

Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées
Département d'Électricité, Électronique et Informatique
Institut Montefiore



Méthodes d'accélération du tir de rayons sonores pour la simulation en acoustique des salles

Stéphane LESOINNE

Thèse de doctorat présentée en vue de l'obtention du grade de
DOCTEUR EN SCIENCES DE L'INGÉNIEUR (électricité et électronique)

Année Académique 2013-2014

Le jury :

Jean-Jacques	EMBRECHTS	<i>Promoteur</i>
Christophe	GEUZAINÉ	<i>Examineur</i>
Dick	BOTTELDOOREN	<i>Examineur</i>
Judicaël	PICAUT	<i>Examineur</i>
Marc	VAN DROOGENBROECK	<i>Président</i>

Table des matières

I	Contexte et état de l'art	19
1	Introduction	21
2	Aperçu de la simulation numérique en acoustique des salles	25
2.1	Introduction	25
2.2	Aperçu de la résolution de l'équation de propagation de l'onde sonore	26
2.3	Aperçu des méthodes ondulatoires	27
2.4	Aperçu des méthodes énergétiques	30
2.5	Conclusion	40
3	Méthodes d'accélération des simulations basées sur l'acoustique géométrique	45
3.1	Introduction	45
3.2	Principales notions utilisées pour la réduction du temps de calcul en acoustique des salles	46
3.3	Principales méthodes d'accélération de la méthode des sources images	51
3.4	Principales méthodes d'accélération du tir de faisceaux	52
3.5	Principales méthodes d'accélération de la radiosité	54
3.6	Principales méthodes d'accélération du tir de rayons sonores	54
3.7	Méthodes de mise à jour des réponses impulsionnelles en temps réel utilisées dans le cadre de l'auralisation	60
3.8	Conclusion	61
4	Présentation de l'algorithme de base utilisant le tir de rayons sonores	65
4.1	Introduction	65
4.2	Vue globale du tir de rayons séquentiel	66
4.3	Contribution d'un rayon à un récepteur sphérique	72
4.4	Intersection entre les rayons et les surfaces	75
4.5	Parallélisation	80
4.6	Conclusion	81

II	Description des méthodes d'accélération du tir de rayons sonores	83
5	Méthode 1 : Accélération par le traitement vectoriel de la recherche d'intersection	87
5.1	Introduction	87
5.2	Particularités du traitement vectoriel par SSE	88
5.3	Réorganisation de l'algorithme d'intersection entre les rayons et les surfaces	89
5.4	Recherche de la surface intersectée avec les instructions SSE	91
5.5	Tests de la méthode 1 et résultats	99
5.6	Conclusion	101
6	Méthode 2 : Accélération par la recherche des surfaces occlusives	103
6.1	Introduction	103
6.2	Schéma global de l'intégration de la méthode 2 dans l'algorithme du tir de rayons	104
6.3	Détection des surfaces occlusives entre les paires de surfaces et les paires de source-surface	105
6.4	Recherche accélérée d'intersection entre un rayon et une surface par utilisation des obstructions sur le parcours du rayon	114
6.5	Minimisation du nombre de surfaces testées lors de la recherche d'intersections	116
6.6	Résultats et analyse	119
6.7	Conclusion	130
7	Méthode 3 : Accélération par l'utilisation de récepteurs de taille variable	133
7.1	Introduction	133
7.2	Croissance des récepteurs	135
7.3	Contribution d'un rayon à un récepteur de taille variable	139
7.4	Diminution du nombre de rayons lors de la croissance du récepteur	145
7.5	Calcul de l'erreur statistique suite au changement de taille du récepteur et du nombre de rayons	147
7.6	Calcul du volume d'un récepteur quelconque	148
7.7	Résultats	154
7.8	Conclusion	167
8	Conclusion générale et perspectives	169

III	Annexes	191
A	Représentation des salles de test	195
A.1	Salles pour le test du modèle des surfaces occlusives	195
A.2	Salles pour le test de la méthode des récepteurs de taille variable	201
B	Méthode 1 : Algorithme du test d'appartenance d'un point à une surface par paquet de surfaces	205
C	Méthode 2 : Quelques valeurs de temps nécessaire à la détection des surfaces occlusives	207
D	Méthode 3 : Résultats des simulations avec récepteurs variables	209
D.1	Détermination automatique de la valeur de t_{base}	209
D.2	Résultats des simulations pour un tir de 50 millions de rayons avec et sans élimination des rayons	209
D.3	Résultat des simulations pour un tir d'un million de rayons avec et sans élimination des rayons	214
E	Liste des publications de Stéphane Lesoinne	221

Liste des acronymes

AVX	Advanced Vector eXtension
BEM	Boundary Elements Method
BRDF	Bi-Directional Distribution Function
BSP	Binary Space Partitioning
BVH	Bounding Volumes Hierarchy
C80	Clarity
CPU	Central Processing Unit
D50	Definition
DWM	Digital Waveguide Mesh
DWM	Digital Waveguide Method
EDT	Early Decay Time
FDTD	Finite Differences Time Domain
FEM	Finite Elements Method
FPU	Floating Point Unit
GPGPU	General Purpose computation on Graphics Processing Unit
GPU	Graphics Processing Unit
RASTI	RApid Speech Transmission Index
RIR	Room Impulse Response
SIMD	Single Input Multiple Data
SPL	Sound Pressure Level
SSE	Streaming SIMD Extension

TLM Transmission Line Matrix
TR30 Reverberation Time
Ts Temps central

Summary

The thesis deals with the acceleration of the sound ray tracing, a method of numerical simulation in room acoustics. This subject holds an important position in analysis and architectural design as well as the spatial reproduction of sound environments called "auralization."

To analyze or simulate the acoustics of a room, numerical techniques are used to calculate its impulse response between a transmission point and a receiving point. This response models the sound changes in the room during the sound propagation between the source and the point of hearing/audition. It is a solution of the equation of propagation of the sound wave whose analytical solution is generally not possible except for very simple rooms. The resolution is therefore usually approximated numerically by various techniques including sound ray tracing which follows the propagation of energy rays in the room from a source and detects their intersections with a receiver.

The original ray tracing algorithm used in this thesis is:

- Stochastic;
- Raw and sequential;
- Taking into account both specular and diffuse reflections;
- Dealing with convex quadrilateral planar surfaces;
- Treating all surfaces during the search for intersection with rays;
- Using fixed size spherical receptors.

Most of the time, the cost of the algorithms shooting rays is distributed in the search for intersections between rays and surfaces. This computation time can be reduced by some existing acceleration methods which usually deal (only) with the early part of the impulse response. However, several points can be improved:

- These methods cannot accelerate with sufficient precision the simulation of rooms with high reverberation time (from 500 ms to several seconds).
- Search for intersections between rays and surfaces is accelerated by using a partitioning of the room by various types of trees that do not allow simultaneous use of vector instructions and a quick update in case of modification of the geometry of the room.

The objective of this thesis is, through the development of three complementary approaches, to quickly obtain the acoustical simulation of rooms whose

geometry can undergo small changes and whose reverberation time can be high.

Acceleration of intersection tests between rays and surfaces

The intersection test between rays and surfaces is conventionally performed for one ray and one surface at a time. By leveraging the vector calculus capabilities of current processors, the reflections of rays can be treated for several surfaces at a time (packet of surfaces) in a reduced number of instructions.

Reducing the number of tested surfaces

The number of surfaces tested for finding intersections is reduced by exploiting the inter-surface visibility and the likelihood of intersections between rays and surfaces. Visibility information can be partially updated in case of a partial modification of the geometry of the room. This method can be parallelized on any number of processors and exploit vector instructions.

Reduction of the number of rays by the technique of the adaptive size receptor

The decrease in the number of rays occurs without drastic increase in statistical errors of the impulse response through the use of variable size receivers. Indeed, increasing the size of the receptor compensates for the loss of precision induced by the decrease in the number of rays. These receivers support the inclusion of obstacles in their volume.

Results

The three techniques developed in this thesis are complementary (to one another) and provide a total gain between 12 and 15 per processor while maintaining acoustically equivalent results. In addition, they allow partial updates of the geometry provided that the number of modified surfaces is low (typically around ten surfaces for complex rooms). This gain is divided between the three methods as follows:

1. An acceleration factor of 2 for the vector processing of packets of surfaces when searching for intersections. This method also helps to treat flat convex surfaces with any number of vertices.

2. An acceleration factor between 4 and 5 for minimizing the number of processed surfaces when searching for ray intersections by taking into account occlusions between the surfaces and by taking into account the probability of intersections between rays and surfaces. These gains are achieved by combining this technique with vector processing of surfaces.
3. An acceleration factor of between 3 and 6 for dynamically reducing the number of rays during the calculation of the late part of the reverberation. The increase in statistical errors caused by the decrease in the number of rays is compensated by the increase in the size of the receiver.

Finally, when parallelized with OpenMP on an 8-cores CPU with Hyper-Threading, the total gain raises to 120 - 150 and then a complete room impulse response can be computed with 10^6 rays in less than 2s.

Résumé

La thèse développée dans ce document traite de l'accélération du tir de rayons sonores, une méthode de simulation numérique en acoustique des salles. Ce domaine occupe une position importante en analyse et en conception architecturale ainsi que dans la reproduction spatialisée d'ambiances sonores dénommée « auralisation ».

Pour analyser ou simuler l'acoustique d'une salle, les techniques numériques calculent sa réponse impulsionnelle entre un point d'émission et un point de réception. Cette réponse modélise les modifications sonores apportées par la salle durant la propagation du son entre la source et le point d'audition. Elle est solution de l'équation de propagation de l'onde sonore dont la résolution analytique n'est en général pas possible excepté pour les salles très simples. La résolution est dès lors le plus souvent approchée numériquement par diverses techniques dont le tir de rayons sonores qui suit la propagation dans la salle de rayons énergétiques issus d'une source et détecte leurs intersections avec un récepteur.

L'algorithme initial (ou « de base ») utilisé dans cette thèse est celui d'un tir de rayons :

- stochastique ;
- brut et séquentiel ;
- prenant en compte aussi bien les réflexions spéculaires que diffuses ;
- traitant des surfaces planes convexes quadrilatères ;
- traitant toutes les surfaces lors de la recherche d'intersection ;
- utilisant des récepteurs sphériques de taille fixe.

La majeure partie du coût en temps de calcul des algorithmes de tir de rayons est réparti dans la recherche d'intersections entre les rayons et les surfaces. Ce temps de calcul peut être réduit par quelques méthodes d'accélération existantes qui visent pour la plupart la partie précoce de la réponse impulsionnelle. Cependant, plusieurs points peuvent être améliorés :

- Ces méthodes ne permettent pas d'accélérer avec une précision suffisante la simulation des salles dont le temps de réverbération est élevé (de 500 ms à plusieurs secondes).
- La recherche d'intersection entre les rayons et les surfaces est accélérée en utilisant un partitionnement de la salle suivant différents types d'arbres

dont les plus efficaces ne permettent pas d'utiliser simultanément les jeux d'instructions vectoriels et une mise à jour rapide en cas de modification de la géométrie de la salle.

L'objectif de cette thèse est, à travers le développement de trois approches complémentaires, d'obtenir rapidement la simulation de l'acoustique d'une salle dont la géométrie peut subir de petites modifications et dont le temps de réverbération peut être élevé.

Accélération des tests d'intersection entre les rayons et les surfaces

Le test d'intersection entre les rayons et les surfaces est classiquement effectué pour un rayon et une surface à la fois. En exploitant les capacités de calcul vectoriel des processeurs actuels, les réflexions des rayons peuvent être traitées pour plusieurs surfaces à la fois (par paquets de surfaces) en un nombre d'instruction réduit.

Réduction du nombre de surfaces testées

Le nombre de surfaces testées pour la recherche d'intersections est réduit en exploitant la visibilité inter-surfaces ainsi que la probabilité d'intersections entre les rayons et les surfaces. Les informations de visibilité peuvent être mises à jour partiellement en cas de modification d'une partie de la géométrie de la salle. Cette méthode peut être parallélisée sur un nombre quelconque de processeurs et exploiter les instructions vectorielles.

Réduction du nombre de rayons par la technique des récepteurs de taille variable

La diminution du nombre de rayons s'effectue sans augmentation drastique des erreurs statistiques de la réponse impulsionnelle grâce à l'utilisation de récepteurs de taille variable. En effet, l'augmentation de la taille des récepteurs compense la perte de précision induite par la diminution du nombre de rayons. Ces récepteurs prennent en charge l'inclusion d'obstacles dans leur volume.

Résultats

Les trois techniques développées dans le cadre de cette thèse sont complémentaires l'une de l'autre et apportent un gain total compris entre 12 et 15

par processeur tout en conservant des résultats acoustiquement équivalents. De plus, elles autorisent les mises à jour partielles de la géométrie pour autant que le nombre de surfaces modifiées reste faible (modification d'une dizaine de surfaces pour les salles complexes). Ce gain se répartit entre les trois méthodes de la façon suivante :

1. Un facteur d'accélération d'ordre 2 pour le traitement vectoriel des surfaces par paquets lors de la recherche d'intersections avec les rayons. Cette méthode permet en outre de traiter des surfaces planes convexes avec un nombre quelconque de sommets.
2. Un facteur d'accélération compris entre 4 et 5 pour la minimisation du nombre de surfaces traitées lors de la recherche d'intersections avec les rayons en tenant compte des occlusions entre les surfaces et en tenant compte des probabilités d'intersections entre les rayons et les surfaces. Ces gains sont obtenus en couplant cette technique au traitement vectoriel des surfaces.
3. Un facteur d'accélération compris entre 3 et 6 pour la diminution dynamique du nombre de rayons parcourant la salle lors du calcul de la partie tardive de la réverbération. L'augmentation des erreurs statistiques provoquée par cette diminution du nombre de rayons est compensée par l'augmentation de la taille du récepteur.

In fine, en parallélisant l'algorithme au moyen d'OpenMP sur un CPU 8-coeurs doté de l'Hyper-Threading, une réponse impulsionnelle de salle complète peut être calculée avec 10^6 rayons en moins de 2 secondes.

Remerciements

Merci à Jean-Jacques Embrechts pour m'avoir permis de réaliser cette thèse, pour son soutien ainsi que ses conseils avisés lors la rédaction de ce document.

Merci à Marc Van Droogenbroeck pour sa relecture de ce document.

Merci à l'ensemble des membres du jury de cette thèse pour avoir accepté de l'évaluer.

Merci aux membres actuels et anciens du service d'acoustique, du CEDIA, de l'institut Montéfiore et de l'ULg pour les moments passés ensemble. Je pense notamment mais pas seulement à Nicolas, Angel, Alexandre, Alexis, Vivalia, Laurent et Julien.

Merci à mes parents, ma famille et mes amis pour leurs encouragements.

Et, surtout, merci à Caroline, Émilie et Élise.

Première partie
Contexte et état de l'art

Chapitre 1

Introduction

La thèse développée dans ce document traite de l'accélération du tir de rayons sonores, une méthode de simulation numérique en acoustique des salles. Ce domaine occupe une position importante en analyse et en conception architecturale (par exemple dans les bureaux d'études acoustiques) ainsi que dans la reproduction spatialisée d'ambiances sonores dénommée « auralisation ».

Pour analyser ou simuler l'acoustique d'une salle, les techniques numériques calculent sa réponse impulsionnelle (RIR)¹ entre un point d'émission et un point de réception. Cette réponse modélise les modifications sonores apportées par la salle durant la propagation du son entre la source et le point d'audition. Cette RIR est solution de l'équation de propagation de l'onde sonore dont la résolution analytique n'est en général pas possible sauf pour les salles très simples². La résolution est dès lors le plus souvent approchée numériquement par diverses techniques plus ou moins complexes appartenant aux deux familles de méthodes citées ci-après.

Les méthodes ondulatoires (FEM, BEM, DWM, FDTD ...³) tiennent compte du comportement ondulatoire de la propagation sonore. Elles sont caractérisées par un temps de calcul qui croît rapidement avec la fréquence simulée, ce qui les réserve le plus souvent pour les simulations aux basses fréquences. Les méthodes énergétiques (tir de rayons, sources images, tir de faisceaux, radiosité ...⁴) ne tiennent pas compte quant à elles du comportement ondulatoire de la propagation acoustique et ne sont dès lors valides que pour les moyennes et hautes fréquences pour lesquelles les phénomènes d'interférences peuvent être négligés. Elles sont néanmoins plus rapides que les méthodes ondulatoires pour générer des réponses impulsionnelles⁵ large bande car leur temps de simulation

1. RIR ou Room Impulse Response.

2. Par exemple, une salle parallélépipédique dont les surfaces sont identiques et très réfléchissantes.

3. Ces techniques seront introduites au chapitre suivant.

4. Ces techniques seront introduites au chapitre suivant.

5. La phase de la réponse impulsionnelle n'est pas créée par ces méthodes et doit être

ne dépend pas de la fréquence simulée.

Le temps de calcul de la plupart de ces méthodes dépend de la durée de la réponse impulsionnelle et peut devenir très élevé⁶ pour obtenir une longue RIR complète⁷. Or, ces temps de calcul ne sont pas adaptés à une utilisation dans les applications d'auralisation en temps réel. Ils nécessitent d'être diminués pour pouvoir mettre à jour rapidement les réponses impulsionnelles, notamment lors du déplacement de la source ou du récepteur et lors de changement dans la géométrie de la salle. Plusieurs méthodes d'accélération ont été publiées dans la littérature dans ce sens en se limitant pour la plupart aux premières réflexions de l'onde sonore.

En effet, la simulation rapide de la partie tardive de la réverbération par les méthodes énergétiques en tenant compte des phénomènes de diffusion et de diffraction reste un challenge. Ceci est principalement dû au nombre élevé de réflexions de l'onde sonore ainsi qu'à la dispersion des directions de propagation lors de chaque réflexion.

Objectif de la thèse

Cette thèse se concentrera sur les méthodes énergétiques en proposant des solutions originales pour obtenir *rapidement* une RIR large bande incluant la partie tardive de la réverbération. Parmi les méthodes énergétiques, le tir de rayons est une des méthodes les plus rapides pour générer la partie tardive de la RIR sans hypothèses restrictives⁸ ou paramètres difficiles à fixer⁹ tout en permettant de simuler les réflexions spéculaires et diffuses¹⁰.

Cependant, le tir de rayons se heurte à trois difficultés majeures. D'une part, les recherches d'intersections entre rayons et surfaces sont extrêmement nombreuses dans cet algorithme et consomment énormément de temps. D'autre part, les imprécisions sur l'évaluation de la réponse impulsionnelle croissent *rapidement* avec sa durée, nécessitant de plus en plus de rayons au fur et à mesure que la RIR s'allonge. Enfin, la résolution temporelle est plus faible que pour d'autres techniques, comme celle des sources images par exemple.

Certaines méthodes d'accélération ont déjà été proposées et décrites dans la littérature spécialisée : elles seront présentées au chapitre 3. Elles ne sont cependant pas entièrement satisfaisantes, car :

- soit, elles ne permettent pas d'accélérer avec une précision suffisante la simulation des salles dont le temps de réverbération est élevé (de 500 ms à plusieurs secondes) ;

générée à *posteriori*, le plus souvent en se basant sur une séquence aléatoire.

6. De quelques minutes à plusieurs heures selon la méthode utilisée.

7. Pour des durées supérieures à la seconde par exemple dans les salles réverbérantes.

8. Telle que l'hypothèse de décroissance exponentielle.

9. Comme pour les Feedback Delay Networks.

10. Dont la présence affecte les résultats de façon non négligeable [66].

- soit, elles ne prennent pas en compte les réflexions diffuses, or ces dernières peuvent avoir un impact très significatif sur l’acoustique de la salle ;
- soit, elles nécessitent une structure de données dont la génération a un coût. Pour les méthodes existantes, basées sur le partitionnement spatial, il existe un compromis entre les performances et le temps de génération/mise à jour de ces structures lors d’un changement de géométrie.

Face à ces limitations, l’objectif de cette thèse est, à travers le développement de trois approches originales et complémentaires, d’obtenir rapidement la simulation de l’acoustique d’une salle, dont le temps de réverbération peut être élevé, dont les surfaces peuvent présenter n’importe quelles propriétés de réflexion (spéculaire, diffuse ou mixte) et dont la géométrie peut subir de *petites* modifications (modifications de quelques surfaces). Ces trois approches sont :

- Une méthode d’accélération par traitement vectoriel de la recherche d’intersections entre les rayons et des paquets de surfaces.
- Une méthode d’accélération par la recherche des surfaces occlusives, qui utilise une approche autre que le partitionnement spatial pour la réduction « efficace » du nombre de surfaces testées. Elle se base sur la visibilité et sur la probabilité d’intersection des surfaces avec les rayons. La génération des informations de visibilité peut être parallélisée sur un nombre élevé de processeurs¹¹ et elles peuvent être mises à jour partiellement en cas de modification d’une partie de la géométrie de la salle.
- Une méthode d’accélération par l’utilisation de récepteurs de taille variable gérant l’inclusion d’obstacles. Elle permet la réduction du nombre de rayons utilisés à divers instants clés, tout en conservant constante la précision sur toute la longueur de la RIR. En effet, l’augmentation de la taille des récepteurs augmente leur probabilité d’intersection avec les rayons. On exploite ici la dimension temporelle des réponses acoustiques en privilégiant les résolutions temporelles et spatiales pour la partie précoce de la RIR (récepteurs de petite taille) et la vitesse d’exécution pour la partie tardive (récepteurs de grande taille).

Ces méthodes seront développées en détail aux chapitres 5, 6 et 7.

Organisation du document

Ce document est organisé en 2 parties.

La première partie décrit, entre autres, le contexte dans lequel se situe ce travail de thèse ainsi que l’état de l’art concernant les techniques de simulation utilisées en acoustique des salles et leurs méthodes d’accélération actuelles.

11. Au maximum égal au nombre de séquences aléatoires indépendantes du générateur de nombres pseudo-aléatoires du type Mersenne-Twister MT2203. Ce nombre maximum est égal à 6024 en utilisant la librairie Intel MKL [4].

Cette partie traitera aussi de certaines méthodes d'accélération rencontrées en synthèse d'images de par la proximité de ces domaines lorsqu'on se limite aux premières réflexions. Elle est constituée des quatre premiers chapitres dont celui-ci. Le chapitre 2 présente les principales méthodes de simulation, en se concentrant principalement sur les méthodes ondulatoires et énergétiques. Ensuite, le chapitre 3 présente les principales techniques d'accélération des méthodes énergétiques géométriques. Nos recherches se concentreront sur l'accélération d'un algorithme de tir de rayons sonores : l'algorithme de base sera présenté au chapitre 4.

