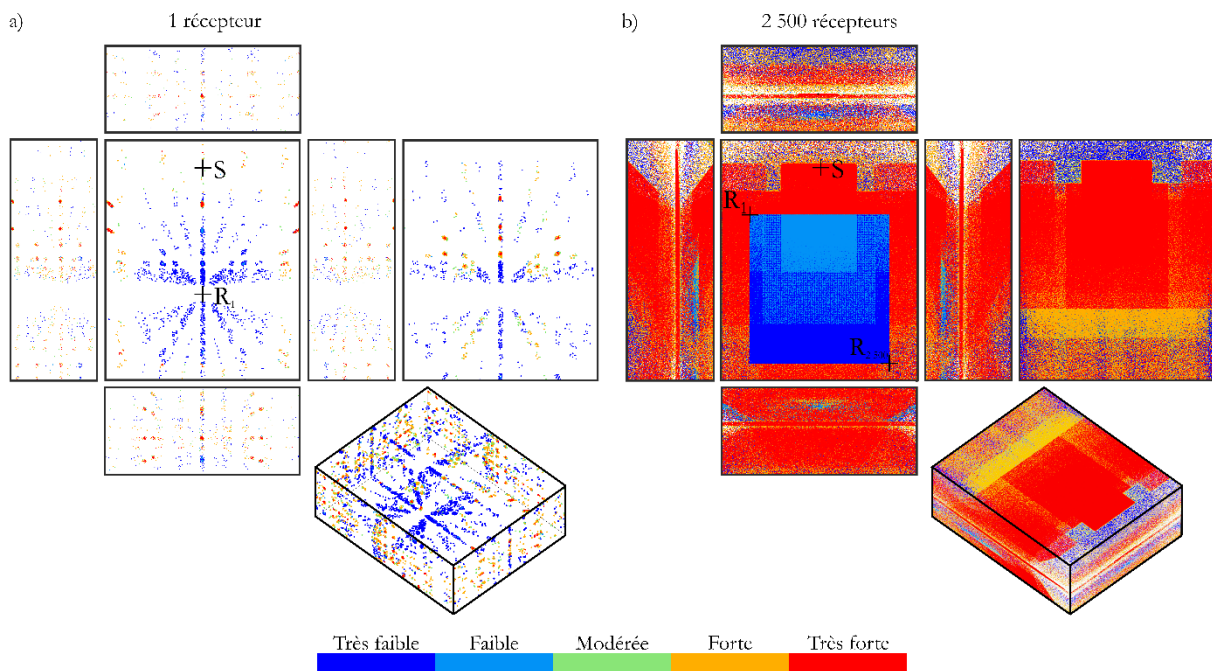



Figure 45: Origine et intensité des réflexions incidentes sur (a) 1 récepteur et (b) 2 500 récepteurs.

Pour représenter toute la scène depuis un point, nous utilisons la projection de Mollweide (Beckers, 2022). Il s'agit d'une projection pseudo-cylindrique qui représente la sphère entière sur une ellipse avec un rapport de 2:1 entre les axes (Figure 46). Cette représentation respecte les angles solides avec une faible distorsion dans toutes les directions, elle permet donc d'observer l'impact de chaque surface de la scène sur le champs étudié (Beckers, 2014).

Le choix de projeter la scène plutôt que de la développer implique la sélection d'un point d'observation arbitraire. Puisque nous nous intéressons aux réflexions incidentes sur un public, nous plaçons ce point de projection au milieu de l'auditoire. Durant toute la thèse, nous utiliserons le symbole de l'œil (« + ») pour indiquer l'emplacement du point de projection de Mollweide (Figure 46b) et la source sonore (« +S ») est toujours placée au centre de l'axe horizontal de la projection.

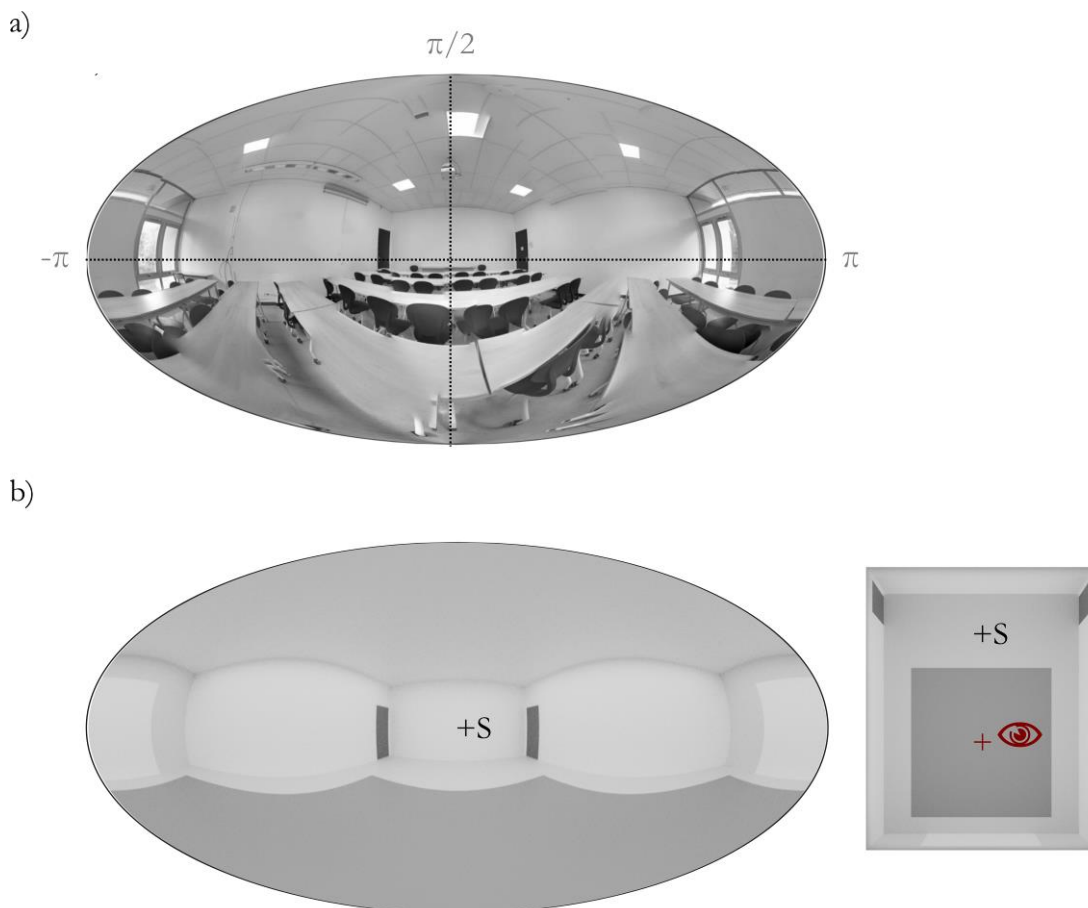


Figure 46: Projection de Mollweide (a) d'une photographie panoramique d'une salle de classe (b) d'un rendu réaliste

Pour obtenir une projection de Mollweide, la scène est d'abord projetée sur une sphère, puis la sphère sur le plan. La projection P des points O sur une sphère unitaire centrée sur le point de projection est donnée par l'Eq. 32.

$$P = \frac{O}{|O|} \quad (32)$$

Les coordonnées de P sont converties en coordonnées sphériques (longitude φ et latitude α) sur la sphère unitaire. La projection de Mollweide de P est donnée par l'Eq. 32, avec x et y les coordonnées cartésiennes dans le plan de projection ; β un angle auxiliaire calculé itérativement par les Eq. 34, 35 et 36.

$$\begin{cases} x = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \varphi \cos \beta \\ y = \sqrt{2} \sin \beta \\ 2\beta + \sin 2\beta = \pi \sin \alpha \end{cases} \quad (33)$$

Avec :

$$\beta' = \alpha \quad (34)$$

Puis :

$$\delta\beta' = -\left(\beta' + \sin \beta' - \frac{\pi \sin \alpha}{1 + \cos \beta'}\right) \quad (35)$$

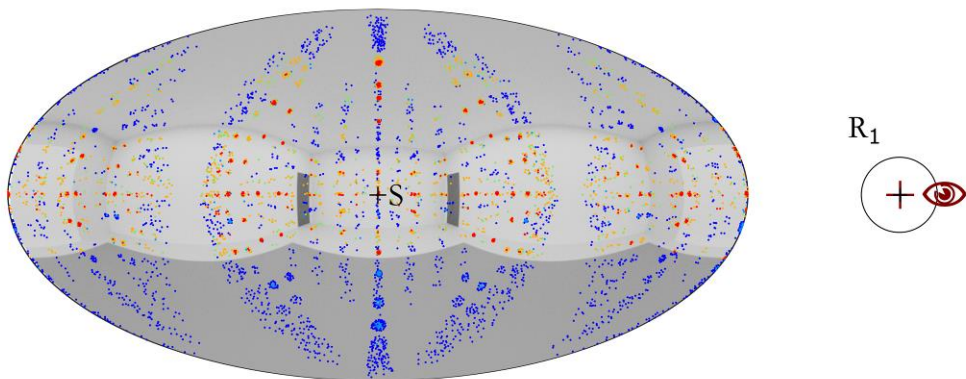
Et :

$$\beta = \frac{\beta'}{2} \quad (36)$$

La Figure 47 montre la projection de Mollweide des données présentées en Figure 45. Pour faciliter la lecture de la représentation graphique, on superpose une vue panoramique en rendu réaliste de la scène étudiée, ce qui permet d'identifier depuis quelle surface provient une réflexion. La représentation graphique obtenue sur un récepteur (Figure 47a) correspond à ce qui pourrait être mesuré par une caméra acoustique omnidirectionnelle,

nous y reviendrons dans la seconde application de la thèse (chapitre 4). En revanche, la Figure 47b est une représentation abstraite. Elle cumule les réflexions incidentes sur un grand nombre de récepteurs, mais est vue depuis un seul point de projection. Elle contient toute l'information dont le concepteur a besoin, c'est-à-dire d'où proviennent les réflexions et quelle est leur intensité. Dans les cas d'étude suivants, nous allons utiliser cette représentation pour améliorer l'intelligibilité de la parole dans une salle et de la musique dans une chapelle. Puisque nous nous intéressons à des rapports d'énergie entre des premières réflexions et des réflexions tardives, il suffit de filtrer la représentation graphique selon le délai d'arrivée des rayons.

a) Réflexions incidentes en 1 récepteur



b) Réflexions incidentes en 2500 récepteurs

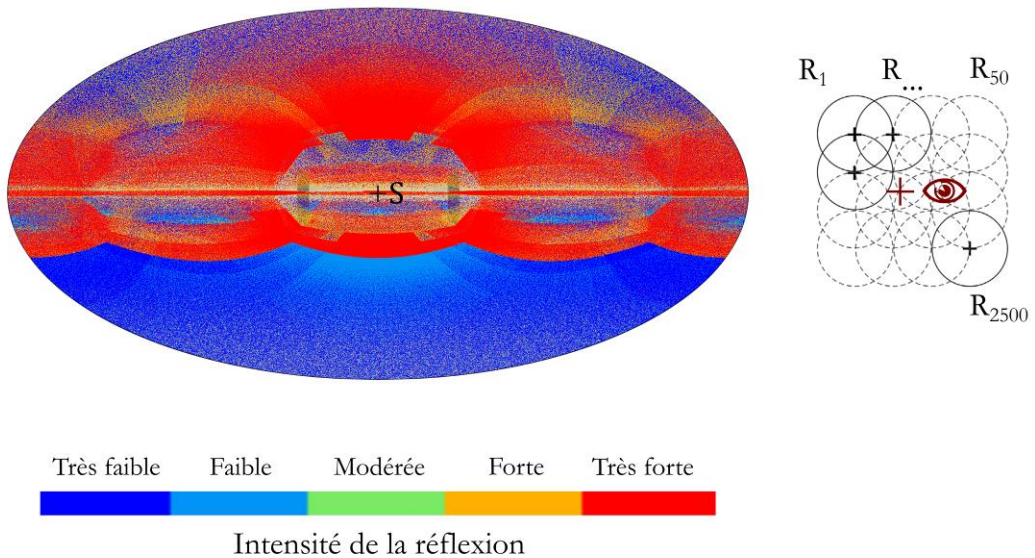


Figure 47: Construction d'une représentation graphique des réflexions multiples pour (a) 1 récepteur et (b) 2500 récepteurs.

3.2. Emplacement idéal de panneaux absorbants à l'intérieur d'une salle de classe

3.2.1. Présentation du cas d'étude

Le premier cas d'étude est une salle de classe rectangulaire ($8.75 \times 7.12 \times 3.16$ m) du campus universitaire d'Anglet. Elle comporte un faux plafond, un sol en vinyle, des murs en béton peint, une baie vitrée sur toute la longueur du mur du fond, deux doubles fenêtres à ses extrémités et deux portes en bois à l'avant.

Des réponses impulsionnelles, réalisées selon le mode opératoire du chapitre Méthode, ont été réalisées dans la salle vide, sans public, sur 8 récepteurs, puis dans la salle occupée par un public de 33 personnes, sur 5 récepteurs. D'après les échelles de Marshall, les mesures montrent que la Clarté moyenne de la parole est insuffisante, y compris en présence de public (Tableau 7).

Sur un cas d'étude similaire, Sala (1995) propose de répartir sur 30 % de la surface totale de la salle des matériaux absorbants sur au moins deux surfaces du local. Ici, la surface totale de la salle est de 225 m^2 , la surface d'absorbants à rajouter est alors de 67.5 m^2 . D'après les mesures, le public peut être considéré comme un élément absorbant, il occupe ici une surface au sol de 28.5 m^2 .

La surface de panneaux absorbants à rajouter est donc estimée à 39 m^2 . Les panneaux absorbants (108 au total) sont des plaques de mousse de mélamine carrées de 600 mm de côté avec des pyramides ($95 \times 95 \times 40$ mm) (Figure 48a). Il s'agit d'un système léger et facilement repositionnable, ce qui est pratique pour tester différentes configurations. La Figure 48b montre les coefficients d'absorption du matériau, donnés par le fournisseur Solutions Elastomères (Groupe Paul, 2023). Trois configurations sont testées : dans la salle sans absorbant, avec des absorbants au plafond, et avec des absorbants en couronne autour du public.

Tableau 7 : Clarté moyenne de la parole (C_{50}) mesurée dans la salle de classe initiale.

| Bandes d'octaves [Hz] | 500 | 1k | 2k |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| C_{50} sans public [dB] | -4.40 | -3.48 | -1.75 |
| C_{50} avec public [dB] | 1.44 | 1.43 | 4.21 |

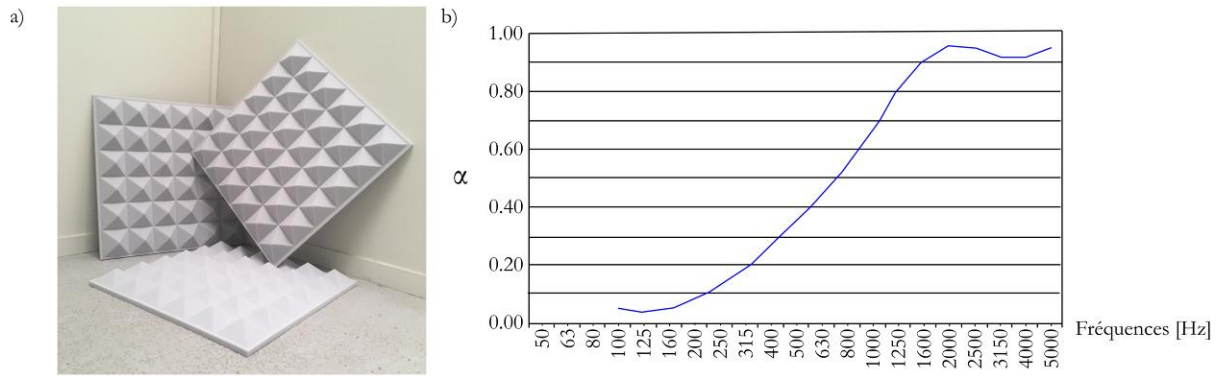


Figure 48: (a) Panneaux absorbants et (b) coefficient d'absorption d'après Solutions Elastomères (Groupe Paul, 2023).

3.2.2. Paramétrage de la simulation

La source est située à la place du professeur, à 1.40 m de haut. On simule 2500 récepteurs à la hauteur du public assis, à 1.30 m de haut, espacés de 0.10 m, selon le schéma présenté en Figure 47. Les paramètres de la simulation sont choisis en amont par un test de paramétrage (voir chapitre Méthode) sur le paramètre C_{50} avec un critère de convergence fixé à 0.10 dB. D'après la Figure 49, pour des récepteurs de 0.10 m de rayon, il est nécessaire de tirer 2 millions de rayons. Le Tableau 8 montre les coefficients d'absorption des différents éléments dans la simulation, considérés pour la bande d'octave centrée à 1 kHz. La simulation est réalisée dans la salle vide, sans mobilier, et prend en compte l'absorption du public sous la forme d'une surface absorbante au sol.

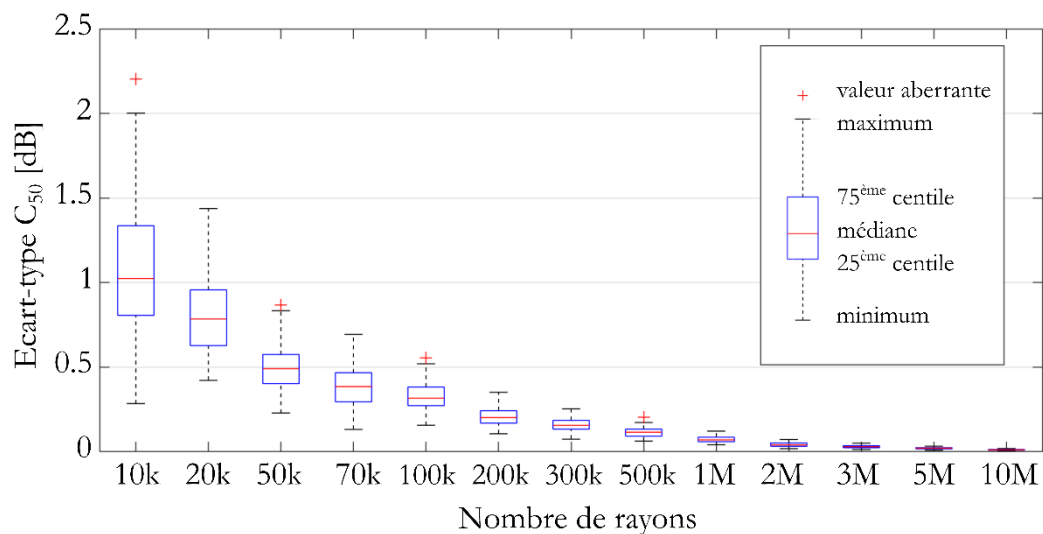


Figure 49: Etude de convergence des récepteurs de la salle de classe.

Tableau 8: Coefficients d'absorption utilisés dans la simulation de la salle de classe.

| Elément | Matériaux | α |
|-------------------|--------------------|----------|
| Porte | Bois | 0.10 |
| Mur | Béton | 0.05 |
| Sol | Vinyle | 0.10 |
| Plafonds | Composite | 0.20 |
| Fenêtre | Verre | 0.05 |
| Public | Surface absorbante | 0.90 |
| Panneau absorbant | Mélamine | 0.70 |

3.2.3. Résultats

L'objectif est d'atteindre les valeurs C_{50} les plus élevées possibles avec 39 m² d'absorbant. D'après la première simulation le C_{50} moyen dans la pièce initiale est de 0.7 dB (Figure 50a).

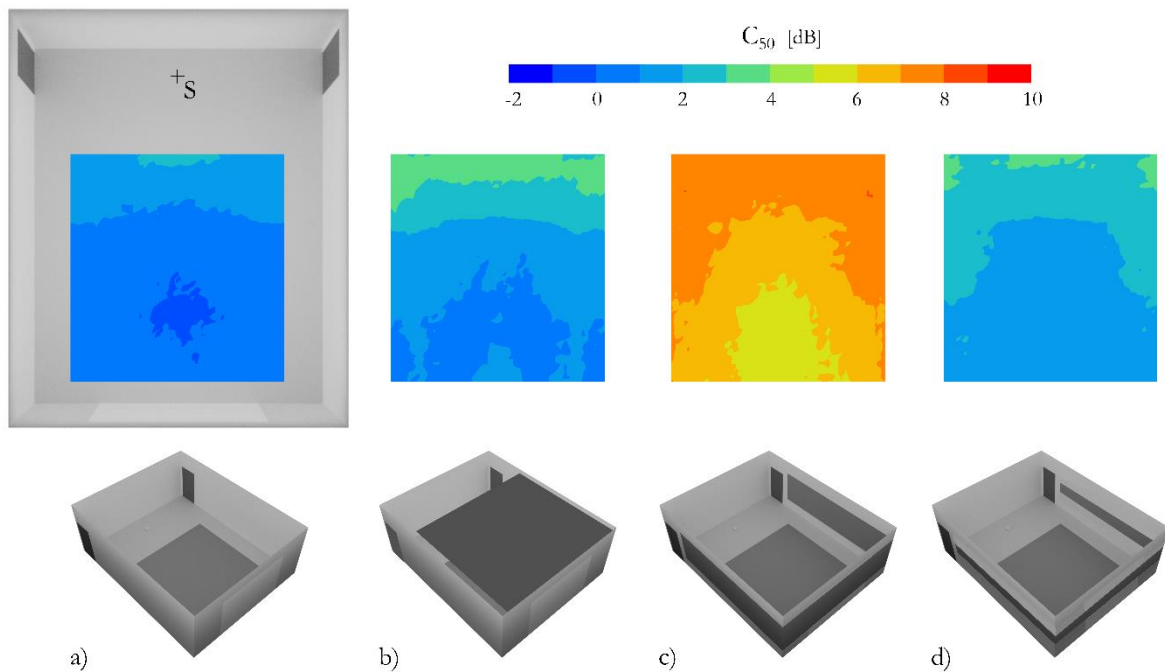


Figure 50: Cartes de C_{50} simulées (a) sans absorbant (b) avec absorbants placés au plafond, (c) avec absorbants placés en couronne, (d) trois fois moins d'absorbants placés en couronne.

La première solution, que l'on retrouve dans la plupart des salles de classe, consiste à placer l'absorbant au plafond. D'après la Figure 50b, l'amélioration est assez faible, le C_{50} moyen augmente de 1 dB. Sans information complémentaire, ce résultat suggère que l'implantation des absorbants n'est pas idéale ou que la quantité posée n'est pas suffisante. La Figure 51 montre la représentation graphique des réflexions incidentes sur le public à l'intérieur de la salle de classe et permet de distinguer sur deux représentations les premières réflexions (avant 50 ms) (Figure 51a) des réflexions tardives (après 50 ms) (Figure 51b).

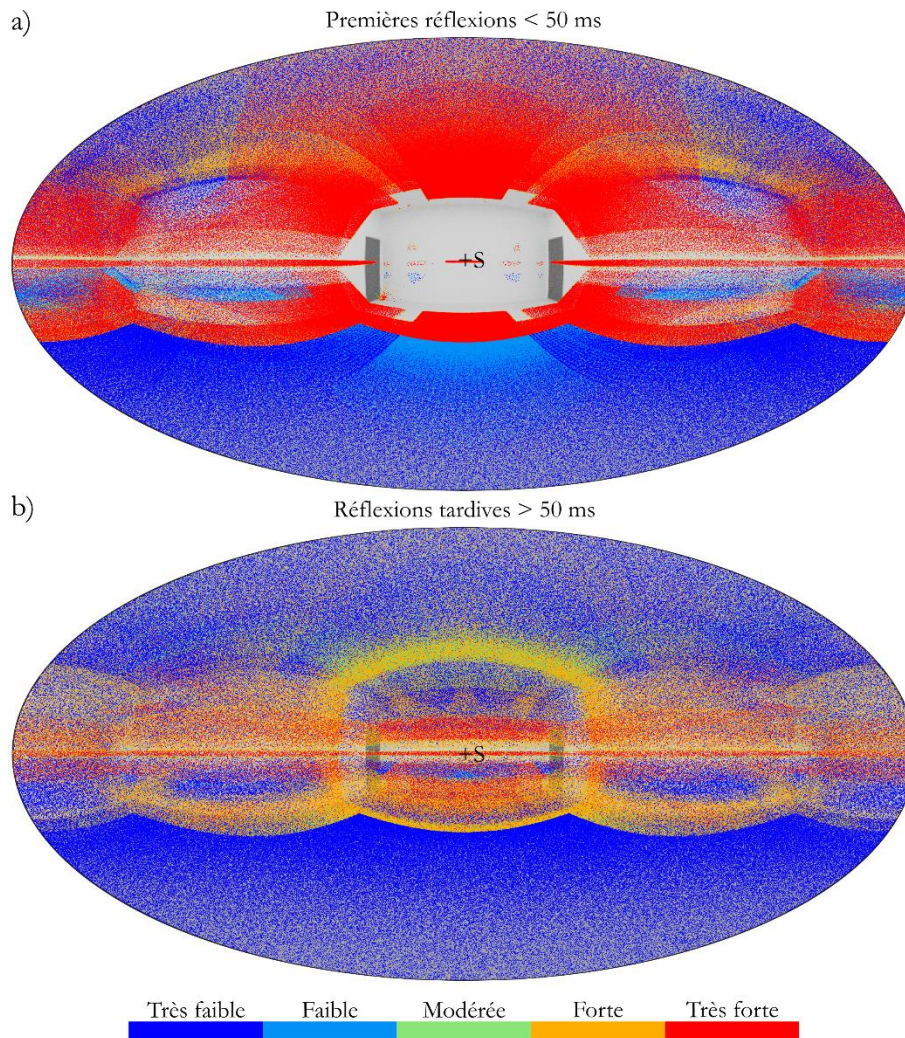
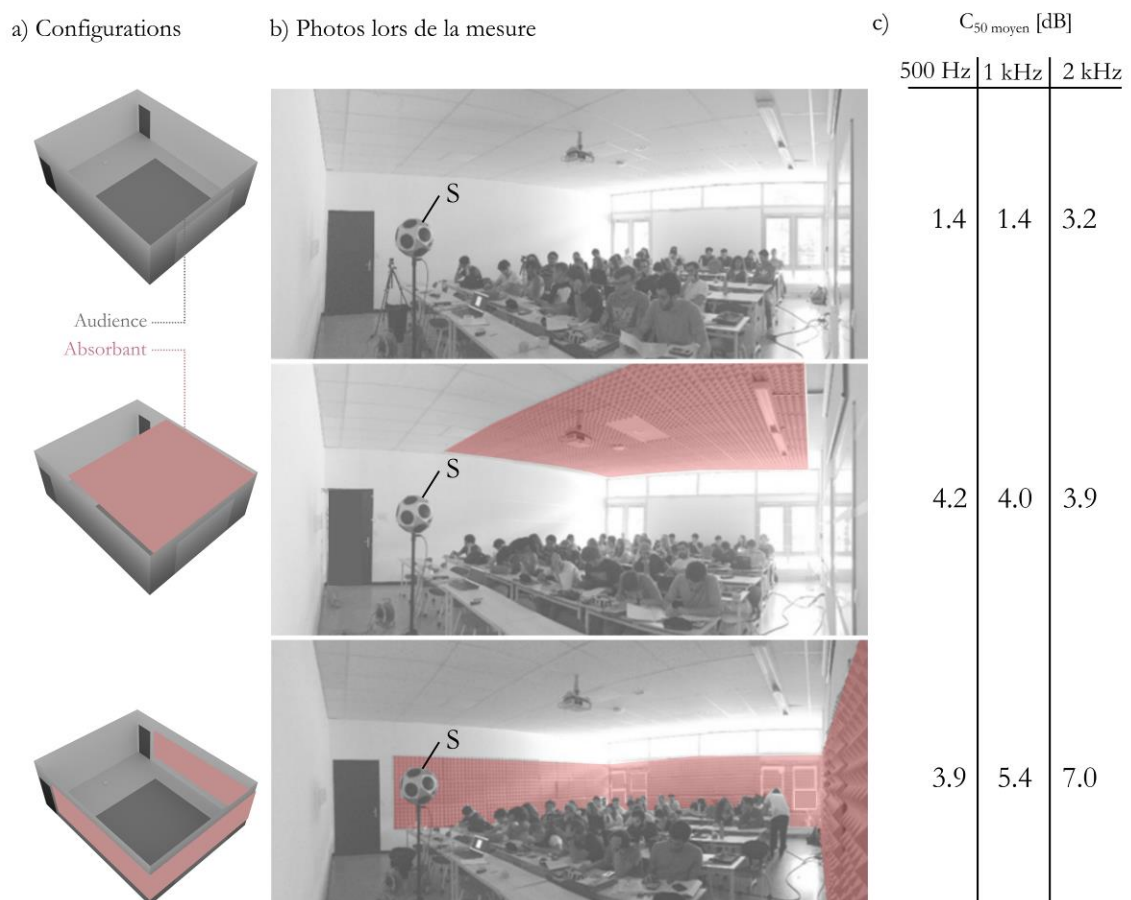


Figure 51 : Représentation graphique des (a) premières réflexions et (b) réflexions tardives sur l'ensemble du public dans la salle de classe.