Dans la seconde partie du document sont décrites les trois méthodes conçues et développées dans cette thèse :

- Premièrement, au chapitre 5 la méthode d'exploitation des jeux d'instructions vectoriels pour la recherche d'intersections entre les rayons et les paquets de surfaces.
- Deuxièmement, au chapitre 6, la méthode qui accélère la recherche d'intersections entre les rayons et les surfaces par exploitation de la visibilité entre les paires de surfaces et entre les sources et les surfaces,
- Troisièmement, au chapitre 7, la méthode qui accélère la simulation en réduisant le nombre de rayons parcourant la salle. Cette réduction est compensée par l'augmentation dynamique de la taille du récepteur afin de conserver une erreur statistique constante et des résultats acoustiquement équivalents.

La thèse se termine enfin par ses conclusions au chapitre 8.

Chapitre 2

Aperçu de la simulation numérique en acoustique des salles

2.1 Introduction

Les principales techniques de la simulation numérique du champ sonore en acoustique des salles seront brièvement introduites dans ce chapitre. Ces techniques peuvent être distinguées selon qu'elles résolvent l'équation de propagation ou non.

L'équation de propagation s'exprime comme suit :

En un point (x, y, z) et en un instant t , le champ sonore est caractérisé en dehors des sources et dans un milieu stationnaire par l'équation de propagation

$$\nabla^2 p(x, y, z, t) - \frac{1}{c^2} \times \frac{\partial^2 p(x, y, z, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1.1)$$

où $p(x, y, z, t)$ est la pression sonore et c est la vitesse de propagation du son (m/s).

Certaines méthodes de simulation ne résolvent pas l'équation 2.1.1 en tant que telle : le champ sonore y est simulé en se basant sur des modèles paramétriques [56, 57, 79]. Ceci peut être justifié lorsque le champ sonore doit être rapidement mis à jour ou lorsque les ressources de calcul disponibles sont limitées. Un exemple de ce type de modèles est celui des FDN (Feedback Delay Network) qui sont des structures avancées de délais appliqués au signal émis par la source de façon à imiter les réflexions dans une salle. Le principal avantage de ces techniques est leur faible coût en calcul. Par contre la détermination des paramètres du modèle pour une salle bien particulière est complexe et sans garantie sur le réalisme des résultats ce qui ne permet pas de les utiliser pour une analyse acoustique d'une salle bien particulière.

Les méthodes de résolution numériques non paramétriques peuvent être regroupées en deux familles selon qu'elles tiennent compte ou non du caractère

ondulatoire de la propagation acoustique, sous la dénomination de méthodes ondulatoires (section 2.3) et de méthodes énergétiques¹ (section 2.4). On obtient ainsi une solution avec une base physique qui peut servir à l'analyse acoustique des salles. Les principales considérations relatives à la résolution de l'équation de propagation 2.1.1 seront introduites à la section 2.2.

2.2 Aperçu de la résolution de l'équation de propagation de l'onde sonore

La résolution de l'équation de propagation de l'onde sonore (2.1.1) tient compte des conditions aux limites (obstacles²) qui vont exprimer la réflexion, la diffusion et la diffraction de l'onde sonore, ce qui peut modifier la phase et atténuer l'amplitude de l'onde sonore. Ces modifications de l'onde sonore se produisent lorsque le milieu de propagation, caractérisé par une impédance acoustique³ Z , change. Ceci se produit lorsque l'onde qui se propage dans un milieu d'impédance Z rencontre l'interface avec un milieu d'impédance différente. A ce moment, une partie de l'onde incidente est transmise dans le second milieu (l'obstacle), tandis que la composante restante est réfléchiée à son interface en fonction d'un facteur de réflexion⁴ complexe lié notamment à la différence d'impédance rencontrée à cet interface.

La résolution analytique exacte de cette équation n'est pas réaliste hormis pour les salles extrêmement simples (un parallélépipède rectangle par exemple). Dès lors, des techniques approchées sont utilisées. Celles-ci diffèrent notamment par la prise en compte totale ou partielle des effets subis par l'onde sonore en présence d'obstacles. Notamment, l'onde incidente peut être :

- Réfléchiée spéculairement selon une loi de Snell pour laquelle l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion, ce qui est le cas pour une onde plane réfléchiée sur une surface plane infinie. Pour les ondes sphériques, les angles d'incidence sont multiples mais pour une surface infinie parfaitement rigide ou libre, la réflexion spéculaire est théoriquement valide [170].
- En partie réfléchiée et en partie dispersée (edge scattering) pour les surfaces lisses et de dimensions finies. Cet effet de bord peut être interprété comme de la diffraction.

1. Les méthodes énergétiques se limitent à la propagation de l'énergie sonore et ne sont valides que pour les moyennes et hautes fréquences.

2. Murs de la salle, présence de personnes et d'objets.

3. L'impédance acoustique d'un milieu de propagation est le produit de sa densité par la vitesse de propagation qui y règne. L'impédance acoustique d'une paroi (d'une surface) est définie comme étant le rapport de la pression sonore et de la composante normale de la vitesse des particules à l'endroit de la surface.

4. Rapport des amplitudes de la pression due aux ondes réfléchiées et incidentes.

- Diffusée si la surface présente des irrégularités de taille non négligeable par rapport à la longueur d’onde (surface scattering).
- Diffractée par les arêtes / coins des surfaces et des objets comme si ces coins et arêtes devenaient des sources. Lorsque la taille de l’objet est de l’ordre de la longueur d’onde, cet effet est notable et réduit l’effet de masquage d’une source par une paroi.

Selon la méthode choisie, la prise en compte de ces effets peut-être intrinsèque, approchée ou négligée.

Une hypothèse très utilisée en acoustique des salles, même si l’on s’en écarte plus ou moins en pratique, est l’hypothèse simplificatrice de paroi localement réactive. Selon cette hypothèse, l’impédance de la paroi est indépendante de l’angle d’incidence et l’onde ne se propage pas tangentiellement dans la paroi, ce qui permet de simplifier l’expression du facteur de réflexion et la résolution du problème par la même occasion.

Les principales méthodes ondulatoires et énergétiques sont présentées aux sections 2.3 et 2.4.

2.3 Aperçu des méthodes ondulatoires

Les méthodes ondulatoires sont des méthodes avancées de résolution de l’équation de propagation (2.1.1) qui tiennent compte de la phase de l’onde acoustique. Les principales méthodes ondulatoires sont [170][88] les méthodes :

- Aux éléments finis FEM (Finite Element Method) [43][176][129].
- Aux éléments frontières BEM (Boundary Element Method) [15][34].
- Aux différences finies FDTD (Finite Difference Time Domain) [27][116].
- Aux lignes de transmission TLM (Transmission Line Matrix) [175].
- Aux guides d’ondes DWM (Digital Waveguide Mesh) [112].

Selon la méthode choisie, cette résolution peut s’effectuer dans le domaine fréquentiel ou temporel (habituellement par les méthodes FDTD, TLM et DWM).

Ces méthodes reposent sur une décomposition / un maillage de la salle en éléments de volumes ou en éléments de surfaces dont la taille est inférieure à la longueur d’onde choisie⁵ pour la résolution, ce qui conduit à une augmentation considérable du nombre d’éléments et par conséquent de la charge de calcul pour les moyennes et hautes fréquences. Dès lors, pour une résolution large bande, ces méthodes sont associées à d’autres techniques pour les fréquences élevées.

Un désavantage de ces méthodes est que lorsque les surfaces ne sont pas totalement réfléchissantes ou absorbantes, la formulation des conditions aux limites peut devenir très compliquée [87][144].

⁵. Par exemple, le maillage du volume se fait habituellement au moyen de 6 à plus de 10 éléments par longueur d’onde.

Hormis leurs avantages et inconvénients respectifs, la différence la plus marquante entre les méthodes fréquentielles et temporelles réside dans leur adéquation au calcul de réponses impulsionnelles :

- Dans le domaine fréquentiel, la résolution est effectuée pour une fréquence donnée ce qui nécessite un grand nombre d'exécutions dans le cas d'un signal large bande.
- Dans le domaine temporel, le calcul d'une réponse impulsionnelle se fait en une seule exécution.

Il est à noter qu'à l'origine, les méthodes BEM et FEM ont été développées pour une résolution dans le domaine fréquentiel, mais qu'une résolution par une méthode BEM dans le domaine temporel, mieux adaptée au calcul d'une réponse impulsionnelle dans un volume clos, est donnée dans [62].

Les méthodes les plus courantes, qui sont complémentaires aux méthodes énergétiques car limitées à une utilisation basse fréquence, sont présentées brièvement dans les sous-sections suivantes.

2.3.1 FEM

La méthode des éléments finis transforme l'équation de Helmholtz discrétisée en un système d'équations linéaires. Sa résolution se fait sous forme matricielle en incluant les conditions aux limites et les contributions des sources. Elle est basée sur le principe de conservation énergétique entre des espaces contigus dont les échanges sont modélisés en discrétisant le volume de la salle en un ensemble d'éléments de volume. Ensuite, dans chaque élément de volume, le champ sonore est décrit par des fonctions polynomiales qui se rejoignent de façon continue à la jonction de ces éléments.

Le résultat de cette méthode fournit la pression aux nœuds du maillage et une technique courante pour dériver la réponse dans le domaine temporel est l'utilisation d'une technique modale [43], c'est à dire qui recherche les modes propres de la salle.

Comparativement à la méthode BEM, la méthode FEM s'effectue pour un nombre d'éléments plus important puisque tout le volume doit être maillé tandis que les interactions entre les éléments est plus longue à calculer pour les BEM que pour les FEM.

2.3.2 BEM

La méthode résout l'intégrale de Helmholtz-Kirchhoff sur la surface enveloppe de la salle

$$p(r) = \iint \left(g(r|r_0) \frac{\partial p(r_0)}{\partial n} - p(r_0) \frac{\partial g(r|r_0)}{\partial n} \right) dS_0$$

où r_0 est la position de l'élément de surface dS_0 et r , une position choisie et $g(r|r_0)$ est la fonction de Green en espace libre

$$g(r|r_0) = \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}_0|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}_0|}.$$

L'intégrale est discrétisée sur la surface et sa résolution numérique se fait avec des matrices pleines, à la différence des méthodes FEM.

Le maillage est constitué d'éléments de surface de taille égale à (au plus) un sixième de la longueur d'onde. Ceci impose une limite inférieure sur le nombre d'éléments de surface ce qui entraîne une limite pratique de la méthode aux basses et moyennes fréquences.

2.3.3 FDTD

La méthode aux différences finies [27][116][86][174] utilise une version simplifiée de l'équation de propagation où les opérateurs différentiels sont approchés par des différences. La résolution est effectuée dans le domaine temporel, ce qui facilite l'extraction de la réponse impulsionnelle par rapport aux méthodes de résolution dans le domaine fréquentiel.

La modélisation des conditions aux limites peut poser problème et la caractérisation fréquentielle des matériaux est introduite par [86] sous l'hypothèse de surfaces localement réactives.

Le volume de la salle est habituellement maillé par une grille régulière, dont la taille des éléments doit être suffisamment petite pour tenir compte de la géométrie de la salle et de la plus petite longueur d'onde du signal. Par conséquent, son utilisation pour une grande salle avec un maillage fin résulte en une grande consommation mémoire et un long temps de calcul même si cette méthode est bien adaptée au traitement parallèle et son implémentation sur GPU apporte un gain important (jusqu'à 200X par rapport à un CPU simple cœur) [174][104].

La méthode est sujette à des erreurs de dispersion qui affectent la phase et l'amplitude de la pression calculée car la vitesse de propagation de la solution dans le maillage est fonction de la direction⁶.

2.3.4 TLM et DWM

Le modèle des lignes de transmission TLM [81][107][82] est basé sur la discrétisation spatiale et temporelle du modèle de Huygens. Selon ce modèle, le front d'onde consiste en un nombre de sources secondaires qui donnent naissance à des ondelettes sphériques dont l'enveloppe donne un nouveau front

6. La propagation se fait dans des directions imposées par le maillage. Comme ces directions sont constantes, elles sont privilégiées par rapport aux directions intermédiaires.

d'onde sphérique. Pour ce faire, le volume est doté d'un maillage cubique de petits tubes interconnectés et bidirectionnels (les lignes de transmission) dans lequel se propage l'impulsion sonore émise par la source.

En chaque nœud, l'onde incidente est propagée dans les six lignes connectées⁷ et la pression y est mesurée en sommant les impulsions incidentes. Pour obtenir une solution précise, le maillage doit être dense au prix d'une forte augmentation de la charge de calcul limitant son utilisation aux basses fréquences.

Suite à l'utilisation d'une structure régulière, cette méthode est soumise à des erreurs de dispersion tout comme la FDTD. Cependant, contrairement à la FDTD, cette méthode propose un modèle qui ne nécessite pas la résolution d'une équation d'onde différentielle [80] et est considérée plus stable.

La méthode DWM [16][131][83] rectilinéaire est semblable à la méthode TLM [111] dans ses principes.

2.4 Aperçu des méthodes énergétiques

Les méthodes énergétiques se limitent à la propagation de l'énergie sonore, sans tenir compte du caractère ondulatoire du son. La diffraction et les effets de phase peuvent être approchés par divers artifices de calculs plus ou moins complexes [38][179][73]. L'utilisation de l'approche énergétique en lieu et place de l'approche ondulatoire est justifié aux hautes et moyennes fréquences où la densité des modes propres (décrits ci-dessous) de la salle est élevée.

Les modes propres ainsi que les fréquences propres associées sont liés à la formation d'ondes stationnaires dans la salle, qui peut être vue comme un système résonnant excité par une source sonore. Dans ce cas, la distribution spatiale du champ sonore est obtenue en résolvant l'équation de Helmholtz en régime sinusoïdal dont les solutions modales sont appelées « modes » [170].

Dans une salle, le champ sonore total est donné par la superposition des modes excités par la source. Ces modes peuvent se recouvrir fortement sur l'axe des fréquences d'autant plus que leur densité est élevée. Lorsque leur densité est faible (basses fréquences), la caractérisation du champ sonore peut se faire mode par mode. La réponse fréquentielle est alors une succession de pics relativement distincts colorant la réponse de la salle. Lorsque la densité est suffisamment élevée, les modes se recouvrent fortement et la coloration de la réponse fréquentielle devient faible voire négligeable. Dans ce cas, une analyse détaillée de tous les modes n'est pas nécessaire en pratique, ce qui est exploité par les méthodes énergétiques. La fréquence de Schroeder f_s à partir de laquelle cette simplification est valide en pratique est présentée ci-dessous

7. Lignes auxquelles il convient d'ajouter les lignes nécessaires au traitement des inhomogénéités et à la gestion du comportement dissipatif.

puis suivra la classification des méthodes énergétiques les plus utilisées.

2.4.1 Fréquence de Schroeder

Les méthodes énergétiques sont considérées comme valides pour les fréquences supérieures à la fréquence de Schroeder [140]

$$f_s = 2000\sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2.4.1)$$

où T est le temps de réverbération (s) et V est le volume de la salle en m^3 . Pour $f > f_s$, le recouvrement modal⁸ est suffisamment important pour ne pas nécessiter une analyse en détail puisque la densité des modes propres augmente avec la fréquence et est approchée par

$$\frac{dN_f}{df} \approx 4\pi V \frac{f^2}{c^3} \quad (2.4.2)$$

où c est la vitesse du son (m/s) et N_f est le nombre de fréquences propres à une fréquence f donnée.

2.4.2 Classification des méthodes énergétiques

Les méthodes énergétiques peuvent être classées dans les catégories suivantes :

- L’acoustique géométrique [170][88] comprenant principalement le tir de rayons et ses variantes, le modèle des sources images et la radiosité.
- L’acoustique statistique [128][152] utilisant une approximation de décroissance exponentielle de la réverbération et valide sous l’hypothèse de champ diffus [67] pour des salles de forme classique et une absorption uniforme et faible des parois [128][152].
- Les modèles de diffusion [117][119] et l’équation de transport [113][77] sont basées sur l’analogie entre la propagation de l’énergie sonore dans une salle aux parois diffusantes et la diffusion de particules se propageant dans un milieu diffusant.

Cette thèse s’intéresse plus particulièrement aux méthodes d’acoustique géométrique dans le cadre de la propagation sonore dans une salle. Les principaux champs d’applications de ces méthodes sont l’acoustique des salles, la propagation extérieure [101][50], l’acoustique sous-marine [49] et les techniques ultrasonores (par exemple, l’évaluation non destructive [78]).

Les méthodes énergétiques les plus utilisées en acoustique des salles sont le tir de rayons, la méthode des sources images, le tir de faisceaux, la radiosité et le modèle de diffusion. Leurs notions fondamentales sont présentées dans les sous-sections suivantes.

8. Avec un mélange de phases important.

2.4.3 Tir de rayons

La modélisation de la propagation par tir de rayons est une technique utilisée dans de nombreux domaines dont notamment l'imagerie de synthèse, l'électromagnétisme et bien sûr, l'acoustique. Le principal avantage du tir de rayons en acoustique des salles est sa possibilité de simuler la partie moyenne et tardive de la réverbération quelle que soit sa décroissance, notamment pour les salles disproportionnées ou celles dont l'absorption n'est pas uniformément répartie.

En acoustique des salles, cette méthode a été introduite par Krokstad [89] et repose principalement sur deux hypothèses :

1. Les ondes sonores peuvent être modélisées par de fins pinceaux énergétiques que l'on appelle « rayons sonores »⁹.
2. Les ondes sonores sont considérées quasi-planes et le rayon se propage en ligne droite perpendiculairement au front d'onde. Dans ce cas et pour un signal large bande, l'interaction de deux rayons en un point est approchée par l'addition de leur énergie ou de leur densité énergétique [170].

Ces rayons peuvent être émis dans des directions prédéfinies ou aléatoires auquel cas, on parle de méthode stochastique, ce qui est le cas de l'algorithme utilisé dans cette thèse qui fait partie de la famille des méthodes de Monte-Carlo.

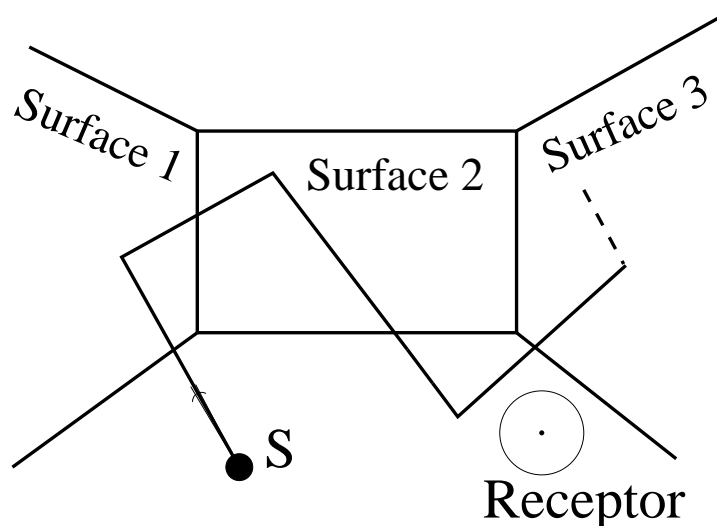


FIGURE 2.4.1 – Tir de rayons. Un rayon issu de la source ponctuelle S se réfléchit sur les surfaces de la salle jusqu'à son extinction. Lorsqu'il intersecte le récepteur sphérique, on y ajoute sa contribution énergétique.

⁹ A noter que ces rayons peuvent être remplacés par des particules, auquel cas, on parle de tir de particules [40].

Le fonctionnement de la méthode, illustré à la figure 2.4.1, est le suivant :

- Dans une salle modélisée numériquement aux parois¹⁰ caractérisées par les propriétés acoustiques de leurs matériaux, les rayons sont émis à partir d'une source sonore ponctuelle¹¹ et dotés d'une énergie propre en fonction de la puissance de la source. Leur propagation rectiligne est suivie en tenant compte de l'absorption sur les parois et dans le milieu de propagation jusqu'à leur extinction fixée par un critère d'arrêt énergétique (leur énergie tombe sous un seuil e_{stop}) ou temporel (leur temps de propagation dépasse le seuil t_{stop}).
- Les réflexions aux parois sont spéculaires bien que certains effets tels que la diffusion [47] et la diffraction [150] peuvent être simulés par des artifices de calcul. L'absorption est exprimée par un coefficient d'absorption¹² α pour chaque bande de fréquence. De même, un coefficient de diffusion permet de caractériser les réflexions diffuses¹³ d'une paroi pour chaque bande de fréquence.
- L'évolution de l'énergie sonore au cours du temps en un point P de la salle pour une source émettant une impulsion d'énergie en $t=0$, est présentée sous forme d'échogrammes (figure 2.4.2). Un échogramme regroupe les contributions énergétiques des rayons sur un axe temporel discrétisé en intervalles. Ces intervalles temporels sont souvent choisis de l'ordre de quelques millisecondes pour obtenir une résolution temporelle satisfaisante ainsi qu'un échantillon représentatif de contributions énergétiques des rayons.
- Les contributions énergétiques des rayons sont captées par un récepteur non ponctuel¹⁴ centré en P dont la forme la plus courante est la sphère¹⁵ mais qui peut-être volumique ou surfacique. A partir de cet échogramme, on peut extraire les paramètres acoustiques¹⁶ de la salle (sous-section 4.2.3) qui en caractérisent la qualité acoustique.

10. Par souci d'efficacité, les parois sont généralement modélisées par des surfaces planes convexes.

11. La modélisation des sources sonores non ponctuelles sort du cadre de cette thèse.

12. Il s'agit la plupart du temps d'une valeur moyenne obtenue pour des incidences aléatoires mesurée en chambre réverbérante [8] même s'il est possible de modéliser un coefficient d'absorption dépendant de l'angle d'incidence si l'impédance de la paroi est connue [170].

13. Pour des angles d'incidence aléatoires.

14. Sinon, la probabilité d'intersection avec un rayon est nulle.

15. Car la surface d'intersection de la sphère est indépendante de l'angle d'incidence du rayon.

16. SPL, TR30, EDT, C80, ...

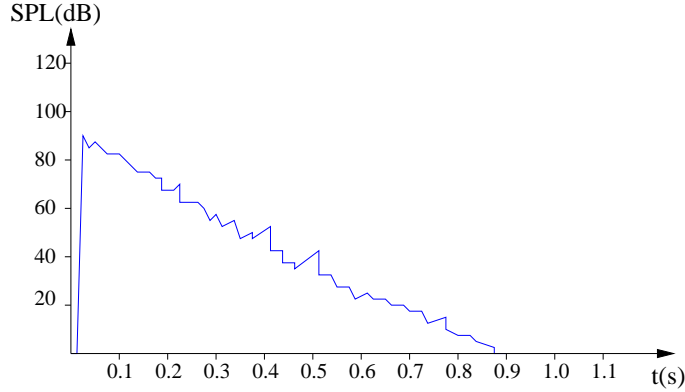


FIGURE 2.4.2 – L'échogramme obtenu pour une bande d'octave y donne l'évolution temporelle de l'énergie sonore dans le récepteur.

L'algorithme de base utilise des sources ponctuelles omnidirectionnelles, des récepteurs sphériques omnidirectionnels ou directionnels et prend en compte les réflexions spéculaires et diffuses au moyen d'une technique avancée qui évite la croissance exponentielle du nombre de rayons et qui sera présentée au chapitre 3 [46].

Dans le cadre d'un tir de rayons stochastique utilisant des récepteurs sphériques, la moyenne du carré de la valeur efficace de la pression sonore¹⁷ au récepteur centré au point C est donnée par [100]

$$\overline{p_{eff}^2(V)} = \frac{\rho_0 c}{V} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \nu(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta \quad (2.4.3)$$

et

$$\nu(\theta, \varphi) = I(\theta, \varphi) \sum_{i=0}^{+\infty} a_i(\theta, \varphi) \delta_i(\theta, \varphi) \left(\frac{e^{-\alpha d_{in}} - e^{-\alpha d_{out}}}{\alpha} \right) \quad (2.4.4)$$

où α est le coefficient d'absorption du milieu (m^{-1}), ρ_0 la densité du milieu (kg/m^3), c (m/s) la vitesse du son dans ce milieu, V (m^3) est le volume du récepteur, d_{in} (respectivement d_{out}) est la distance (m) parcourue par le rayon depuis l'origine jusqu'à son point d'entrée P_{in} (respectivement de sortie P_{out}) dans le récepteur, i est l'ordre de réflexion du rayon issu de la source avec une direction (θ, φ) et une intensité énergétique¹⁸ (Watts/steradian) $I(\theta, \varphi)$, $a_i(\theta, \varphi)$ est le produit des facteurs de réflexions¹⁹ des surfaces rencontrées donné par

$$a_i(\theta, \varphi) = (1 - \alpha_1) \dots (1 - \alpha_i).$$

17. p_{eff}^2 au centre du récepteur est approximée par la moyenne des p_{eff}^2 sur tout le volume récepteur à condition que la pression y soit suffisamment homogène.

18. Exprimée comme la puissance émise par unité d'angle solide.

19. Fonction de la fréquence et de l'angle d'incidence à la surface. Cette dernière dépendance est en règle générale négligée.

La fonction δ_i permet de ne prendre en compte les rayons que durant la traversée du récepteur et vaut

$$\delta_i(\theta, \varphi) = \begin{cases} 1 & \text{si le rayon } (\theta, \varphi) \text{ traverse le récepteur à la réflexion } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.4.5)$$

Dans le cas d'une résolution de l'équation (2.4.3) par un processus stochastique, la moyenne du carré de la valeur efficace de la pression $\overline{p_{eff}^2(V)}$ s'obtient [46] par l'espérance mathématique de $\hat{p}^2(V)$ qui permet d'approcher la solution avec un nombre fini de rayons :

$$\overline{p_{eff}^2(V)} = E(\hat{p}^2(V)) = E\left(\frac{4\pi\rho_0c}{NV} \sum_{k=1}^N \nu(\theta_k, \varphi_k)\right) \quad (2.4.6)$$

où N est le nombre de rayons tirés de la source avec une densité de probabilité proportionnelle à $\sin\theta d\theta d\varphi$.

Ces résultats sont soumis à des erreurs systématiques dues aux erreurs sur les données et sur le modèle, mais aussi à des erreurs dues à la fluctuation stochastique des simulations [98][45]. Ce dernier type d'erreur peut être réduit en augmentant le nombre d'échantillons de p_{eff}^2 pour le calcul de $\overline{p_{eff}^2}$ ou en moyennant les résultats de plusieurs simulations [170]. Ceci peut être, notamment, réalisé en augmentant le nombre de rayons, ce qui influence directement et défavorablement la charge de calcul.

L'erreur statistique sur $\overline{p_{eff}^2}$ peut être évaluée pour chaque intervalle temporel par sa variance qui est calculée, dans le cas d'un tir de rayons stochastique avec un récepteur sphérique et un critère d'arrêt énergétique, par

$$\sigma^2 \approx \left(\frac{4\pi\rho_0c}{NV}\right)^2 \left(\sum_k^N \nu_k^2 - \frac{\left(\sum_k^N \nu_k\right)^2}{N}\right) \quad (2.4.7)$$

où ν_k est la contribution énergétique d'un rayon à l'intervalle temporel considéré. Cette expression peut être obtenue de la même façon que l'expression de la variance pour un récepteur surfacique [44][46].

En effet, si l'équation (2.4.3) est mise sous la forme

$$\overline{p_{eff}^2(V)} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2.4.8)$$

où

$$F(\theta, \varphi) = \frac{\rho_0c}{V} \nu(\theta, \varphi)$$

alors, la variance de l'estimateur [44][46] est donnée par

$$\begin{aligned}
Var(\hat{p}^2) &= \frac{4\pi}{N} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F^2(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi \\
&\quad - \frac{1}{N} \left[\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi \right]^2 \\
&\approx \frac{1}{N} \left[\left(\frac{4\pi\rho_0 c}{V} \right)^2 \frac{\left(\sum_{k=1}^N \nu_k^2 \right)}{N} - (\hat{p}^2(V))^2 \right]
\end{aligned} \tag{2.4.9}$$

où

$$\hat{p}^2(V) = \frac{4\pi\rho_0 c}{NV} \sum_{k=1}^N \nu_k.$$

2.4.4 Méthode des sources images

Le principal avantage de la méthode des sources images en acoustique des salles est sa précision temporelle et spatiale, mais son temps de calcul croît exponentiellement avec l'ordre de réflexion.

L'algorithme conventionnel, décrit dans [14][24], génère des réponses impulsionnelles de salles (RIR) pour des parois partiellement absorbantes et néglige la diffusion et la diffraction. Cette dernière peut être simulée à l'aide de sources images particulières « diffractantes » [153][132] mais reste limitée à des ordres faibles en pratique.

La génération des sources images a lieu comme suit :

1. La source S est réfléchiée en miroir sur chacune des M surfaces, ce qui donne naissance à M sources images S_i de premier ordre.
2. Chaque source image S_i issue de la surface « i » est réfléchiée en miroir sur les $(M - 1)$ autres surfaces et donne naissance aux $(M - 1)$ sources images $S_{i,j}$
3. Et ainsi de suite, chaque source image génère $(M - 1)$ nouvelles sources images d'un ordre de réflexion plus élevé.

Ensuite, l'audibilité de chaque source image par un récepteur ponctuel est déterminée par un test de visibilité très coûteux en temps de calcul. Par exemple, à la figure 2.4.3, la source $S_{2,1}$ n'est pas visible par le récepteur R car le chemin d'ordre 2 entre celui-ci et la source S qui est modélisé par $S_{2,1}$ est coupé par un obstacle, la surface Surface3.

L'ensemble infini de ces sources représente toutes les réflexions spéculaires possibles de la source au récepteur. En pratique, suite au coût élevé des tests de visibilité, la génération des sources images s'arrête habituellement à un ordre

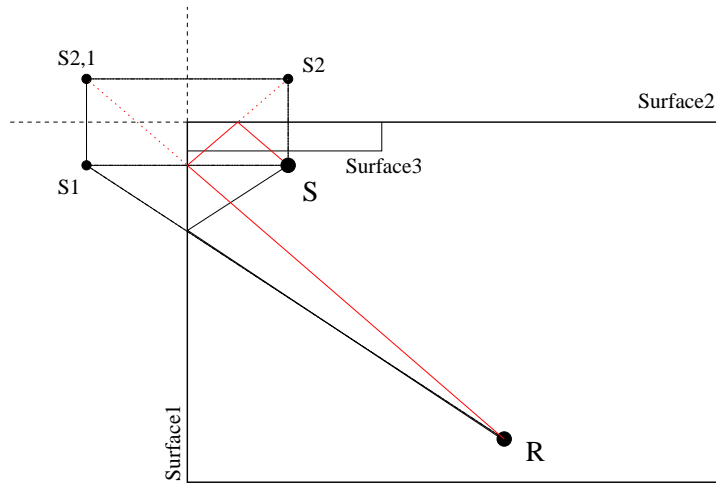


FIGURE 2.4.3 – Représentation de la méthode des sources images en 2D. La source S se réfléchit notamment sur la surface2 qui donne naissance à la source d'ordre 1 $S2$ puis $S2$ se réfléchit sur la surface1 et donne naissance à la source d'ordre 2 $S2,1$. La source $S2,1$ n'est pas audible pour R dans l'exemple car la surface3 se trouve sur le chemin de propagation entre S et R .

de réflexion inférieur à 10 pour obtenir les résultats en un temps raisonnable, ce qui tronque fortement la réponse impulsionnelle.

Chaque source image S_k d'ordre quelconque contribue au récepteur R en émettant une impulsion en $t = 0$ qui arrive au récepteur en

$$t_{S_k} = \frac{d_k}{c}$$

où d_k est la distance parcourue entre S_k et R et c est la vitesse du son dans le milieu de propagation. Au récepteur, l'énergie de l'impulsion est réduite par absorption dans le milieu de propagation et par absorption sur les surfaces, ce qui a également pour effet d'étaler cette impulsion puisque l'absorption dépend de la fréquence.

En pratique, ce modèle est applicable pour des réponses impulsionnelles courtes ou des salles de géométrie simple ne comportant que des réflexions spéculaires.

2.4.5 Tir de faisceaux

Le tir de faisceaux est une modification du tir de rayons issue de l'imagerie de synthèse [65]. Cette modification propage des faisceaux (figure 2.4.4), et non plus de fins pinceaux, afin de pallier aux erreurs introduites par l'épaisseur nulle des rayons [98].

Le choix de la forme du faisceau est important :

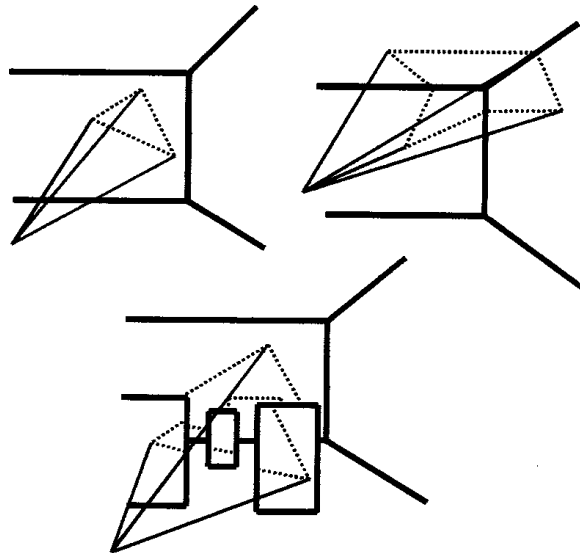


FIGURE 2.4.4 – Exemple de faisceau et les différents façons dont il peut illuminer les surfaces. Extrait de [42].

- Si les faisceaux se recouvrent à l’émission²⁰, certains chemins de propagation seront comptabilisés plusieurs fois.
- Si les faisceaux ne couvrent pas toute la surface d’émission de la source, certains chemins de propagation ne seront pas détectés.
- Si les faisceaux ne se recouvrent pas et couvrent l’entièreté de la surface de la source²¹, tous les chemins de propagation sont détectés à condition que la propagation des faisceaux soit opérée de façon exacte [42].

Malheureusement, la propagation exacte des faisceaux peut devenir complexe et très coûteuse en calculs s’ils sont réfléchis sur plusieurs surfaces.

La simulation des réflexions diffuses est plus difficile à mettre en œuvre que pour le tir de rayons et peut se faire en divisant les cônes incidents lorsqu’ils atteignent des surfaces diffusantes [37]. La diffraction d’arêtes peut être modélisée de différentes façons notamment :

- Par Funkhouser dans [55] qui génère, à chaque arête diffractante, un nouveau cône qui englobe tous les rayons prévus par la théorie géométrique de la diffraction.
- Par le modèle UTD (Uniform Theory of Diffraction) [85] qui est l’un des plus courants en acoustique géométrique et qui est appliqué par Taylor [159] au tir de frustrum [93], une version approchée du tir de faisceaux.
- En se basant sur le principe d’incertitude d’Heisenberg [150][149].
- En séparant les parties spéculaire et diffuse lors de la réflexion [51] et en faisant varier le coefficient de diffusion quand les pyramides frappent les

20. Par exemple, en utilisant des cônes [165][166][114].

21. Par exemple, en utilisant des pyramides [102][50].

surfaces à proximité des bords.

2.4.6 Radiosité

A l'origine, la méthode de la radiosité²² a été utilisée en éclairage, en synthèse d'image [60] et en thermique. Elle résout l'équation de propagation lumineuse, ou de rayonnement dans le cas thermique, en modélisant les échanges d'énergie irradiée entre des surfaces totalement diffusantes. Sa particularité dans ces domaines est de négliger le temps de propagation de la lumière, ce qui n'est pas valable en acoustique. Pour l'acoustique des salles, Kuttruff a dérivé de nouvelles équations [90][91] en intégrant la dépendance temporelle.

Hormis pour des cas simples, la résolution nécessite l'utilisation de techniques numériques :

1. Les surfaces de la salle sont discrétisées en éléments de surface et un facteur de forme B_{ij} est calculé pour chaque paire de ces éléments.
2. L'énergie émise par la source est ensuite échangée entre chaque élément de surface jusqu'à atteindre un critère d'arrêt.
3. Lorsqu'ils atteignent le récepteur ponctuel, ces échanges énergétiques sont pris en compte avec leur temps d'arrivée ainsi que l'absorption par les surfaces et le milieu de propagation.

En acoustique des salles, cette méthode a été relativement peu étudiée et utilisée²³ en raison de l'hypothèse de réflexions totalement diffuses et du coût très élevé du calcul des facteurs de formes qui caractérisent l'échange d'énergie entre les surfaces.

Récemment, Siltanen a introduit une généralisation de la méthode de la radiosité appelée « méthode de transfert de radiance acoustique » qui modélise les types de réflexions spéculaire et diffuse à l'aide de fonctions de distribution de réflexion bi-directionnelle BRDF [143][142].

Le calcul des facteurs de forme ou des BRDFs reste dépendant de la position de la source. Antani et al. utilisent le concept de « transfert de radiance acoustique direct à indirect » [17] pour supprimer cette dépendance dans le cas de réflexions purement diffuses et éviter ainsi le recalcul des facteurs de formes lors du déplacement de la source et du récepteur.

22. Cette méthode est aussi appelée radiant exchange [102], integral equation method [91], intensity-based boundary element method [54] ou radiosité acoustique pour traduire la dépendance temporelle de la version acoustique [115].

23. Lebot et Coquillet la comparent au tir de rayons [95], Lewers l'utilise pour le calcul de la partie tardive des échogrammes dans une méthode hybride [102].

2.4.7 Modèle de diffusion

Le modèle de diffusion est basé sur l'analogie entre la propagation de l'énergie sonore dans une salle aux parois diffusantes et la diffusion de particules se propageant dans un milieu diffusant [110]. Ce modèle dont la variable est la densité de l'énergie sonore a été introduit par Ollendorff [117] et des solutions analytiques peuvent être obtenues pour des géométries simples [119]. Mais, c'est surtout l'utilisation de la méthode des éléments finis pour résoudre ce problème (similaire à la conduction thermique dans un solide) qui l'a rendue populaire [164].

A partir de ce modèle numérique [164], divers phénomènes physiques affectant la propagation sonore dans les salles ont pu être pris en compte : transmission par les ouvertures [23] ou à travers des parois [20], absorption atmosphérique [21] et matériaux possédant des coefficients d'absorption élevés [22][76].

L'équation de diffusion est moins coûteuse à résoudre numériquement que l'équation de transport et *a fortiori* l'équation de propagation. De plus, le maillage du domaine de propagation peut être très grossier car il n'est plus lié à la longueur d'onde, avec des mailles d'une taille de l'ordre du libre parcours moyen²⁴.

La décroissance énergétique peut être obtenue en quelques dizaines de secondes y compris pour des géométries complexes impliquant de nombreux couplages entre salles [120]. Néanmoins, ce modèle n'est valable que lorsque la salle est mélangeante [110] et ne permet pas d'évaluer la décroissance temporelle de l'énergie sonore lorsque les réflexions des parois de la salle sont majoritairement spéculaires [53]. De plus, les premières réflexions ne sont pas correctement simulées (le modèle fait l'hypothèse que le mélange est instantané dans la salle), limitant ainsi son application dans le cadre de l'acoustique des salles et l'auralisation.

2.5 Conclusion

Le calcul du champ sonore en acoustique des salles par résolution analytique de l'équation de propagation de l'onde sonore n'est pas envisageable pour les salles réelles. Pour résoudre ce problème, diverses méthodes de simulation numériques ont été développées dont les principales sont classées en méthodes ondulatoires ou énergétiques selon qu'elles résolvent la propagation sonore en prenant en compte ou non le caractère ondulatoire de la propagation.

Les méthodes ondulatoires (*cfr.* tableau 2.5.1) résolvent numériquement l'équation de propagation sonore en tenant compte des effets de phase. Cependant, en général, ces méthodes souffrent d'un temps d'exécution élevé, voire

24. Distance de parcours moyenne entre deux réflexions.

très élevé, qui augmente avec la fréquence, et d'une consommation mémoire importante. Ce qui fait qu'en pratique, même si les résultats sont valides pour toutes les fréquences, les simulations se limitent aux basses fréquences suite à la dépendance fréquentielle du temps d'exécution. Il est à noter que la résolution peut s'effectuer dans le domaine fréquentiel ou temporel selon la méthode utilisée et que, pour certaines méthodes, notamment FEM et BEM, les deux sont possibles. En acoustique des salles, la résolution temporelle est plus adaptée au calcul des réponses impulsionnelles et sera privilégiée en pratique.

Méthodes ondulatoires				
	FEM	BEM	FDTD	TLM et DWM
Validité	Théoriquement valable pour toute la bande de fréquence			
Limitations	Conditions aux limites difficiles à modéliser			
Durée	Très longue	Très longue	Longue	Longue
Consommation mémoire	Très élevée	Très élevée	Très élevée	Très élevée
Résultats	Réponse impulsionnelle ou fréquentielle			
Utilisation temps réel	Difficile	Difficile	Aux basses fréquences	

TABLE 2.5.1 – Résumé des caractéristiques d'intérêt des méthodes ondulatoires. A noter que pour ces méthodes, la consommation mémoire augmente avec la fréquence et la taille de la salle.

Les méthodes énergétiques (tableau 2.5.2) traitent la propagation de l'énergie sonore et par conséquent, ne tiennent pas compte des phénomènes d'interférences et de la phase (plus généralement). Par contre, elles ont l'avantage d'être plus rapides que les méthodes ondulatoires et d'avoir un temps d'exécution indépendant de la fréquence. Cependant, leur validité est limitée aux moyennes et hautes fréquences et les effets tels que la diffraction et les réflexions diffuses doivent être approchés par des artifices de calcul lorsque c'est possible.

Cette thèse s'intéresse aux méthodes énergétiques et en particulier à la technique du tir de rayons. Il s'agit d'une des méthodes de simulation les plus rapides de la partie tardive de la réverbération, qui tient compte des réflexions diffuses et sa consommation mémoire est parmi les moins élevées. Cependant, une simulation peut prendre plusieurs dizaines de minutes voire plusieurs heures selon la complexité de la salle et la précision souhaitée.

Dans le cas particulier de l'auralisation en temps réel, les réponses impulsionnelles sont obtenues en temps réel par des méthodes énergétiques en se limitant à la partie précoce de la simulation. Dès lors d'autres approches sont

utilisées pour la partie tardive telles que son précalcul par tir de rayons ou l'utilisation de modèles paramétriques dont le choix des paramètres pour une salle donnée est délicat et complexe.

Cette thèse va s'attacher à réduire le temps de génération de la partie tardive de l'échogramme sans nécessairement chercher à atteindre le temps réel. Pour ce faire, le chapitre suivant présentera plus en détail les principales méthodes d'accélération des méthodes de simulation énergétique basées sur l'acoustique géométrique.

Méthodes énergétiques					
	Rayons	SI	Faisceaux	Radiosité	Eq. de diffusion
Validité	En théorie, valable uniquement pour les fréquences $f > f_s$				
Limitations	Pas de diffraction simple	Pas de réflexions diffuses	Pas de réflexions diffuses	Pas de réflexions spéculaires	Limitée aux salles mélangeantes et les premières réflexions ne sont pas correctes
Avantages	Calcul de la réponse impulsionnelle tardive et des réflexions diffuses	Résolution spatiale et temporelle élevée	Permet la diffraction et bonne résolution spatiale et temporelle	Les facteurs de forme sont indépendants de la position du récepteur	Rapide et bonne gestion des locaux couplés
Rapidité	La plus élevée pour une réverbération tardive précise	Élevée mais croît rapidement avec l'ordre de réflexion	Élevée pour les premiers ordres de réflexion. Moins pour les ordres supérieurs	Précalcul extrêmement lent	Élevée
Occupation mémoire	Faible	Croît rapidement avec l'ordre de réflexion	Croît rapidement avec l'ordre de réflexion	Élevée	Plus faible que celle des méthodes ondulatoires
Résultats	Échogrammes dans plusieurs bandes de fréquences (plusieurs octaves)				
Utilisation temps réel	Pour un nombre de rayons extrêmement faible	Oui pour un ordre de réflexion faible	Pour un ordre de réflexion faible	Possible en précalculant les facteurs de forme	Non

TABLE 2.5.2 – Résumé des caractéristiques d'intérêt des méthodes énergétiques.