Les récepteurs sont les mêmes que ceux utilisés pour les cartes de clarté de la Figure 50. Ici, l'objectif est d'atténuer les réflexions tardives pour augmenter la clarté. Or, d'après la Figure 51b, les réflexions tardives très fortes se concentrent majoritairement sur la mi-hauteur des murs, tout autour du public. On répartit les 39 m² d'absorbant sur cette zone, en épargnant le mur avant, car il accueille le tableau du professeur. Plus

spécifiquement, les absorbants sont posés, à 0.60 m du sol, sur 1.20 m de hauteur. D'après les représentations graphiques, cette disposition permet aussi de maintenir la surface réfléchissante au plafond, là où les réflexions avant 50 ms – à conserver – sont très fortes. La disposition en U donne des résultats nettement plus satisfaisants que la disposition au plafond : la Clarté augmente de 6.8 dB sur l'ensemble du public (Figure 50c). Cette valeur correspond à des conditions d'écoute de la parole excellentes selon l'échelle de Marshall. La Figure 50d correspond à la même disposition que la Figure 50c, mais avec trois fois moins d'absorbant, soit 13 m². La carte est similaire à celle observée avec la quantité initiale d'absorbants placés au plafond. Ce résultat suggère qu'en travaillant à la fois sur la représentation graphique et sur les cartes de paramètres, il serait possible de réduire la quantité d'absorbants pour atteindre les valeurs de clarté souhaitées. La Figure 52 montre les mesures effectuées dans la pièce en présence du public et de mobilier sur quatre récepteurs répartis dans la pièce. Les résultats montrent que les valeurs dans la configuration initiale varient selon la fréquence, mais on observe que les tendances observées entre les configurations sont cohérentes avec la simulation. La configuration en U des absorbant donne de meilleurs résultats que lorsque les panneaux sont placés au plafond. L'amélioration est plus significative sur les bandes de 1 kHz et 2 kHz car le matériau est plus absorbant (Figure 48b).



Les écarts des valeurs de C_{50} entre les configurations sont moins importants que dans la simulation. Cela peut être dû à des imprécisions de mesure, à des erreurs d'évaluation des coefficients d'absorption des surfaces (notamment du public), à l'effet du mobilier ou de la diffraction qui n'ont pas été pris en compte dans la simulation. Les écarts dû à la diffusion entre la simulation par lancer de rayons et les mesures à l'intérieur d'enceintes fermées ont d'ailleurs déjà été observés dans la littérature (Hodgson, 1991). Malgré ces différences, les mesures confirment que la disposition des absorbants a une influence sur la clarté de la parole et que la solution identifiée avec notre méthode donne de meilleurs résultats.

3.3. Conception d'un plafond réflecteur à l'intérieur d'une chapelle

3.3.1. Présentation du cas d'étude

Le deuxième cas d'étude est une église du XVIII^{ème} siècle, la chapelle Corneille de Rouen, en France. C'est une église en forme de croix avec une nef unique et quatre tribunes qui encadrent la croisée des transepts. Le bâtiment mesure 52 m de long et 19 m de haut et peut accueillir un public d'environ 600 personnes. Il y a quelques années, cette chapelle a été transformée en salle de concert à l'aide de systèmes réflecteurs et de dispositifs absorbants (Khale, 2012). L'objectif est de réitérer cet exercice de réhabilitation à l'aide des représentations graphiques des réflexions sonores.

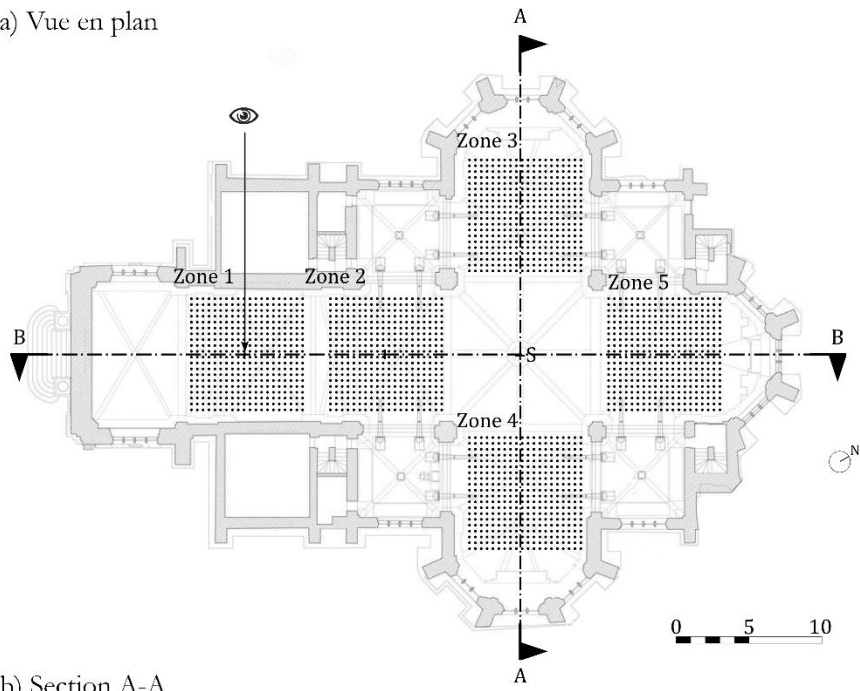
La simulation est effectuée sur un modèle 3D de la chapelle, composé de 18 000 triangles. Le modèle a été reconstitué à partir de plans de l'atelier d'architecture King Kong disponibles en ligne (ArchDaily, 2022) (Figure 53). Appliquer la démarche employée dans la salle de classe n'est pas envisageable, la quantité d'absorbants à rajouter serait trop importante. Ici, il est nécessaire d'augmenter les premières réflexions à l'aide d'un dispositif réfléchissant.

Pour ne pas encombrer la surface du sol et les murs, le dispositif doit être suspendu. Il est composé de panneaux plats rétractables, à la manière d'une cloison amovible. Au cours du chapitre Méthode, nous avons montré l'intérêt de la forme en segment de spirale logarithmique pour rediriger les réflexions vers les derniers rangs du public. Nous utilisons donc cette forme dans le cadre de la conception du plafond réflecteur suspendu.

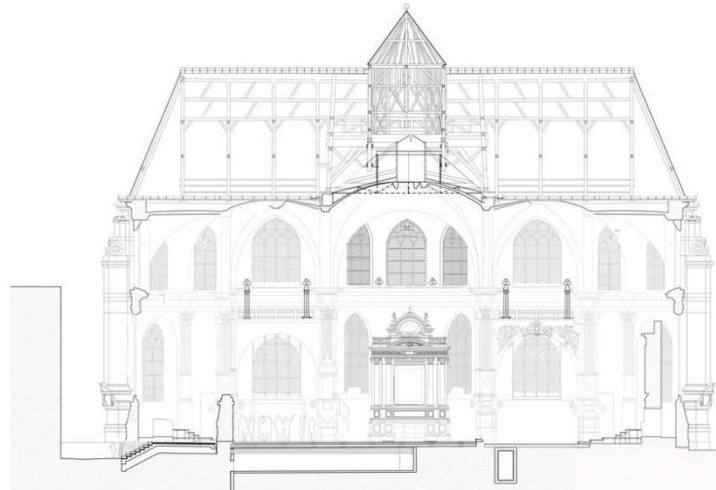
3.3.2. Paramétrage de la simulation

La carte de clarté de la musique C_{80} de chaque zone est établie à partir d'un réseau de 400 récepteurs situés à la hauteur d'un public assis (1.30 m) (Figure 54). Les représentations graphiques des réflexions sonores ne sont créées que pour la Zone 1 en réglant le nombre de récepteurs à 2500. La source est située dans la croisée du transept, dans la position d'un chanteur, à 2 m de hauteur. Le Tableau 9 indique les coefficients d'absorption pris en compte dans la simulation.

a) Vue en plan



b) Section A-A



c) Section B-B

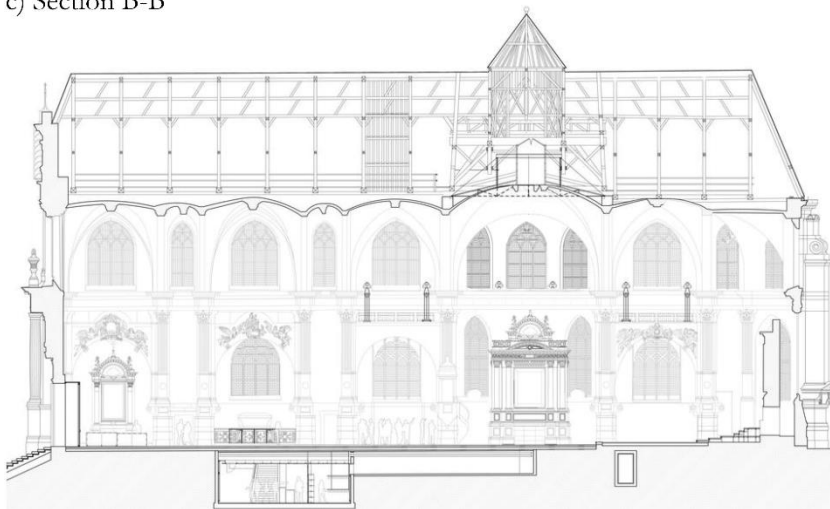


Figure 53 : Plans et vues de la Chapelle Corneille d'après l'atelier d'architecture King Kong.

Tableau 9 : Coefficients d'absorption utilisés dans la simulation de la Chapelle.

| Élément | Matériaux | α |
|-----------------------|--------------------|----------|
| Parois de la chapelle | Marbre | 0.05 |
| Public | Surface absorbante | 0.90 |
| Panneau réflecteur | Composite | 0.20 |

Le nombre de rayons est déterminé de la même manière que dans le premier cas d'étude, mais sur le paramètre C_{80} . Comme la chapelle est plus grande que dans le premier cas d'étude et que la source est plus éloignée des récepteurs, les résultats sont très différents. La simulation C_{80} dans la chapelle est donc réalisée avec 2 millions de rayons et des récepteurs de 0.10 m de rayon avec un critère de convergence de 1 dB (Figure 55). Des tests sur la durée de propagation des rayons ont montré qu'au-delà de 1500 ms, la valeur du C_{80} se stabilise. Tous les résultats sont obtenus pour 2000 ms de propagation.

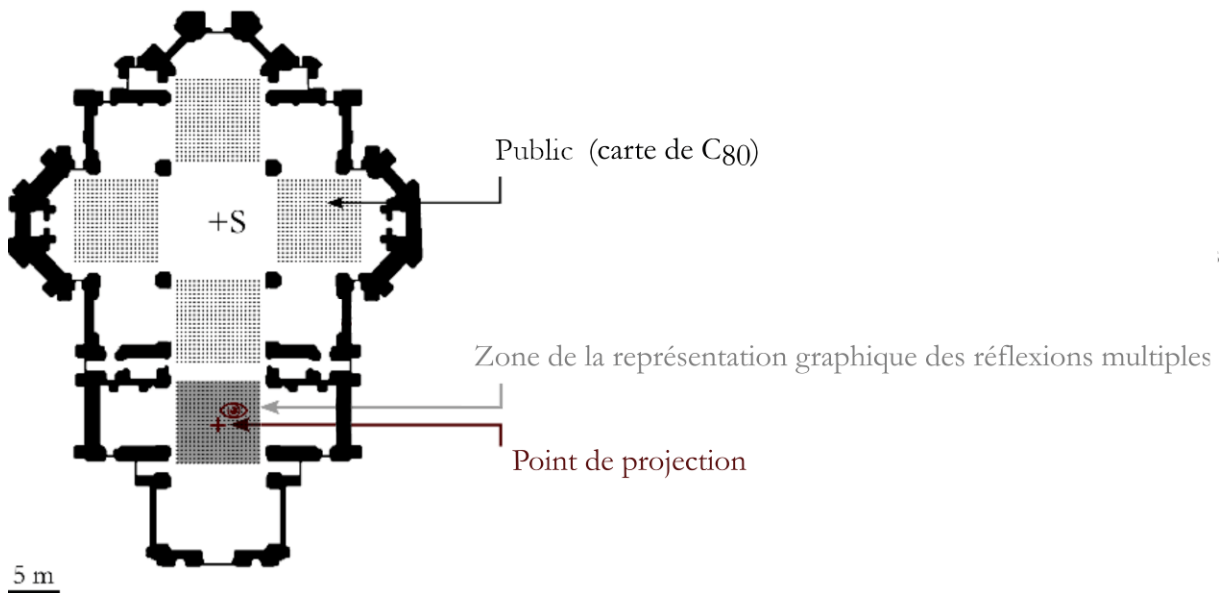


Figure 54 : Emplacement des récepteurs utilisés pour les cartes et la représentation graphique à l'intérieur de la Chapelle.

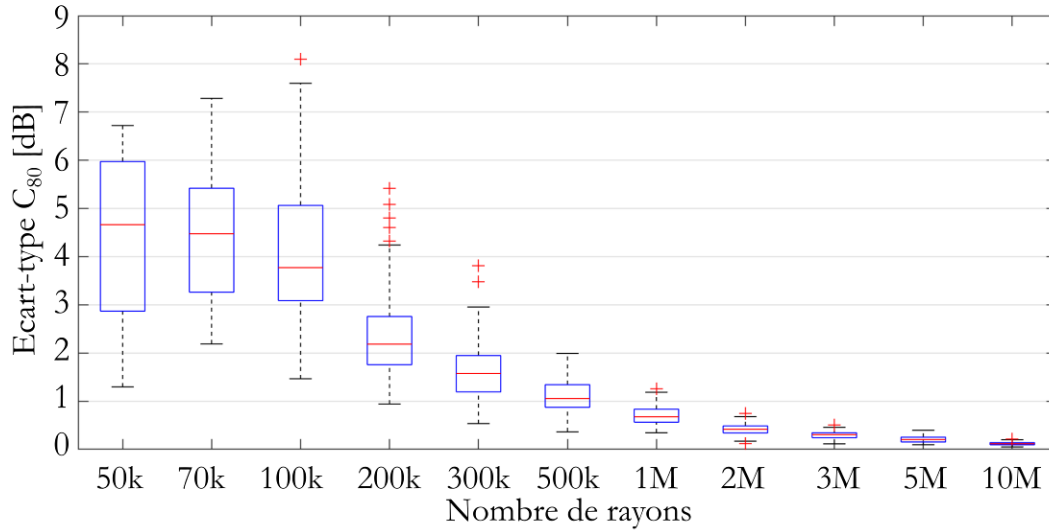


Figure 55 : Etude de convergence des récepteurs à l'intérieur de la Chapelle Corneille.

3.3.3. Résultats

La représentation graphique des réflexions multiples dans la configuration initiale dans la zone 1 montrent qu'il y a peu de premières réflexions (Figure 56a) et beaucoup de réflexions tardives (Figure 56b). La clarté est très faible dans toute la chapelle (Figure 57), en particulier dans la zone de la représentation graphique où le C_{80} est le plus faible, et où l'on atteint des valeurs allant jusqu'à -6 dB. Cela est dû aux grandes dimensions de la chapelle, en particulier à sa hauteur de 19 m, qui génère un retard important dans les premières réflexions. Pour réduire ce retard, il est nécessaire d'introduire des éléments réfléchissants. L'objectif est de "ramener" toutes les réflexions tardives les plus fortes avant 80 ms.

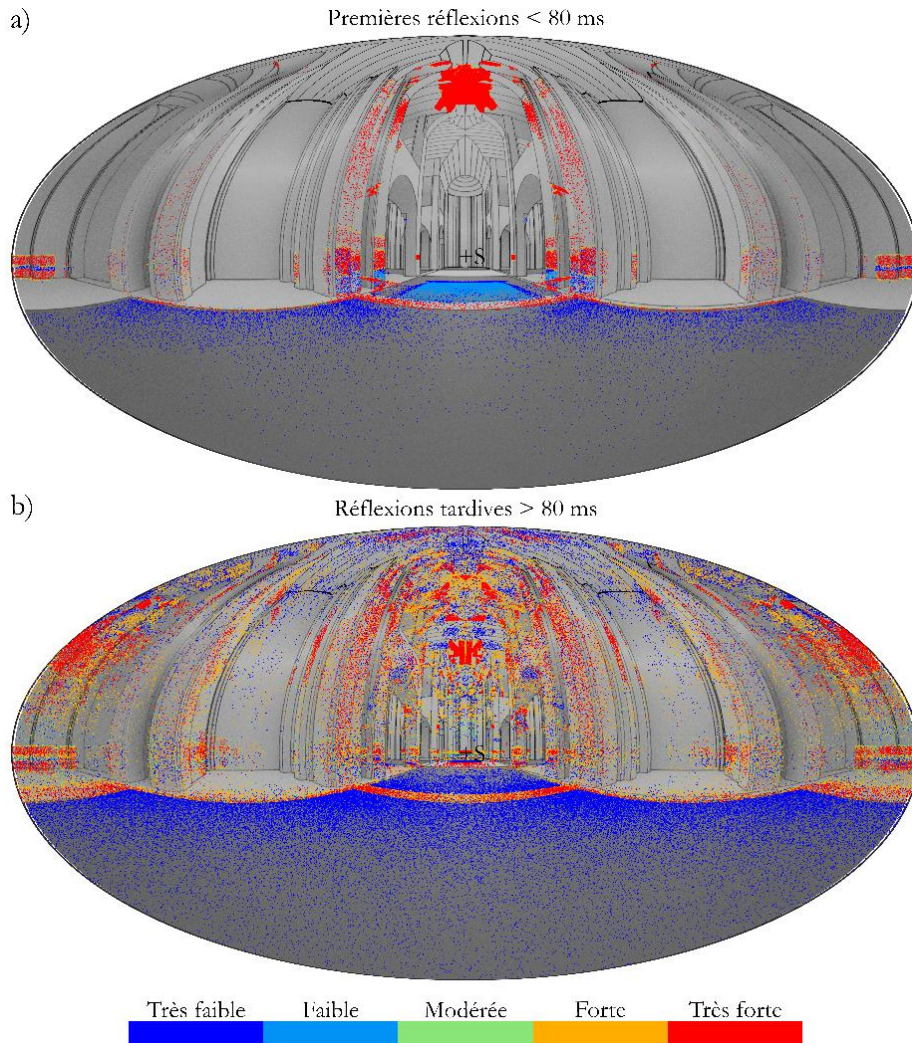


Figure 56: Représentation graphique des (a) premières réflexions et (b) des réflexions tardives sur le public dans la configuration initiale.

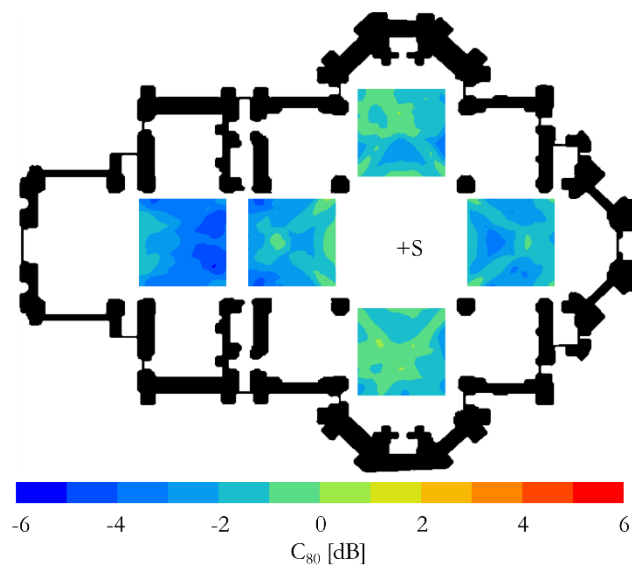
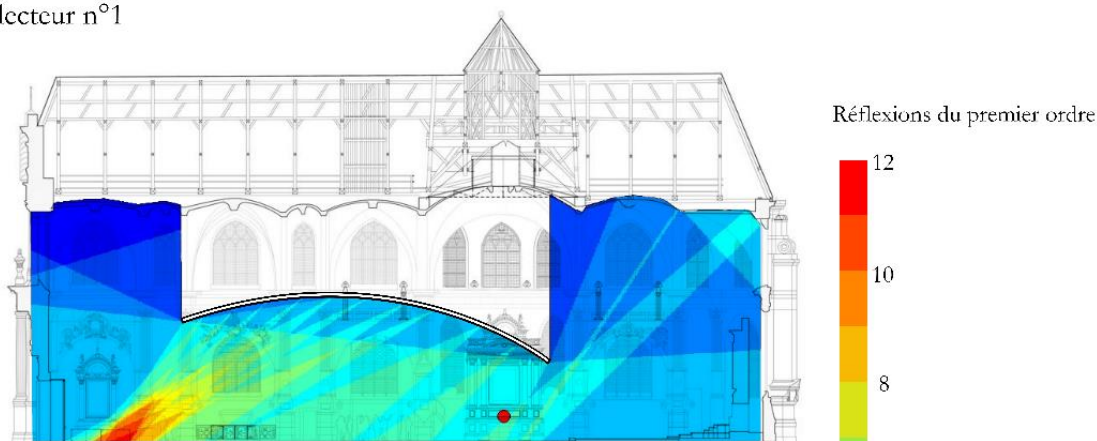


Figure 57: Carte de C_{80} dans la configuration initiale.

a) Réflecteur n°1



b) Réflecteur n°2

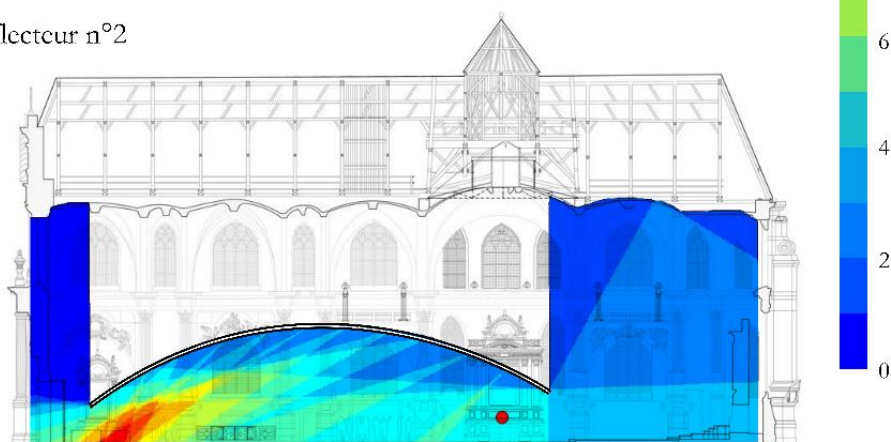


Figure 58: Conception d'un plafond réflecteur suspendu avec RaditzD.

La forme du réflecteur n° 1 est d'abord réalisée sur une coupe, à l'aide de *Raditz2D* pour vérifier que les premières réflexions sont bien réparties sous la nef, avec plus de réflexions sur les rangées arrière (Figure 58). Pour des raisons esthétiques, la zone du public à l'intérieur du chœur n'est pas couverte. La forme du réflecteur est une branche de spirale logarithmique, qui, comme nous l'avons montré au cours du chapitre Méthode, est la surface courbe la plus adaptée à la redirection des réflexions sonores vers le fond d'une salle.

Les premières réflexions de la proposition n° 1 sont beaucoup plus nombreuses que dans la configuration initiale (Figure 59a). Elles proviennent non seulement des panneaux réfléchissants mais aussi des arcades qui sont devenues des éléments réfléchissants. Avec ce premier dispositif, le C_{80} augmente de 2 dB sur l'ensemble de la chapelle (Figure 60). Il reste encore quelques réflexions tardives très fortes provenant du réflecteur (Figure 59b). Pour les éliminer, il faut encore réduire le temps de parcours de ces réflexions. Dans la proposition n° 2, la hauteur du dispositif est ramenée de 6 m à 4 m au-dessus de la source.

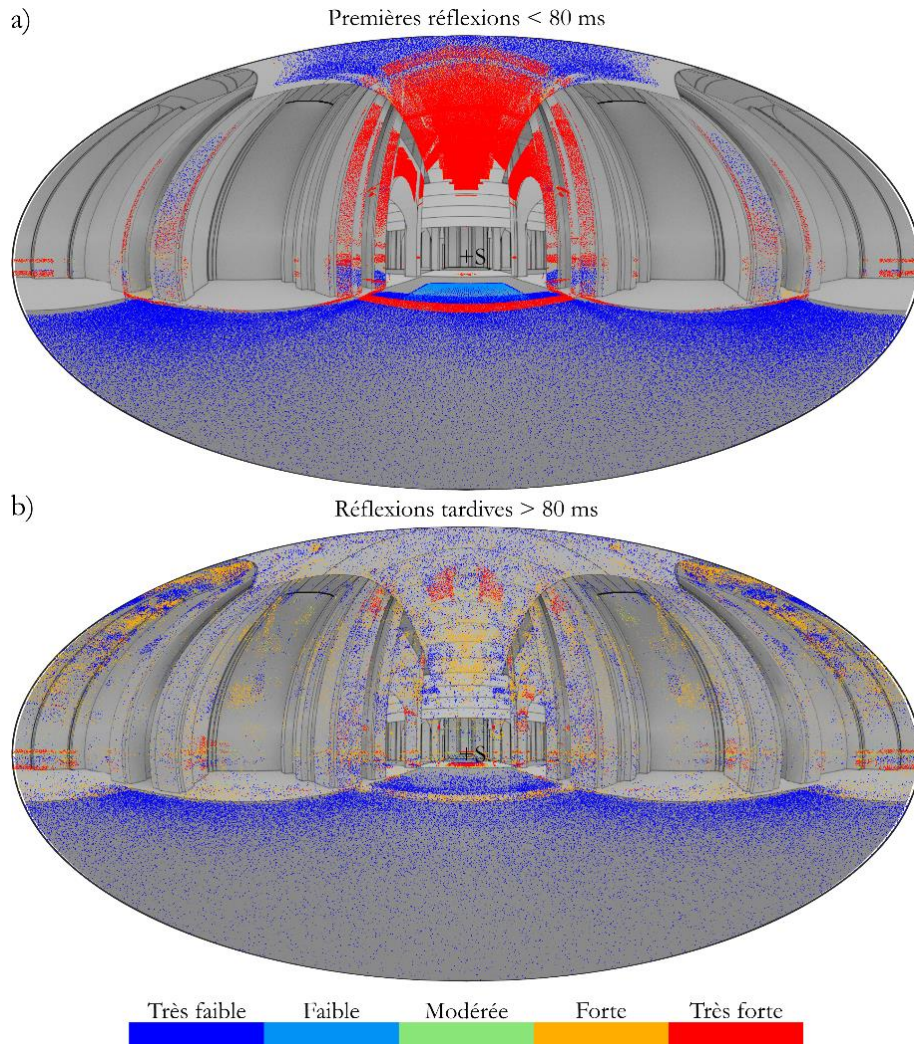


Figure 59: Représentation graphique des (a) premières réflexions et (b) réflexions tardives avec la proposition n°1.

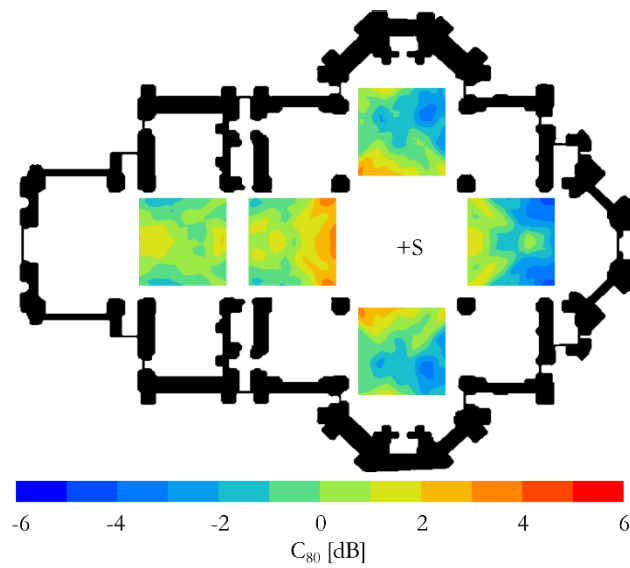


Figure 60: Carte de C_{80} à l'intérieur de la chapelle avec la proposition n°1.

De plus, il y a très peu de premières réflexions provenant de la partie arrière de la chapelle : la forme du dispositif est donc étendue à l'arrière de la nef, en suivant la trajectoire de la spirale logarithmique (Figure 58b). En résumé : dans la proposition n° 2, le réflecteur n° 2 a la même forme que le réflecteur n° 1, il est abaissé de 2 m et prolongé de 8 m suivant sa courbe vers la partie arrière de la nef, et des panneaux verticaux ferment les arcades (Figure 61). Dans la proposition n° 2, les premières réflexions les plus fortes sont beaucoup plus nombreuses et proviennent de toutes les directions (Figure 62a). Il n'y a plus de réflexions tardives les plus fortes sur les panneaux (Figure 62b). Le C_{80} est positif dans toutes les zones situées sous le réflecteur et augmente en moyenne de 4 dB par rapport à la configuration initiale (Figure 63). L'objectif d'amélioration de la clarté avec des panneaux réfléchissants est atteint. Il est intéressant de noter qu'il y a quelques réflexions modérées. Cela est dû aux grandes différences entre les coefficients d'absorption très faibles des surfaces construites et les coefficients d'absorption très élevés du public. Dans un contexte de conception plus large, les représentations graphiques des réflexions peuvent être utilisées pour combiner les deux stratégies présentées dans les études de cas (modification des matériaux et de la forme). Les représentations graphiques de la proposition n° 2 montrent que certaines des réflexions tardives les plus fortes restent à l'arrière à la hauteur du public (Figure 62b).

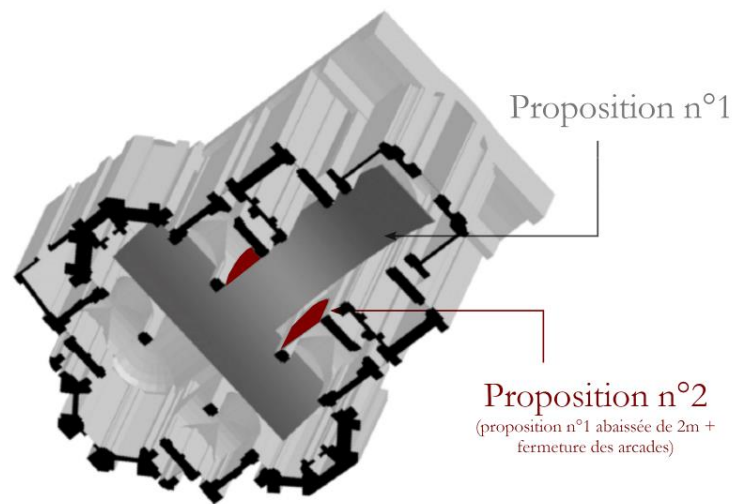


Figure 61 : Axonométrie plafonnante de la proposition n°1 et n°2.

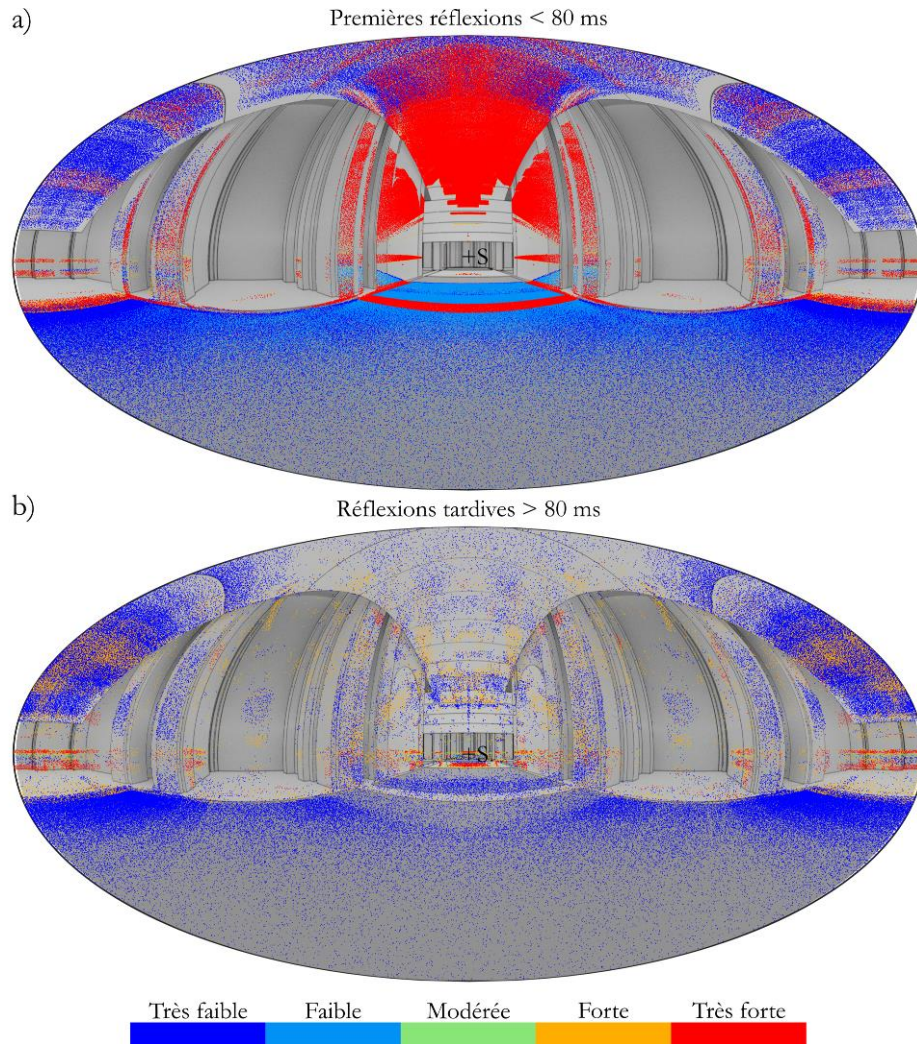


Figure 62 : Représentation graphique des (a) premières réflexions et (b) réflexions tardives avec la proposition n°2..

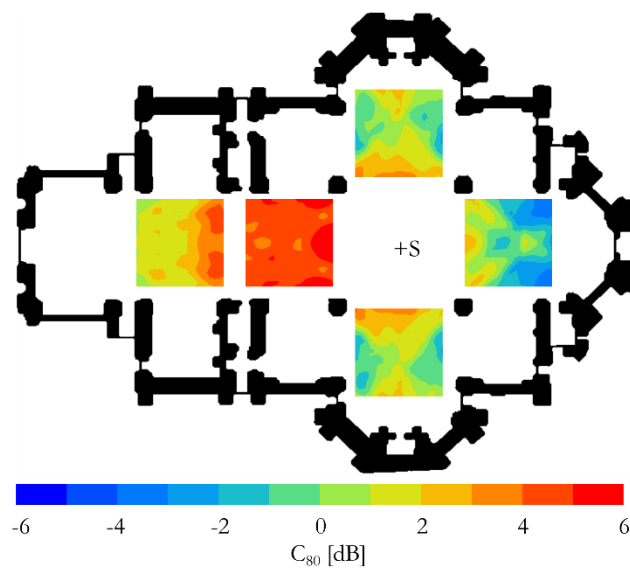


Figure 63 : Carte de C_{80} à l'intérieur de la chapelle avec la proposition n°2.

Dans la proposition n° 3, des éléments absorbants ($\alpha = 0.9$) sous forme de rideaux de 3 m de haut par 9 m de large sont ajoutés derrière chacune des zones du public. Au total, 108 m² de rideaux sont installés (Figure 64). La Figure 65 correspond aux représentations graphiques des réflexions sonores avec la proposition n° 3. La représentation des premières réflexions ne change pas beaucoup par rapport à la proposition n° 2, mais les réflexions tardives sont plus atténuées. L'ajout de l'absorbant a un effet très satisfaisant et augmente la clarté de 2 dB par rapport à la proposition n° 2 (Figure 66).

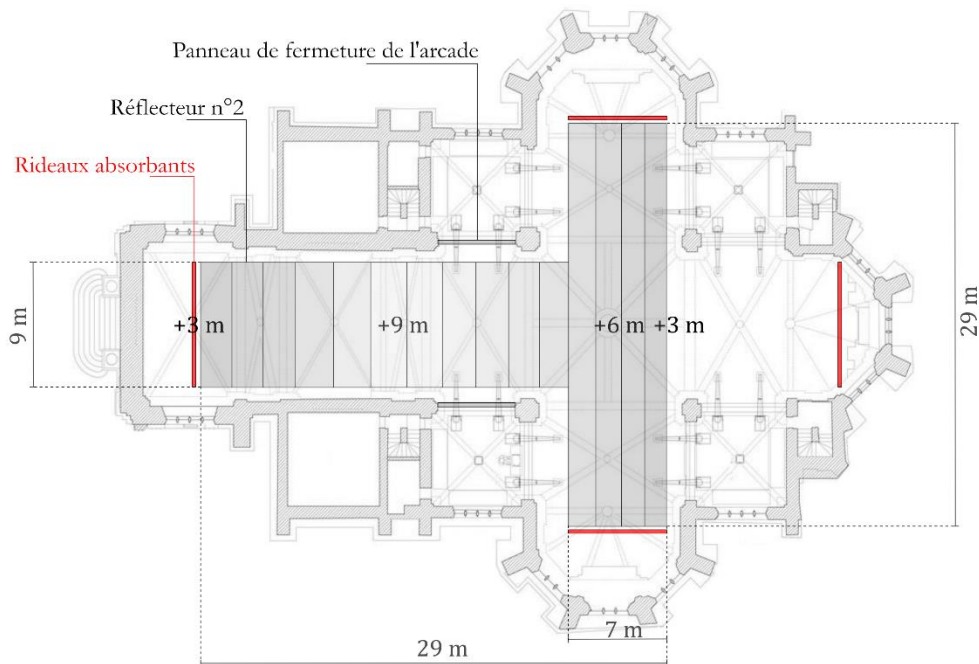


Figure 64 : Vue en plan de la proposition n°3.

3.3.4. Extension de la méthode à l'étude du paramètre du paramètre d'énergie latérale

Jusqu'à présent, la représentation des réflexions multiples a été utilisée pour améliorer le paramètre de Clarté sur l'ensemble du public. Nous proposons maintenant de l'étendre à celles de la Fraction d'Énergie Latérale (LEF). En effet, ces deux paramètres sont souvent en contradiction l'un avec l'autre : augmenter l'intelligibilité réduit généralement la sensation d'enveloppement. Pour cela, nous nous intéressons cette fois-ci à la zone du public placée à l'avant de la nef (Figure 67).

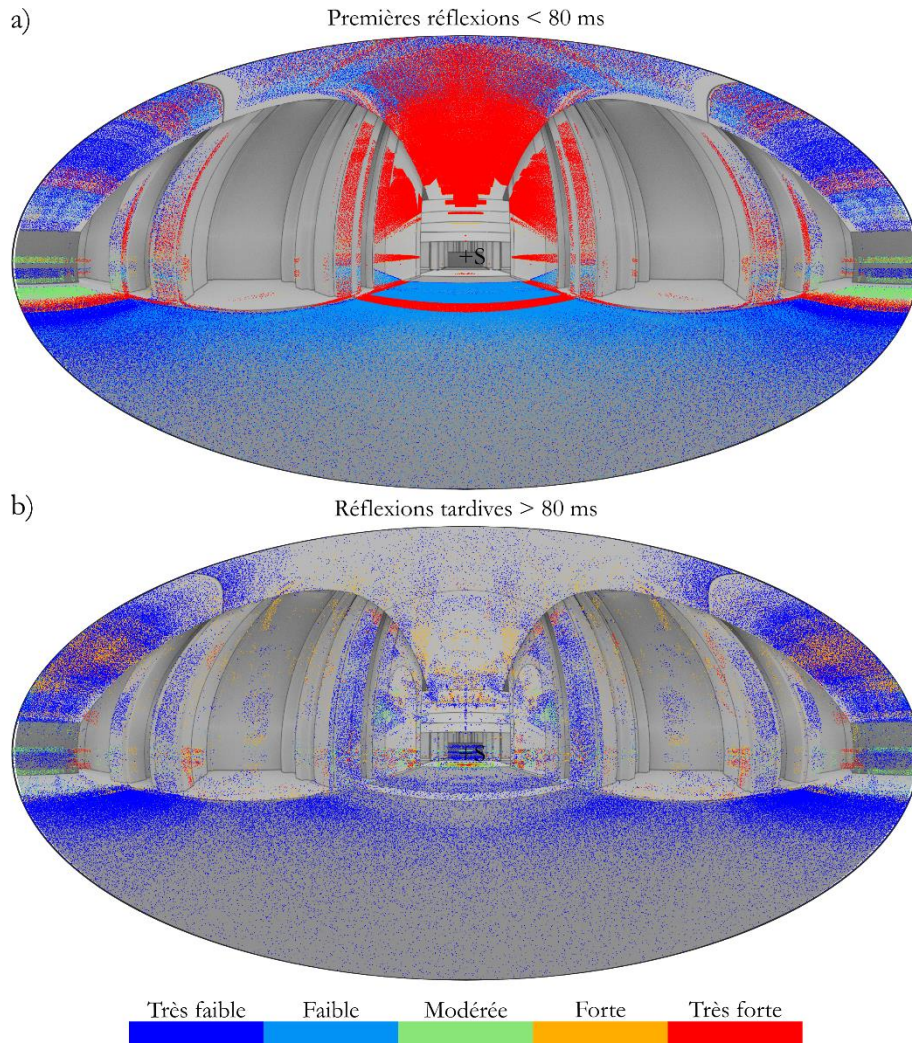


Figure 65: Représentation graphique des (a) premières réflexions et (b) réflexions tardives avec la proposition n°3.

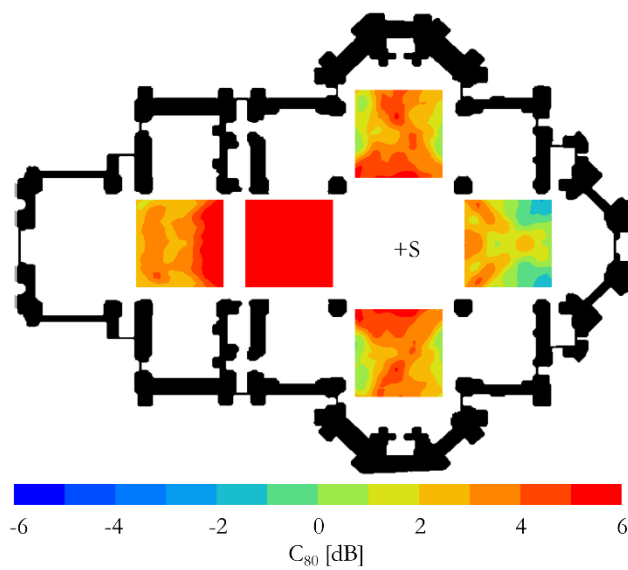


Figure 66: Carte de C_{80} à l'intérieur de la chapelle avec la proposition n°3.

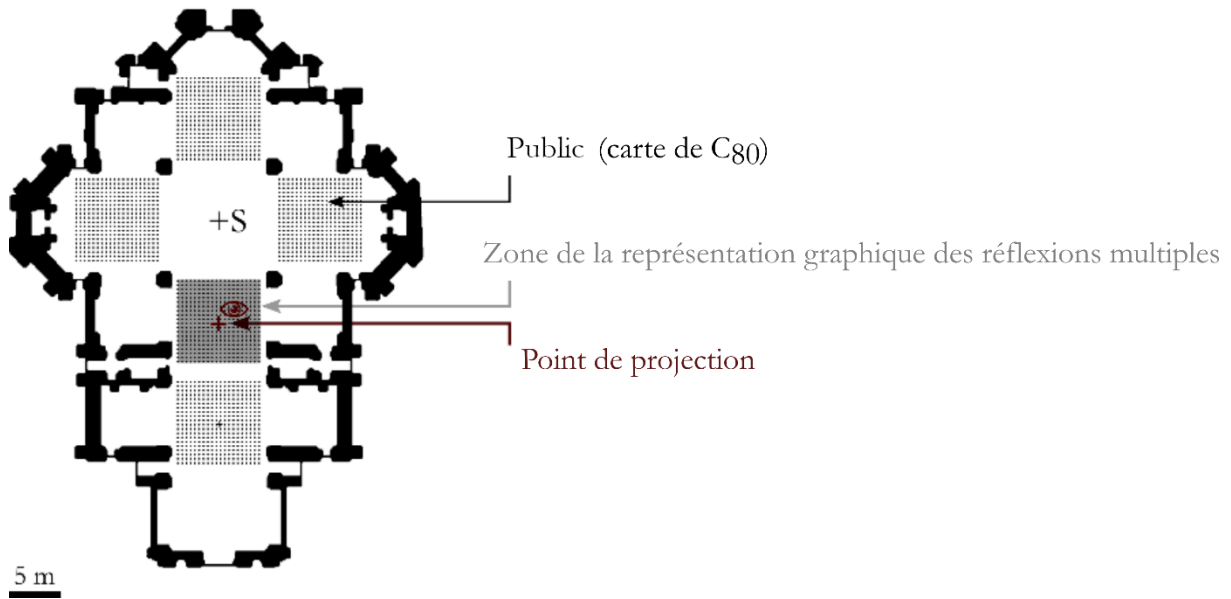


Figure 67: Emplacement des récepteurs à l'intérieur de la Chapelle.

Pour construire une représentation graphique des réflexions multiples permettant d'interpréter les valeurs de Fraction d'énergie Latérale (LF) (Eq. 3), il est nécessaire de pondérer l'énergie des rayons incidents par rapport à l'angle avec lequel ils atteignent le récepteur (Figure 68). La Figure 69 montre les cartes de C_{80} (a, d, g), et LF (b, e, h), ainsi que les représentations graphiques des premières réflexions (entre 5 et 80 ms) pondérées en fonction de leur angle d'incidence φ (c, f, i), pour la configuration initiale (sans réflecteur), la proposition n° 1 et la proposition n° 2.

$$LF = \frac{\int_5^{80} I \cos^2 \varphi}{\int_0^{80} I} \quad (3)$$

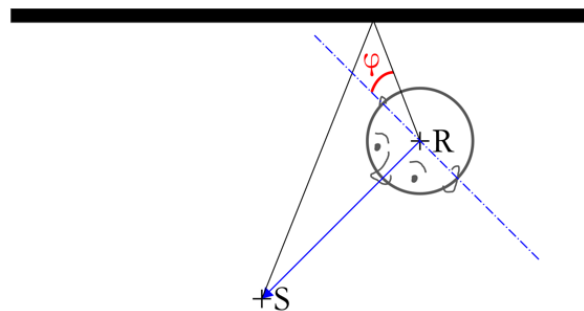


Figure 68: Angle de pondération des réflexions multiples.

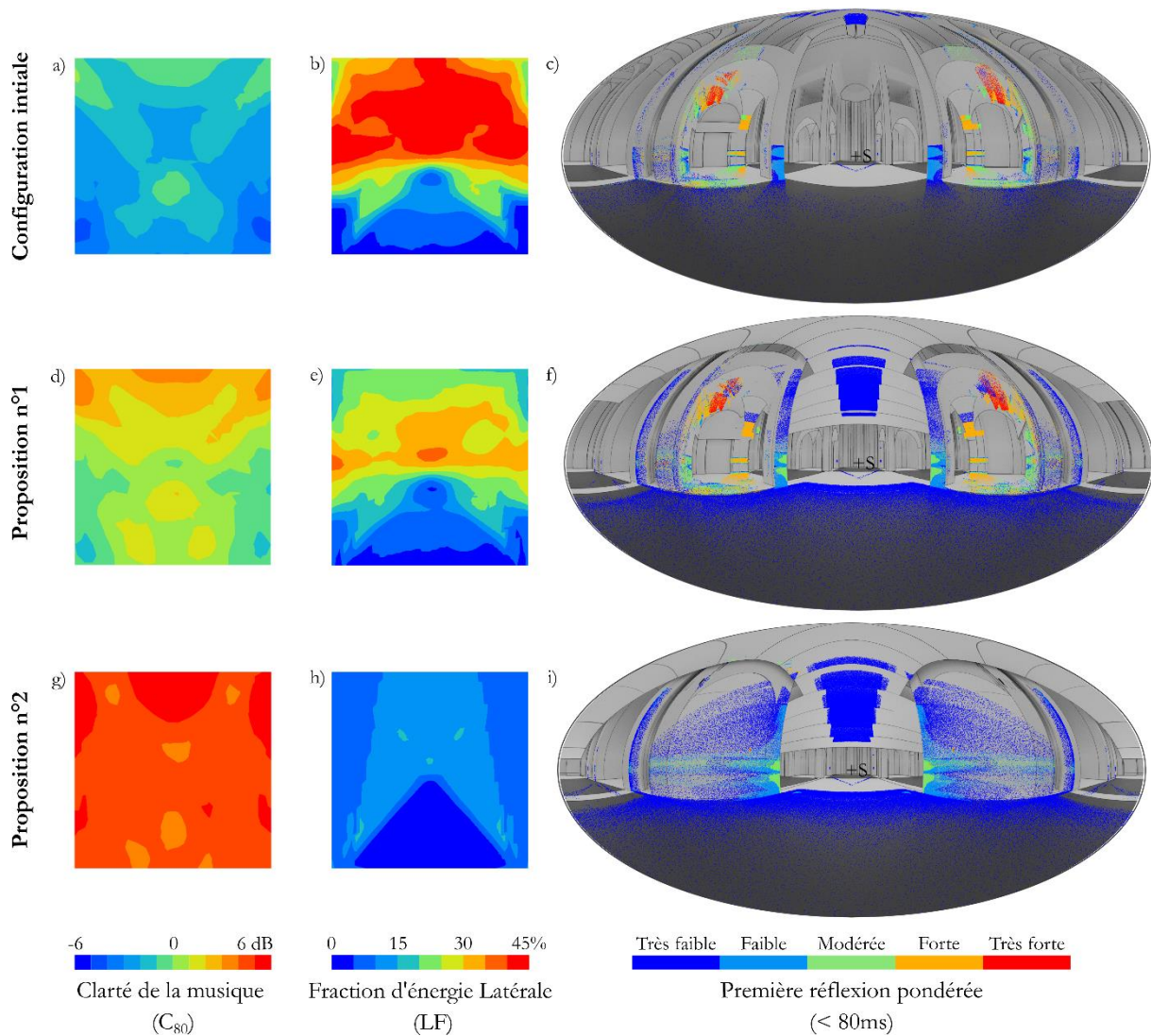


Figure 69: Cartes de C_{80} , LF et représentation graphique des réflexions multiples pondérées à l'intérieur de la Chapelle.