Chapitre 3

Méthodes d'accélération des simulations basées sur l'acoustique géométrique

3.1 Introduction

Dans leur version brute, les méthodes énergétiques basées sur l'acoustique géométrique qui ont été présentées au chapitre 2 sont parmi les méthodes les plus rapides pour obtenir une réponse impulsionnelle de salle. Cependant, le temps de résolution reste élevé pour générer des réponses impulsionnelles complètes. Afin d'accélérer ce processus, différentes techniques ont vu le jour dont les plus courantes sont :

- La considération d'hypothèses simplificatrices,
- L'exploitation d'informations sur la géométrie de la salle au moyen d'algorithmes spécifiques. Les plus courants partitionnent la salle en sous-espaces contenant un nombre réduit de surfaces du modèle géométrique.
- La parallélisation des algorithmes sur plusieurs processeurs et l'utilisation des capacités de traitement vectoriel des processeurs actuels tels que les unités SIMD des CPU et des GPU ¹.

Quant aux trois méthodes développées dans le cadre de cette thèse, elles sont basées sur une parallélisation par vectorisation de l'algorithme sur CPU (chapitre 5) et une utilisation multiprocesseurs, sur l'exploitation d'informations géométriques de la salle (chapitre 6) ainsi que sur une modification du récepteur et du nombre de rayons parcourant la salle en un instant donné (chapitre 7).

1. Les GPU sont des processeurs graphiques optimisés pour un traitement intensif des données en parallèle. La tendance actuelle est à l'ouverture de ce matériel aux algorithmes fortement parallélisables.

Dans ce chapitre seront, entre autres, présentées les notions nécessaires à la description de ces techniques d'accélération ainsi que leur application aux méthodes des sources images, du tir de faisceaux, de la radiosité ainsi qu'au tir de rayons sonores. Ensuite, le cas particulier du calcul du champ sonore en temps réel pour l'auralisation sera brièvement évoqué en fin de chapitre.

3.2 Principales notions utilisées pour la réduction du temps de calcul en acoustique des salles

Afin de comprendre les méthodes d'accélération présentées dans ce chapitre, quelques notions seront introduites ci-dessous. Ces notions portent sur la vectorisation (notions de SIMD², GPU³ et GPGPU⁴) et le partitionnement spatial (notions d'arbre BSP, d'octree et de BVH).

Il est à noter que la parallélisation du code par vectorisation permet de tirer parti des évolutions matérielles actuelles mais nécessite une modification en profondeur des algorithmes utilisés. En outre, les techniques de partitionnement spatial de salle présentées ci-dessous sont issues de la synthèse d'image et ont été transposées en acoustique des salles par plusieurs auteurs.

Passons maintenant à l'introduction des notions pré-requises pour la suite de ce chapitre.

3.2.1 Traitement en parallèle des données

Traditionnellement, les simulations s'exécutent sur un processeur de type CPU spécialisé dans l'exécution d'algorithmes séquentiels comportant un nombre élevé de branchements.

Il y a une dizaine d'années, le gain de puissance de calcul se faisait principalement par augmentation de la fréquence de fonctionnement du CPU et par optimisation de ses jeux d'instructions. Depuis que la montée en fréquence des processeurs se révèle plus difficile, la tendance actuelle est de traiter simultanément plusieurs instructions au moyen de l'intégration :

- De plusieurs cœurs d'exécution par processeur.
- D'unités spécialisées en traitement vectoriel pour chaque cœur du processeur. Ces unités SIMD [10] appliquent une même instruction simultanément à plusieurs données. Pour les processeurs les plus courants⁵, ces

2. Single Input Multiple Data.

3. Graphics Processing Units.

4. General Purpose computation on Graphics Processing Units.

5. Intel et AMD.

jeux d'instructions se nomment SSE, SSE2,... et AVX⁶ et traitent des vecteurs de 128 bits (SSE) et des vecteurs de 256 bits (AVX).

A la différence des unités de traitement vectoriel, chaque cœur d'exécution possède l'ensemble complet des fonctionnalités des processeurs et gère efficacement les branchements divergents.

Pour utiliser les unités de traitement vectoriel, l'algorithme doit être adapté pour mettre les données sous forme de vecteurs⁷ et éliminer le plus possible de branchements divergents.

D'autres types de processeurs que les CPUs se sont spécialisés dans le traitement de problèmes massivement parallèles. Par exemple, en synthèse d'image, les **GPU** sont des processeurs dédiés à la rasterisation⁸ [121] de modèles géométriques 3D comportant de nombreuses primitives⁹. Ce type d'architecture qui possède une bande passante très élevée mais aussi un temps de latence élevé était complexe à utiliser dans d'autres domaines d'applications. Cependant, ces architectures ont récemment évolué et se sont ouvertes au traitement des applications massivement parallèles. Elles sont constituées de nombreuses unités de traitement vectoriel et de ce fait sont fortement influencées par les branchements divergents. Ce traitement à base de GPU est repris sous le vocable GPGPU.

Savioja dresse l'état des lieux de son utilisation en acoustique des salles dans [130].

3.2.2 Exploitation d'informations sur la géométrie de la salle

Dans les méthodes géométriques utilisées en acoustique des salles, la majeure partie du temps de calcul est passée à parcourir la liste des primitives géométriques de la salle. Par exemple, pour le tir de rayons, la liste entière des surfaces est parcourue à chaque réflexion de rayon pour trouver celle sur laquelle il se réfléchira. Cependant, la plupart des surfaces pourraient ne pas être testées car elles sont trop éloignées du trajet du rayon.

Le tri sur les surfaces d'intérêt est le plus souvent effectué sur base d'un partitionnement spatial de la salle en sous-espaces contenant un nombre limité de surfaces et parfois sur la base de leur visibilité à partir d'un point ou d'une région de la salle :

6. Disponibles sur les processeurs Intel.

7. Cette mise en forme peut présenter un surcoût non négligeable.

8. La rasterisation est la conversion d'une image vectorielle en image matricielle, typiquement pour générer l'ensemble des pixels à afficher sur un écran à partir d'un modèle géométrique en 3D.

9. Une primitive géométrique est le plus petit élément atomique d'intérêt. En synthèse d'image, il s'agit le plus souvent de triangles mais il peut s'agir de points, lignes ou surfaces quelconques.

- Les techniques les plus courantes de partitionnement spatial sont les arbres BSP¹⁰, les octrees et les arbres BVH¹¹. Leur coût total est celui de la traversée de l'arbre plus celui du test des surfaces appartenant aux feuilles traversées. Ces structures sont présentées aux points 3.2.2.1 à 3.2.2.3. Le lecteur intéressé peut consulter [64] pour une étude plus détaillée ainsi que [181, 13, 180] pour une technique d'optimisation de la génération de ces arbres sur GPU.
- Les différentes techniques de visibilité peuvent être classées en quatre catégories selon leur précision sur la détection des primitives visibles et cachées [84]. Le lecteur intéressé en trouvera un état de l'art dans [36].

3.2.2.1 Arbres BSP

Le partitionnement binaire de l'espace (**BSP**) [109] sépare récursivement la salle en deux parties au moyen d'hyperplans jusqu'à satisfaire un critère d'arrêt. Celui-ci fixe habituellement le nombre de surfaces contenues dans chaque sous-espace. Ces hyperplans sont des plans dans le cas d'un espace à trois dimensions et des lignes dans le cas d'un espace à deux dimensions.

L'orientation et la position de ces hyperplans sont critiques pour obtenir de bonnes performances et sont choisies de façon à minimiser une fonction de coût. En règle générale, les performances sont meilleures lorsque l'arbre est équilibré.

Lors de la génération de l'arbre, satisfaire la fonction de coût pour une orientation quelconque des hyperplans peut être complexe et lente, amenant à des temps de génération très longs. Ceux-ci peuvent être fortement réduits¹² grâce aux arbres sous-optimaux les plus utilisés : les arbres Kd¹³ [109] qui imposent que les hyperplans soient alignés selon les axes.

Il est à noter qu'un algorithme d'arbre BSP compétitif avec les arbres Kd est présenté dans [71] même si son temps de génération reste supérieur d'un facteur 10.

Un exemple d'arbre Kd en deux dimensions est donné à la figure 3.2.1 :

1. La scène comporte un nœud unique pour toute la salle et ses feuilles sont constituées par l'ensemble des primitives de la salle.
2. Un premier segment de droite sépare la salle en deux et la racine de l'arbre obtient comme fils les deux sous-espaces situés de part et d'autre du segment de droite. Les feuilles sont réparties selon leur appartenance à ces sous-espaces.

10. Binary Space Partitioning.

11. Bounding Volume Hierarchy.

12. Moins d'une demi seconde pour 600 triangles [71].

13. K dimensional tree ou Kd-tree.

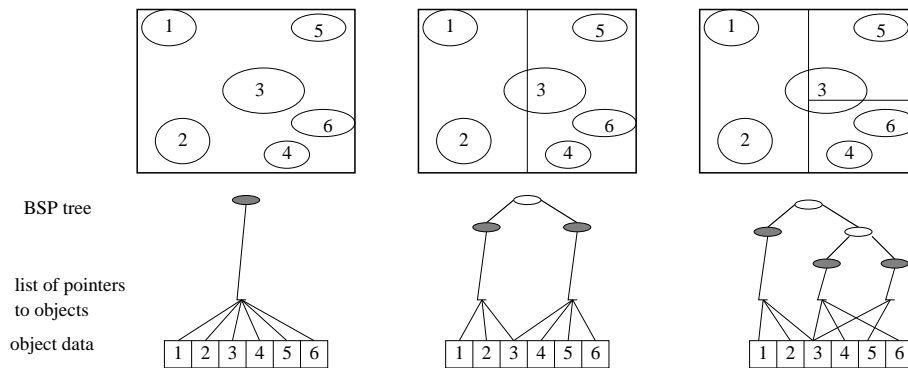


FIGURE 3.2.1 – Exemple de partitionnement par arbre Kd en 2D, extrait de [64].

3. La séparation au moyen de segments de droite est répétée pour chaque sous-espace jusqu'à satisfaire un critère d'arrêt généralement basé sur le nombre maximum de feuilles attachées aux nœuds.

On peut noter qu'une surface peut être testée plusieurs fois ou subdivisée en sous-surfaces convexes si elle appartient à plusieurs feuilles.

En synthèse d'image, l'utilisation de ces arbres est évitée dans les scènes dynamiques¹⁴ suite au coût élevé des mises à jour de l'arbre [177]. En acoustique, les contraintes temps réel sont plus lâches pour la partie tardive que pour la partie précoce et les arbres BSP ont récemment été utilisés [139] car leur accélération compense le temps de régénération. La prise en compte des scènes dynamiques en acoustique des salles permet de :

- modéliser des parties mobiles de la scène telles que des panneaux orientables (abasons) ;
- comparer l'influence des modifications sur l'acoustique de la salle ;
- impacter une gamme d'applications plus étendue que le déplacement des sources et récepteurs lors d'une auralisation.

3.2.2.2 Octrees

Un octree est une structure de données de type arbre dont chaque nœud peut compter jusqu'à huit enfants, comme illustré à la figure 3.2.2. Il partitionne de façon récursive un espace à 3 dimensions en huit sous-espaces appelés octants ou « voxels » [11, 58, 126]. Chaque voxel est associé aux surfaces qu'il contient partiellement ou entièrement. Le partitionnement s'arrête dès satisfaction d'un critère d'arrêt¹⁵.

Appliqué au tir de rayons en acoustique des salles, ses performances sont

14. Une scène est dynamique lorsque sa géométrie évolue au cours du temps.

15. Lorsque le nombre de surfaces dans chaque voxel est inférieur à une valeur donnée.

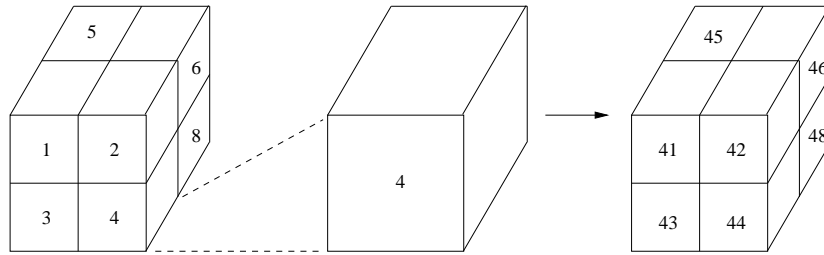


FIGURE 3.2.2 – Exemple d’octree. Une première boîte est décomposée en huit octants. Ensuite, chaque octant peut lui même est décomposé en huit autres octants. Extrait de [64].

inférieures aux arbres Kd mais sa mise à jour est plus rapide [137] et ils permettent l’insertion, la manipulation (rotation, translation, mise à l’échelle) et la suppression rapides des polygones de la scène. La méthode la plus rapide pour accéder à ce type de modèle en cellules est le hashage spatial (Spatial Hashing ou SH) [139]. Il est à noter qu’un même objet peut être testé plus d’une fois s’il appartient à plusieurs voxels.

3.2.2.3 Volumes englobants hiérarchisés

La hiérarchisation par volumes englobants (**BVH**) regroupe un ensemble réduit de primitives géométriques dans des volumes. Ces volumes sont englobés récursivement dans d’autres volumes jusqu’à obtenir un unique volume englobant à la racine de l’arbre [64][59]. Cette structure est illustrée à la figure 3.2.3 avec au plus deux fils par nœuds.

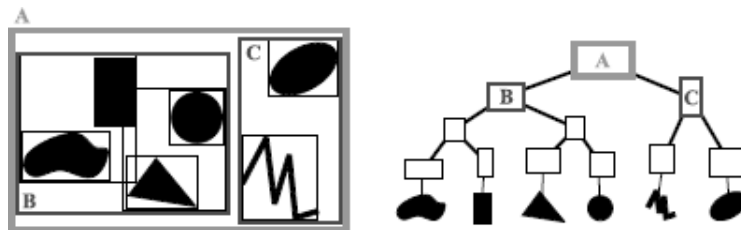


FIGURE 3.2.3 – Exemple d’arbre BVH dans lequel chaque nœud possède au plus deux fils. Lors de sa construction, chaque primitive est entourée par une boîte. Ensuite, ces boîtes sont groupées par paires et englobées par une nouvelle boîte. Cette opération est répétée jusqu’à obtenir la boîte englobante unique « A ». Extrait de [63].

En synthèse d’image, l’avantage de cette structure par rapport aux arbres BSP est sa plus grande facilité de mise à jour lors d’un changement de géométrie, ce qui en fait une technique plus adaptée à une scène dynamique [172][177]

qu'un arbre BSP. Cependant, la génération de ces arbres ne donne pas de très bons résultats en présence de surfaces de tailles très différentes comme c'est le cas en acoustique de salle.

Une méthode récente donne de meilleurs résultats [123, 151] mais les primitives peuvent être testées plusieurs fois contrairement à la méthode classique.

3.3 Principales méthodes d'accélération de la méthode des sources images

Les méthodes d'accélération des sources images se concentrent principalement sur la réduction du coût des tests de visibilité des sources images qui composent la majeure partie des coûts de cette méthode. Ce coût croît avec le nombre de surfaces de la salle et l'ordre de réflexion maximum. Pour éviter le test systématique de la liste entière des surfaces, plusieurs techniques ont été utilisées dont :

- Les arbres BSP dans [136] qui mènent à une complexité logarithmique sur le nombre de surfaces.
- La voxelisation avec hashage spatial [139].
- Les algorithmes de visibilité dans [30][31]. Ils sont comparés à l'algorithme du tir de faisceaux accéléré [92] pour un ordre de réflexion 3 et des salles composées d'un millier de triangles et fournissent une accélération d'ordre 10 à 20X. Une description complète de l'utilisation de cette méthode sur GPU pour un système interactif est donnée dans [158] et un mécanisme d'adaptation au changement de scènes est brièvement donné dans [108].
- Un tir de rayons d'ordre¹⁶ 1 accéléré par un arbre BVH pour estimer la visibilité des sources images. Les rayons sont issus de chaque source image et détectent les surfaces qui interviennent dans les réflexions entre la source et le récepteur [157], ce qui permet de générer les sources images visibles. Cette méthode permet de traiter en temps réel des modèles très complexes jusqu'à un ordre de réflexion de 2 ou 3 avec de la diffraction d'ordre 1.
- Des tables de correspondance¹⁷ et une méthode de tri utilisées par [106] pour éviter le calcul des opérations mathématiques les plus fréquentes qui sont soit redondantes, soit inutiles dans le cas d'une salle parallélépipédique. L'exemple fourni par McGovern spécifie un gain de 8X.

Ces techniques d'accélération permettent la simulation en temps réel pour des salles moyennement complexes et un ordre de réflexion d'ordre 3 mais la

16. L'ordre d'un tir de rayons est défini par le nombre maximum de réflexions subies par les rayons. Après ce nombre de réflexions, les rayons sont arrêtés.

17. Look-up tables.

simulation rapide d'échogrammes complets reste toujours hors de portée.

En pratique, le temps de simulation est souvent réduit en limitant l'utilisation de la méthode des sources images à la partie précoce de la réponse impulsionnelle tandis que la partie tardive est simulée par une autre technique telle que le tir de rayons [168], la radiosité ou à partir d'une estimation de la décroissance énergétique basée sur la méthode des sources images [96][97].

3.4 Principales méthodes d'accélération du tir de faisceaux

Le coût du tir de faisceaux exact¹⁸ [42] est principalement dû à leur découpage lors des réflexions et est amplifié par le fait que le nombre de faisceaux augmente à chaque découpe.

Les techniques mises en œuvre pour réduire le coût de ces opérations utilisent principalement des hypothèses simplificatrices sur les intersections entre les faisceaux et les surfaces :

- Les faisceaux sont approximés par leur axe médian lors de la recherche d'intersection avec les surfaces [102][50]. Cette approximation néglige des chemins de propagation importants ce qui introduit rapidement des erreurs non négligeables. Farina propose de compenser ces erreurs en appliquant une correction énergétique à la fin de la réverbération, cependant cette correction est très délicate à mettre en œuvre.
- Les faisceaux sont approchés par des frustra¹⁹ où chaque frustrum est prédivisé en plusieurs sous-frustrum qui seront réfléchis indépendamment. Cette technique illustrée à la figure 3.4.1 est introduite en acoustique par Lauterbach [93]. Un rayon est associé à chaque sous-frustrum et ceux-ci rencontrent une surface si ce rayon la touche, comme illustré à la figure 3.4.2 b). Dans cet exemple, le tir de frustra sous-estime l'intersection avec la surface 1 et surestime l'intersection avec les surfaces 2 et 3. Le tir de frustra ne garantit pas une réflexion ou un découpage exact de chaque frustrum, négligeant ainsi une partie des chemins de réflexions valides.

Ce tir de frustra peut être accéléré au moyen :

- D'un arbre BVH dont la traversée est accélérée en traitant vectoriellement les rayons supports par paquets.
- D'une subdivision adaptative en sous-frustrum qui dépend de la complexité locale du modèle géométrique de la salle [32]²⁰.

18. Le tir de faisceau est qualifié d'exact quand les faisceaux sont découpés et réfléchis correctement sur les surfaces.

19. Frustrum au singulier et frustra au pluriel.

20. La gestion de la diffraction y est également introduite.

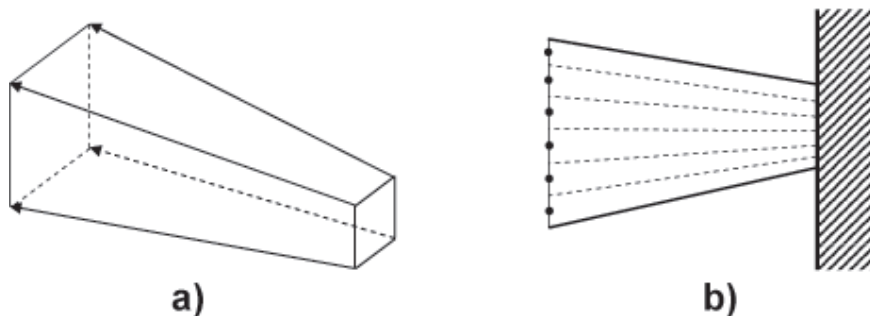


FIGURE 3.4.1 – a) Exemple de frustrum carré et b) un exemple de subdivision du frustrum en sous-frustra. Extrait de [93].

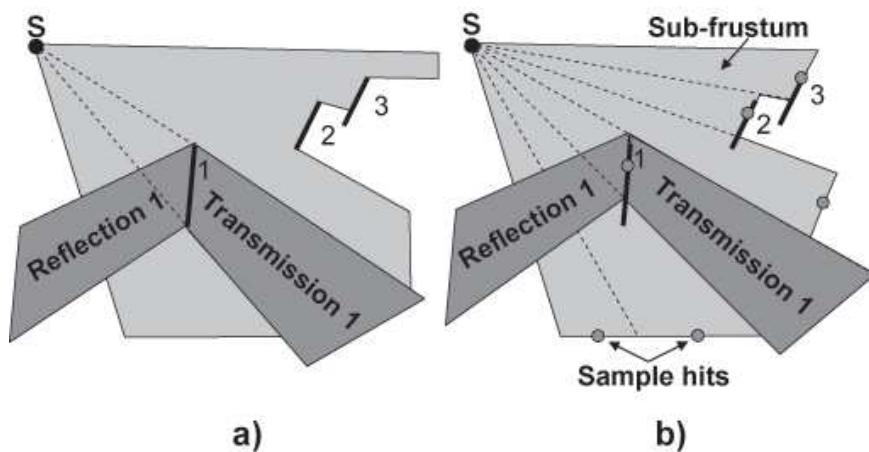


FIGURE 3.4.2 – Illustration du découpage a) du tir de faisceaux et b) du tir de frustra par les surfaces. Illustration issue de [93].

Le tir de frustra fournit des résultats proches de ceux du tir de faisceaux exact basique avec un gain de temps compris entre 5 et 22 [93].