Avec la pondération, les réflexions latérales sont les plus fortes, car elles arrivent avec un φ plus faible. Dans la configuration initiale, les valeurs de C_{80} (Figure 69a) sont faibles, mais les premiers rangs reçoivent beaucoup d'énergie latérale (Figure 69b) ($LF > 45\%$). Ces réflexions latérales plus fortes proviennent principalement du plafond voûté des arcades (Figure 69c). Dans la proposition n°1, de nombreuses premières réflexions s'ajoutent grâce au faux plafond suspendu, augmentant ainsi fortement le C_{80} qui devient positif sur l'ensemble du public étudié (Figure 69d). Cependant, ces réflexions sont principalement frontales (elles apparaissent en bleu au centre de la Figure 69f), ce qui réduit la valeur du LF devant le public d'environ 15% (Figure 69e).

Dans la proposition n° 2, la fermeture des arcades par des panneaux verticaux augmente encore le nombre de premières réflexions, mais fait disparaître les réflexions latérales les plus fortes (Figure 69i). Même si les réflexions sont toujours présentes au même endroit sur la représentation graphique leur angle d'incidence a changé : elles n'atteignent plus les mêmes récepteurs et apparaissent donc plus faibles. Avec la proposition n°

2, la valeur moyenne de C_{80} est d'environ 6 dB (Figure 69g) sur l'ensemble du public, tandis que les valeurs de LF sont partout inférieures à 15% (Figure 69h).

L'augmentation de la clarté entraîne une réduction significative de la sensation d'enveloppement. Avec ces nouveaux résultats, nous pouvons considérer que la proposition n° 1 offre finalement un bon compromis entre l'intelligibilité de la source et les réflexions latérales. Les représentations graphiques panoramiques permettent d'interpréter les tendances observées sur les cartes d'indicateurs et de guider la prise de décision en fonction de l'utilisation de la salle. Pour écouter une conférence, par exemple, la proposition n° 2 est la plus adaptée, car elle privilégie l'intelligibilité. En revanche, pour l'écoute d'une symphonie, la proposition n° 1 assure une Clarté suffisante sans éliminer les réflexions latérales qui contribuent à la sensation d'enveloppement.

3.4. Conclusions du chapitre 3

A partir du moteur de calcul de lancer de rayons *Simonetta*, présenté dans le Chapitre Méthode, nous avons proposé dans la première application de la thèse un post-traitement de la simulation sous la forme d'une nouvelle représentation graphique des réflexions multiples capable de spatialiser l'information sonore sur l'ensemble du public. Elle s'appuie sur des deux éléments : une évaluation qualitative des réflexions (divisées en cinq catégories allant de la plus faible à la plus forte), et une projection de Mollweide pour représenter la scène avec une faible distorsion.

Dans tout le chapitre, des matériaux idéalisés à 1 kHz ont été supposés. Il serait possible de travailler avec des matériaux plus réalistes en modifiant les valeurs des coefficients d'absorption. L'utilisation de matériaux très absorbants ou très réfléchissants a pour principal avantage d'accentuer les tendances sur la représentation graphique (qui délivre une information spatiale qualitative) afin de faciliter l'interprétation et la prise de décision.

La représentation graphique a été ensuite utilisée en filtrant les réflexions selon leur délais d'arrivée pour permettre une représentation spatiale des composantes de la clarté. Elle a permis de déterminer l'emplacement idéal d'une certaine quantité d'absorbants dans une salle de classe, et d'améliorer la conception d'un dispositif réfléchissant à l'intérieur d'une chapelle. Dans les deux cas, les solutions identifiées grâce à la représentation graphique ont donné les meilleurs résultats. Dans le premier cas, ces résultats ont été vérifiés par une mesure en présence de public. Dans le second, nous avons étendu l'utilisation de la représentation graphique pour l'analyse du paramètre de Fraction d'Energie Latérale. Pour cela, les réflexions sur la représentation graphique ont été pondérées selon leur angle d'incidence. Grâce à ces nouvelles images, il devient possible de discuter la pertinence des choix de conception par rapport à l'équilibre à maintenir entre l'intelligibilité et la sensation d'enveloppement.

Les résultats montrent par ailleurs que la représentation graphique peut s'adapter à n'importe quelle géométrie, et à n'importe quelle implantation du public, et ce, quelle que soit la complexité architecturale de la salle. Elle peut donc être utilisée pour l'étude des dispositifs en terrasses que l'on retrouve dans la plupart des salles de concerts contemporaines.

CHAPITRE 4 – Des salles de concert aux rues de la ville : le passage de l’acoustique des salles à l’acoustique urbaine

Ce chapitre reprend et complète les articles « Impact of multiple reflections on urban acoustics » publié en novembre 2021 dans la revue *Journal of Physics*, « From Concert Halls to City Streets: Bridging the Gap Between Room Acoustics and Urban Acoustics » pour la conférence *I3DA*.

Introduction

Les villes du sud de l’Europe ont été tracées il y a souvent près de deux mille ans par des ingénieurs romains ou leurs successeurs médiévaux et présentent aujourd’hui des bâtiments de toutes les époques où il fait bon vivre, sous un climat qui n’est ni très froid en hiver, ni très chaud en été. Aussi, même pour atteindre les standards de confort actuels, il n’est besoin que d’un chauffage d’appoint. L’été, il suffit de garder les fenêtres ouvertes en grand pour ventiler la nuit. Or, ces villes idéales n’étaient pas prévues pour le tourisme et la vie nocturne de notre temps. Les rues étroites aux façades parallèles agissent comme des amplificateurs du bruit de la rue et les habitants, excédés, ferment leurs fenêtres dotées de double vitrage (Barclay, 2012). Pour ne pas mourir de chaud, ils installent la climatisation, laquelle, fonctionnant désormais jour et nuit, produit des pics de consommation électrique au pire moment de l’année, quand les rivières sont à leur étiage et qu’il n’y a pas de vent. L’architecture urbaine traditionnelle ne manquait pas de ressources pour éviter que le bruit de la rue ne monte aux étages (Sanchez, 2016) : des trottoirs sous arcades, des balcons, des encorbellements, ... Cependant, l’évolution trop rapide de la vie urbaine ces dernières décennies n’a pas permis que des solutions empiriques trouvent leur chemin, et l’architecture contemporaine, qui préfère les façades lisses et les murs rideaux, s’est détournée de toute idée de concevoir acoustiquement les nouveaux quartiers.

Les premières images réalisées en milieu urbain grâce à la caméra acoustique permettent d’apprécier à quel point le champ sonore y est complexe, et que les réflexions spéculaires dominent dans ces paysages minéraux faits de surfaces planes et d’angles droits, tant à l’extérieur que dans les intérieurs. Pour la simulation, les méthodes géométriques sont donc appropriées, et tout particulièrement le lancer de rayons.

Dans une première partie, la chaîne de mesure ponctuelle (traditionnellement utilisée en acoustique des salles) et la simulation montre qu'il existe, essentiellement, trois configurations de rue du point de vue de l'acoustique. Dans celle que nous appelons « 1P », la rue n'est bordée de façades que d'un seul côté, l'autre étant, par exemple, à l'orée d'un parc ou au bord d'une rivière. La configuration « 2P » est celle du canyon urbain, rue rectiligne et très longue, typique du plan de ville en damier. Les réflexions multiples y sont bien plus nombreuses que dans le cas précédent, mais bien moins que dans la configuration « 3P », celle d'une cour rectangulaire. Or, dans les centres anciens, les rues sont souvent courtes et acoustiquement fermées par les façades des rues perpendiculaires où elles vont se jeter. De telles rues correspondent donc à la configuration « 3P », la plus amplificatrice.

Dans la seconde partie du chapitre, on propose de simuler le champ sonore à l'échelle d'une ville entière. Pour ce faire, nous imaginons un « forçage » acoustique, fait d'un très grand nombre de sources identiques, régulièrement espacées, couvrant l'ensemble des rues passantes, comme si la ville était entièrement congestionnée d'un trafic automobile dense et uniforme. Cette idéalisation a l'avantage de pouvoir être reproduite dans n'importe quelle configuration urbaine, et permet donc de comparer des villes entre elles, ou les différents scénarii de rénovation d'une même ville. Il est possible, ensuite, de simuler une caméra acoustique, placée à l'intérieur d'un appartement test, pour analyser la provenance des différentes réflexions multiples extérieures et intérieures qui contribuent au niveau sonore (Izumi, 2021).

Par l'analyse des images du champ sonore urbain mesurées par la caméra acoustique et simulée pour son pendant virtuel, il devient possible à l'urbaniste de comprendre puis de corriger acoustiquement le plan d'une ville, et de faire entrer l'acoustique urbaine dans la pratique du projet comme l'une des composantes principales de la Physique Urbaine, de manière à retrouver des villes sobres et confortables, c'est-à-dire véritablement durables.

4.1. Etude acoustique à l'échelle de la rue

4.1.1. Simplification de la forme urbaine en trois configurations : 1P, 2P et 3P+

La ville se compose de bâtiments qui s'alignent entre eux pour former des rues, et de rues qui s'entrecroisent entre elles pour former des quartiers. Le maillage urbain est ponctué par des places, des monuments ou des jardins publics, qui permettent à ses habitants de se réunir autour d'évènements, d'histoire et de traditions communes. Que ce soit par des rues couvertes (Jerez de Frontera) ou souterraines (Montréal), fluviales (Venise) ou enneigées (Boston), lisses (Manhattan) ou en relief (Malte), droites (Paris) ou sinueuses (Sienne), chaque ville présente des spécificités architecturales urbaines qui lui sont propres (Figure 70). Nous proposons de simplifier la ville en trois configurations. La première, appelée 1P, désigne une rue dont les façades des bâtiments ont une vue dégagée, la deuxième, 2P, représente une rue canyon composée deux rangées parallèles de bâtiments, et la troisième 3P+ désigne toute scène urbaine plus enclavée (petite cour, place, une rue fermée etc.). Pour étudier l'influence des réflexions multiples qui se produisent à l'intérieur de chaque configuration, nous utilisons le dispositif de mesure et de simulation utilisé en acoustique des salles, en se basant sur l'étude d'une réponse impulsionnelle.



Calle Ciego, Jerez de la Frontera, Espagne



Galleria San Federico, Turin, Italie



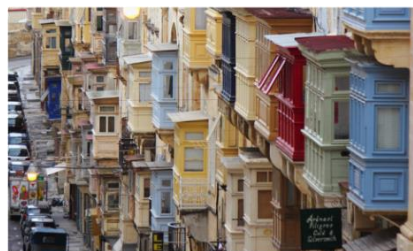
Newbury Street, Boston, Etats-Unis



Canal, Venise, Italie



Portu Kalea, Saint-Sébastien, Espagne



Rue de la République, La Valette, Malte



Habitat 67, Montréal, Québec

Figure 70 : Différentes rues dans le monde.

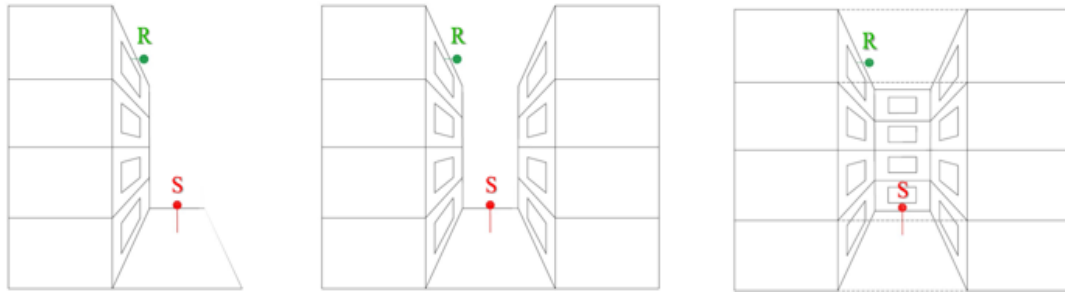


Figure 71 : Trois configurations urbaines pour l'acoustique appelées 1P, 2P, 3P+..

Pour cela, trois configurations réelles correspondant aux descriptions des cas 1P, 2P et 3P+ ont été identifiées (Figure 72) (leurs dimensions sont présentées dans le Tableau 10) :

- Le cas 1P est une façade dégagée d'un bâtiment du campus universitaire de Montaury à Anglet ;
- Le cas 2P est une façade d'un immeuble de la rue Poissonnerie au centre-ville de Bayonne ;
- Le cas 3P+ est une cour intérieure de la bibliothèque universitaire du campus Montaury à Anglet.

Dans chaque cas, une source omnidirectionnelle (un haut-parleur Brüel & Kjær Omnipower type 4292-L) est placée à hauteur d'homme, à 1.80m du sol dans la rue, et le récepteur (un sonomètre Brüel & Kjær type 2250) est placé en hauteur, à flanc de la façade soit au niveau d'une fenêtre ouverte, soit à l'acrotère du bâtiment. Le signal émis depuis la source est un signal à balayage exponentiel (*e-sweep*) qui le signal le plus adapté à la mesure en extérieur (Müller-Trapet, 2020). La mesure a été réalisées dans des conditions ambiantes favorables avec un niveau sonore ambiant inférieur à 40 dB.

Tableau 10 : Dimensions des configurations étudiées.

| Cas | 1P | 2P | 3P+ |
|--|------|------|------|
| Hauteur [m] | 11.7 | 10.3 | 11.7 |
| Largeur [m] | | 5.0 | 5.0 |
| Profondeur [m] | | | 8.0 |
| Distance entre le récepteur et la source [m] | 10.2 | 8.9 | 10.3 |

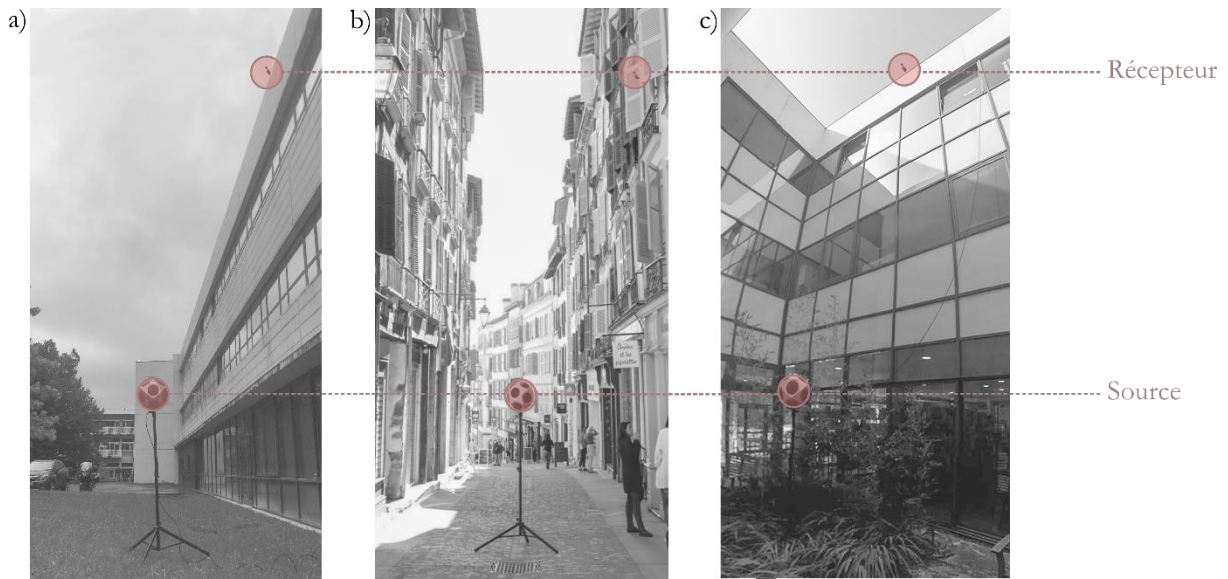


Figure 72 : Trois configurations identifiées correspondant aux cas 1P, 2P, 3P+.

Un modèle 3D simplifié de chaque cas a été modélisé en respectant les dimensions des cas mesurés. La simulation est exécutée avec le moteur de calcul *Simonetta*. Un coefficient d'absorption unique de 0.01 a été appliqué à toutes les faces du modèle. Les rayons se propagent avec un critère d'arrêt fixé à 500 ms de propagation.

4.1.2. Résultats de la mesure et de la simulation dans les trois configurations

La Figure 73 montre les réponses impulsionnelles mesurées dans les trois configurations. Chacun présente un premier pic qui correspond au son direct, et dont le retard est proportionnel à la distance entre le récepteur et la source, suivi par d'autres pics qui correspondent aux réflexions sonores. Sur la réponse impulsionnelle du cas 1P (Figure 73a), le pic du son direct est suivi par un seul pic, il s'agit de la réflexion sur le sol. Ce deuxième pic est beaucoup plus atténué que le deuxième pic sur cas 2P (Figure 73b). Cela est dû à la nature de la surface sur laquelle se produit la réflexion : dans le cas 1P, le sol est une pelouse, alors que dans le cas 2P, il s'agit d'une rue pavée. De façon générale, on remarque que le nombre de réflexions augmente d'un cas à l'autre.

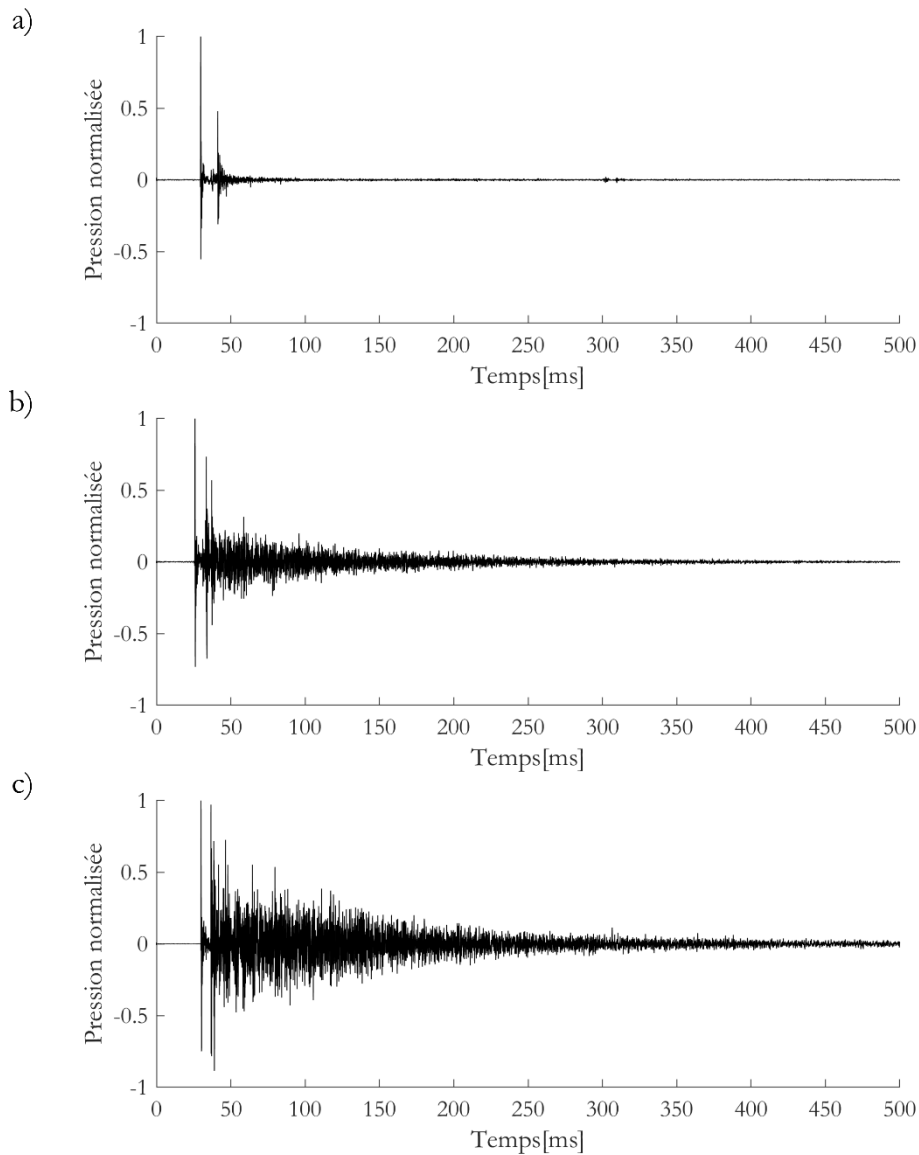


Figure 73 : Réponses impulsionnelles mesurées dans le cas (a) 1P, (b) 2P et (c) 3P+.

Les réflexions multiples contribuent à l'augmentation du niveau sonore. Pour évaluer cette augmentation, il faut comparer le niveau sonore correspondant à chaque réponse impulsionnelle, en intégrant l'énergie dans le temps. Un problème se pose cependant car on ne connaît pas le niveau sonore de la source omnidirectionnelle utilisée en mesure (L_w). Or, il s'agit d'une donnée d'entrée pour la simulation. Pour cela, on calibre le niveau sonore de la source en simulation de manière obtenir le même résultat que la mesure obtenue sur le cas 1P. Puis, on utilise le niveau sonore calibré L_w pour les deux autres simulations. En plus du niveau sonore obtenu au récepteur, on calcule aussi le paramètre EDT pour valider le résultat obtenu en simulation.

La Figure 74 et la Figure 75 montrent respectivement les niveaux sonores et les valeurs d'EDT obtenus par la mesure et la simulation. Les résultats montrent une très bonne concordance entre la mesure et la simulation sur les deux paramètres. Les écarts peuvent être principalement dû à des imprécisions de la chaîne de mesure,

à l'évaluation des coefficients d'absorption ou la simplification du modèle géométrique. La simulation considère en effet des surfaces planes et prend en compte un seul coefficient d'absorption. Par rapport au cas 1P (pris comme référence), on observe une augmentation du niveau sonore d'environ 6 dB sur le 2P, et 12 dB sur le cas 3P+. Cette augmentation du niveau sonore se traduit aussi l'augmentation du temps de première décroissance entre le cas 2P et le cas 3P+ (la valeur de l'EDT du cas 1P ne peut pas être calculé car la réponse impulsionnelle ne contient qu'une seule réflexion provenant du sol).

Ces premiers résultats permettent de valider l'utilisation du lancer de rayons pour l'étude des réflexions multiples en milieu urbain, et montrent leur impact sur l'augmentation du niveau sonore dans les espaces urbains. A partir de cette première validation, il devient possible de tester toutes les configurations de rues que l'on souhaite, afin de déterminer à partir de quelles largeurs un cas 2P devient un cas 1P, et, de la même manière à partir de quelle profondeur un cas 3P+ devient un cas 2P.

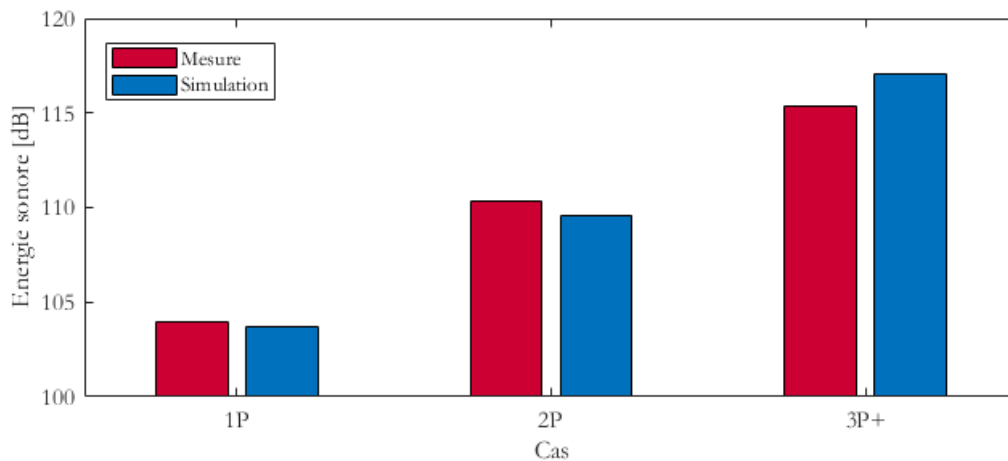


Figure 74 : Comparaison des niveaux sonores mesurés et simulés.

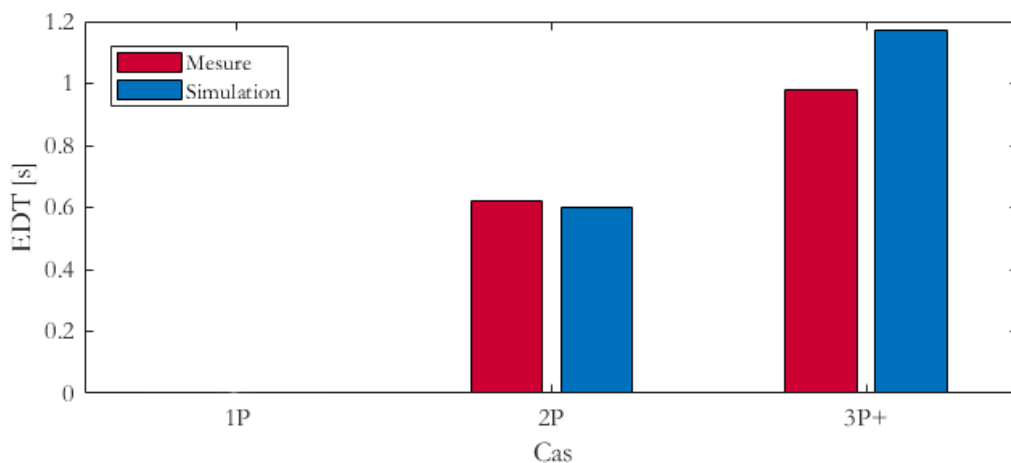


Figure 75 : Comparaison des valeurs d'EDT mesurés (à 1kHz) et simulés.

La Figure 76 et Figure 77 montrent comment le niveau sonore diminue à mesure que les dimensions des espaces étudiés augmentent. Les graphiques sont exprimés en niveau sonore par rapport au niveau sonore de la configuration suivante : plus le largeur du cas 2P augmente, plus il se rapproche du cas 1P. Ces résultats montrent qu'à partir d'une largeur d'environ 15 m, les réflexions multiples provenant de la façade d'en face ont un impact inférieur à 1 dB, et peut donc être considérée comme un cas 1P. De la même manière, une rue fermée de 5m de largeur, peut être considérée comme une rue ouverte à partir de 60 m de long.