D'autres techniques sont plus axées sur l'optimisation pour un récepteur mobile :

- Utilisation d'un arbre BSP dans une salle composée de multiples locaux intérieurs [55]. Cet arbre sert principalement à la construction d'un arbre de faisceaux précalculé pour un parcours, un déplacement du récepteur d'un local à l'autre en temps réel.
- Exploitation de la cohérence spatiale pour un récepteur mobile dans [92]. Un arbre de faisceaux, dont la construction est accélérée par un arbre Kd, est également utilisé avec un tir de faisceaux approché et limité aux réflexions spéculaires. Lorsque le récepteur se déplace, l'algorithme réutilise et met à jour les chemins de propagation non valides obtenus pour la position du récepteur précédente. Cette technique permet de

traiter en temps réel des modèles simples avec un ordre de réflexion faible (ordre 3 jusqu'à un millier de polygones) mais le temps nécessaire à la mise à jour croît très rapidement avec l'ordre de réflexion. Le temps de calcul augmente avec la densité d'occlusion des surfaces.

Ces deux dernières techniques ne sont pas utiles pour accélérer un tir de faisceaux pour des sources et des récepteurs fixes.

3.5 Principales méthodes d'accélération de la radiosité

Le coût de la méthode de la radiosité est principalement dû au calcul des facteurs de forme ou des BRDFs dans le cas de la méthode de transfert de radiance acoustique.

Pour réduire ce coût, Tsingos [160] utilise un système de radiosité hiérarchique avec une finesse variable de la subdivision en éléments de surface. Cette finesse dépend d'un critère d'erreur et s'adapte à la complexité géométrique de la zone traitée.

Une autre technique [115] utilise une discrétisation plus faible lorsque les éléments de surface agissent comme des sources et plus élevée lorsqu'ils agissent comme des récepteurs. De plus, les facteurs de forme sont approximés avec les hypothèses suivantes :

- Les coefficients de réflexion sont indépendants de l'angle d'incidence,
- Les enceintes sont convexes et vides,
- Les sources sont ponctuelles et omnidirectionnelles.

Cette méthode a été testée sur des salles de complexité moyenne [68] et fournit des résultats en bonne concordance avec un tir de rayons totalement diffus. Cependant, l'évaluation des facteurs de forme reste extrêmement coûteuse.

3.6 Principales méthodes d'accélération du tir de rayons sonores

L'algorithme de base du tir de rayons sonores (ou du tir de particules²¹) passe la majorité du temps de calcul²² à rechercher les intersections entre les

21. La différence entre le tir de rayons et de particules repose sur la méthode de détection. Le tir de particules comptabilise le nombre de frappes sur un détecteur et somme les énergies qui traversent le récepteur indépendamment de la distance parcourue par ces particules [147][148].

22. Mesuré à 90% du temps de calcul pour l'implémentation dans le module initial du tir de rayons utilisé.

rayons et les surfaces. Pour ce faire, la liste des surfaces est entièrement testée à chaque réflexion d'un rayon.

Lorsqu'un échogramme complet est généré, le nombre de réflexions moyen peut être très élevé. De plus, on doit émettre beaucoup de rayons pour compenser la croissance de l'erreur statistique avec la durée de l'échogramme.

La génération de l'échogramme peut être plus rapide en accélérant l'étape de réflexion des rayons et en réduisant le nombre total de réflexions, ce qui peut se faire en :

- évitant le parcours de la liste entière des surfaces grâce à l'exploitation d'informations géométriques (par exemple au moyen d'arbres BSP, BVH ou de voxels) ;
- diminuant le nombre de surfaces nécessaires pour modéliser la salle tout en conservant un comportement acoustique équivalent [142] ;
- effectuant le test d'intersection simultanément pour plusieurs rayons ou plusieurs surfaces grâce au traitement vectoriel sur CPU ou GPU ;
- minimisant le nombre de rayons tirés grâce au choix d'une taille de récepteur adéquate pour obtenir une erreur statistique acceptable.

Plusieurs de ces techniques peuvent être combinées pour obtenir un gain plus élevé.

L'augmentation du nombre de rayons peut aussi être due à la simulation brute des réflexions diffuses et de la diffraction par génération de nouveaux rayons à chaque réflexion diffuse ou diffractée. Cette croissance exponentielle du nombre de rayons peut être évitée, notamment grâce aux techniques suivantes :

- Les réflexions diffuses sont simulées en distribuant l'angle de réflexion des rayons incidents selon une loi de Lambert (un rayon incident donne un seul rayon réfléchi). Les réflexions partiellement diffuses sont également prises en compte en appliquant une probabilité de réflexion spéculaire ou diffuse à chaque rayon. Un avantage supplémentaire de cette technique est la prise en charge de toutes les bandes de fréquences en un seul tir [46].
- Les particules générées lors de la diffraction sont réunifiées au moyen d'une discrétisation des surfaces et des angles d'incidence des particules. Par contre, la consommation mémoire est très importante et empêche son utilisation pour les géométries complexes [122].

L'algorithme de diffusion développé par Embrechts [46] est inclus dans le tir de rayons utilisé pour cette thèse.

Les principales techniques d'accélération du tir de rayons sonores sont présentées ci-dessous.

3.6.1 Recherche d'intersections entre les rayons et les surfaces

Les techniques d'accélération du tir de rayons sonores à base d'arbres géométriques sont issues du tir de rayons en synthèse d'images où les modèles géométriques sont très complexes²³. Ces techniques cherchent à réduire le nombre de surfaces testées et sont présentées ci-dessous pour la synthèse d'images suivies de leur application en acoustique des salles.

3.6.1.1 En synthèse d'images

En synthèse d'images, les arbres Kd sont les plus utilisés mais récemment l'utilisation des arbres BVH a pris de l'ampleur pour les scènes dynamiques.

La traversée de ces arbres est accélérée par le calcul vectoriel en traitant les intersections par paquets de rayons cohérents²⁴ [173][28]. Si les rayons des paquets divergent, le traitement par paquets reste possible moyennant leur réorganisation en nouveaux paquets de rayons cohérents, ce qui implique un surcoût et rend ce traitement moins efficace [29]. Par contre si cette cohérence est faible ou nulle, ce traitement n'est pas profitable. Wald contourne cette limitation en traitant la traversée d'un arbre BVH par paquets de surfaces [171].

La traversée d'un rayon par paquets de surfaces n'est envisageable que si un nombre suffisant de nœuds ou surfaces peut être traité en même temps. Ceci ne convient pas aux arbres BSP à cause de leur nature binaire à leur nature binaire et leur tendance à générer des feuilles peu peuplées. Par contre, elle s'applique bien aux arbres BVH qui contiennent un nombre élevé d'éléments par volume englobant.

La génération des arbres BSP [181] et BVH [94] ainsi que leur traversée peut se faire sur GPU [125, 52, 69, 61, 124, 12].

3.6.1.2 En acoustique

Les arbres BSP (ou Kd) ainsi que les arbres BVH sont utilisés en acoustique depuis peu et très peu de données de performances sont disponibles pour effectuer une comparaison.

Les arbres **Kd** sont utilisés avec un tir de particules à l'université d'Aachen [99, 135, 139]. Les temps de calcul et les gains par rapport à l'algorithme non optimisé obtenus pour 4 salles de complexité croissante sont résumés à la figure 3.6.1 et au tableau 3.6.1. Dans [139], contrairement à l'accélération de la méthode des sources images, ces arbres sont remplacés par une technique de hashage spatial dont les performances sont inférieures en scènes statiques. Ce

23. Plusieurs dizaines ou centaines de milliers de triangles.

24. Les rayons sont cohérents s'ils empruntent des trajets dans des directions semblables

choix est fait car le temps de régénération de l'arbre complet dans les scènes dynamiques est compensé par le gain supérieur de la méthode. Par contre, les performances avec les arbres BSP dépendent de la densité moyenne de réflexion dans la salle [139].

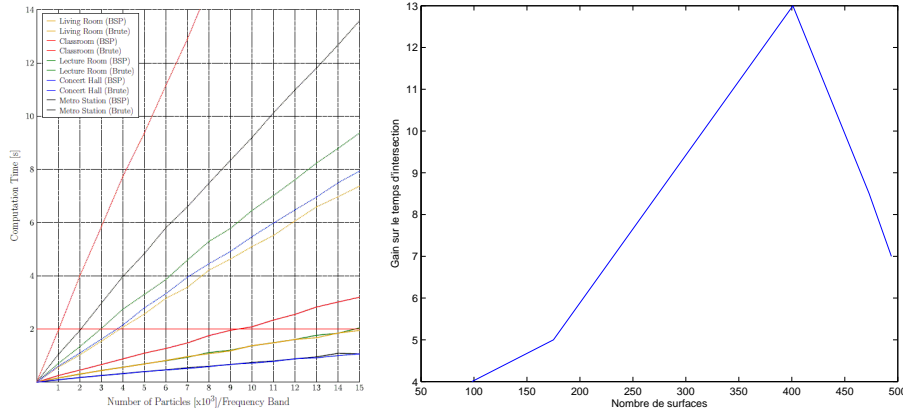


FIGURE 3.6.1 – a) Comparaison des temps de calcul pour un algorithme de tir de particules force brute et pour un algorithme accéléré avec un arbre BSP en fonction du nombre de particules tirées par bande d’octaves sur un core i7 2,8 GHz (4 CPU). b) Gains apportés par l’algorithme BSP par rapport à l’algorithme force brute en fonction du nombre de surfaces. Ces données sont obtenues par D. Schröder dans [139].

	Nombre de surfaces	Gains de temps
Living	98	4
Salle de lecture	175	5
Station de métro	401	13
Salle de classe	473	8,5
Salle de concert	494	7

TABLE 3.6.1 – Gains de temps obtenus en utilisant les arbres BSP sur des salles de grande complexité dans [139], page 154.

Les arbres **BVH** avec traversée par paquets de rayons sont utilisés dans un tir de rayons diffus [156] pour un ordre de réflexion maximum d’ordre 3 et plusieurs milliers de polygones. Malgré le faible ordre de réflexion, les performances souffrent déjà de la faible cohérence des rayons.

Les caractéristiques utilisés par Taylor [156] se rapprochent plus de celles du tir de rayons en synthèse d’images que de celles utilisées classiquement en acoustique des salles (tableau 3.6.2). Les temps de calcul sont donnés pour des simulations sur un ordinateur doté de 7 cœurs, ce qui rend la comparaison difficile avec d’autres méthodes.

	Synthèse d'images	Acoustique
Complexité de la salle	Très élevée	Faible à moyenne
Homogénéité des surfaces	Elevée	Faible
Nombre max. de réflexions	Faible	Elevé
Cohérence des rayons	Elevée	Faible

TABLE 3.6.2 – Comparaison des caractéristiques habituelles du tir de rayons en synthèse d'images et en acoustique.

Dans la littérature en synthèse d'images, les performances des arbres de partitionnement spatial sont étudiées et présentées pour des modèles de scènes très complexes avec un nombre très élevé de polygones aux dimensions homogènes, ce qui est rarement le cas en acoustique des salles. Dès lors, ces données ne sont pas directement transposables en acoustique des salles.

En outre, les algorithmes de traversées des arbres en acoustique n'utilisent pas les paquets de rayons vu leur peu de cohérence induite par l'ordre maximum de réflexions élevé et par la simulation des réflexions diffuses. Dans la littérature, l'utilisation des paquets de surfaces n'a pas encore été testée.

Hormis l'utilisation d'arbres BSP et BVH, d'autres techniques existent. Notamment dans le cas particulier d'une salle composée de nombreux locaux couplés, la propagation peut être décomposée en chacun de ces locaux en utilisant des **portails**²⁵ aux points de passage entre ces locaux. Les relations entre les locaux sont exprimées au moyen des graphes de scènes²⁶ [135, 99, 146, 138].

A noter que le tir de rayons sonores a été porté sur GPU [72, 127] mais il se limite aux réflexions spéculaires. Le lecteur intéressé par l'utilisation des GPU en acoustique des salles peut consulter [161, 130].

3.6.1.3 Exploitation d'informations sur la géométrie de la salle

Le temps de recherche d'intersections entre les rayons et les surfaces dépend du nombre de surfaces du modèle de la salle. Dans [142], le nombre de surfaces d'un modèle géométrique est réduit en conservant un comportement acoustiquement équivalent. L'intérêt de cette méthode est général et ne se limite pas au tir de rayons.

La difficulté dans cette méthode est de conserver un comportement acoustique identique en modélisant, par une seule surface plane de caractéristiques acoustiques uniformes, une section non plane faite de matériaux aux propriétés acoustiques différentes. Cette étape nécessite une mise à jour du coefficient

²⁵. Structure qui délimite la jonction entre deux zones de l'espace.

²⁶. Structure de données générale dont les noeuds contiennent la représentation spatiale d'une pièce et dont les liaisons entre les noeuds représentent les portails connectant les locaux.

d'absorption et du coefficient de diffusion, ce qui reste un sujet de recherches futures.

3.6.2 Minimisation des erreurs statistiques

Une technique d'accélération spécifique au tir de rayons sonores repose sur la diminution du nombre de rayons tirés compensée par l'utilisation d'un récepteur dont la taille varie afin de minimiser les erreurs sur les échogrammes.

En effet, avec un récepteur de taille constante, les erreurs croissent exponentiellement au fur et à mesure de la propagation des rayons. Elles sont dues à la diminution de la probabilité d'intersection entre les rayons et le récepteur. Puisque la probabilité d'intersection augmente avec la taille du récepteur, on peut choisir un récepteur plus grand pour réduire ces erreurs au prix d'une diminution de la résolution spatiale.

Pour la simulation d'échogrammes complets, le nombre de rayons à tirer dépend de la précision souhaitée en fin d'échogramme et par conséquent de la taille du récepteur. En effet, pour une précision donnée, choisir un récepteur de grande taille diminue le nombre de rayons à tirer, ce qui réduit la durée de la simulation. Ce principe est mis en œuvre par Lehnert qui utilise un récepteur de taille croissante afin de compenser l'augmentation de l'erreur tout au long de la propagation des rayons [98]. Cependant, rien n'est mis en œuvre pour gérer l'inclusion d'obstacles dans le récepteur.

D'après Lehnert,

$$r = l_{max} \sqrt{\frac{2\pi}{N}} \quad (3.6.1)$$

est le radius²⁷ minimal du récepteur pour que tous les rayons, émis selon une densité constante par angle solide, soient interceptés par ce récepteur. Dans cette équation, l_{max} est la longueur maximale d'un rayon et N est le nombre de rayons tirés. Il utilise cette formule en remplaçant l_{max} par la longueur actuelle du rayon lors de l'intersection.

L'auteur emploie également une correction de l'énergie afin de compenser un nombre de rayons trop faible en fin d'échogramme.

Un récepteur de taille variable est également utilisé dans [178] avec une croissance linéaire du radius selon

$$r = \log_{10}(V) d_{SR} \sqrt{\frac{4}{N}} \quad (3.6.2)$$

où V est le volume de la salle, d_{SR} est la distance source-récepteur.

Jiang choisit la taille d'un récepteur fixe pour minimiser les erreurs. Le choix de la taille de ce récepteur est lié à l'estimation de la densité de rayons

²⁷ Pour éviter toute confusion avec les rayons tirés, le rayon du récepteur sera dénommé « radius » par la suite.

sonores pour une salle parallélépipédique [74]. A noter que ces deux auteurs n'ont pas pour but l'accélération du tir de rayons mais la diminution des erreurs de propagation.

Un problème se pose lorsque le récepteur inclut des obstacles car le volume du récepteur n'est plus donné par celui d'une sphère pleine. Pour de petits récepteurs, cette possibilité est négligée car peu probable, mais ce n'est plus le cas lorsque le récepteur grandit. Un autre problème pour les grands récepteurs est de savoir à quel intervalle temporel la contribution du rayon doit être ajoutée. Ces deux points seront développés plus en détail au chapitre 7.

Néanmoins, cette idée de réduire le nombre de rayons en adaptant la taille du récepteur servira de base à la méthode développée au chapitre 7. L'originalité principale de notre méthode est la prise en compte de l'inclusion d'obstacles dans le récepteur ainsi que la maîtrise de la réduction du nombre de rayons.

3.7 Méthodes de mise à jour des réponses impulsionnelles en temps réel utilisées dans le cadre de l'auralisation

L'auralisation est la reproduction audible de données sonores obtenues à partir de données simulées, mesurées ou synthétisées [170]. En acoustique des salles, ces données sont les réponses impulsionnelles de la salle.

L'auralisation en temps réel est un domaine particulier qui nécessite la mise à jour en temps réel des résultats de simulation pour permettre le déplacement du récepteur, de la source et les changements de géométrie. Cette mise à jour est rarement possible pour l'entièreté de la réponse impulsionnelle sauf en posant des hypothèses très restrictives qui limitent fortement la qualité de la simulation.

La mise à jour est alors généralement séparée pour la partie précoce et la partie tardive de l'échogramme [170, 157].

Pour des applications professionnelles, on souhaite conserver la qualité des simulations aussi élevée que possible [26] tout en permettant un changement rapide de la position de la source et du récepteur. La méthode utilisée pour générer la partie tardive doit, pour bien faire, simuler correctement la diffusion et les salles au comportement acoustique particulier tel que l'écho flottant²⁸ ou la décroissance énergétique non exponentielle des réponses impulsionnelles.

Dans la littérature, les techniques les plus utilisées pour calculer le champ précoce sont les sources images, le tir de faisceaux et le tir de frustra tandis que

²⁸ L'écho flottant est une série de réflexions régulières et répétées de l'onde acoustique selon une direction privilégiée entre deux parois fortement réfléchissantes et parallèles. Cet écho est souvent perçu désagréablement comme un aller-retour répétitif du son.

le calcul du champ tardif repose sur deux approches : - soit les valeurs sont précalculées et chargées au besoin, - soit les valeurs sont calculées grossièrement et mises à jour progressivement.

Par exemple, les valeurs d'échogramme peuvent être précalculées en différents points de la salle par une méthode de tir de rayons ou de particules et être récupérées en fonction des besoins. Cette technique gère bien les récepteurs mobiles mais pas les sources mobiles ni les modifications de géométrie (Auralias [26, 1, 163]). Une autre possibilité est le calcul préalable des facteurs de forme ou des BRDFs pour calculer la partie tardive par une méthode de radiosité [162, 141, 17].

Le système RAVEN²⁹ utilise les mises à jours progressive du champ tardif. En premier lieu, la partie tardive est grossièrement calculée par tir de particules pour rester sous les 2 secondes de mise à jour puis elle est affinée en fonction du temps disponible [99, 134, 139].

Ces méthodes peuvent également faire appel à des hypothèses restrictives telles que :

- Une décroissance énergétique exponentielle (REsound [155], iSound [157]).
- Un tir de cônes sans décomposition lors des réflexions. Cette prise d'hypothèse est compensée par une correction énergétique difficile à mettre en œuvre (RAMSETE [7] et CATT [2]). Les déplacements du récepteur ne sont pas pris en compte en temps réel.

Les techniques développées dans cette thèse n'ont pas pour but de permettre la mise à jour en temps réel de la partie tardive de l'échogramme mais d'en accélérer la génération sans prendre d'hypothèses trop restrictives.

Notre objectif est de calculer des échogrammes acoustiquement équivalents à ceux générés par l'algorithme de base, mais pour une fraction du temps de calcul, sans néanmoins atteindre le temps réel. L'objectif visé est d'atteindre un ordre de grandeur de quelques secondes pour la modification des surfaces et de leurs propriétés acoustiques. Nous verrons au chapitre 8 qu'une série de tests sur l'utilisation conjointe des trois méthodes et de 16 threads sur 2 processeurs quadricoeur³⁰ E5520 à 2,2 GHz ont montré que le tir d'un million de rayons s'effectue en moins de 2 secondes pour les salles données en annexe A.

3.8 Conclusion

L'accélération des méthodes de simulation géométrique en acoustique des salles est axée sur la partie précoce de la réponse impulsionnelle. Or la partie tardive de l'échogramme est intéressante à simuler par une méthode avancée

²⁹. Université de Aachen, RWTH.

³⁰. Processeur 4 coeurs avec hyperthreading d'avant-dernière génération.

en particulier lorsque sa décroissance n'est pas exponentielle. Pour cela, la méthode brute du tir de rayons figure parmi les plus rapides mais pourrait encore être améliorée.

On retiendra de ce chapitre que les principales méthodes d'accélération du tir de rayons en acoustique des salles rencontrées dans la littérature sont :

- Le traitement vectoriel par GPGPU pour des réflexions purement spéculaires.
- L'utilisation d'un récepteur de grande taille fixe ou variant de façon continue pour réduire le nombre de rayons émis à partir de la source. Cependant, l'inclusion d'obstacles dans le récepteur est ignorée et le nombre de rayons tirés résulte d'un compromis portant sur la précision des parties précoce et tardive de l'échogramme.
- Le partitionnement géométrique de la salle au moyen de méthodes issues du tir de rayons en synthèse d'images qui diffère du cas acoustique en plusieurs points : modélisation complexe des salles, tailles des surfaces homogènes et traitement par paquets de rayons. La méthode la plus rapide actuellement est le traitement par arbre BSP [139] mais l'arbre doit être reconstruit en entier lors d'un changement de géométrie et sa traversée ne profite pas d'un traitement vectoriel.

Il est à noter que le parcours vectoriel des arbres de partitionnement spatial par paquets de rayons n'est pas intéressant en acoustique dû à la divergence élevée des trajets suivis par les rayons, suite au nombre élevé de réflexions et à la modélisation du phénomène de diffusion.

Dans cette thèse sont développées trois approches complémentaires basées sur le tir de rayons sonores et tenant compte des réflexions diffuses :

- Un traitement vectoriel par paquets de surfaces en utilisant les instructions SSE permettra d'atteindre un gain d'ordre 2 au chapitre 5.
- Dans le but d'obtenir une accélération élevée avec une structure partiellement modifiable et une compatibilité avec la vectorisation, une approche différente du partitionnement spatial est envisagée pour réduire le nombre de tests d'intersection entre les rayons et les surfaces. L'approche choisie se base sur la visibilité inter surfaces associée aux probabilités d'intersection entre les rayons et les surfaces. Au chapitre 6, nous montrerons que lorsque cette méthode est couplée à la vectorisation par paquets de surfaces, elle fournit une accélération d'un facteur compris entre 4 et 5, tout en permettant un recalcul des informations de visibilité en cas de modification partielle de la géométrie de la salle.
- Enfin, des récepteurs de taille variable seront utilisés. Contrairement aux méthodes décrites en 3.6.2, l'inclusion d'obstacles dans leur volume³¹ sera prise en compte. Au chapitre 7, nous montrerons que des résultats acoustiquement équivalents peuvent être obtenus pour une fraction du temps

31. Tout en restant conforme avec la théorie du tir stochastique de rayons.

de calcul (gain compris entre 3 et 6).
Avant de présenter ces méthodes et d'en évaluer les performances, le chapitre 4 décrira l'algorithme brut du tir de rayons qui servira de base d'implémentation et d'évaluation des performances des nouvelles méthodes.

Chapitre 4

Présentation de l'algorithme de base utilisant le tir de rayons sonores

4.1 Introduction

Avant de décrire les méthodes d'accélération développées dans le cadre de cette thèse, une vue globale de l'algorithme du tir de rayons¹ sera présentée. Cet algorithme servira de base de comparaison pour évaluer les méthodes d'accélération développées aux chapitres suivants.

Cet algorithme de base est un tir de rayons :

- stochastique² ;
- brut et séquentiel ;
- prenant en compte aussi bien les réflexions spéculaires que diffuses ;
- capable de traiter des surfaces planes convexes comportant un nombre quelconque de sommets (≥ 3) ;
- traitant toutes les surfaces lors de la recherche d'intersection avec un rayon ;
- utilisant des récepteurs sphériques³ de taille fixe.

La majeure partie du coût en temps de calcul des algorithmes de tir de rayons réside dans la recherche d'intersections entre les rayons et les surfaces.

Les points présentés dans ce chapitre sont :

- Une vue globale de l'algorithme séquentiel du tir de rayons qui comprend

1. Utilisé par le logiciel Salrev dans le cadre d'études acoustiques et comme module de pré-calcul d'échogrammes pour l'auralisateur développé dans le cadre du projet Auralias [1, 26].

2. Les rayons sont émis de la source aléatoirement selon une densité de probabilité spécifiée.

3. Omnidirectionnels et/ou directionnels.

- les modèles géométrique, environnemental et acoustique ainsi que ses paramètres, la présentation des résultats et le suivi des rayons à la section 4.2,
- La contribution des rayons au récepteur sphérique à la section 4.3,
 - La méthode d'intersection entre les rayons et les surfaces à la section 4.4,
 - La parallélisation du code, à la section 4.5.

4.2 Vue globale du tir de rayons séquentiel

Le schéma global de fonctionnement de l'algorithme est illustré à la figure 4.2.1 et est présenté dans cette section sans trop détailler.

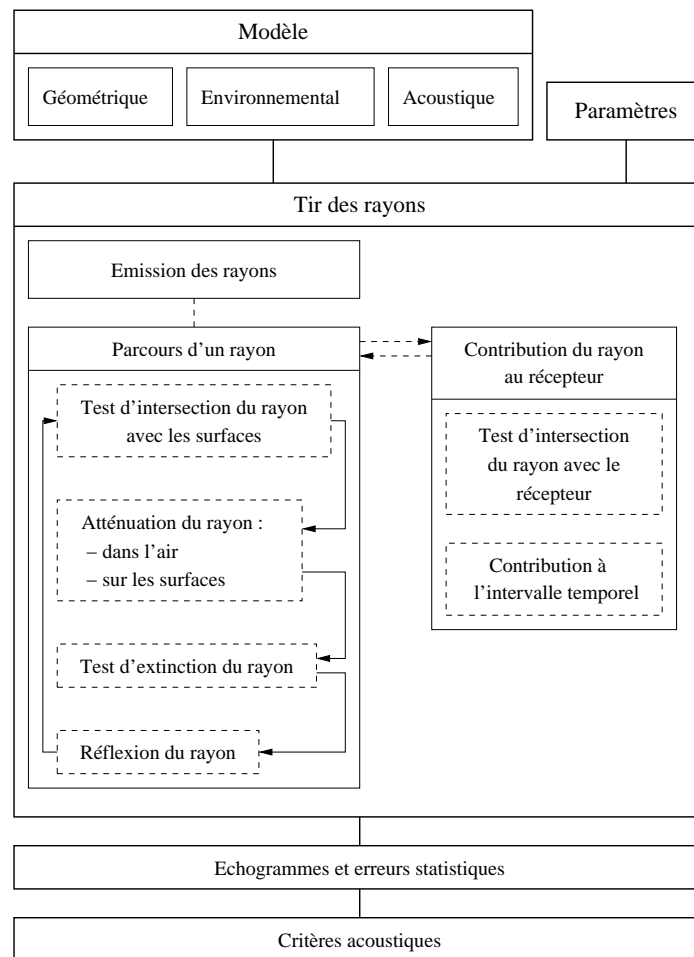


FIGURE 4.2.1 – Schéma global de fonctionnement du programme de tir de rayons.

Cet algorithme est soumis aux choix et aux hypothèses suivantes qui sont parmi les plus couramment rencontrés dans la littérature :

- Pour simplifier la recherche d’intersection entre les rayons et les surfaces, le modèle géométrique est composé de polygones convexes⁴,
- Les sources sont ponctuelles et omnidirectionnelles,
- Les récepteurs sphériques sont de taille fixe et peuvent être omnidirectionnels ou directionnels,
- Les réflexions peuvent être spéculaires, diffuses ou mixtes,
- Les caractéristiques acoustiques des matériaux sont données par bande d’octave.

Le schéma global est constitué du module de tir de rayons décrit à la sous-section 4.2.4 qui reçoit en entrées les données (le modèle de simulation et un ensemble de paramètres) décrites aux sous-sections 4.2.1 et 4.2.2 et qui fournit en sortie des résultats sous la forme d’échogrammes et de critères acoustiques, décrits à la section 4.2.3.

4.2.1 Le modèle de simulation

Le modèle de simulation reçu en entrée du module de tir de rayons comporte l’ensemble des données caractérisant la salle prise en compte :

- Le modèle géométrique de la salle qui est constitué d’un ensemble de surfaces qui peuvent s’intersecter et déborder⁵ de la salle par simplicité de conception, comme illustré à la figure 4.2.2.
- Le modèle environnemental qui décrit le milieu de propagation sonore caractérisé par sa vitesse de propagation du son, sa densité ainsi que son atténuation par bande d’octave.
- Le modèle acoustique qui comprend les propriétés acoustiques d’absorption et de diffusion associées au modèle géométrique ainsi que les caractéristiques acoustiques des sources et des récepteurs. A chaque surface sont associés un coefficient d’absorption $\alpha_{surf}(f)$ et un coefficient de diffusion $s_{surf}(f)$ par bande d’octave f . Une source est caractérisée par sa position, sa puissance par bande d’octave et un récepteur sphérique est caractérisé par sa position, son rayon et son orientation pour un récepteur directionnel (figure 4.2.3).

Les modèles géométriques utilisés en acoustique des salles sont des modèles simples de taille réduite par rapport à leurs homologues architecturaux. Ainsi, les détails d’une surface rugueuse peuvent être modélisés par une valeur adaptée du coefficient de diffusion [118]. En règle générale, ils sont composés d’au maximum quelques centaines de polygones.

4. C’est l’hypothèse la plus courante.

5. Ce qui empêche de déterminer l’intérieur de la scène par l’orientation des normales aux surfaces, comme c’est l’habitude en synthèse d’images.

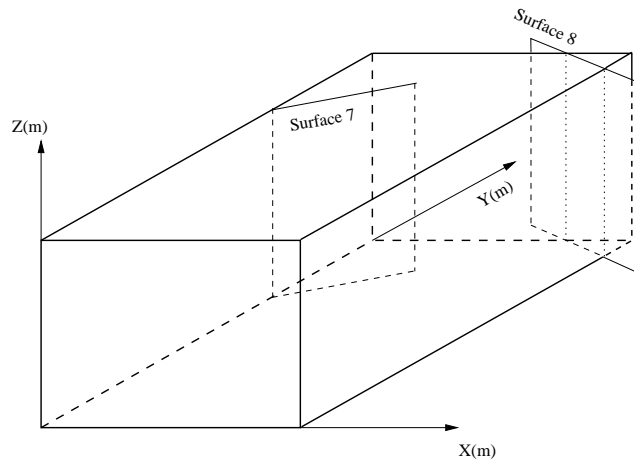


FIGURE 4.2.2 – Salle modélisée par huit polygones convexes dont la surface 8 est débordante. Dans ce cas, l’orientation des normales ne permet pas de définir l’intérieur et l’extérieur de la salle.

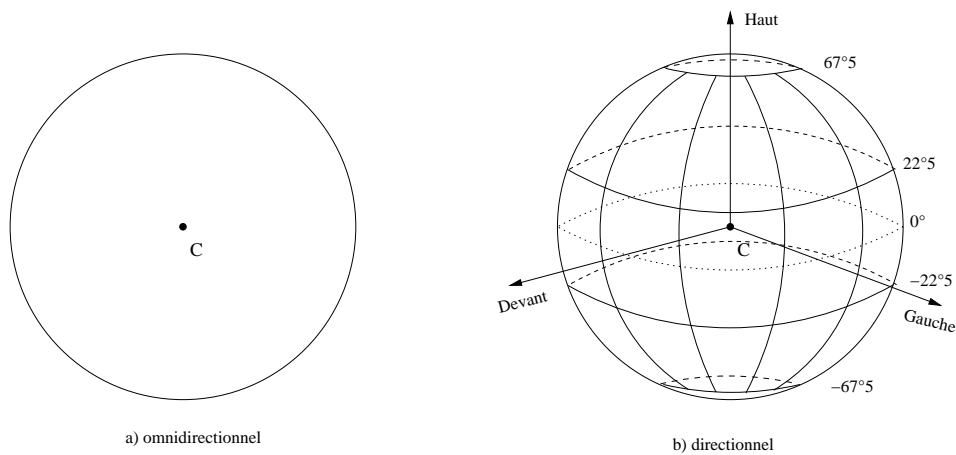


FIGURE 4.2.3 – Récepteur sphérique a) omnidirectionnel et b) directionnel avec 26 récepteurs de type angles solides et un système de vecteurs donnant son orientation.

4.2.2 Paramètres de simulation

L’algorithme du tir de rayons permet de choisir un certain nombre de paramètres de calcul. Ces paramètres ont principalement une influence sur le temps de calcul, la précision obtenue ainsi que sur la résolution spatiale et temporelle. Ils comprennent :

- Le nombre de rayons tirés par la source (plus il est important, plus les résultats sont précis mais plus la simulation sera longue).
- La longueur des intervalles temporels (par bande d’octave) dans lesquels

- les contributions des rayons seront sommées (plus elle est grande, plus la résolution temporelle des échogrammes est faible).
- Le nombre d’intervalles temporels est identique pour toutes les bandes de fréquences (ce paramètre influence la durée de la réponse impulsionnelle que l’on peut simuler).
 - Le critère d’extinction des rayons est identique pour toutes les bandes d’octaves. Sa valeur par défaut est fixée à -40dB⁶ d’atténuation de la puissance du rayon à l’émission.
 - Le nombre de bandes d’octaves qui est égal à 10 ou 8 si on néglige les bandes aux extrémités du spectre.
 - Le nombre d’angles solides qui peut être choisi à 1 (récepteur omnidirectionnel), 6 ou 26 (figure 4.2.3 b). Plus ce nombre est élevé, plus il faut tirer de rayons pour atteindre une précision donnée pour un secteur angulaire donné.

4.2.3 Présentation des résultats : Échogrammes et paramètres acoustiques

L’évolution temporelle de l’intensité sonore dans la salle est présentée sous forme d’un échogramme pour chaque bande d’octave, comme illustré à la figure 2.4.2.

Un ensemble de paramètres acoustiques caractérisant qualitativement l’acoustique d’une salle est calculé à partir de cet échogramme, suivant la norme ISO3382 [9]. Ces paramètres sont :

- Le niveau de pression sonore **SPL** (dB) qui est la pression sonore efficace en dB en régime établi avec pour valeur de référence $20\mu\text{Pa}$ RMS, c’est la somme de toutes les contributions arrivant au récepteur au cours du temps.
- Le temps de réverbération **TR30** (dB) est le temps nécessaire pour observer une diminution de 60dB dans l’intensité d’un son après arrêt de la source. Il est évalué à partir de la pente (entre -5 et -35 dB et rapporté à 60 dB) de la décroissance énergétique (intégration à rebours de l’échogramme).
- Le temps de décroissance précoce **EDT** (s) évalué à partir de la pente en 0 et -10 dB (extrapolé à 60 dB) de la décroissance énergétique.
- La définition **D50** (%) qui caractérise l’intelligibilité d’une source : elle est définie par le rapport entre l’énergie précoce et l’énergie tardive :

$$D50 = \frac{\int_0^{50ms} [g(t)]^2 dt}{\int_0^\infty [g(t)]^2 dt} * 100,$$

6. Le critère d’arrêt énergétique est aussi exprimé en un pourcentage de la puissance initiale des rayons et vaut par défaut 0.01%.

où $g(t)$ est la réponse impulsionnelle de la salle filtrée dans une bande d'octave.

- La clarté **C80** (dB), similaire au D50 pour les applications musicales, calculée par :

$$C80 = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{80ms} [g(t)]^2 dt}{\int_{80ms}^{+\infty} [g(t)]^2 dt} \right).$$

- Le temps central **Ts** (ms), qui caractérise aussi l'intelligibilité. C'est le barycentre énergétique de la réponse impulsionnelle calculé par :

$$T_s = \frac{\int_0^{+\infty} t \cdot [g(t)]^2 dt}{\int_0^{+\infty} [g(t)]^2 dt}.$$

- Le **Rasti** (RApid Speech Transmission Index), qui est un critère large-bande de mesure de l'intelligibilité de la parole [70].

4.2.4 Le tir des rayons

Schématiquement le module fonctionne en trois grandes étapes qui sont présentées ci-dessous : l'émission des rayons par la source ainsi que leur parcours de la salle et leur extinction.

4.2.4.1 Émission des rayons par la source

Les rayons sont émis au même instant $t = 0$ dans une direction aléatoire (θ_i, φ_i) avec une densité de probabilité proportionnelle à $\sin \theta_i$ ⁷ (figure 4.2.4). La source est ponctuelle, omnidirectionnelle et impulsionnelle. La puissance initiale P_0 d'un rayon est donnée par :

$$P_0(f) = \frac{P_S(f)}{N}$$

où $P_S(f)$ est la puissance (en Watt) de la source pour la bande d'octave considérée et N est le nombre de rayons.

4.2.4.2 Parcours d'un rayon dans la salle

Après son émission, le rayon se propage dans la salle jusqu'à son extinction. Pendant son parcours, il se réfléchit sur les surfaces du modèle géométrique et sa puissance diminue, absorbée par l'air et les surfaces rencontrées.

Lorsqu'il rencontre une surface, selon la valeur du coefficient de diffusion s_{surf} , le rayon peut être réfléchi spéculairement ($s_{surf} = 0$), de manière diffuse

7. Ce qui se traduit par un nombre constant de rayons par angle solide.

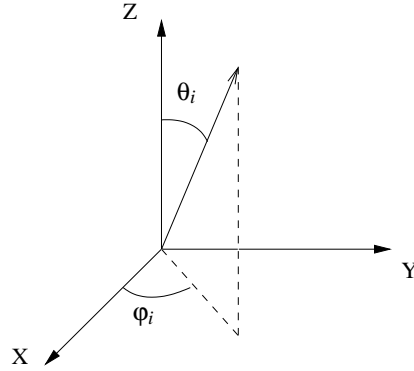


FIGURE 4.2.4 – Angles d'émission des rayons

($s_{surf} = 1$) ou mixte ($s_{surf} \in]0; 1[$). Lorsque la réflexion est partiellement diffuse, un premier tirage aléatoire détermine si la réflexion est spéculaire ou diffuse. Dans ce cas, un deuxième tirage aléatoire détermine la nouvelle direction du rayon [46].

Lors de sa réflexion par une surface, la puissance du rayon est mise à jour en tenant compte de la puissance perdue par absorption dans l'air et sur les surfaces.

Après avoir parcouru l_{rayon} mètres dans l'air, la puissance du rayon $P(f)$ pour la bande d'octave centrée en f , se calcule par

$$P(f) = P_0(f) \cdot 10^{-\frac{\alpha_{air}(f) \cdot l_{rayon}}{1000}}, \quad (4.2.1)$$

où $\alpha_{air}(f)$ est le coefficient d'absorption de l'air à la fréquence f (en dB/100m).

Si pendant son parcours, le rayon subit K réflexions, sa puissance est donnée par

$$P(f) = P_0(f) \cdot 10^{-\frac{\alpha_{air}(f) \cdot l_{rayon}}{1000}} \cdot \prod_{i=1}^K (1 - \alpha_i(f)), \quad (4.2.2)$$

où $\alpha_i(f)$ est le coefficient d'absorption de la surface à la $i^{\text{ème}}$ réflexion pour la bande d'octave centrée en f . Cette étape est coûteuse en temps de calcul suite à l'évaluation de la puissance de 10^{-X} . Le temps de calcul a été réduit en utilisant une fonction 10^{-X} optimisée par traitement vectoriel [3].

4.2.4.3 Extinction des rayons

Pendant son parcours dans la salle, un rayon est éteint si

$$P(f) < \epsilon P_0(f), \forall f,$$

où $P(f)$ est la puissance du rayon dans la bande d'octave centrée en f , et ϵ est le critère d'arrêt énergétique.

4.3 Contribution d'un rayon à un récepteur sphérique

La contribution d'un rayon au récepteur est présentée plus en détail car elle est une des composantes principales de la méthode 3 : « Accélération par l'utilisation de récepteurs de taille variable » développée au chapitre 7. La tâche de ce module est de déterminer l'énergie recueillie par le récepteur pendant sa traversée par un rayon ainsi que l'intervalle temporel de l'échogramme auquel la contribution énergétique doit être ajoutée.

Considérons un récepteur sphérique de radius ρ et centré en C . Pour chaque bande de fréquence, le récepteur recueille l'énergie des rayons qui le traversent. Cette énergie est ajoutée à l'intervalle temporel Δt_A (de l'échogramme) qui contient le temps mis par le rayon pour aller de la source au point A , la projection de C sur la rayon, comme illustré à la figure 4.3.1.

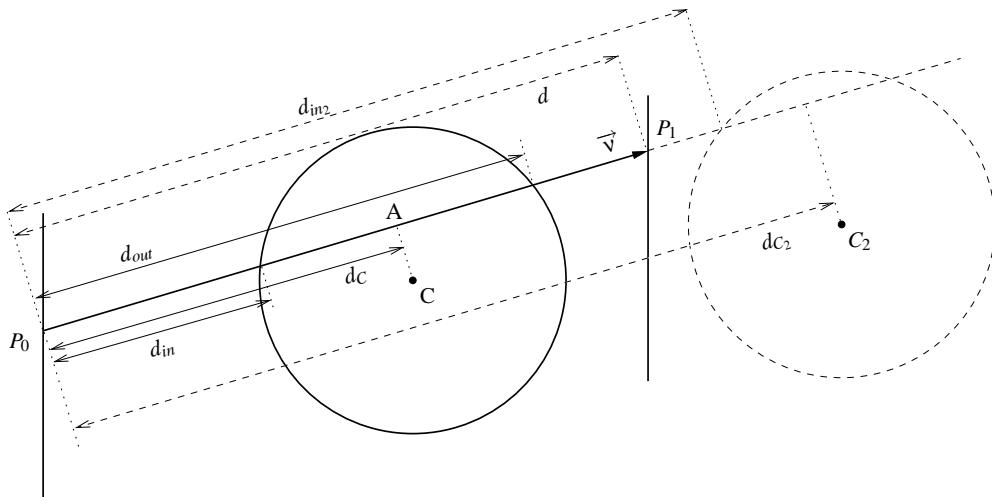


FIGURE 4.3.1 – Intersection du récepteur centré en C par le segment de rayon compris entre P_0 et P_1 tandis que le récepteur centré en C_2 , situé après le segment de rayon, n'est pas intersecté.

Pour déterminer l'énergie transférée au récepteur par un rayon pendant sa traversée, le point d'entrée P_{in} et le point de sortie P_{out} du rayon dans le récepteur doivent être connus (équation (2.4.4)) ainsi que la puissance transportée par le rayon. Leur calcul est décrit plus en détail ci-dessous et, pour plus de clarté, sera développé ici pour une seule bande d'octave centrée en f .

4.3.1 Intersection entre les rayons et les récepteurs

Les points d'entrée et de sortie d'un rayon dans le récepteur sont obtenus en testant l'intersection du récepteur avec le rayon pour chaque réflexion. Comme

illustré à la figure 4.3.1, cette intersection est effectuée avec le segment de rayon compris entre deux réflexions sur les surfaces du modèle d'origine P_0 et d'extrémité P_1 .

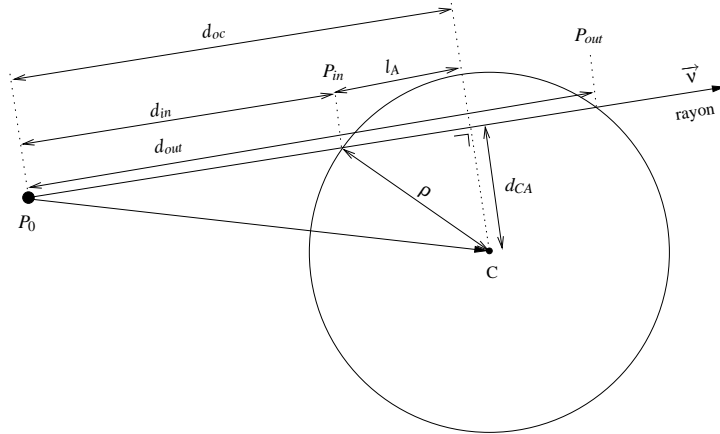


FIGURE 4.3.2 – Test d'intersection d'un rayon de vecteur directeur \vec{v} avec une sphère centrée en C de rayon ρ . La distance entre le point d'entrée (respectivement le point de sortie) et l'origine du segment de rayon est notée d_{in} (respectivement d_{out}).