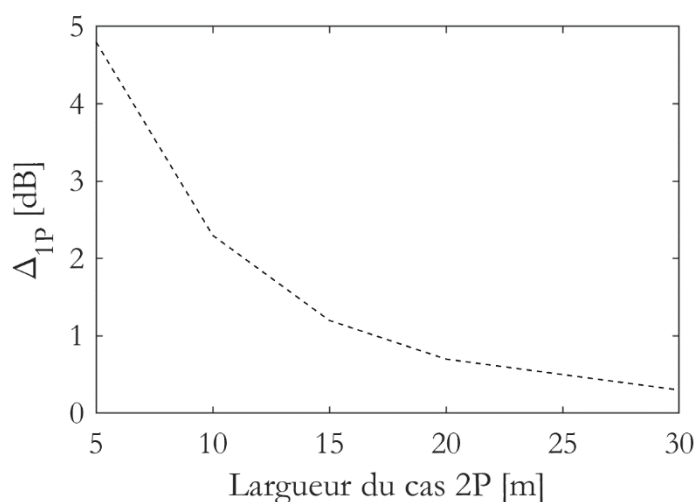


Figure 76: Effet de l'augmentation de la largeur de la rue sur le niveau sonore.

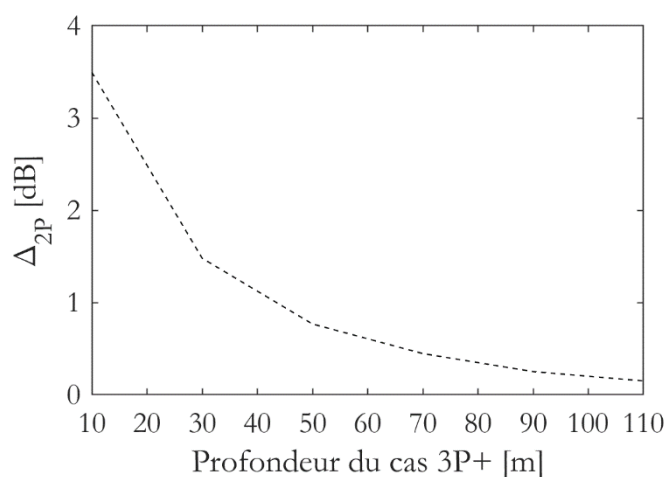


Figure 77: Effet de l'augmentation de la profondeur de la cour sur le niveau sonore.

Les mesures et les simulations ont été obtenues sur un seul point, placé au troisième étage. En réalité, le niveau sonore dans les configurations dépend aussi de l'étage auquel se situe un appartement. Dans ce dernier test, réalisé uniquement en simulation, on multiplie le nombre de récepteurs de manière à représenter le champ sonore sur toute la hauteur des bâtiments, en étudiant aussi l'intérieur des bâtiments. La surface du bâtiment étudié est alors percée par des ouvertures permettant aux rayons d'entrer par les fenêtres ouvertes, les autres surfaces des bâtiments sont laissées pleines. La Figure 78 montre les modèles 3D des trois configurations, composées par des blocs de 5 m de long, 5 m de large et 3.5 m de haut. Sur les façades ouvertes, les fenêtres de 1.80 m de haut et 1.60 m de large sont placées à 1 m du sol de chaque étage. La source (point noir sur la Figure 79) est placée au milieu de la surface du sol avec un niveau sonore de 80 dB, et le niveau sonore est calculé sur une grille verticale composée de 10 000 récepteurs sphérique de 0.10 m de rayon. La barre de couleurs a été adaptée pour mettre en valeur les niveaux sonores intérieurs. La simulation est effectuée par un tir d'un million de rayons, qui se propagent dans le modèle pendant 500 ms.

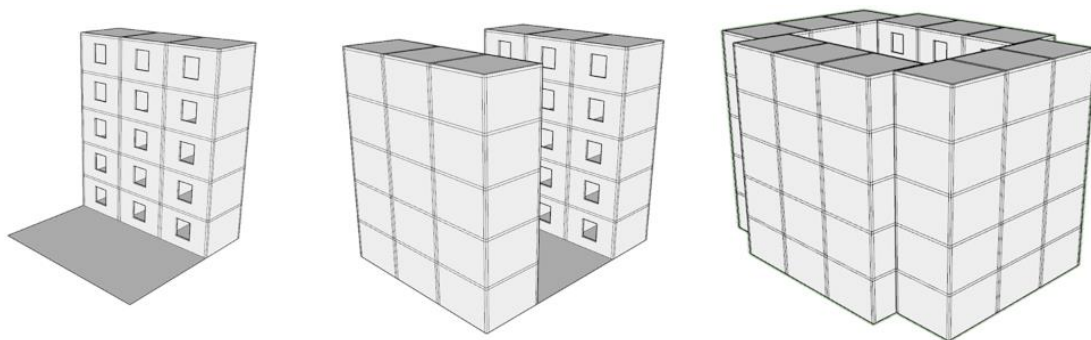


Figure 78: Modèles 3D des trois configurations étudiées appelées 1P, 2P, et 3P+.

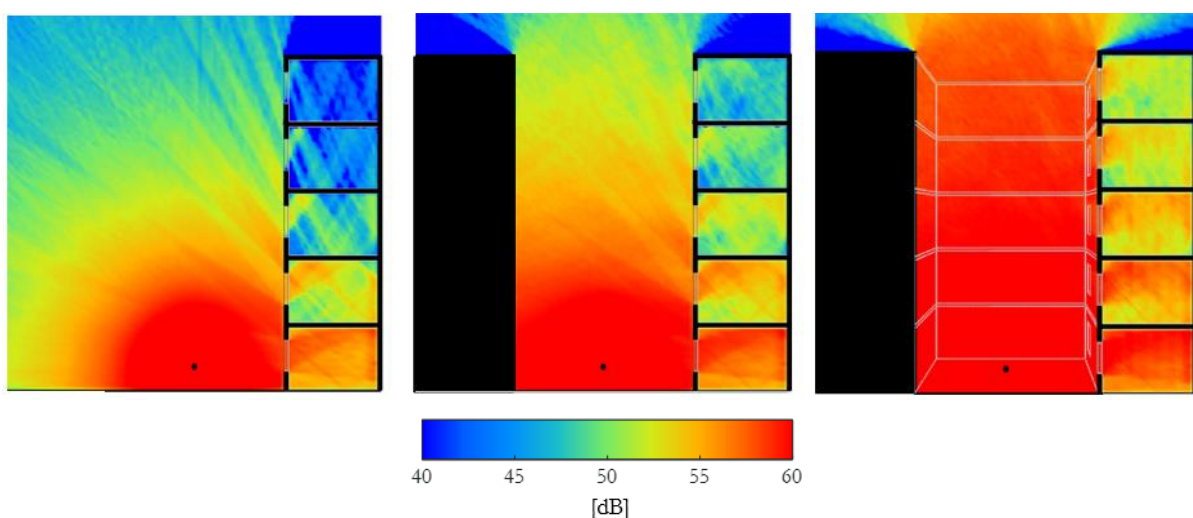


Figure 79: Cartes du niveau sonore simulé dans les trois configurations.

La Figure 79 montre le niveau sonore obtenu sur les récepteurs une vue en coupe des espaces intérieurs des trois cas étudiés, les valeurs ont été interpolées pour donner un aspect continu au résultat. Le résultat illustre la stratification du niveau sonore selon les étages, mais aussi l'impact de la géométrie extérieure sur le niveau sonore intérieur. Par exemple, on remarque qu'un appartement au dernier étage du cas 2P a le même niveau sonore qu'un appartement au deuxième étage d'un cas 1P, et, de la même manière qu'un appartement du dernier étage d'un cas 3P a le même niveau sonore que le premier étage du cas 1P.

Ces premiers résultats montrent l'influence des réflexions multiples sur l'augmentation du niveau sonore en ville et les nuisances que cela engendre dans les intérieurs des bâtiments occupés. Cependant, cette simulation suppose que la réflexion demeure spéculaire, y compris lorsque le son entre par la fenêtre ouverte. Dans la partie suivante, nous nous intéresserons à la validation de la réflexion spéculaire en milieu urbain par la mesure du champ spatialisé, aujourd'hui rendu possible avec l'arrivée sur le marché des nouvelles caméras acoustiques.

4.2. Etude acoustique à l'échelle de la ville

4.2.1. Première campagne de mesure par caméra acoustique en milieu urbain

Une première campagne de mesure par caméra acoustique en milieu urbain a été réalisée dans le centre de Bayonne (France) dans l'allée Gardin, une rue droite et très étroite d'environ 2 m de large et 130 m de long. Pour créer une source de bruit constante et suffisamment forte sans déranger le voisinage, nous avons utilisé le bruit de roulement d'une valise. Le bruit généré par le roulement de la valise à mesure qu'elle s'éloigne dans la rue est observé à l'aide d'une caméra acoustique SoundCam Bionic M, composée de 112 microphones, pendant un moment très calme, sans autres sources de bruit dans le voisinage (Figure 80).

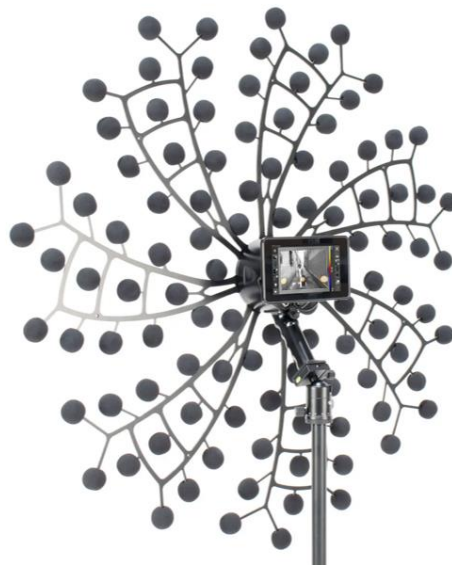


Figure 80 : Caméra acoustique SoundCam Bionic M utilisée pour la mesure d'après CAE (2023).

La Figure 81 montre une séquence filtrée sur les bandes de fréquence entre 4.2 kHz et 4.8 kHz avec une gamme dynamique de 5 dB (la barre de couleur s'étend de 28.5 à 33.5 dB). Ce filtre haute fréquence permet de renforcer la discontinuité du champ sonore. L'emplacement de la source sonore est représenté par le symbole « +S », et un filtre coupe-bas de 31 dB est ajouté en post-traitement pour mieux distinguer les différents points visibles sur les images acoustiques.

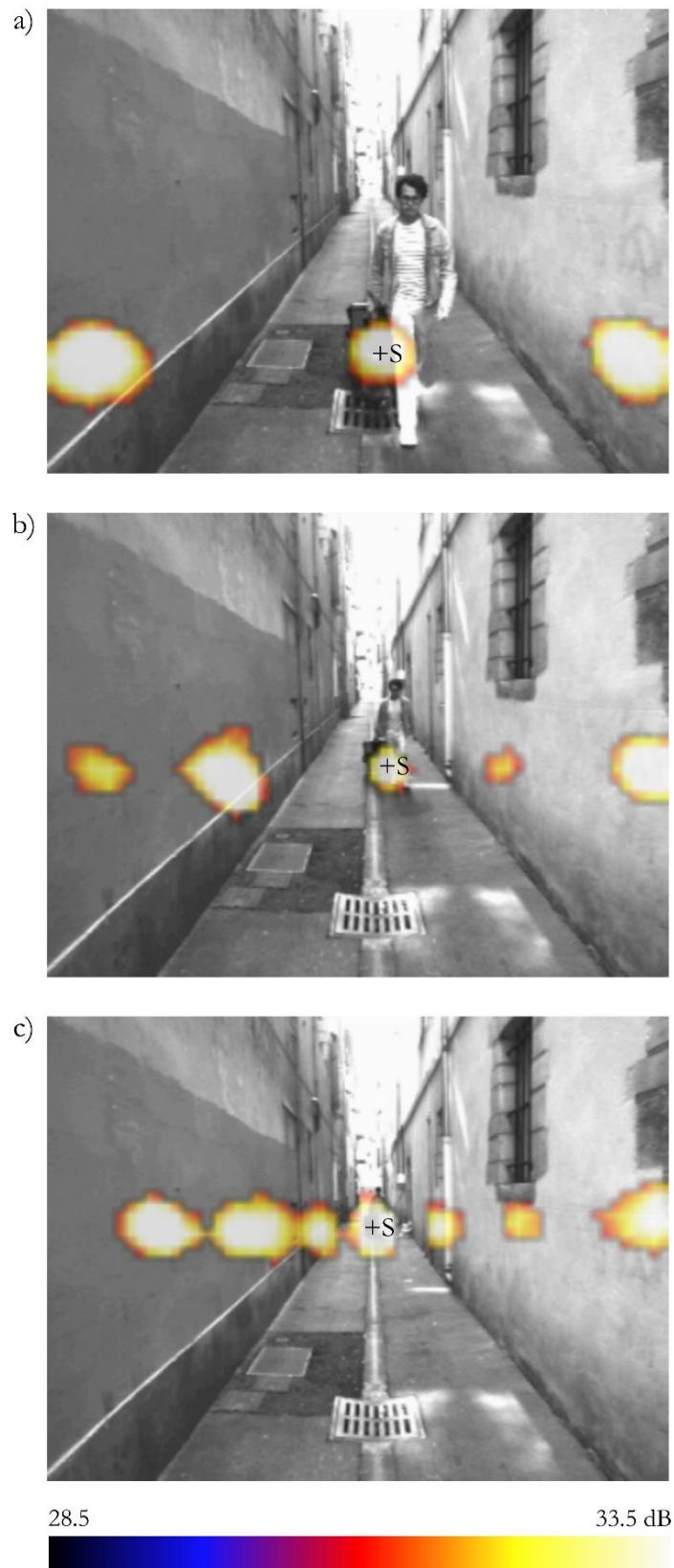


Figure 81 : Réflexions du (a) premier ordre (b) deuxième ordre et (c) troisième ordre mesurées par caméra acoustique dans les fréquences [4,2 kHz - 4,8 kHz].

Les photographies acoustiques montrent très clairement les réflexions spéculaires de premier ordre, de deuxième ordre et de troisième ordre sur les façades de la rue. Ces mesures sont une illustration immédiate de la méthode des images : les réflexions sonores sont placées sur les reflets de la source par rapport aux murs verticaux. Les réflexions d'ordre supérieures ne sont visibles qu'à partir d'une certaine distance puisque l'angle de vue horizontal de la caméra optique est de 70° . Ces premiers résultats valident l'hypothèse d'une réflexion essentiellement spéculaire et l'utilisation de méthodes géométriques pour la simulation acoustique en milieu urbain.

4.2.2. Première simulation acoustique à l'échelle de la ville

À quelques kilomètres de Bayonne, dans le Pays Basque espagnol, se trouve la ville de Pasaia (Figure 82a), qui réunit diverses configurations architecturales dans un périmètre restreint : un centre historique, des immeubles de grande hauteur, un port, des rues piétonnes étroites et de grands axes routiers. Pour étudier la relation entre ces différentes configurations urbaines et les réflexions sonores, une simulation par lancer de rayons a été réalisée. À l'aide des données de Google Earth, un modèle 3D de bâtiments et de terrain composé de 60 000 triangles est créé (Figure 82b), et un coefficient d'absorption unique de 0.1 est attribué à toutes les faces du modèle, conformément aux valeurs recommandées par Ismail (2005).

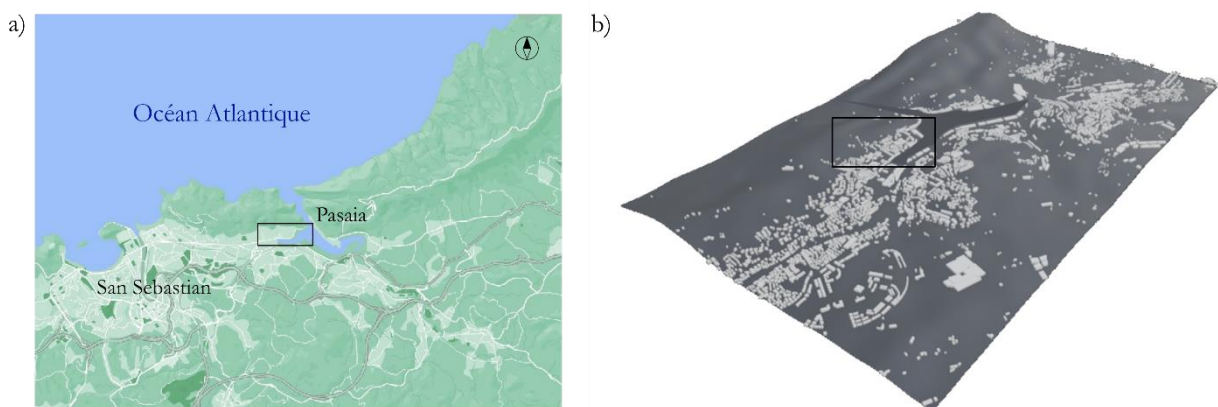


Figure 82 : (a) Localisation de la ville de Pasaia et (b) modèle 3D de la ville utilisé pour la simulation.

Les simulations sont effectuées sur les quartiers San Pedro et Trinxerpe, deux quartiers voisins au nord-est de Pasaia (Figure 84a). Pour simuler le champ sonore, on génère un forçage acoustique constitué d'un très grand nombre de sources identiques et régulièrement espacées couvrant toutes les rues, comme si la ville était entièrement saturée par un trafic automobile dense et uniforme. Au total, 2700 sources sont positionnées à 0.20 m du sol, chacune émettant un niveau sonore de 100 dB. Chaque source émet un million de rayons, et chacun se propage jusqu'à la dixième réflexion. Au-dessus de chaque source, à 15 m du sol, 2700 récepteurs sphériques de 0.6 m de diamètre sont placés. Au total, 27 milliards de rayons ont été traités pour parvenir au résultat, avec un temps de calcul d'environ 55 h. La Figure 84b montre les niveaux sonores calculés sur les récepteurs dans la configuration initiale de la ville. Des différences allant jusqu'à 10 dB peuvent être observées. Les valeurs les plus basses se trouvent dans les rues bordées d'une seule façade (1P), les valeurs moyennes sont obtenues dans les rues longues (2P) et les valeurs les plus élevées sont obtenues dans les espaces très fermés par des bâtiments (ou des rues très étroites) (3P+). Cette triple distinction est clairement visible dans l'histogramme des niveaux de bruit (Figure 83a). A partir de la Figure 84b, nous redessinons Pasaia, en supprimant des bâtiments aléatoires dans les zones où les niveaux de bruit sont les plus élevés. Les bâtiments retirés apparaissent en gris foncé sur la Figure 84c. Dans la plupart des cas, les niveaux sonores sont atténués (Figure 84c). La Figure 83b montre qu'il y a effectivement beaucoup moins de récepteurs classés 3P+ que dans la configuration initiale. Dans certains cas, la suppression des bâtiments n'a pas eu d'effet sur les niveaux sonores. C'est notamment le cas dans le quartier des Salinas, (au centre de la Figure 84), un îlot urbain composé de trois bâtiments parallèles identiques entourés de trois autres bâtiments, l'ensemble formant une scène urbaine très fermée composée de murs parallèles proches. La suppression de deux bâtiments a eu très peu d'impact sur les niveaux de bruit. Pour mieux comprendre les interactions sonores entre les façades, il est nécessaire d'étudier la spatialisation du champ sonore. Dans la section suivante, nous avons utilisé une caméra acoustique pour explorer cette zone.

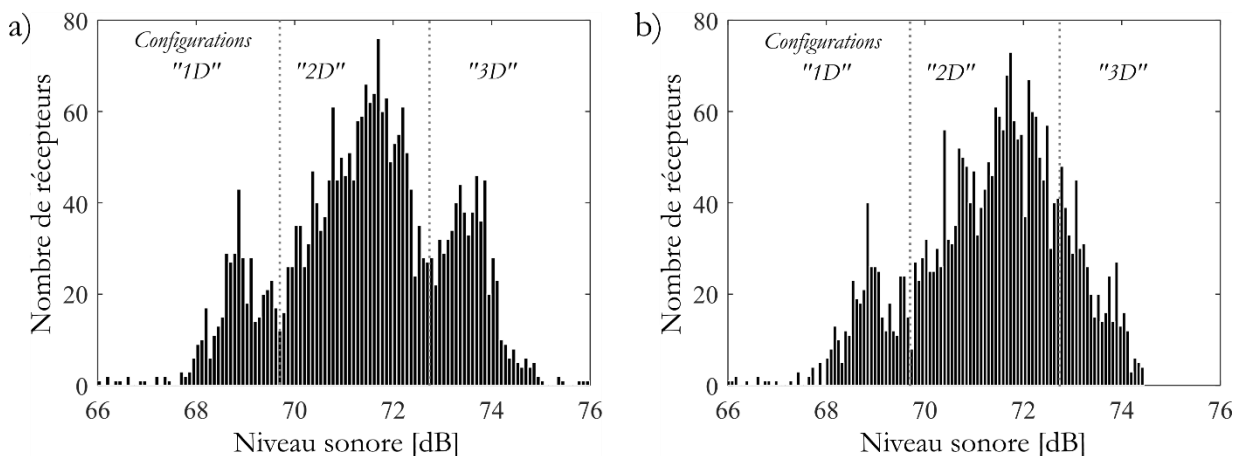


Figure 83 : Diagrammes de distribution dans (a) la configuration initiale et (b) modifiée de la ville.

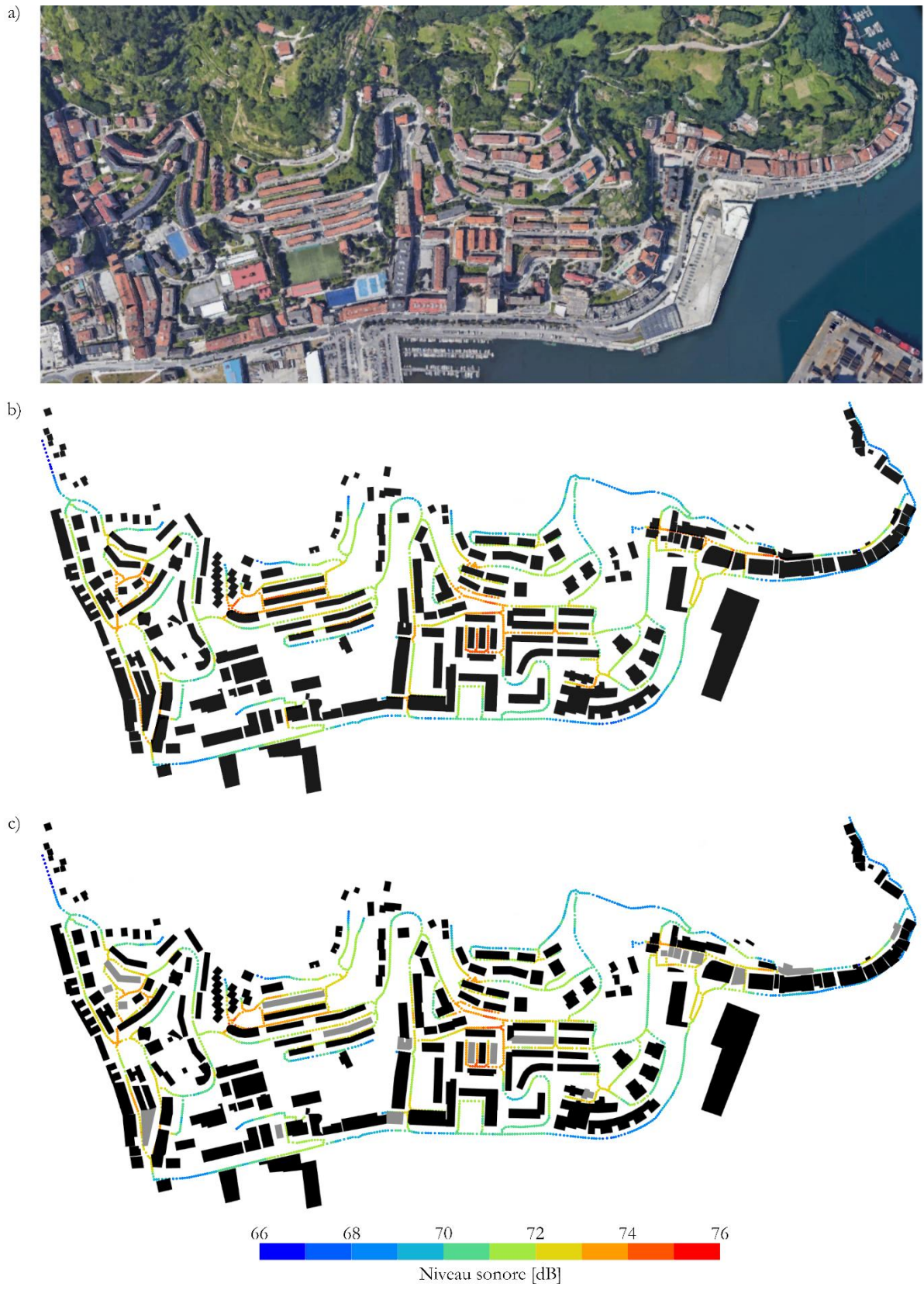


Figure 84 : (a) Photo satellite, (b) simulation de Pasaia initiale et (c) de Pasaia modifiée.

Les résultats de la Figure 84 permettent d'apporter un premier support d'aide à la conception architecturale et urbaine en tout début de projet. Ils peuvent accompagner les décisions en matière de gestion des flux de transports, et de la mise en place des dispositifs de protections acoustiques en permettant d'identifier les endroits où la forme de la ville peut localement engendrer des réflexions sonores multiples importantes. D'autres décisions, à l'échelle du bâtiment (forme et matériaux en façade (Yang, 2020), ou en toiture (Van Renterghem, 2010)) peuvent ensuite permettre d'atténuer localement les effets des réflexions multiples en jouant sur la diffraction ou la diffusion des ondes sonores. Notre méthode permet d'obtenir une première estimation du niveau sonore dans le champ de vision de la source et dans le champ de vision étendu par les réflexions multiples. Dans certains cas, comme les cours urbaines fermées, le niveau sonore est généralement dominé par des effets de diffraction (Hornikx, 2009), qui ne sont pas pris en compte dans cette étude.

4.2.3. Deuxième campagne de mesure par caméra acoustique

Une deuxième campagne de mesures par caméra acoustique a été réalisée à l'intérieur du quartier de Salinas. La caméra acoustique est placée en hauteur, au 3ème étage d'un des bâtiments du quartier, sur le rebord d'une fenêtre ouverte (Figure 85). Une réponse impulsionnelle est mesurée à partir d'un claquement de main effectué par un opérateur dans la rue (représenté par le symbole "+S" sur la Figure 85 et Figure 86a), et enregistrée pendant 1 s. La Figure 86 montre des instantanés acoustiques pris par la caméra acoustique pendant la réponse impulsionnelle, filtrés sur l'intervalle de fréquence [1.15 kHz – 2.6 kHz]. La gamme dynamique de la barre de couleurs est fixée à 3 dB, ce qui permet d'observer les réflexions successives dans le temps.