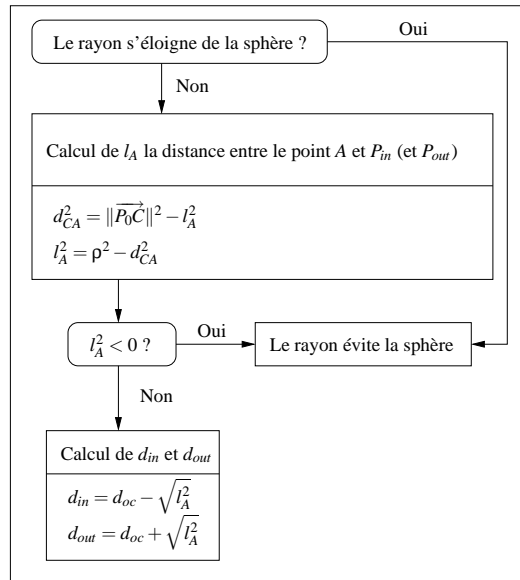


FIGURE 4.3.3 – Calcul des distances d_{in} et d_{out} entre l'origine du segment de rayon et les points d'entrée et de sortie dans le récepteur sphérique de rayon ρ . Les variables sont représentées à la figure 4.3.2.

L'algorithme d'intersection est illustré à la figure 4.3.3 et se décompose en

quatre étapes [105] :

1. La direction du rayon est testée pour savoir si le rayon s'éloigne de la sphère

$$d_{oc} = \overrightarrow{P_0C} \cdot \vec{v} < 0$$

où \vec{v} est de norme unitaire. Dans ce cas, il n'y a pas d'intersection et le test s'arrête. Sinon, $d_{oc} \geq 0$ et est la distance $\|P_0A\|$.

2. Si le segment de rayon se dirige vers le récepteur, l'intersection existe si

$$d_{CA} < \rho$$

où

$$d_{CA} = \sqrt{\|P_0C\|^2 - \|P_0A\|^2}$$

est la distance entre le rayon et le centre du récepteur. La distance entre P_{in} et A est calculée par $l_A^2 = \rho^2 - d_{CA}^2$ et l'intersection existe si

$$l_A^2 \geq 0.$$

3. Lorsque l'intersection existe, les distances d_{in} et d_{out} entre l'origine du segment de rayon et les points d'entrée et de sortie du rayon dans le récepteur sont calculées par

$$\begin{aligned} d_{in} &= d_{oc} - \sqrt{l_A^2} \\ d_{out} &= d_{oc} + \sqrt{l_A^2} \end{aligned}$$

La contribution du rayon n'est pas prise en compte si le récepteur n'est pas atteint par le segment de rayon c-à-d si le récepteur est derrière la surface de réflexion du rayon (figure 4.3.1) :

$$d_{in} \geq d.$$

Les distances D_{in} et D_{out} parcourues par le rayon entre la source et P_{in} et P_{out} sont dès lors obtenues par

$$D_{in} = d_{in} + l_{ray} \quad (4.3.1)$$

$$D_{out} = d_{out} + l_{ray} \quad (4.3.2)$$

où l_{ray} est la distance parcourue par le rayon avant d'arriver en P_0 .

4.3.2 Énergie transmise au récepteur par un rayon

En posant $P_K(f)$, la puissance (Watt) du rayon après la réflexion d'ordre K et à la fréquence f , l'énergie accumulée par le récepteur durant sa traversée par le rayon (équation 2.4.4) est calculée par

$$E_K(f) = P_K(f) \left(\frac{e^{-\alpha(f)D_{in}} - e^{-\alpha(f)D_{out}}}{\alpha(f)} \right) \quad (4.3.3)$$

où $\alpha(f)$ est l'atténuation de l'air [Népers/m] à la fréquence f .

4.3.3 Ajout de la contribution énergétique du rayon à l'échogramme

L'énergie $E_K(f)$ est transmise au récepteur par le rayon au point A après un temps de parcours

$$t = \frac{d_{oc} + l_{ray}}{c} \quad (4.3.4)$$

et est enregistrée dans l'intervalle temporel d'indice

$$j = \left\lfloor \frac{t}{\Delta t(f)} \right\rfloor \quad (4.3.5)$$

où $\Delta t(f)$ est la durée en secondes de l'intervalle temporel. La validité de l'enregistrement de la contribution au récepteur non ponctuel en un seul intervalle temporel repose sur l'hypothèse d'un récepteur de petit radius. Lorsque ce n'est plus le cas, une autre technique doit être utilisée comme nous le verrons au chapitre 7.

4.4 Intersection entre les rayons et les surfaces

Cette étape du tir de rayons est également importante car la majeure partie du temps de calcul lui est consacrée et elle fera l'objet de l'accélération par les méthodes exposées aux chapitres 5 et 6. Elle va donc être décrite en détail ci-dessous en commençant par les deux étapes principales.

Afin de déterminer les surfaces intersectées par un rayon, l'algorithme brut d'intersection est appliqué à l'ensemble des surfaces l'une après l'autre (figure 4.4.1) et détermine l'intersection la plus proche dans la direction de propagation du rayon considéré. Cet algorithme brut sera amélioré au chapitre 6 en réduisant le nombre de surfaces testées par l'introduction d'informations sur la visibilité entre les surfaces ainsi qu'en tenant compte de leurs probabilités d'intersection avec les rayons.

Cet algorithme fonctionne en deux étapes :

1. Détermination de la distance entre P_0 et le point d'intersection P avec le plan support⁸ de la surface comme décrit à la sous-section 4.4.1.
2. Test de l'appartenance de ce point à la surface comme décrit à la sous-section 4.4.2.

A ces deux étapes, s'ajoutent divers tests pour éliminer les cas particuliers :

1. La surface d'origine du segment de rayon ne doit pas être testée.
2. Si l'angle d'incidence est proche de 0° , la distance n'est pas calculée car cela impliquerait une division par 0.

8. Le plan support d'une surface est le plan qui contient cette surface.

9. Le rayon est rasant à cette surface.

4.4.1 Calcul du point d'intersection entre le rayon et un plan de support

Le calcul du point d'intersection P entre le rayon de vecteur directeur normé \vec{v} issu de P_0 et un plan de normale \vec{n} passant par un point P_1 est donné par

$$P(x, y, z) = P_0(x, y, z) + d \cdot \vec{v}$$

ou d est la distance entre P_0 et P .

Cette distance est calculée par

$$d = \frac{(P_1 - P_0) \cdot \vec{n}}{\vec{v} \cdot \vec{n}}, \quad (4.4.1)$$

où $\vec{v} \cdot \vec{n}$ est le cosinus de l'angle d'incidence entre le rayon et le plan et P_1 est un point quelconque appartenant au plan de support.

4.4.2 Test d'appartenance d'un point d'intersection à la surface

Le point d'intersection trouvé au point 4.4.1 est sur le plan support de la surface considérée. Il reste à déterminer si ce point d'intersection se trouve sur la surface, c-à-d à l'intérieur d'un polygone convexe.

Au départ, l'algorithme utilisé dans Salrev¹⁰ était optimisé pour les polygones convexes à quatre sommets A, B, C, D et traitait le problème en trois dimensions.

Dans l'algorithme initial, le point d'intersection P appartient au polygone s'il est du côté intérieur de chaque arête comme illustré à la figure 4.4.2 où les normales $\vec{n}_A, \vec{n}_B, \vec{n}_C, \vec{n}_D$ aux arêtes $\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{BD}, \overrightarrow{CA}, \overrightarrow{DC}$ sont orientées vers l'intérieur du polygone.

Dans le schéma de l'algorithme illustré à la figure 4.4.3, les quatre opérations de test n'ont pas une structure identique et le nombre d'instructions (21 multiplications, 12 additions et 9 soustractions) est plus élevé que pour l'algorithme décrit ci-après, ce qui est moins approprié au traitement vectoriel.

Dans le cadre de cette thèse, cet algorithme initial a été remplacé par une version qui résout le problème en deux dimensions¹¹ (dans le plan de la surface) pour des polygones convexes dotés d'un nombre quelconque de sommets [133]. Un exemple est donné à la figure 4.4.4 pour quatre sommets.

10. Salrev est le module de tir de rayons développé et utilisé au laboratoire d'acoustique de l'Université de Liège. C'est ce module qui a été modifié, réécrit et optimisé pour effectuer les tests de cette thèse.

11. Le traitement en 2D nécessite un prétraitement léger et permet de réduire le nombre d'opérations effectuées.

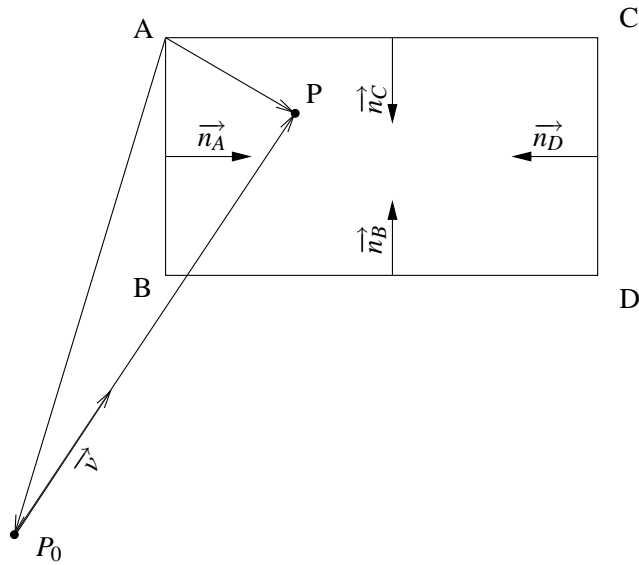


FIGURE 4.4.2 – Test d'appartenance d'un point à un polygone convexe en 3 dimensions par l'algorithme de base.

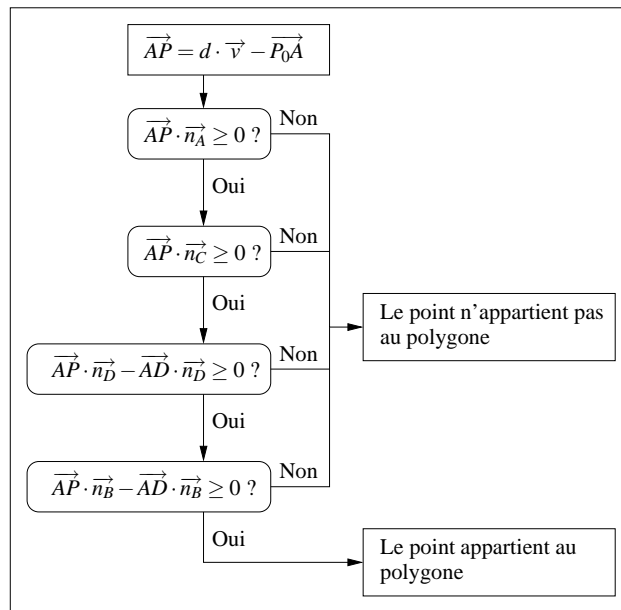


FIGURE 4.4.3 – Algorithme du test d'appartenance limité à un polygone convexe à 4 sommets.

Le point $P(X, Y)$ appartient au polygone doté de n sommets s'il est du côté intérieur pour toutes les arêtes :

$$\vec{n}_i \cdot \overrightarrow{(P - V_i)} \leq 0, \forall i \in [0, n - 1], \quad (4.4.2)$$

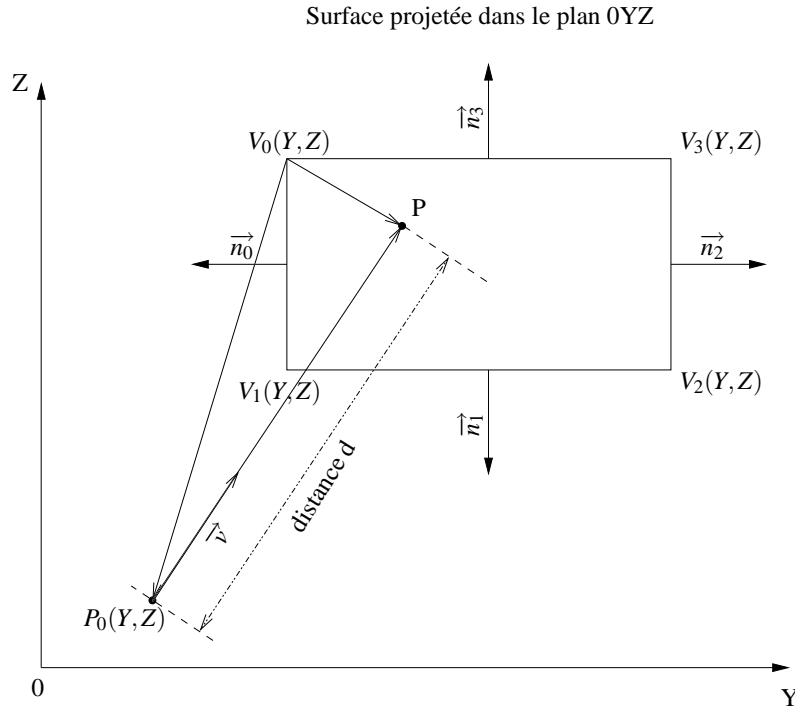


FIGURE 4.4.4 – Test d'appartenance d'un point à un polygone convexe en 2 dimensions.

où par hypothèse, les n sommets V_i sont orientés dans le sens anti-horloger et les normales $\vec{n}_i(X, Y)$ aux arêtes $\overrightarrow{V_i V_{i+1}}$ sont orientées vers l'extérieur du polygone, $i \in [0, n - 1]$.

Comme illustré à la figure 4.4.5, le nombre d'instructions est réduit en passant à deux dimensions : 10 multiplications, 8 soustractions et une addition. De plus, les opérations de tests ont une structure identique ce qui convient mieux à un traitement vectoriel¹².

Pour appliquer cet algorithme à un problème à trois dimensions, un pré-traitement avant le tir de rayons est nécessaire. Les surfaces sont projetées¹³ sur un des trois plans OXY, OXZ, OYZ. La projection est effectuée sur le plan qui maximise l'aire de la surface projetée (figure 4.4.6).

Maintenant que les étapes principales ont été décrites, passons à la description de la parallélisation sur CPU de cet algorithme.

12. Cet algorithme est modifié au chapitre 5 pour traiter plusieurs tests vectoriellement. En pratique, la taille égale à quatre « floats » des vecteurs SSE permet de traiter en une durée identique les polynômes à 3 ou 4 sommets.

13. On conserve 2 des 3 coordonnées dans une étape de précalcul.

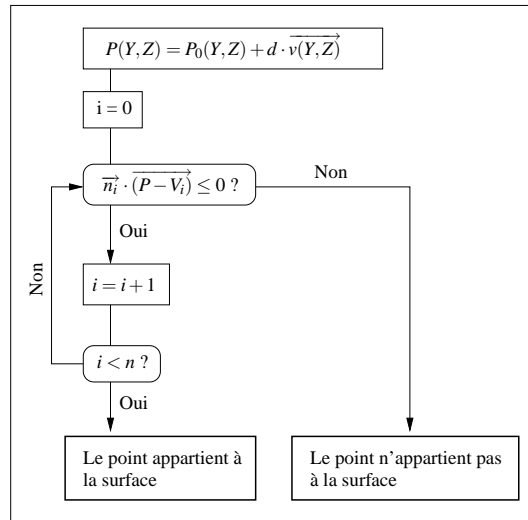


FIGURE 4.4.5 – Algorithme du test d'appartenance en deux dimensions pour un polygone convexe de n sommets.

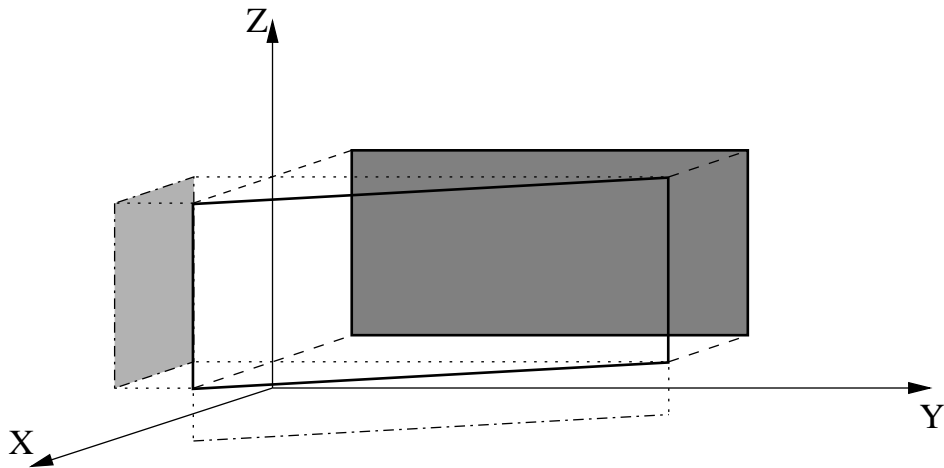


FIGURE 4.4.6 – L'aire de la surface projetée est maximale sur le plan $0YZ$. Cette projection est effectuée en conservant les coordonnées Y et Z des sommets de la surface.

4.5 Parallélisation

Puisque chaque rayon est un évènement indépendant, l'algorithme peut être parallélisé pour tirer plusieurs rayons à la fois. Dans le cadre de cette thèse, la

parallélisation a été effectuée au moyen d'OpenMP¹⁴ [5] et la librairie MKL¹⁵ d'Intel [4] fournit le générateur de séquences pseudo-aléatoires indépendantes MT2203 du type Mersenne-Twister. Ce générateur permet d'utiliser un nombre élevé (6024) de séquences aléatoires indépendantes¹⁶ pour les réflexions diffuses et l'émission des rayons.

Les tests effectués montrent une bonne évolution des performances en fonction du nombre de processeurs utilisés (voir figure 8.0.1) indépendamment de la salle simulée et en négligeant les coûts d'initialisation des modules de calculs. Par exemple, le gain est d'ordre 10 pour un processeur à 8 cœurs dotés de l'hyper-threading.

4.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté les grandes étapes de l'algorithme du tir de rayons en développant principalement les opérations nécessaires aux trois nouvelles méthodes développées dans cette thèse, à la partie 2.

Les deux premières méthodes d'accélération agissent sur l'algorithme d'intersection entre les rayons et les surfaces tandis que la troisième méthode agit sur l'algorithme d'intersection entre les rayons et les récepteurs.

La méthode d'accélération 1 développée dans le chapitre 5 agit en traitant le calcul des points d'intersection entre les surfaces et un rayon ainsi que les tests d'appartenance pour plusieurs surfaces à la fois.

La méthode d'accélération 2 développée dans le chapitre 6 agit par réduction du nombre de surfaces testées lors de la recherche d'intersection en se basant non pas sur un partitionnement spatial mais en se basant sur des informations de visibilité précalculées.

La méthode d'accélération 3 développée dans le chapitre 7 agit par accroissement de la taille du récepteur et diminution du nombre de rayons à des instants clés. L'algorithme d'intersection entre les rayons et les récepteurs sera modifié afin de gérer l'inclusion d'obstacles suite à l'accroissement du récepteur.

14. Une interface de programmation multi-plateforme pour le calcul parallèle sur des machines à mémoire partagée.

15. La librairie MKL (Math Kernel Library) est une librairie commerciale de calcul haute performance développée par Intel.

16. Ce type de générateur permet d'éviter le biais des résultats introduit par l'extraction des valeurs d'une seule séquence aléatoire au moyen de techniques telles que le splitting ou le leap-frog [48, 154, 35, 145].

Deuxième partie

Description des méthodes d'accélération du tir de rayons sonores

Dans la première partie, les bases de la simulation en acoustique géométrique ont été posées ainsi que ses principales méthodes d'accélération. La seconde partie développe et étudie trois méthodes innovantes qui agissent selon trois axes complémentaires :

- l'adaptation vectorielle de l'algorithme d'intersection entre un rayon et les surfaces,
- la réduction du nombre de surfaces testées en utilisant des informations de visibilité,
- l'augmentation dynamique de la taille des récepteurs afin de réduire le nombre de rayons parcourant la salle en un instant donné en profitant de la dimension temporelle pour jouer sur la précision des RIR.

Pour conclure, les apports de ces trois méthodes ainsi que les perspectives futures seront résumés au chapitre 8.

Lors de la présentation individuelle de chaque méthode, les performances seront évaluées sur un seul processeur par rapport aux performances de l'algorithme brut (chapitre 4). Elles seront ensuite évaluées en utilisant conjointement ces méthodes. Enfin, ces performances seront évaluées sur un processeur multi-coeurs.

Passons maintenant à la présentation et l'analyse de ces trois méthodes.

Chapitre 5

Méthode 1 : Accélération par le traitement vectoriel de la recherche d'intersection

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, l'accélération du tir de rayons va porter sur sa partie la plus coûteuse : l'algorithme de recherche d'intersection entre un rayon et les surfaces. L'algorithme de départ, présenté au chapitre 4, va être modifié pour tester plusieurs surfaces à la fois au moyen d'instructions vectorielles.

Le traitement vectoriel se fera sur CPU au moyen des instructions SSE disponibles sur l'ensemble des CPU récents. Ces jeux d'instructions y sont les jeux d'instructions les plus courants et traitent des vecteurs de 128 bits. Ils existent en différentes versions dont la disponibilité est variable selon le modèle de processeur. Les versions disponibles systématiquement sont :

- SSE1 qui opère sur des vecteurs de quatre flottants. Les opérations arithmétiques s'appliquent entre les éléments de deux vecteurs.
- SSE2 qui opère sur des vecteurs de deux doubles ou quatre entiers. Les opérations arithmétiques s'appliquent également entre les éléments de deux vecteurs.
- SSE3 qui permet de fonctionner horizontalement dans un vecteur, c'est-à-dire que les instructions peuvent effectuer des opérations entre les éléments d'un seul vecteur.

D'autres versions existent dont notamment SSE4 et AVX¹. Cependant, elles ne sont disponibles que depuis peu sur les dernières générations de processeurs² et n'ont pas été prises en compte dans le cadre de cette thèse.

1. Notamment, le jeu d'instructions AVX travaille sur des vecteurs de 256 bits, ce qui est le double de la taille des vecteurs de données SSE.

2. Uniquement sur les processeurs Intel.

Il est à noter que le traitement vectoriel pourrait également se faire sur GPU. Un travail de fin d'études [33] réalisé par S. Chèvremont dans le service d'acoustique a abordé le traitement par GPU. Ce travail a comparé deux approches différentes sur les simulations données au tableau 5.1.1 :

1. Le traitement partiel sur CPU et GPU. Le GPU traite la recherche de la surface destination tandis que le CPU s'occupe du reste. En utilisant la carte graphique et les deux cœurs du processeur, les gains obtenus par rapport à l'algorithme brut croissent de 5 à 10 entre la simulation 1 et la simulation 3.
2. Le traitement complet sur GPU. Le GPU et le CPU traitent chacun complètement des groupes de rayons. Les gains obtenus décroissent de 12 à 10 entre la simulation 1 et la simulation 3. Les calculs des intersections entre les rayons et les récepteurs sont pénalisants sur GPU.