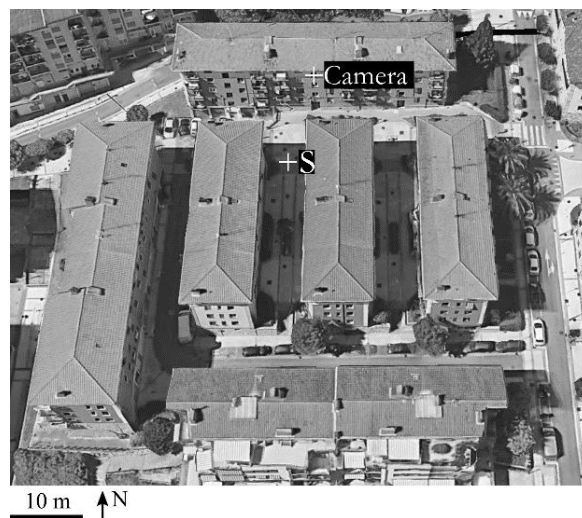


Figure 85: Vue satellite du quartier des Salinas et implantation de la caméra et de la source sonore.

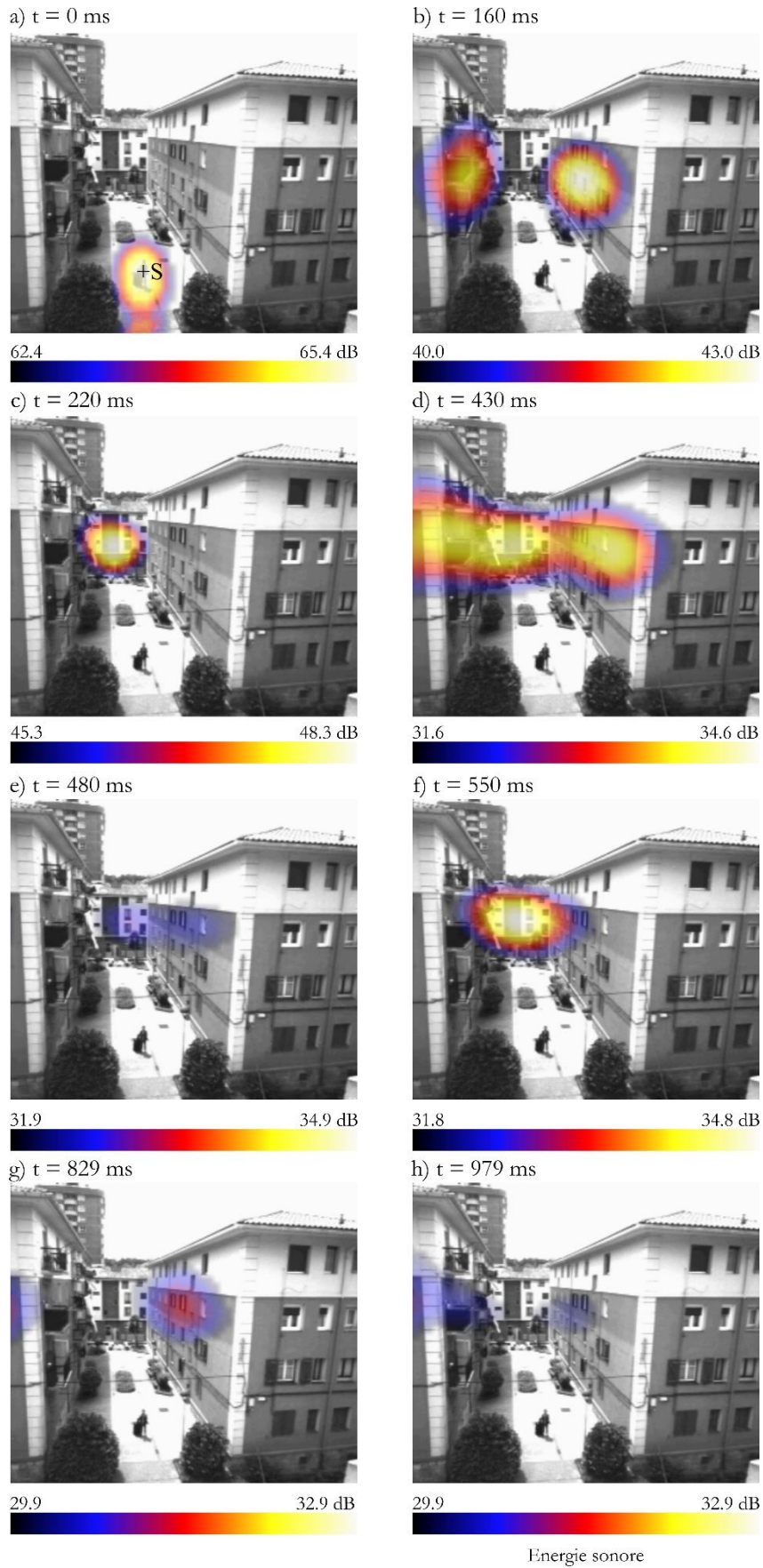


Figure 86: Mesure d'une réponse impulsionnelle par caméra acoustique depuis la fenêtre ouverte d'un bâtiment du quartier des Salinas.

Le premier cliché montre la source et la première réflexion sur le sol (Figure 86a). Les autres instantanés montrent des réflexions ping-pong multiples successives qui se produisent entre les façades parallèles des deux bâtiments centraux (Figure 86b, d, g et i), et sur la façade du bâtiment opposé au point d'observation (Figure 86c, d et f). Les reflets apparaissent plus fortement sur le bâtiment de droite que sur celui de gauche. Ceci peut être dû au point de vue de la caméra (qui est davantage orientée vers le bâtiment de droite), ou à la présence de balcons sur le bâtiment de gauche, dont la forme peut modifier la trajectoire des réflexions spéculaires. Ces résultats démontrent une fois de plus le rôle prépondérant des réflexions multiples et spéculaires sur l'acoustique urbaine, et montrent que la forme de la ville joue un rôle très important dans le bruit qui atteint les étages des bâtiments occupés, et qui pénètre ensuite à l'intérieur des habitations par les fenêtres ouvertes.

4.2.4. Mesure et simulation du bruit extérieur depuis l'intérieur

La pollution sonore dans les zones urbaines oblige les habitants à fermer leurs fenêtres, ce qui limite le refroidissement nocturne des intérieurs par ventilation naturelle. Pour simuler par lancer de rayons cette énergie sonore qui pénètre à l'intérieur des bâtiments par les fenêtres ouvertes dans la Figure 79, nous avons laissé les rayons se propager dans le modèle en créant des ouvertures sur les façades des bâtiment. Comme nous l'avons mentionné, cela pose à nouveau le problème de la validité de la réflexion spéculaire, une fois que le son a traversé le seuil de la fenêtre.

4.2.4.1. *Méthode de mesure*

Pour ce dernier test, on recule la caméra placée précédemment au point de vue de la Figure 85 est déplacée vers l'intérieur du bâtiment, de manière à filmer la fenêtre ouverte et les différents murs de la pièce. La pièce est une cage d'escalier et la caméra est placée sur le palier du dernier étage, contre le mur du fond. Contrairement aux mesures précédentes où la source de bruit est générée par un opérateur, nous filmons ici simplement la fenêtre soumise au bruit extérieur, en nous assurant qu'il n'y a pas de source de bruit à l'intérieur.

4.2.4.2. Méthode de simulation

Pour cette dernière simulation, un modèle plus détaillé de la zone du quartier de Salinas est utilisé (Figure 87). A l'intérieur du bâtiment étudié, nous avons ajouté la pièce correspondant à celle mesurée par la caméra acoustique, en laissant une ouverture carrée au niveau de la fenêtre latérale de 1.60 m de côté. La modélisation acoustique de la zone est réalisée à l'aide de 5000 sources réparties uniformément (dans la zone rouge de la Figure 87) dans les rues du quartier, à 0.50 m du sol. Le récepteur est placé au même endroit que la caméra utilisée pour les mesures. Dans le Chapitre 3 de la thèse, nous avons proposé une représentation graphique qui cumule l'origine des réflexions incidentes sur un grand nombre de récepteurs. Appliqué à la conception acoustique des salles, ce graphique a permis de comprendre l'impact d'une source sonore et de ses réflexions sur l'ensemble d'un public. Dans un contexte urbain, nous nous intéressons ici à un seul récepteur (un point placé à la fenêtre d'une habitation), soumis à une multitude de sources extérieures et à leurs réflexions.

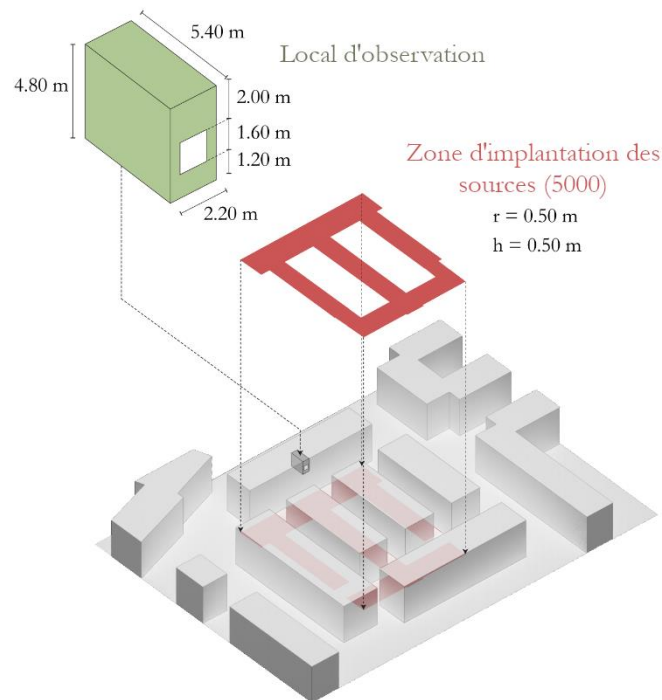


Figure 87: Modèle 3D utilisé pour la simulation du quartier des Salinas.

Nous construirons donc la même représentation graphique que celle proposée dans le Chapitre 3, mais avec une démarche inverse : ici, on montre l'origine des réflexions multiples provenant d'un groupe de sources sur un récepteur unique. Comme nous l'avons mentionné, la simulation par lancer de rayons pour un très grand

nombre de sources peut rapidement devenir très coûteux en temps de calcul. Ici, comme nous nous intéressons à un seul récepteur, nous utilisons une technique de tir de rayons inversé (*backward raytracing* en anglais), c'est-à-dire que les rayons sont tirés depuis le récepteur et on vérifie l'intersection des rayons avec les sphères sources placées dans la rue. Un tir d'un million de rayons est effectué, et chacun d'entre eux se propage jusqu'à la cinquième réflexion. Comme dans les simulations précédentes, le coefficient d'absorption de toutes les surfaces est de 0.1.

4.2.4.3. Résultats

La Figure 88a est issue de la représentation panoramique présentée dans la Figure 88c, qui montre l'origine des réflexions sonores à 360° autour du récepteur. Les résultats de la simulation ont été rognés le long de la ligne blanche en pointillés de manière à obtenir une vue de la pièce similaire à celle mesurée par la caméra acoustique (Figure 88b). Sur l'image obtenue par caméra acoustique, la fenêtre ouverte apparaît très bruyante comme s'il y avait une source placée dans l'axe de l'ouverture. On observe également la présence de taches au plafond et sur les parois latérales de la pièce, qui semblent correspondre à des réflexions spéculaires.

Grâce à la représentation graphique simulée, nous retrouvons très précisément l'emplacement de ces réflexions sonores. Les réflexions les plus fortes remplissent la fenêtre ouverte (elles proviennent des surfaces bâties des bâtiments voisins) et une partie centrale du plafond. Nous trouvons également l'emplacement de réflexions fortes et modérées sur les murs latéraux et sur les côtés du plafond. Les réflexions visibles dans la simulation proviennent à la fois des rayons directs (on voit les sources depuis la fenêtre ouverte) mais aussi des réflexions sonores multiples provenant des façades des bâtiments voisins, qui, après avoir traversé le rebord de la fenêtre, continuent à se propager dans la pièce.

Certaines réflexions faibles et modérées au-dessus de la fenêtre et au coin du plafond sur la simulation n'apparaissent pas sur la mesure. Cela peut être lié à la dynamique de la caméra, qui n'est peut-être pas assez sensible pour les détecter. L'idéalisation des sources sonores urbaines par un procédé de simulation acoustique a permis d'obtenir une image proche de l'image mesurée par une caméra acoustique soumise au bruit ambiant de la ville. Grâce à ces résultats, nous avons montré qu'il est possible d'utiliser le lancer de rayons pour simuler des réflexions sonores multiples à l'échelle urbaine, aussi bien en extérieur qu'en intérieur.

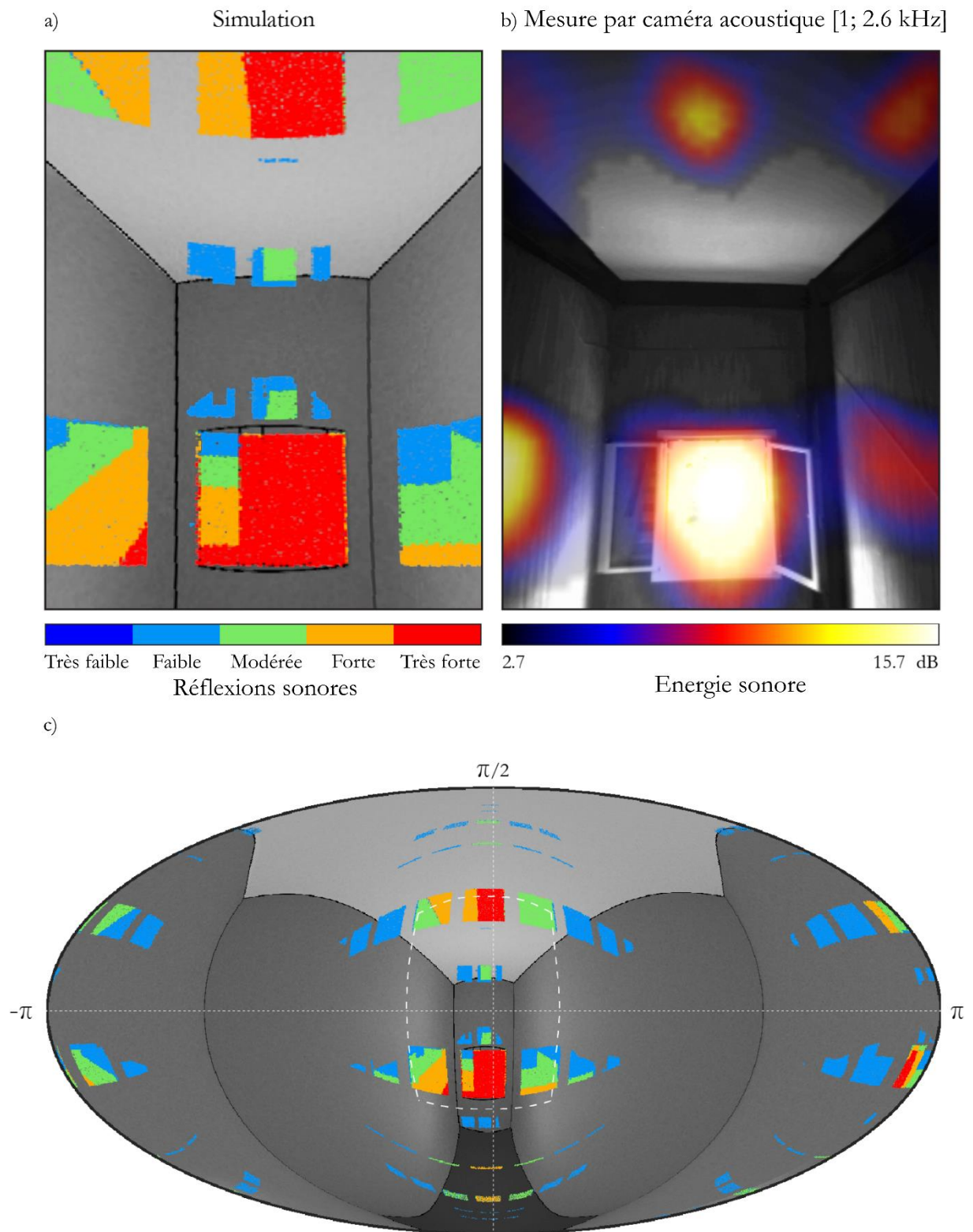


Figure 88: (a) Origine des réflexions multiples incidentes au récepteur, (b) mesure par caméra acoustique et (c) représentation graphique des réflexions multiples sur une projection de Mollweide.

4.3. Conclusions du chapitre 4

L'acoustique des salles a donné naissance à des outils de mesure et de simulation en constante évolution, afin de permettre aux concepteurs de prendre les décisions les plus pertinentes sur la forme et les matériaux qu'ils donnent à leurs salles de concert. En tirant parti de ces outils, l'acoustique urbaine peut fournir des premiers éléments d'analyse.

Les photographies prises par les caméras acoustiques ont permis de visualiser les réflexions multiples et spéculaires dans le champ sonore urbain. Ces résultats valident l'utilisation de la simulation acoustique par lancer de rayons à grande échelle. Pour étudier l'influence de la forme des bâtiments sur les réflexions multiples, le principe du modèle acoustique constitué d'une multitude de sources sonores a permis d'identifier trois configurations urbaines appelées 1P, 2P et 3P+. A partir de ce résultat, nous avons pu étudier l'impact d'un scénario de réhabilitation urbaine sur la réduction des niveaux sonores dans les quartiers les plus exposés de la ville de Pasaia.

La représentation graphique de l'origine des réflexions sonores, initialement développée pour l'acoustique des salles au cours du Chapitre 3 de la thèse, a été adaptée pour l'étude en milieu urbain afin de prendre en compte l'effet de sources sonores multiples sur un récepteur placé à l'intérieur d'une salle d'un bâtiment. Les résultats graphiques, comparés aux images de la caméra acoustique, ont montré que la réflexion reste principalement spéculaire, une fois que le son a traversé la fenêtre. Ce résultat valide l'utilisation de la simulation par lancer de rayons pour l'étude de la pénétration du bruit à l'intérieur des bâtiments.

Les mesures par caméra acoustique ont été réalisées dans des bandes de fréquences élevées (supérieures à 1 kHz), une étude plus approfondie sur les basses fréquences permettrait d'identifier les limites du modèle géométrique et donc la nécessité d'une simulation par éléments finis du champ sonore.

L'ensemble de ces premiers résultats de mesure et de simulation acoustique en milieu urbain offre de nouvelles perspectives pour l'émergence d'une discipline d'aide à la conception acoustique architecturale urbaine, basée sur l'étude d'images spatialisées du champ sonore, pour appréhender la ville dans toute sa complexité, depuis l'échelle de la ville entière jusqu'aux intérieurs habités.

Conclusions générales et perspectives

Dans cette thèse, les dispositifs de mesure traditionnels (réponse impulsionnelle) et novateurs (caméra acoustique) ont été associés à la simulation par lancer de rayons pour traiter la ville avec la même exigence que les acousticiens ont pour les salles de concert, en suivant précisément les trajets des réflexions spéculaires multiples, de manière à pouvoir guider la conception de solutions adaptées.

La chaîne de mesure traditionnelle, composée d'une source sonore omnidirectionnelle et d'un sonomètre, permet d'obtenir la réponse impulsionnelle et d'en déduire des paramètres objectifs (niveau sonore, clarté, temps de réverbération). Dans la première application de la thèse (chapitre 3), des mesures en présence d'un public ont été réalisées pour comparer plusieurs dispositions de panneaux absorbants dans une salle de classe. Elles ont montré que la disposition identifiée par la simulation donne les meilleurs résultats. Dans la seconde application (chapitre 4), une utilisation de la chaîne de mesure en extérieur a mis en évidence l'augmentation du niveau sonore en ville liée aux réflexions multiples. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par le lancer de rayons. Cependant, notre expérience a montré que la mesure en milieu urbain est très invasive (émission bruyante de signaux sonores, câbles reliant les appareils, raccordement au réseau électrique). Dans la pratique, les campagnes de mesure sont fortement limitées spatialement.

Pour dépasser ces difficultés, nous avons utilisé une caméra acoustique. C'est un appareil facile à transporter, à mettre en place et à manipuler, qui permet une mesure rapide (une image peut être obtenue en quelques secondes) et non intrusive, ce qui la rend très adaptée aux campagnes de mesure en ville. D'après les images acoustiques prises lors de deux campagnes de mesure qui ont été menées dans les villes de Bayonne et de Pasaia, les réflexions spéculaires multiples dominent le champ sonore urbain. La simulation par lancer de rayons a montré que la réflexion demeure essentiellement spéculaire lorsque le bruit extérieur entre par la fenêtre ouverte des habitations.

Pour pouvoir simuler des images acoustiques, nous avons introduit une caméra virtuelle dans l'outil de lancer de rayons *Simonetta*, que nous avons développé pour la simulation acoustique à l'échelle urbaine. Le code, écrit en C++, bénéficie à la fois de la précision de la méthode de Monte Carlo à échantillonnage stratifié et des performances de calcul d'*Embree*, ce qui a permis de traiter de très grandes quantités de rayons en optimisant le calcul à l'intérieur de la CPU. Du fait que nous travaillons à différentes échelles, il est nécessaire de vérifier le paramétrage de la simulation à chaque nouveau cas.

La simulation d'images acoustiques pour guider la conception a conduit au développement d'une représentation graphique des réflexions multiples, non plus sur un point, mais sur tout un auditoire. Elle

s'appuie sur une double projection. D'abord, la scène entière est projetée sur une sphère entourant le point d'intérêt, puis cette sphère est projetée sur le plan (projection de Mollweide). La représentation est munie d'une échelle à 5 couleurs qui permet d'apprécier l'intensité des réflexions. En filtrant les réflexions selon leur retard, on obtient sur deux graphiques la représentation du numérateur et du dénominateur des paramètres de clarté (C_{50} , C_{80}) et de la Fraction d'Énergie Latérales (LF). Les graphiques résultants montrent d'une manière complète et synthétique l'effet des modifications de la forme et des matériaux de la scène sur l'acoustique. Cependant, ils ne délivrent qu'une information qualitative. Ils ont donc été enrichis par d'autres résultats, soit par la simulation de cartes d'indicateurs, soit par des mesures ponctuelles (avant et après installation du dispositif), afin de fournir une validation quantitative. Les solutions identifiées ont donné les meilleurs résultats par rapport à celles couramment utilisées en acoustique des salles. Les résultats ont confirmé que la disposition des absorbants a une influence non négligeable sur l'acoustique, et qu'une répartition en couronne à la hauteur de l'auditoire dans une salle rectangulaire est la meilleure configuration pour améliorer l'intelligibilité de la parole. L'étude sur la chapelle a montré que la transformation d'un espace très réverbérant en auditorium nécessite la mise en place d'infrastructures conséquentes, au détriment de la sensation d'enveloppement que l'on peut avoir au départ.

A l'échelle de la rue, les zones urbaines se divisent principalement en trois catégories, que nous avons appelées 1P, 2P, 3P+ et qui correspondent respectivement aux rues dont les façades sont dégagées (1P), aux rues longues bordées par des bâtiments parallèles (2P) et aux rues fermées, places et petites cours (3P+). Cette classification donne une indication sur l'impact des réflexions multiples qui contribuent à l'augmentation locale du niveau sonore. Sur trois cas de dimensions semblables, les mesures ponctuelles de réponses impulsionnelles ont montré une augmentation du niveau sonore, par rapport au cas 1P, de 6 dB sur le cas 2P et de 11 dB sur le cas 3P+.

Le forçage acoustique, fait d'une grande quantité de sources sonores réparties uniformément sur les voies de circulation, permet d'évaluer l'influence de la forme de n'importe quelle ville sur les niveaux sonores. La thèse montre que les réflexions multiples en milieu urbain peuvent couramment engendrer des écarts de l'ordre de 10 dB entre différents points de la ville. L'étude de Pasaia montre que l'on retrouve la triple distinction 1P, 2P et 3P+. La simulation d'un scénario de curetage de la ville a permis de supprimer la majorité des cas 3P+. Tout comme en acoustique des salles, nous avons montré que la réhabilitation acoustique urbaine est possible au prix de modifications lourdes et coûteuses. Dans le futur, il faut approfondir davantage les scénarii de conception, en adoptant une démarche basée sur des représentations spatiales du champ sonore et des principes architecturaux (arcades, balcons, encorbellement, inclinaison des façades) permettant à la ville de se densifier tout en maîtrisant son impact sur les habitants. Pour cela, il sera aussi nécessaire d'associer les autres leviers de santé et de confort urbain que sont la lumière, la thermique et la ventilation naturelle, afin de proposer finalement un support d'aide à la décision et la mise en place de solutions qui prennent en compte tous les aspects de la Physique Urbaine.

Conclusions and perspectives

In this thesis, conventional (impulse response) and innovative (acoustic camera) measurement devices were combined with raytracing simulation to treat the city with the same high standards that acousticians have for concert halls, precisely tracking the paths of multiple specular reflections, to be able to guide the design of suitable solutions.

The conventional measurement setup, comprising an omnidirectional sound source and a sound level meter, is used to measure the impulse response and deduce objective parameters (sound level, clarity, reverberation time). In the first application of the thesis (chapter 3), measurements in the presence of a live audience were carried out to compare several layouts of absorbent panels in a classroom. The results showed that the layout suggested by the simulation gave the best results. In the second application (chapter 4), the use of the measurement setup outdoors revealed that multiple reflections increase noise levels in the city. These results are consistent with those obtained with the raytracing method. However, our experience has shown that measurement in an urban environment is highly invasive (noisy emission of sound signals, cables connecting devices, and connection to the power grid). In practice, measurement campaigns are severely limited spatially.

To overcome these difficulties, we used an acoustic camera. This device is very portable, simple to handle as well as to set up, and enables rapid (an image can be obtained in a few seconds) and non-intrusive measurements, making it highly suitable for urban measurement campaigns. Acoustic images taken during two measurement campaigns carried out in the cities of Bayonne and Pasaia confirmed that multiple specular reflections dominate the urban sound field. Simulation using raytracing has shown that reflection remains essentially specular when external noise enters through the open windows.

To be able to simulate acoustic images, we introduced a virtual camera into the *Simonetta* raytracing tool, which we developed for acoustic simulation on an urban scale. The code, written in C++, benefits from both the precision of stratified sampling Monte Carlo and the computational performance of *Embree*, allowing us to process very large quantities of rays. As we work on different scales, it is necessary to verify the simulation parameterization for each new case.

The simulation of acoustic images to guide design has led us to develop a graphic representation of multiple reflections, no longer on one point, but on an entire audience. This is based on a double projection. First, the entire scene is projected onto a sphere surrounding the point of interest, then this sphere is projected onto the plane (Mollweide projection). The representation is graded on a 5-color scale, allowing the intensity of the reflections to be assessed. By filtering the reflections according to their delay, the numerator and denominator

of the clarity parameters (C_{50} , C_{80}) and the Lateral Energy Fraction (LF) are represented on two separate graphics. The resulting figures comprehensively and synthetically show the effect of modifications to stage shape and materials on acoustics. Nevertheless, they provide only qualitative information. They have therefore been enriched by other results, either through the simulation of indicator maps or through punctual measurements (before and after installation of the device), to provide quantitative validation. The identified solutions gave the best results compared to those commonly used in room acoustics. The results confirmed that the arrangement of absorbers has a significant influence on acoustics and that a crown-shaped distribution at audience height in a rectangular classroom is the best configuration for improving speech intelligibility. The chapel study showed that transforming a highly reverberant space into an auditorium requires the installation of substantial infrastructure, to the detriment of the enveloping sensation one may initially perceive.

At the street level, urban areas can be divided into three main categories, which we have called 1P, 2P and 3P+, corresponding respectively to streets with unobstructed façades (1P), long streets lined by parallel buildings (2P) and closed streets, squares and small courtyards (3P+). This classification indicates the impact of multiple reflections, which contribute to the local increase in noise levels. In three cases of similar dimensions, punctual measurements of impulse responses showed an increase in sound level, relative to the 1P case, of 6 dB in the 2P case and 11 dB in the 3P+ case.

Acoustic forcing, consisting of a large number of sound sources uniformly distributed along roadways, makes it possible to evaluate the influence of the shape of any city on sound levels. The thesis shows that multiple reflections in an urban environment can often generate differences of the order of 10 dB between different places in the city. Pasaia's study shows that the triple distinction 1P, 2P, and 3P+ can be found. The simulation of a city *curettage* scenario eliminated the majority of 3P+ cases. As in the case of room acoustics, we have shown that urban acoustic rehabilitation is possible at the cost of heavy and costly modifications.

In the future, design scenarios will need to be explored in greater depth, adopting an approach based on spatial representations of the sound field and architectural principles (arcades, balconies, corbelling, façade inclination) enabling the city to become denser while controlling its impact on residents. To achieve this, it will also be necessary to associate the other drivers of health and urban comfort, such as light, heat, and natural ventilation, to ultimately offer a decision-making aid and the implementation of solutions that take into account every aspect of Urban Physics.

Bibliographie

A

- Abdou, A., & Guy, R. W. (1996). Spatial information of sound fields for room-acoustics evaluation and diagnosis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(5), 3215-3226.
- Acuña Paz y Miño, J., Lawrence, C., & Beckers, B. (2019). 4π thermography: a projection to Understand Thermal Balance. In *Proceedings of the 16th IBPSA Conference, Rome, Italy*.
- Acuña Paz y Miño, J., (2020a). *Application des méthodes d'imagerie au rayonnement dans les scènes urbaines* (Doctoral dissertation, Université de Pau et des Pays de l'Adour).
- Acuña Paz y Miño, J., Lawrence, C., & Beckers, B. (2020b). Visual metering of the urban radiative environment through 4π imagery. *Infrared Physics & Technology*, 110, 103463.
- Acuña Paz y Miño, J., Dupont, N., & Beckers, B. (2021). Pixel-by-pixel rectification of urban perspective thermography. *Remote Sensing of Environment*, 266, 112689.
- Acuña Paz y Miño, J., **de Bort, I.**, & Beckers, B. (2023) Multi-Physical Human Comfort Assessment through Integrated Sound, Light, and Heat Panoramic Measurements, *I3DA, 5-7 september 2023, Bologna, Italy*.
- Albert, D. G., & Liu, L. (2010). The effect of buildings on acoustic pulse propagation in an urban environment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(3), 1335-1346.
- ArchDaily (2023). Chapelle Corneille/ atelier d'architecture King Kong, https://www.archdaily.com/791226/chapelle-corneille-atelier-darchitecture-king-kong?ad_medium=gallery (consulté le 28/09/2023).

B

- Badino, E., Manca, R., Shtrepi, L., Calleri, C., & Astolfi, A. (2019). Effect of façade shape and acoustic cladding on reduction of leisure noise levels in a street canyon. *Building and Environment*, 157, 242-256.
- Balderrama, A., Kang, J., Prieto, A., Luna-Navarro, A., Arztmann, D., & Knaack, U. (2022). Effects of Façades on Urban Acoustic Environment and Soundscape: A Systematic Review. *Sustainability*, 14(15), 9670.

- Balderrama, A., Arzmann, D., & Schulz, J. U. (2021). Review of commercial software tools for facade acoustics. *ae/papers*, 4(6), 465-472.
- Barclay, M., Kang, J., & Sharples, S. (2012). Combining noise mapping and ventilation performance for non-domestic buildings in an urban area. *Building and Environment*, 52, 68-76.
- Barron, M. (2009). *Auditorium acoustics and architectural design*. Routledge.
- Bassuet, A. (2011). New acoustical parameters and visualization techniques to analyze the spatial distribution of sound in music spaces. *Building Acoustics*, 18(3-4), 329-347.
- Beckers, B. & Coch Roura, H. (2005). La acústica diseñada desde su expresión gráfica, *TecniAcústica*, Terrassa, 2005.
- Beckers, B., & Beckers, P. (2012). A general rule for disk and hemisphere partition into equal-area cells. *Computational Geometry*, 45(7), 275-283.
- Beckers, B., & Beckers, P. (2014). *Reconciliation of geometry and perception in radiation physics*. John Wiley & Sons.
- Beckers, B. (2016a). Multiscale analysis as a central component of urban physics modeling. *Computational Methods for Solids and Fluids: Multiscale Analysis, Probability Aspects and Model Reduction*, 1-27.
- Beckers, B., & Beckers, P. (2016b). *Complete set of Matlab procedures for achieving uniform ray generation*, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Université de Liège, www.heliodon.net.
- Beckers, B. (2017). *Calcul par la méthode des images de la réflexion spéculaire dans des enceintes prismatiques convexes*, Université de Pau et des Pays de l'Adour, www.heliodon.net.
- Beckers, B. (2019). Omnidirectional source modeling for ray tracing in room acoustics with specular reflection. *WSEAS Transactions on Acoustics and Music*, 6, 13-22.
- Beckers, B., Acuña Paz y Miño, J., & **de Bort, I.** (2022) Influence of optical characteristics of façades on pedestrian thermal comfort within the streets of Manhattan, *MED Green Forum*, 6th, Florence.
- Beckers, B., **de Bort, I.**, & Acuña Paz y Miño, J. (2023) Computer aided acoustic design of concert halls, *I3DA*, 5-7 september 2023, Bologna, Italy.
- Berardi, U., Iannace, G., & Maffei, L. (2016). Virtual reconstruction of the historical acoustics of the Odeon of Pompeii. *Journal of Cultural Heritage*, 19, 555-566.
- Blender (2023). <https://www.blender.org/> (consulté le 28/09/2023).

Bouville, C., Brusq, R., Dubois, J. L., & Marchal, I. (1985). Generating high quality pictures by ray-tracing. In *Computer Graphics Forum*, Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 4 (2), 87-99.

Bradley, J. S., Reich, R., & Norcross, S. G. (1999). A just noticeable difference in C50 for speech. *Applied Acoustics*, 58(2), 99-108.

Bradley, J. S. (2011). Review of objective room acoustics measures and future needs. *Applied Acoustics*, 72(10), 713-720.

Bugeat, A., Beckers, B., & Fernández, E. (2020a). Improving the daylighting performance of residential light wells by reflecting and redirecting approaches. *Solar Energy*, 207, 1434-1444.

Bugeat, A. (2020b). *Développement d'une méthode de radiosité pour l'étude du rayonnement solaire en milieu urbain* (Doctoral dissertation, Université de Pau et des Pays de l'Adour).

C

CAE Software (2023). Acoustic Camera – Bionic M-112 microphone array, <https://www.cae-systems.de/en/products/acoustic-camera-sound-source-localization/bionic-m-112.html> (consulté le 28/09/2023).

Campbell, G.S. (1977). An Introduction to Environmental Biophysics. *Heidelberg Science Library*.

Campbell, J.B. and Wynne, R.H. (2011). *Introduction to remote sensing*. Guilford press.

Campos, A., Sakamoto, S., & Salvador, C. D. (2021). Directional early-to-late energy ratios to quantify clarity: A case study in a large auditorium. In *2021 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA)*. IEEE, 1-9.

CATT-Acoustic (1998). <https://www.catt.se/> (consulté le 28/08/2023).

Changnon, S. A., Kunkel, K. E., & Reinke, B. C. (1996). Impacts and responses to the 1995 heat wave: A call to action. *Bulletin of the American Meteorological society*, 77(7), 1497-1506.

Comesaña, D. F., Steltenpool, S., Carrillo Pousa, G., de Bree, H. E., & Holland, K. R. (2013). Scan and paint: theory and practice of a sound field visualization method. *International Scholarly Research Notices*, 2013.

Compagnon, R. (2004). Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and buildings*, 36(4), 321-328.

Cox, T. J., Davies, W. J., & Lam, Y. W. (1993). The sensitivity of listeners to early sound field changes in auditoria. *Acta Acustica united with Acustica*, 79(1), 27-41.

Cros, B., Durand, P., Cachier, H., Drobinski, P., Frejafon, E., Kottmeier, C., ... & Wortham, H. (2004). The ESCOMPTE program: an overview. *Atmospheric Research*, 69(3-4), 241-279.

Cucharero, J., Hänninen, T., & Lokki, T. (2019, August). Influence of sound-absorbing material placement on room acoustical parameters. In *Acoustics* (Vol. 1, No. 3, pp. 644-660). MDPI.

D

Dalenbäck, B. I. (2010). Engineering principles and techniques in room acoustics prediction. In *Baltic-Nordic Acoustics Meeting, Bergen, Norway*.

Dal Re, M. (1726). *Perspective du palais de la Simonetta vers le jardin*. Gravure de la série *Ville di delizia o siano palagi camparecci nello Stato di Milano*.

de Bort, I., & Beckers, B. (2021). Impact of multiple reflections on urban acoustics. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2042, No. 1, p. 012052). IOP Publishing.

de Bort, I., y Miño, J. A. P., & Beckers, B. (2023). Graphical representation of multiple sound reflections as an aid to enhance clarity across a whole audience. *Applied Acoustics*, 206, 109305.

de Bort, I., Acuña Paz y Miño, J. & Beckers, B. (2023). From Concert Halls to City Streets: Bridging the Gap Between Room Acoustics and Urban Acoustics. *I3DA, 5-7 september 2023, Bologna, Italy*.

Deutsche Digitale Bibliothek, (2008). *Beschreibung deß Luft-Hauses Simonetta bey Meyland / wie auch desselbigen Wunder-würdigen Echo oder Wieder-Halls. (Akustik im Hof der Villa Simonetta in Mailand)*, Bibliothèque d'État de Saxe - Bibliothèque d'État et universitaire de Dresde (SLUB).

Duport, N. (2021). *Études thermiques urbaines à différentes échelles par éléments finis* (Doctoral dissertation, Université de Pau et des Pays de l'Adour).

E

EASE (1990). <https://www.afmg.eu/en/ease> (consulté le 28/09/2023).

Edwards, P. N. (2006). Meteorology as infrastructural globalism. *Osiris*, 21(1), 229-250.

F

Farina, A., Cocchi, A., Garai, M., & Semprini, G. (1992). Old Churches as concert halls: a non-sabinian approach to optimum design of acoustic correction. *Proc. of 14th. ICA, F5-7, Beijing*, 3(10).

Farina, A. (1995). Verification of the accuracy of the pyramid tracing algorithm by comparison with experimental measurements of objective acoustic parameters. In *Proc. 15th Int. Congr. Acoust. (ICA'95)* (pp. 445-448).

Farina, A., Amendola, A., Capra, A., & Varani, C. (2011). Spatial analysis of room impulse responses captured with a 32-capsule microphone array. In *Audio Engineering Society Convention 130*. Audio Engineering Society.

Fausti, P., & Cocchi, A. (1992). The Acoustic of sports halls, *ICA Beijing*.

Fazenda, B., & Drumm, I. (2013). Recreating the sound of Stonehenge. *Acta Acustica united with Acustica*, 99(1), 110-117.

Ferréol, R. (2020). *Podaire d'une courbe*, MathCurve, Encyclopédie des formes mathématiques remarquables, <https://mathcurve.com/courbes2d/podaire/podaire.shtml> (consulté le 28/092023).

Freniere, E. R., Gregory, G. G., & Hassler, R. A. (1999, September). Edge diffraction in Monte Carlo ray tracing. In *Optical design and analysis software* (Vol. 3780, pp. 151-157). SPIE.

G

Galindo, M., Girón, S., & Cebrián, R. (2020). Acoustics of performance buildings in Hispania: The Roman theatre and amphitheater of Segobriga, Spain. *Applied acoustics*, 166, 107373.

García-Nevado, E., Duport, N., Bugeat, A., & Beckers, B. (2021). Benefits of street sun sails to limit building cooling needs in a Mediterranean city. *Building and Environment*, 187, 107403.

Georgiou, F. (2018). *Modeling for auralization of urban environments* (Doctoral dissertation, Eindhoven University of Technology).

Ghiaus, C., Allard, F., Santamouris, M., Georgakis, C., & Nicol, F. (2006). Urban environment influence on natural ventilation potential. *Building and environment*, 41(4), 395-406.

Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. John Wiley & Sons.

Groupe Paul (2023). Mousse Mélamine Pyramide, *Solutions Elastomères*, <https://www.solutions-elastomeres.com/fr/mousse-alveolaire/329-mousse-pyramide-melamine-isolation-phonique.html> (consulté le 28/09/2023).

Guidorzi, P., Barbaresi, L., D’Orazio, D., & Garai, M. (2015). Impulse responses measured with MLS or Swept-Sine signals applied to architectural acoustics: an in-depth analysis of the two methods and some case studies of measurements inside theaters. *Energy Procedia*, 78, 1611-1616.

H

Hak, C., Hak, J., & Wenmaekers, R. (2008). INR as an estimator for the decay range of room acoustic impulse responses. In *Audio Engineering Society Convention 124*. Audio Engineering Society.

Heinz, R. (1993). Binaural room simulation based on an image source model with addition of statistical methods to include the diffuse sound scattering of walls and to predict the reverberant tail. *Applied Acoustics*, 38(2-4), 145-159.

Hodgson, M. (1991). Evidence of diffuse surface reflections in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89(2), 765-771.

Hodgson, M., York, N., Yang, W., & Bliss, M. (2008). Comparison of predicted, measured and auralized sound fields with respect to speech intelligibility in classrooms using CATT-Acoustic and ODEON. *Acta Acustica united with Acustica*, 94(6), 883-890.

Homikx, M. (2009). *Numerical modelling of sound propagation to closed urban courtyards*. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology.

Homikx, M., Waxler, R., & Forssén, J. (2010). The extended Fourier pseudospectral time-domain method for atmospheric sound propagation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(4), 1632-1646.

Homikx, M. (2016). Ten questions concerning computational urban acoustics. *Building and Environment*, 106, 409-421.

Homikx, M., Dohmen, M., Conen, K., van Hooff, T., & Blocken, B. (2018). The wind effect on sound propagation over urban areas: Predictions for generic urban sections. *Building and Environment*, 144, 519-531.

Horvat, M., Jambrosic, K., & Domitrovic, H. (2008). A comparison of impulse-like sources to be used in reverberation time measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5), 3501.

Hou, Q., Cai, M., & Wang, H. (2017). Dynamic modeling of traffic noise in both indoor and outdoor environments by using a ray tracing method. *Building and Environment*, 121, 225-237.

Howard, L. (1833). *The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it* (Vol. 3). Harvey and Darton, J. and A. Arch, Longman, Hatchard, S. Highley & R. Hunter.

I

Intel Embree (2023). High Performance Ray Tracing, <https://www.embree.org/> (consulté le 28/09/2023).

Ismail, M. R., & Oldham, D. J. (2005). A scale model investigation of sound reflection from building façades. *Applied Acoustics*, 66(2), 123-147.

I-Simpa (2023). An Open Source software for 3D sound propagation modelling, Université Gustave Eiffel, <https://i-simpa.univ-gustave-eiffel.fr/> (consulté le 28/09/2023).

Iu, K. K., & Li, K. M. (2002). The propagation of sound in narrow street canyons. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(2), 537-550.

Izumi, Y., & Otani, M. (2021). Relation between Direction-of-Arrival distribution of reflected sounds in late reverberation and room characteristics: Geometrical acoustics investigation. *Applied Acoustics*, 176, 107805.

J

Jensen, J. R. (2009). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e*.

Junius, W. (1959). Raumakustische Untersuchungen mit neueren Meßverfahren in der Liederhalle Stuttgart. *Acta Acustica united with Acustica*, 9(4), 289-303.

K

Kahle, E., & Wulfrank, T. (2012). Acoustic solid angle criteria in practice: transforming the Chapelle Corneille in Rouen into a concert hall. In *Acoustics 2012*.

Knopf-Lenoir, C., Muñoz, D., Nahon, R., & Beckers, B. (2016). Multiphysic design of a street section. In *FICUP*.

Krijnen, T., & Hornikx, M. (2014). openPSTD: the open-source implementation of the Pseudo Spectral Time-Domain method. In *Proceedings of forum acusticum, Krakow, Poland, September, 7-12*.

Krokstad, A., Strom, S., & Sørsdal, S. (1968). Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing.

Kulowski, A. (1982). Error investigation for the ray tracing technique. *Applied Acoustics*, 15(4), 263-274.

Kulowski, A. (1985). Algorithmic representation of the ray tracing technique. *Applied Acoustics*, 18(6), 449-469.

Kulowski, A. (2020). Analysis of a caustic formed by a spherical reflector: Impact of a caustic on architectural acoustics. *Applied Acoustics*, 165, 107333.

Kümmritz, S., & Kerscher, M. (2019). The Acoustic Camera as a Tool for Room Acoustic Optimisation. *Proceedings of InterNoise 2019*.

Kuttruff, H. (1971). Simulated reverberation curves in rectangular rooms with diffuse sound fields. *Acta Acustica united with Acustica*, 25(6), 333-342. technique. *Journal of Sound and Vibration*, 8(1), 118-125.

Kuttruff, H. (1992). Some remarks on the simulation of sound reflection from curved walls. *Acta Acustica united with Acustica*, 77(4), 176-182.

L

Lee, P. J., & Kang, J. (2015). Effect of height-to-width ratio on the sound propagation in urban streets. *Acta Acustica united with Acustica*, 101(1), 73-87.

Lee, H. P., Wang, Z., & Lim, K. M. (2017). Assessment of noise from equipment and processes at construction sites. *Building Acoustics*, 24(1), 21-34.

Lehnert, H. (1993). Systematic errors of the ray-tracing algorithm. *Applied Acoustics*, 38(2-4), 207-221.

Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.

Lim, H., Imran, M., & Jeon, J. Y. (2016). A new approach for acoustic visualization using directional impulse response in room acoustics. *Building and environment*, 98, 150-157.

Liptai, P., Badida, M., Lumnitzer, E., & Moravec, M. (2010). Application of acoustic camera in industrial site. *J Prod Eng*, 13(1), 73-76.

M

Mardaljevic, J. J. L. R. (2004). Verification of program accuracy for illuminance modelling: assumptions, methodology and an examination of conflicting findings. *Lighting Research & Technology*, 36(3), 217-239.

Martellotta, F. (2010). The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(2), 654-663.

Marshall, A. H. (1967). A note on the importance of room cross-section in concert halls. *Journal of Sound and Vibration*, 5(1), 100-112.

Marshall, L. G. (1995). Speech intelligibility prediction from calculated C 50 values. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(5), 2845-2847.

Masson, V., Gomes, L., Pigeon, G., Liousse, C., Pont, V., Lagouarde, J. P., ... & Tulet, P. (2008). The canopy and aerosol particles interactions in Toulouse urban layer (CAPITOU) experiment. *Meteorology and atmospheric physics*, 102, 135-157.

Matlab (2023). MathWorks, <https://fr.mathworks.com/products/matlab.html> (consulté le 28/09/2023).

McCormack, L., Delikaris-Manias, S., & Pulkki, V. (2017, September). Parametric acoustic camera for real-time sound capture, analysis and tracking. In *Proceedings of the 20th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-17)* (pp. 412-419).

Mestayer, P. G., Durand, P., Augustin, P., Bastin, S., Bonnefond, J. M., Bénech, B., ... & Voogt, J. (2005). The urban boundary-layer field campaign in Marseille (UBL/CLU-ESCOMPTE): set-up and first results. *Boundary-Layer Meteorology*, 114, 315-365.

Molerón, M., Félix, S., Pagneux, V., & Richoux, O. (2012). Sound propagation in periodic urban areas. *Journal of Applied Physics*, 111(11), 114906.

Molerón, M., Félix, S., Pagneux, V., & Richoux, O. (2014). Low frequency acoustic resonances in urban courtyards. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(1), 74-82.

Monteith, J. L., & Reifsnyder, W. E. (1974). Principles of Environmental Physics. *Physics Today*, 27(3), 51.

Müller-Trapet, M. (2020). On the practical application of the impulse response measurement method with swept-sine signals in building acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 148(4), 1864-1878.

N

Naylor, G. M. (1993). ODEON—Another hybrid room acoustical model. *Applied Acoustics*, 38(2-4), 131-143.

O

ODEON (2023). Odeon Room Acoustics Software, <https://odeon.dk/> (consulté le 28/09/2023).

- O'Donovan, A., Duraiswami, R., & Zotkin, D. (2008). Imaging concert hall acoustics using visual and audio cameras. In *2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (pp. 5284-5287). IEEE.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, *108*(455), 1-24.
- Oke, T. R., & Cleugh, H. A. (1987). Urban heat storage derived as energy balance residuals. *Boundary-Layer Meteorology*, *39*, 233-245.
- Olgay, V. (1963). Design with climate. In *Design with Climate*. Princeton university press.
- OpenPSTD (2023). OpenPSTD project, Building Acoustics Research group of Eindhoven University of Technology, <http://www.openpstd.org/> (consulté le 28/09/2023).
- Ortiz, N. M., Barré, S., & Vonrhein, B. (2015). The Acoustic Camera as a valid tool to gain additional information over traditional methods in architectural acoustics. *Energy Procedia*, *78*, 122-127.

P

- Paini, D., Gade, A. C., & Rindel, J. H. (2005). Agorá Acoustics-Effects of arcades on the acoustics of public squares. In *Forum Acusticum*.
- Papadakis, N. M., & Stavroulakis, G. E. (2019). Review of acoustic sources alternatives to a dodecahedron speaker. *Applied Sciences*, *9*(18), 3705.
- Pätynen, J., Tervo, S., & Lokki, T. (2013). Analysis of concert hall acoustics via visualizations of time-frequency and spatiotemporal responses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *133*(2), 842-857.
- Picaut, J., & Simon, L. (2001). A scale model experiment for the study of sound propagation in urban areas. *Applied Acoustics*, *62*(3), 327-340.
- Picaut, J., Le Pollès, T., L'Hermite, P., & Gary, V. (2005). Experimental study of sound propagation in a street. *Applied Acoustics*, *66*(2), 149-173.
- Picaut, J., & Fortin, N. (2012). I-Simpa, a graphical user interface devoted to host 3D sound propagation numerical codes. In *Acoustics 2012*.
- Postma, B. N., & Katz, B. F. (2015). Creation and calibration method of acoustical models for historic virtual reality auralizations. *Virtual Reality*, *19*, 161-180.

R

Radit2D (2002). Benoit Beckers & Luc Masset, <http://www.heliodon.net/radit/index.html> (consulté le 28/09/2023).

Rindel, J. H. (2000). The use of computer modeling in room acoustics. *Journal of vibroengineering*, 3(4), 219-224.

Rotach, M. W., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, A., Clappier, A., ... & Voogt, J. A. (2005). BUBBLE—an urban boundary layer meteorology project. *Theoretical and Applied Climatology*, 81, 231-261.

S

Sabine, W. C. (1927). *Collected papers on acoustics* (pp. 237-237). Cambridge, MA: Harvard University Press.

Saksela, K., Botts, J., & Savioja, L. (2015). Optimization of absorption placement using geometrical acoustic models and least squares. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(4), EL274-EL280.

Sala, E., & Viljanen, V. (1995). Improvement of acoustic conditions for speech communication in classrooms. *Applied Acoustics*, 45(1), 81-91.

Santon, F. (1980). Traitement acoustique de trois salles a partir d'une methode de rayons. *Acta Acustica united with Acustica*, 44(1), 46-50.

Sanchez, G. M., Van Renterghem, T., Thomas, P., & Botteldooren, D. (2016). The effect of street canyon design on traffic noise exposure along roads. *Building and Environment*, 97, 96-110.

Sato, S. I., Hayashi, T., Takizawa, A., Tani, A., Kawamura, H., & Ando, Y. (2004). Acoustic design of theatres applying genetic algorithms. *Journal of temporal design in Architecture and the environment*, 4(1), 41-51.

Savioja, L., & Svensson, U. P. (2015). Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(2), 708-730.

Schroeder, M. R. (1979). Integrated-impulse method measuring sound decay without using impulses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 66(2), 497-500.

Shirley, P., & Morley, R. K. (2008). *Realistic ray tracing*. AK Peters, Ltd.

Sketchup (2023). Trimble, <https://www.sketchup.com/fr> (consulté le 28/09/2023).

Stettner, A., & Greenberg, D. P. (1989, July). Computer graphics visualization for acoustic simulation. In *Proceedings of the 16th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 195-206).

Stoter, J., De Kluijver, H., & Kurakula, V. (2008). 3D noise mapping in urban areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(8), 907-924.

T

Tanner, B. D. (1990). Automated weather stations. *Remote Sensing Reviews*, 5(1), 73-98.

Thomas, P., Van Renterghem, T., De Boeck, E., Dragonetti, L., & Botteldooren, D. (2013). Reverberation-based urban street sound level prediction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(6), 3929-3939.

Thompson, D., & Harkom, L. (2019). *Application of Acoustic Cameras to Measurement and Tuning of an Orchestra Rehearsal Room*. Universitätsbibliothek der RWTH Aachen.

Torres, J. C. B., Aspöck, L., & Vorländer, M. (2018). Comparative study of two geometrical acoustic simulation models. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40, 1-15.

Tregenza, P., & Wilson, M. (2013). *Daylighting: architecture and lighting design*. Routledge.

Trikootam, S. C., & Hornikx, M. (2019). The wind effect on sound propagation over urban areas: Experimental approach with an uncontrolled sound source. *Building and environment*, 149, 561-570.

V

Valeau, V., Picaut, J., & Hodgson, M. (2006). On the use of a diffusion equation for room-acoustic prediction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(3), 1504-1513.

Van Renterghem, T., & Botteldooren, D. (2010). The importance of roof shape for road traffic noise shielding in the urban environment. *Journal of Sound and Vibration*, 329(9), 1422-1434.

Van Renterghem, T., Hernalsteen, H., & Brown, A. (2019, September). Comparing noise policies of eight European cities using a noise intervention classification scheme. In *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics (ICA 2019), Aachen, Germany* (pp. 9-13).

Vanegas, C. A., Aliaga, D. G., Wonka, P., Müller, P., Waddell, P., & Watson, B. (2010, March). Modelling the appearance and behaviour of urban spaces. In *Computer Graphics Forum* (Vol. 29, No. 1, pp. 25-42). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

Vercammen, M. L. (2013, June). Sound concentration caused by curved surfaces. In *Proceedings of Meetings on Acoustics* (Vol. 19, No. 1). AIP Publishing.

Visual Studio Community (2023). Microsoft, <https://visualstudio.microsoft.com/fr/vs/community/> (consulté le 28/09/2023).

Vorländer, M. (1989). Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 86(1), 172-178.

W

Wald, I., Woop, S., Benthin, C., Johnson, G. S., & Ernst, M. (2014). Embree: a kernel framework for efficient CPU ray tracing. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 33(4), 1-8.

Weghorst, H., Hooper, G., & Greenberg, D. P. (1984). Improved computational methods for ray tracing. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 3(1), 52-69.

Wiener, F. M., Malme, C. I., & Gogos, C. M. (1965). Sound propagation in urban areas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 37(4), 738-747.

Y

Yang, H. S., Kang, J., & Kim, M. J. (2017). An experimental study on the acoustic characteristics of outdoor spaces surrounded by multi-residential buildings. *Applied Acoustics*, 127, 147-159.

Yang, W., & Jeon, J. Y. (2020). Design strategies and elements of building envelope for urban acoustic environment. *Building and Environment*, 182, 107121.

Yamashita, M., & Yamamoto, K. (1990). Scale model experiments for the prediction of road traffic noise and the design of noise control facilities. *Applied Acoustics*, 31(1-3), 185-196.

Yildirim, Y., & Arefi, M. (2023). Seeking the Nexus Between Building Acoustics and Urban Form: A Systematic Review. *Current Pollution Reports*, 1-15.

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Différents paramètres pour évaluer la qualité acoustique d'une salle (Bradley (2011) et Cox (1993))..... | 10 |
| Tableau 2 : Résumé des tests. | 31 |
| Tableau 3 : Dimensions de la géométrie étudiée. | 35 |
| Tableau 4 : Valeurs de paramètres acoustiques obtenus à l'intérieur d'une salle rectangulaire. | 35 |
| Tableau 5 : Variations autour du paramètre C_{50} | 37 |
| Tableau 6 : Temps de calcul pour la salle rectangulaire. | 37 |
| Tableau 7 : Clarté moyenne de la parole (C_{50}) mesurée dans la salle de classe initiale. | 62 |
| Tableau 8 : Coefficients d'absorption utilisés dans la simulation de la salle de classe. | 64 |
| Tableau 9 : Coefficients d'absorption utilisés dans la simulation de la Chapelle. | 70 |
| Tableau 10 : Dimensions des configurations étudiées. | 88 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Maquette de différents motifs architecturaux urbains étudiés sous différents climats (d'après Olgyay (1963)) | 2 |
| Figure 2 : Modèle 3D pour l'étude thermique par éléments finis d'une rue de Bayonne (d'après Acuña Paz y Miño (2021)) | 4 |
| Figure 3 : Rayonnement incident en un point mesuré par superposition d'images photographiques et thermographiques (d'après Acuña Paz y Miño (2020b)) | 4 |
| Figure 4 : (a) Source sonore et (b) tour de capteurs ponctuels utilisés lors des premières mesures urbaines (d'après Wiener (1965)) (c) tours de sonomètres utilisés lors de la campagne de mesure de Picaut (2005) | 5 |
| Figure 5 : Maquettes pour l'étude de la propagation sonore (a) aux abords d'une autoroute à deux étages (Yamashita, 1990), (b) dans une rue Haussmannienne (Picaut, 2001) | 6 |
| Figure 6 : (a) Section du Théâtre de New York et (b, c) photographies de l'onde sonore prises à l'aide la méthode de Schlieren (d'après Sabine (1927)) | 6 |
| Figure 7 : Distribution des directions des réflexions mesurées sur un siège une salle de concert (d'après Junius (1959)) | 7 |
| Figure 8 : Identification des réflexions sonores à l'intérieur d'une salle de concert (d'après O'Donovan (2008)) | 8 |
| Figure 9 : Comparaison entre la mesure par caméra acoustique sphérique et la simulation par lancer de rayons | 8 |
| Figure 10 : Echelles de Marshall pour l'évaluation des paramètres C_{50} et C_{80} d'après Marshall (1995) | 11 |
| Figure 11 : Angle utilisé pour le calcul du LF | 12 |
| Figure 12 : Prises de vue de l'onde sonore sur une section urbaine (d'après Hornikx (2016)) | 14 |
| Figure 13 : Villa Simonetta par Athanasius Kircher et Tobias Nislen en 1684 (Deutsche Digitale Bibliothek, 2008) | 18 |
| Figure 14 : Tir (a) déterministe, (b) aléatoire d'après Kulowski (1985) et (c) par la méthode de Monte Carlo à échantillonnage stratifié avec un maillage à angles solides égaux (490 divisions) | 19 |
| Figure 15 : Pyramide tronquée construite par un lancer de rayons depuis S, d'après Beckers (2019) | 22 |
| Figure 16 : Effet du nombre de rayons sur le niveau sonore calculé en champ libre | 26 |
| Figure 17 : Diagramme en boîte des écarts-types entre les 100 récepteurs | 27 |
| Figure 18 : Test n°1 - (a) diagramme de convergence (b) temps de calcul dans une salle rectangulaire | 28 |
| Figure 19 : Test n°2 - diagramme de convergence de la même salle avec un récepteur plus grand | 29 |
| Figure 20 : Test n°3 - (a) diagramme de convergence (b) temps de calcul dans une chapelle | 30 |
| Figure 21 : Test n°4 - diagramme de convergence dans la chapelle avec des matériaux variés | 30 |
| Figure 22 : Détections de chemins invalides pour les récepteurs non ponctuels d'après Lehnert (1993) | 32 |
| Figure 23 : Niveau sonore champ direct pour des récepteur de rayon (a) $r = 0.05$ m et (b) $r = 0.50$ m | 32 |
| Figure 24 : Valeur du C_{50} en fonction du temps de propagation des rayons | 33 |
| Figure 25 : Valeur d'EDT en fonction du temps de propagation des rayons | 33 |
| Figure 26 : Graphique temporel avec 1 réflexion calculées par (a) la méthode des images et (b) par lancer de rayons | 36 |
| Figure 27 : Graphique temporel avec 10 réflexions calculées par (a) la méthode des images et (b) par lancer de rayons | 36 |
| Figure 28 : Construction d'un cercle avec Radit2D | 38 |
| Figure 29 : Construction d'un cylindre avec Blender | 39 |
| Figure 30 : Niveau sonore après 1 réflexion à l'intérieur d'une ellipse, méthode des images | 40 |

| | |
|---|----|
| Figure 31 : Niveau sonore après 1 réflexion à l'intérieur d'une ellipse calculé par lancer de rayons..... | 41 |
| Figure 32 : Niveau sonore au point de focalisation ellipse, fonction discrétisation courbe, méthode des images..... | 43 |
| Figure 33 : Niveau sonore calculé après 1 réflexion au second foyer d'un ellipsoïde de révolution par lancer de rayons..... | 44 |
| Figure 34 : Graphique temporel à l'intérieur d'un ellipsoïde de révolution..... | 45 |
| Figure 35 : Graphique temporel à l'intérieur de l'ellipsoïde avec $c = 0.40 b$ | 46 |
| Figure 36 : (a) Focalisation des réflexions au deuxième foyer de l'ellipse, (b, c, d) caustiques à l'intérieur de l'ellipse..... | 47 |
| Figure 37 : Focalisation des réflexions dans le cercle..... | 49 |
| Figure 38 : Salle des Nations conçue par Le Corbusier d'après un plan de Barron (2009) étudiée avec Radit2D..... | 50 |
| Figure 39 : Réflexions du premier ordre à l'intérieur d'une parabole..... | 50 |
| Figure 40 : Construction d'un plafond réflecteur courbe à partir d'éléments de 4m de long..... | 51 |
| Figure 41 : Réflexions du premier ordre à l'intérieur de la salle dessinée..... | 52 |
| Figure 42 : Niveaux sonores à l'intérieur d'un cylindre ouvert, méthode des images, lancer de rayons..... | 52 |
| Figure 43 : Niveau sonore à l'intérieur d'une sphère vue en coupe par lancer de rayons..... | 53 |
| Figure 44 : (a) Echelle des réflexions (b) Distribution des intensités reçues sur les récepteurs..... | 57 |
| Figure 45 : Origine et intensité des réflexions incidentes sur (a) 1 récepteur et (b) 2 500 récepteurs..... | 58 |
| Figure 46 : Projection de Mollweide (a) d'une photographie panoramique d'une salle de classe (b) d'un rendu réaliste..... | 59 |
| Figure 47 : Construction d'une représentation graphique des réflexions multiples pour (a) 1 récepteur et (b) 2500 récepteurs..... | 61 |
| Figure 48 : (a) Panneaux absorbants et (b) coefficient d'absorption d'après Solutions Elastomères (Groupe Paul, 2023)..... | 63 |
| Figure 49 : Etude de convergence des récepteurs de la salle de classe..... | 63 |
| Figure 50 : Cartes de C_{50} simulées (a) sans absorbant (b) avec absorbants placés au plafond, (c) avec absorbants placés en couronne, (d) trois fois moins d'absorbants placés en couronne..... | 64 |
| Figure 51 : Représentation graphique des (a) premières réflexions et (b) réflexions tardives sur l'ensemble du public dans la salle de classe..... | 65 |
| Figure 52 : (a) Configurations mesurées (b) Photos lors de la mesure (c) C_{50} moyen mesurés en 5 récepteurs..... | 66 |
| Figure 53 : Plans et vues de la Chapelle Corneille d'après l'atelier d'architecture King Kong..... | 69 |
| Figure 54 : Emplacement des récepteurs utilisés pour les cartes et la représentation graphique à l'intérieur de la Chapelle..... | 70 |
| Figure 55 : Etude de convergence des récepteurs à l'intérieur de la Chapelle Corneille..... | 71 |
| Figure 56 : Représentation graphique des (a) premières réflexions et (b) des réflexions tardives sur le public dans la configuration initiale..... | 72 |
| Figure 57 : Carte de C_{80} dans la configuration initiale..... | 72 |
| Figure 58 : Conception d'un plafond réflecteur suspendu avec Radit2D..... | 73 |
| Figure 59 : Représentation graphique des (a) premières réflexions et (b) réflexions tardives avec la proposition n°1..... | 74 |
| Figure 60 : Carte de C_{80} à l'intérieur de la chapelle avec la proposition n°1..... | 74 |
| Figure 61 : Axonométrie plafonnante de la proposition n°1 et n°2..... | 75 |
| Figure 62 : Représentation graphique des (a) premières réflexions et (b) réflexions tardives avec la proposition n°2..... | 76 |
| Figure 63 : Carte de C_{80} à l'intérieur de la chapelle avec la proposition n°2..... | 76 |
| Figure 64 : Vue en plan de la proposition n°3..... | 77 |
| Figure 65 : Représentation graphique des (a) premières réflexions et (b) réflexions tardives avec la proposition n°3..... | 78 |

| | |
|---|-----|
| Figure 66 : Carte de C_{80} à l'intérieur de la chapelle avec la proposition n°3. | 78 |
| Figure 67 : Emplacement des récepteurs à l'intérieur de la Chapelle. | 79 |
| Figure 68 : Angle de pondération des réflexions multiples. | 79 |
| Figure 69 : Cartes de C_{80} , LF et représentation graphique des réflexions multiples pondérées à l'intérieur de la Chapelle. | 80 |
| Figure 70 : Différentes rues dans le monde. | 87 |
| Figure 71 : Trois configurations urbaines pour l'acoustique appelées 1P, 2P, 3P+ | 88 |
| Figure 72 : Trois configurations identifiées correspondant aux cas 1P, 2P, 3P+. | 89 |
| Figure 73 : Réponses impulsionnelles mesurées dans le cas (a) 1P, (b) 2P et (c) 3P+. | 90 |
| Figure 74 : Comparaison des niveaux sonores mesurés et simulés. | 91 |
| Figure 75 : Comparaison des valeurs d'EDT mesurés (à 1kHz) et simulés. | 91 |
| Figure 76 : Effet de l'augmentation de la largeur de la rue sur le niveau sonore. | 92 |
| Figure 77 : Effet de l'augmentation de la profondeur de la cour sur le niveau sonore. | 92 |
| Figure 78 : Modèles 3D des trois configurations étudiées appelées 1P, 2P, et 3P+. | 93 |
| Figure 79 : Cartes du niveau sonore simulé dans les trois configurations. | 93 |
| Figure 80 : Caméra acoustique SoundCam Bionic M utilisée pour la mesure d'après CAE (2023). | 95 |
| Figure 81 : Réflexions du (a) premier ordre (b) deuxième ordre et (c) troisième ordre mesurées par caméra acoustique dans les fréquences [4.2 kHz - 4.8 kHz]. | 96 |
| Figure 82 : (a) Localisation de la ville de Pasaia et (b) modèle 3D de la ville utilisé pour la simulation. | 97 |
| Figure 83 : Diagrammes de distribution dans (a) la configuration initiale et (b) modifiée de la ville. | 98 |
| Figure 84 : (a) Photo satellite, (b) simulation de Pasaia initiale et (c) de Pasaia modifiée. | 99 |
| Figure 85 : Vue satellite du quartier des Salinas et implantation de la caméra et de la source sonore. | 100 |
| Figure 86 : Mesure d'une réponse impulsionnelle par caméra acoustique depuis la fenêtre ouverte d'un bâtiment du quartier des Salinas. | 101 |
| Figure 87 : Modèle 3D utilisé pour la simulation du quartier des Salinas. | 103 |
| Figure 88 : (a) Origine des réflexions multiples incidentes au récepteur, (b) mesure par caméra acoustique et (c) représentation graphique des réflexions multiples sur une projection de Mollweide. | 105 |

Annexes

Cette partie présente des extraits du code de lancer de rayons développé au cours de la thèse. Les encadrés verts correspondent à des codes en C++.

Annexe 1 – Tir des rayons par Monte Carlo Stratifié

La source sonore omnidirectionnelle est un point depuis lequel on tire un nombre fini de rayons dans toutes les directions. Pour garantir une densité la plus uniforme possible de ces directions, on utilise la méthode de Monte Carlo à échantillonnage stratifié. Cette méthode consiste à diviser la surface de la sphère en cellules puis tirer un rayon à l'intérieur de chacune d'elles. Nous utilisons une partition de la sphère dans laquelle les cellules ont le même angle solide (en stéradian [sr]) (Beckers, 2012). Une description algorithmique disponible en ligne sous *Matlab*[®] (Beckers, 2016b), a été traduite et adaptée en langage C++ pour communiquer avec les fonctions d'intersection *Embree* (Partie 2.). La surface de la sphère est divisée en anneaux sur les latitudes, puis en cellules sur les longitudes. La partition est décrite par une séquence, qui donne le nombre de cellules cumulées par anneau. La fonction *spherePartitionDimension.cpp* (extrait n°1 – ligne 8) calcule la taille de la séquence, et la fonction *spherePartitionSequence.cpp* la calcule (extrait n°1 – ligne 15). Les deux fonctions sont présentées dans les tableaux suivants. La partition de la sphère pour 20 rayons est illustrée par l'extrait n° 1.

```
Extrait n°1 : Partition de la sphère
1 // Input
2 int nbRaysEmitted(20);
3 std::cout << " Nombre de rayons = " << nbRaysEmitted << std::endl;
4
5 // 1_ Dimension de la partition de la sphère
6 int dimSeq(0); // Initi. : Nb éléments dans S
7 int nring = std::floor(sqrt(nbRaysEmitted / 2)); // Initi. : Nb anneaux
8 std::vector<int> nn(nring, 1); // Initi. : Nb cellules/anneau
9 dimSeq = spherePartitionDimension(nbRaysEmitted, dimSeq, nn);
10
11 std::cout << " Dimensions de la partition de la sphere = " << dimSeq << std::endl;
12
13 // 2_ Séquence de la partition de la sphère
14 std::vector<int> S(dimSeq, 1); // Initi. : Sequence des cellules cumulées
15 std::vector<int> R(dimSeq - 3, 1); // Initi. : Sequence des cellules/anneau
16 spherePartitionSequence(S, R, nn, dimSeq, nbRaysEmitted);
17
18 std::cout << "S = [ ";
19 for (int i(0); i < dimSeq; i++)
20 {
21     std::cout << S[i] << " ";
22 }
23 std::cout << "]" << std::endl;
```

```

24
25 // 3_ Longitudes de chaque cellule
26 std::vector<float> t(dimSeq, 1);
27 for (int i(0); i < dimSeq; i++)
28 {
29     int tt = 2 * S[i];
30     float ti = float(tt) / nbRaysEmitted;
31     t[i] = acos(1 - ti);
31 }

```

```

Nombre de rayons = 20
Dimensions de la partition de la sphere = 6
S = [ 1 3 10 17 19 20 ]

```

spherePartitionDimension.cpp

```

1  #include <fstream>
2  #include <sstream>
3  #include <iostream>
4  #include <string>
5  #include <algorithm>
6  #include "header.h"
7
8  int spherePartitionDimension(int nsph, int dimSeq, std::vector<int> &nn)
9  {
10     double pi = 3.14159265358979323846;
11
12     // 1. BSAMS - (Beckers, 2016)
13     int idep = nsph / 2;
14     double tim1 = pi / 2;
15     double rim1 = std::sqrt(2);
16     double nim1 = idep;
17     int nring = std::floor(sqrt(idep));
18     int nana = 0;
19     double ti = 0;
20     double ri = 0;
21     double ni = 0;
22
23     for (int i(0); i < nring; i++) // Loop on the rings or
24 disks
25     {
26         nn[i] = nim1; //
27 Number of cells in disk i
28         ti = tim1 - std::sqrt(2 * pi / idep); // Zenithal angle (20)
29         ri = 2 * std::sin(ti / 2); // Equivalent projection
30 (16)
31         ni = std::round(nim1 * pow((ri / rim1), 2)); // Number of cells (1)
32         nim1 = ni;
33         rim1 = ri;
34         tim1 = ti;
35
36         if (nim1 == 2)
37         {
38             nim1 = 1; //
39 Forcing the presence of polar disks
40         }
41
42         if (nim1 == 0)
43         {
44             nim1 = 1;
45         }
46
47         if (nim1 == 1)
48         {
49             if (nana == 0)
50             {
51                 nana = i + 1;
52             }
53         }
54     }
55
56     nana = nana + 1;
57     dimSeq = nana * 2;

```

```
58     return dimSeq;
59 }
```

spherePartitionSequence.cpp

```
1  #include <fstream>
2  #include <sstream>
3  #include <iostream>
4  #include <string>
5  #include <vector>
6  #include <algorithm>
7  #include "header.h"
8
9  void spherePartitionSequence(std::vector<int>& S, std::vector<int>& R, std::vector<int> nn, int dimSeq, int
10 nbRaysEmitted)
11 {
12     int nana(dimSeq / 2);
13
14     for (int i(0); i < nana - 1; i++)
15     {
16         S[nana - 1 - i] = nn[i];
17     }
18
19     for (int i(nana + 1); i < 2 * nana + 1; i++)
20     {
21         S[i - 1] = 2 * nn[0] - nn[i - nana];
22     }
23
24     S[2 * nana - 1] = nbRaysEmitted;
25     S[0] = 1;
26
27     for (int i(0); i < dimSeq - 2; i++)
28     {
29         R[i] = S[i + 1] - S[i];
30     }
31 }
```

Annexe 2 – Chargement de l’OBJ

Le calcul est réalisé sur une géométrie 3D au format d’entrée OBJ, dont toutes les faces sont des triangles. L’extrait n°3 a été rédigé pour traduire l’OBJ en structures compatibles avec *Embree*. La fonction *loadOBJnumVnumF.cpp* (extrait n°2 – ligne 4) calcule le nombre d’arrêtes et de faces de l’OBJ pour ensuite créer les structures *Embree* aux bonnes dimensions (extrait n°2 – lignes 7-15). Puis, la fonction *loadOBJ.cpp* (extrait n°2 – ligne 19) remplit les structures avec les informations contenue dans l’OBJ. Ces deux fonctions sont présentées dans les tableaux suivants.

```
Extrait n°2 : Chargement d’un OBJ dans les structures Embree
1 // 1 - Chargement du fichier OBJ
2 char pathobj=" C:\Users\...\example.obj" // Fichier
3 int numV = 0; int numF = 0; // Init. Nombre d’arrêtes et de faces
4 loadOBJnumVnumF(pathobj, numV, numF);
5
6 // 2 - Init. des structures Embree (objet, scene, maillage, aretes, normes)
7 RTCDevice device = rtcNewDevice("");
8 RTCScene scene = rtcNewScene(device);
9 RTCGeometry mesh3 = rtcNewGeometry(device, RTC_GEOMETRY_TYPE_TRIANGLE);
10 Vertex3 * norms = (Vertex3*)malloc(sizeof(Vertex3)*numF);
11 Triangle3 * triangles = (Triangle3*)rtcSetNewGeometryBuffer(mesh3, RTC_BUFFER_TYPE_INDEX, 0,
12 RTC_FORMAT_UINT3, sizeof(Triangle3), numF + 1);
13 Vertex3 * vertices3 = (Vertex3 *)rtcSetNewGeometryBuffer(mesh3, RTC_BUFFER_TYPE_VERTEX, 0,
14 RTC_FORMAT_FLOAT3, sizeof(Vertex3), numV);
15
16 // 3 - Lien entre le fichier OBJ et les structures Embree
17 unsigned int geomID;
18 loadOBJ(vertices3, triangles, norms, pathobj);
19 rtcCommitGeometry(mesh3);
20 geomID = rtcAttachGeometry(scene, mesh3);
21 rtcCommitScene(scene);
22
```

```
loadOBJnumVnumF.cpp
1 void loadOBJnumVnumF(char *pathobj, int &numV, int &numF)
2 {
3     FILE *file = fopen(pathobj, "r");
4     if (file == NULL)
5     {
6         printf("Impossible d ouvrir le fichier\n"); // Erreur de lecture
7     }
8
9     while (1) // Lecture du fichier
10    {
11        char lineHeader[100]; // Lecture du premier mot
12        int res = fscanf(file, "%s", lineHeader);
13        if (res == EOF)
14        {
15            break; // Fin de la lecture
16        }
17        if (strcmp(lineHeader, "v") == 0) // VERTICES "v"
18        {
19            numV = numV + 1;
20        }
21        else if (strcmp(lineHeader, "f") == 0) // FACES "f"
22        {
23            numF = numF + 1;
24        }
25    }
26 }
```

```

24     }
25   }
26 }

```

loadOBJ.cpp

```

1  embree::Vec3fa vert;
2  std::string vertfac1, vertfac2, vertfac3, vertfac4;
3  char textvertfac1[100], textvertfac2[100], textvertfac3[100], textvertfac4[100];
4  std::string vertfacstr1, vertfacstr2, vertfacstr3, vertfacstr4;
5  const char deli[] = "/";
6  int numV = 0;
7  int numF = 0;
8
9  void loadOBJ(Vertex3 *vertices, Triangle3 *triangles, Vertex3 *norms, char *pathobj)
10 {
11     FILE * file = fopen(pathobj, "r");
12     if (file == NULL)
13     {
14         printf("Impossible d ouvrir le fichier \n");
15     }
16     while (1) // Lecture du fichier
17     {
18         char lineHeader[100]; // Lecture du premier mot
19         int res = fscanf(file, "%s", lineHeader);
20         if (res == EOF)
21         {
22             break;
23         }
24         if (strcmp(lineHeader, "v") == 0) // VERTICES "v"
25         {
26             fscanf(file, "%f %f %f\n", &vert.x, &vert.y, &vert.z);
27             vertices[numV].x = vert.x;
28             vertices[numV].y = vert.y;
29             vertices[numV].z = vert.z;
30             numV = numV + 1;
31         }
32
33         else if (strcmp(lineHeader, "f") == 0) // FACES "f"
34         {
35             fscanf(file, "%s %s %s\n", &vertfac1, &vertfac2, &vertfac3);
36             strcpy(textvertfac1, vertfac1.c_str()); // V1
37             vertfacstr1 = strtok(textvertfac1, deli);
38             triangles[numF].v0 = std::stoi(vertfacstr1) - 1;
39             strcpy(textvertfac2, vertfac2.c_str()); // V2
40             vertfacstr2 = strtok(textvertfac2, deli);
41             triangles[numF].v1 = std::stoi(vertfacstr2) - 1;
42             strcpy(textvertfac3, vertfac3.c_str()); // V3
43             vertfacstr3 = strtok(textvertfac3, deli);
44             triangles[numF].v2 = std::stoi(vertfacstr3) - 1;
45             numF = numF + 1; // numF
46         }
47     }
48
49     Vertex3 u, v; // NORMS
50     double n, dx, dy, dz;
51     for (int i = 0; i < numF; i++)
52     {
53         u.x = vertices[triangles[i].v1].x - vertices[triangles[i].v0].x;
54         u.y = vertices[triangles[i].v1].y - vertices[triangles[i].v0].y;
55         u.z = vertices[triangles[i].v1].z - vertices[triangles[i].v0].z;
56         v.x = vertices[triangles[i].v2].x - vertices[triangles[i].v1].x;
57         v.y = vertices[triangles[i].v2].y - vertices[triangles[i].v1].y;
58         v.z = vertices[triangles[i].v2].z - vertices[triangles[i].v1].z;
59         dx = (u.y * v.z) - (v.y * u.z);
60         dy = (u.z * v.x) - (u.x * v.z);
61         dz = (u.x * v.y) - (v.x * u.y);
62         n = std::sqrt(dx * dx + dy * dy + dz * dz);
63         norms[i].x = dx / n;
64         norms[i].y = dy / n;
65         norms[i].z = dz / n;
66     }
67 }

```