Numéro de simulation	Rayons	Surfaces	Récepteurs
1	5E6	49	6
2	1E5	72	5
3	1E5	135	12

TABLE 5.1.1 – Caractéristiques principales des simulations utilisées pour les tests sur GPU. Les réflexions spéculaires et diffuses sont prises en compte.

Les simulations ont été exécutées en utilisant OpenCl 1.0 sur un PC doté d'un processeur Intel Core2Duo E8400 à 3,5 GHz, et d'une carte graphique AMD Radeon 5750HD qui traitent des vecteurs de 5 éléments. Dans cette implémentation qui dépend des choix effectués par l'auteur, le traitement par GPU fournit une accélération non négligeable dans ses deux versions mais les gains sont inférieurs aux gains obtenus par des arbres BSP sur CPU en utilisant 2 cœurs de calcul.

La méthode utilisant SSE sera décrite ci-dessous en commençant, à la section 5.2, par la description d'un ensemble de particularités liées au traitement vectoriel SSE. Ensuite, pour être compatible avec ces spécificités, l'algorithme de recherche d'intersection entre les rayons et les surfaces sera transformé à la section 5.3 puis, l'algorithme SSE sera décrit à la section 5.4.

5.2 Particularités du traitement vectoriel par SSE

Les contraintes portent principalement sur l'organisation mémoire des données, l'absence d'instructions de branchement conditionnel et une précision plus faible.

Premièrement, pour que le traitement soit efficace, les données doivent être placées de façon spécifique en mémoire :

- Pour être traitées par blocs, ces données doivent être enregistrées dans des emplacements mémoire contigus, ce qui peut engendrer un surcoût de réarrangement.
- Les données doivent être alignées sur des mots de 16 bytes sous peine de pénaliser les temps de chargement dans les registres SSE, ce qui limite les accès désordonnés aux vecteurs de données.

Le non-respect de ces règles peut rendre nul le gain du traitement vectoriel, surtout lorsque le nombre d'instructions appliquées à ces données est faible.

Deuxièmement, l'absence d'instruction de branchement conditionnel nécessite une réorganisation du code pour obtenir un seul flux d'instructions. La technique usuelle en présence d'un branchement conditionnel consiste à exécuter le code des deux branches et à choisir le bon résultat au moyen d'un masque. Cette façon de procéder réduit considérablement l'intérêt du traitement vectoriel en présence de nombreuses divergences dans le code d'autant plus si ces branchements sont imbriqués.

Troisièmement, les instructions SSE opèrent avec une précision inférieure (32 ou 64 bits) aux instructions scalaires sur les nombres à virgules flottantes de la FPU³ (80 bits). Pour la recherche d'intersections, cela reste acceptable même si, suite aux différences de précision, les résultats des tests d'intersection d'un rayon avec une surface peuvent différer d'une architecture à l'autre lorsque le point d'intersection théorique est proche des extrémités de la surface.

5.3 Réorganisation de l'algorithme d'intersection entre les rayons et les surfaces

Le code de l'algorithme va être réorganisé de façon à éliminer ou retarder au maximum les branchements conditionnels pour permettre d'effectuer vectoriellement le plus grand nombre d'opérations sur les surfaces.

En premier lieu, une liste des branchements conditionnels est dressée puis une réorganisation compatible avec le traitement vectoriel est proposée.

Liste des branchements conditionnels

Dans l'algorithme de base décrit à la section 4.4, les branchements conditionnels sont les suivants :

- La surface testée est-elle la surface d'origine ?
- Le rayon est-il rasant ?
- La distance au point d'intersection est-elle négative ?
- Existe-t-il une distance au point d'intersection plus petite que celle qui vient d'être calculée ?

3. Floating Point Unit.

- Le point d’intersection est-il du coté intérieur à toutes les arêtes ?

Réorganisation des branchements

L’algorithme peut être réorganisé en 5 parties distinctes :

1. Calcul de la distance et des coordonnées du point d’intersection sans branchement.
2. Rejet de la surface d’origine sans test.
3. Rejet des distances négatives et des rayons rasants après le calcul des distances.
4. Calcul selon l’équation (4.4.2) des positions relatives du point d’intersection par rapport aux arêtes. Ces positions relatives sont effectuées par paquets de 4 arêtes. Lorsqu’un paquet a été traité, on passe au point 5.
5. Déterminer si le point d’intersection est intérieur à la surface en testant le signe des résultats obtenus au point 4. S’il reste des arêtes non traitées et que le point d’intersection n’est pas encore déterminé comme extérieur à la surface, on recommence au point 4.

L’algorithme issu de cette réorganisation est illustré à la figure 5.3.1

Cette réécriture de l’algorithme présente les avantages suivants :

1. Le calcul de la distance d’intersection et celui de l’appartenance du point d’intersection à la surface sont découplés, ce qui permet d’exécuter les branchements conditionnels intermédiaires sur le FPU⁴.
2. La distance d’intersection pourra être calculée vectoriellement pour l’ensemble des N surfaces ce qui améliore les temps d’accès aux données par exploitation de la mémoire cache.
3. La position relative du point d’intersection par rapport aux arêtes de la surface pourra être calculée vectoriellement pour plusieurs arêtes et surface par surface.

Un avantage supplémentaire est l’élimination du test sur la surface d’origine.

Pour éviter ce test, les N distances sont enregistrées dans un vecteur de dimension $N + 1$. Ceci permet de rejeter la surface origine sans branchement en remplaçant la distance calculée par une valeur négative. Dès lors, cette surface ne sera pas prise en compte lors du test d’appartenance des points d’intersection aux surfaces. La case supplémentaire du vecteur est une case « poubelle » dont la valeur est remplacée quand le segment de rayon est issu de la source (et non d’une surface), ce qui permet d’unifier le traitement des segments de rayons issu d’une surface ou de la source. Cette case poubelle est ignorée dans les traitements ultérieurs.

4. Le temps de transfert des données entre l’unité SSE et l’unité FPU ou avec la mémoire n’est pas négligeable, il convient donc de limiter ces transferts au maximum.

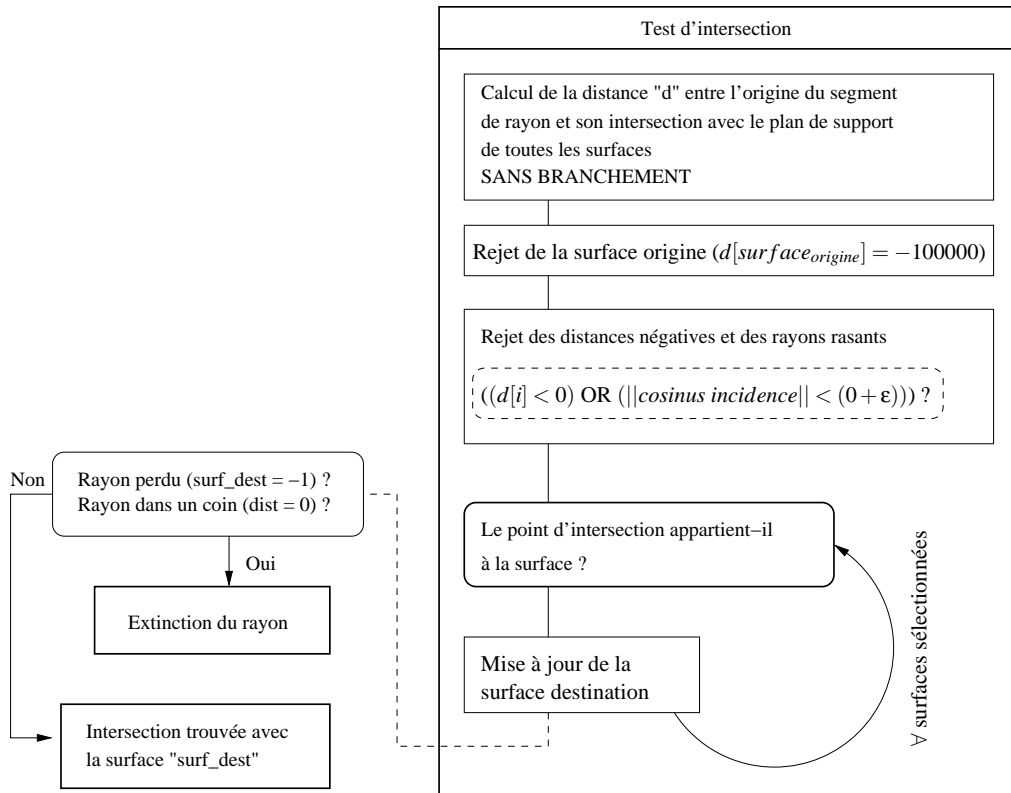


FIGURE 5.3.1 – Schéma de la nouvelle organisation de la recherche d'intersection entre un rayon et les surfaces.

Cet version de l'algorithme servira de base à la recherche d'intersection par paquets de surfaces développée à la section 5.4.

5.4 Recherche de la surface intersectée avec les instructions SSE

La recherche d'intersection se fera au moyen d'instructions SSE selon une approche spécifique pour les deux étapes principales :

1. Le calcul des coordonnées du point d'intersection et celui des distances se feront par paquet de surfaces comme décrit à la sous-section 5.4.1 ;
2. Les tests d'appartenance des points d'intersection aux surfaces se feront par paquet de sommets et surface par surface comme décrit à la sous-section 5.4.3.

De plus, le rejet des rayons rasants et des distances négatives est également effectué en partie par paquet de surfaces. Quant au schéma général de l'algorithme, il reste semblable à celui décrit à la figure 5.3.1.

5.4.1 Calcul des distances par paquet de surfaces

Le calcul des distances s'effectue sur des paquets de quatre surfaces suivant le schéma décrit à la figure 5.4.1. Ce schéma suppose qu'il y ait toujours un nombre de surfaces multiple entier de 4. Lorsque ce n'est pas le cas, il suffit de compléter les données manquantes par des valeurs qui n'affectent pas le résultat du calcul d'intersection. Cette opération s'effectue pendant la mise en forme des données.

Calcul des distances

Le calcul des distances d'intersection pour les quatre surfaces A, B, C et D fait intervenir le calcul des 4 produits scalaires pour le cosinus incidence $\vec{v} \cdot \vec{n}$ et 4 produits scalaires $\overrightarrow{P_0P_1} \cdot \vec{n}$ (équation (4.4.1)). Or, les quatre produits scalaires $\vec{a} \cdot \vec{e}, \vec{b} \cdot \vec{f}, \vec{c} \cdot \vec{g}, \vec{d} \cdot \vec{h}$ peuvent se calculer sous forme vectorielle par

$$\begin{aligned} (\vec{a} \cdot \vec{e}, \vec{b} \cdot \vec{f}, \vec{c} \cdot \vec{g}, \vec{d} \cdot \vec{h}) &= (a_x, b_x, c_x, d_x) * (e_x, f_x, g_x, h_x) \\ &+ (a_y, b_y, c_y, d_y) * (e_y, f_y, g_y, h_y) \\ &+ (a_z, b_z, c_z, d_z) * (e_z, f_z, g_z, h_z) \end{aligned}$$

ce qui nécessite 3 multiplications et 2 additions au lieu de 12 multiplications et 8 additions.

De même le calcul de $\overrightarrow{P_0P_1}$ (nécessaire au calcul de $\overrightarrow{P_0P_1} \cdot \vec{n}$), peut aussi se faire vectoriellement en 3 soustractions au lieu de 12. Pour ce faire, les coordonnées du point P_0 et des points P_1 de chaque surface sont décomposées en leurs composantes x, y et z et rassemblées dans les 6 vecteurs $P_{1x}, P_{1y}, P_{1z}, P_{0x}, P_{0y}, P_{0z}$. Les vecteurs $\overrightarrow{P_0P_1}$ sont ensuite obtenus par 3 soustractions vectorielles puis enregistrés dans les vecteurs $packP_0P_{1x}, packP_0P_{1y}, packP_0P_{1z}$.

Une fois que les produits scalaires ont été calculés, les 4 distances sont obtenues au moyen d'une seule division vectorielle au lieu de 4 et les résultats sont enregistrés dans $packDist$.

Calcul des coordonnées des points d'intersection

Les coordonnées des 4 points d'intersection P sont calculées vectoriellement et enregistrées dans 3 vecteurs $packPx, packPy, packPz$. Par exemple, pour la composante en x des 4 surfaces, l'équation est

$$PackPx = (P_{Ax}, P_{Bx}, P_{Cx}, P_{Dx}) = (P_{0x}, P_{0x}, P_{0x}, P_{0x}) + packDist * (\nu_x, \nu_x, \nu_x, \nu_x)$$

et le traitement est identique pour les composantes y et z . Cette opération nécessite 3 multiplications et 3 additions au lieu de 12 multiplications et 12 additions pour l'ensemble des 4 points d'intersections.

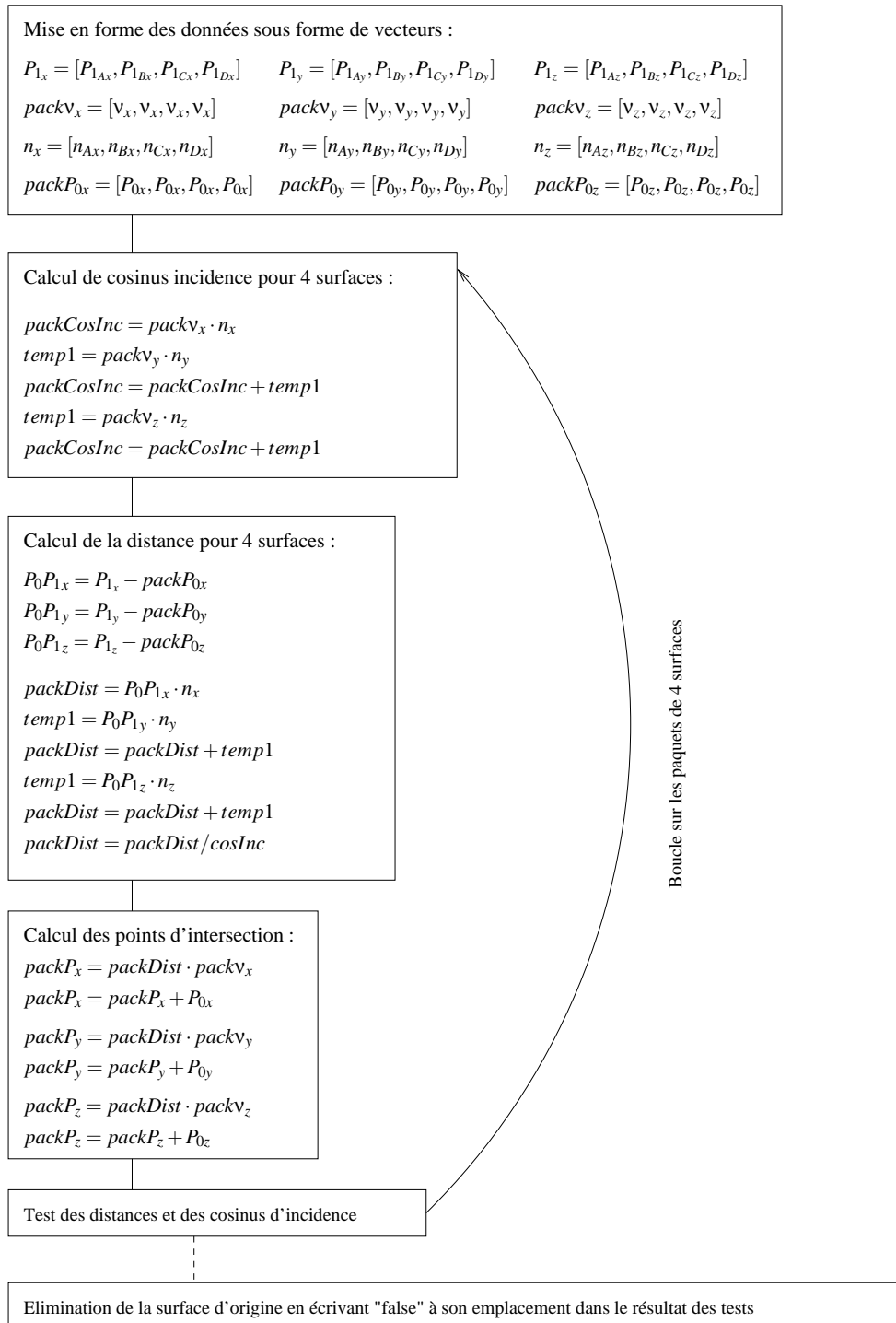


FIGURE 5.4.1 – Calcul des distances et des points d'intersection entre un rayon et un paquet de quatre surfaces.

Coût

Comme attendu, le gain en terme d'opérations est d'ordre 4 pour le calcul des distances et des coordonnées du point d'intersection. Cependant, il faut ajouter à ces coûts l'organisation des données et les échanges entre l'unité de traitement vectorielle et celle de traitement scalaire, ce qui en pratique réduira le gain.

5.4.2 Élimination des distances négatives et des rayons rasants

Dans l'algorithme brut, l'élimination des distances négatives et des rayons rasants est effectuée en testant la distance et l'angle d'incidence pour chaque surface. Or, ces tests peuvent être effectués en partie vectoriellement :

1. Deux instructions SSE pour tester le signe des 4 distances et les 4 angles d'incidence comme illustré à la figure 5.4.2.
2. Une instruction SSE pour combiner les deux vecteurs résultats en un seul.
3. Seules les 4 valeurs obtenues au point 2 doivent être testées par la FPU pour rejeter les distances négatives et les rayons rasants. Le nombre de branchements est réduit à 4 au lieu d'un maximum de 4 fois 2 branchements imbriqués⁵.

Tests par SSE

En traitement vectoriel SSE, une instruction de test sur un vecteur de données ne permet pas le branchement conditionnel mais renvoie une valeur spécifique pour chaque mot du vecteur. Par exemple, la comparaison de la distance et la comparaison du cosinus incidence renvoient les valeurs suivantes (32 bits) pour **chaque** surface du paquet :

$$\begin{aligned} \text{masque distance} &= \begin{cases} 0xFFFFFFFF & \text{si } distance \geq 0 \\ 0x00000000 & \text{sinon} \end{cases} \\ \text{masque cosinus} &= \begin{cases} 0xFFFFFFFF & \text{si } \|\cosinus incidence\| > \epsilon \\ 0x00000000 & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned}$$

où $0x$ correspond à la notation hexadécimale. Pour l'ensemble des surfaces du paquet, le masque correspond à la concaténation des 4 masques et est obtenu en une seule opération vectorielle.

⁵. Le minimum est de 4 branchements si tous les premiers tests sont négatifs.

Le second test porte sur la valeur absolue du cosinus d'incidence qui peut être obtenue très efficacement en forçant le bit de signe à 0⁶. Ceci est fait en une instruction vectorielle pour les cosinus incidence dans `packCosInc`

$$\text{packAbsCosInc} = \text{AND}(\text{packCosInc}, 0x7FFFFFFF)$$

où $\text{AND}(a, b)$ est une instruction « & » bit à bit.

Combinaison des deux vecteurs

Pour réduire le nombre de branchements, les deux vecteurs résultats de masquage `distMask` et `cosMask` peuvent être combinés en un vecteur `testMask` à l'aide d'une seule instruction vectorielle

$$\text{testMask} = \text{AND}(\text{distMask}, \text{cosMask})$$

où une surface satisfait simultanément aux deux conditions si son résultat dans `testMask` vaut `0xFFFFFFFF`. Dans le cas contraire, il vaut `0x00000000`.

Une dernière étape est nécessaire pour pouvoir transférer ces valeurs à l'unité FPU. Les valeurs `0xFFFFFFFF` ne sont pas valides pour être enregistrées dans un float et doivent dès lors être transformées en une valeur choisie arbitrairement à 1.0.

Gains

Un des avantages est de pouvoir réduire le nombre de branchements à 4 au lieu de 8 et d'effectuer les tests en un nombre constant d'opérations : 2 opérations pour tester les distances et les cosinus incidence, 1 instruction pour combiner les résultats et un 1 opération de transformation. A ces 4 opérations, il faut ajouter les opérations de comparaisons des résultats effectuées par FPU, ce qui donne un total de 8 opérations. Puisque ce nombre ne varie pas, le gain en nombre d'opérations devient plus intéressant avec des tailles de vecteurs de données vectorielles supérieures⁷ à 4.

5.4.3 Test d'appartenance SSE d'un point à une surface

Pour le test d'appartenance d'un point à une surface, le traitement par paquet de surfaces est remplacé par un traitement par paquet de sommets.

Dans le cadre de cette thèse, le choix des paquets de sommets est justifié par les raisons suivantes :

6. Selon le standard IEEE754, un `binary32` comme utilisé dans notre cas, est un système signe/amplitude et non pas complément à 2 [41]. Il est composé d'un bit de signe, de 8 bits d'exposant et d'une fraction codée sur 23 bits dont l'organisation binaire est spécifiée par le standard.

7. Comme pour les données AVX.

```

Elimination des surfaces t.q. ( $dist < 0$ ) ou ( $|cosInc| < \epsilon$ )
Les tests retournent 0xFFFFFFFF si le resultat est "true" et 0x00000000 sinon
Changement du bit de signe des cosinus incidence :
packAbsCosInc = AND(packCosInc, 0x7FFFFFFF)

Test si  $|cosInc| > \epsilon$ 
testMask = packAbsCosInc > packe

Test si les distances sont  $\geq 0$ 
tempMask = packDist  $\geq 0$ 

Jonction des 2 tests
testMask = AND(tempMask, testMask)

Transformation du résultat des tests en valeur 1.0 si 0xFFFFFFFF et 0.0 sinon
testMask = AND(testMask, 1.0)

```

FIGURE 5.4.2 – Détection des rayons rasants et des distances négatives par paquet de surfaces. L’algorithme renvoie 0 pour les surfaces correspondantes et 1.0 sinon.

- La méthode par paquet de sommets s’exécute surface par surface ce qui permet de mettre à jour la distance d’intersection dès qu’une intersection est trouvée et ainsi de ne pas tester les intersections plus éloignées.
- Le traitement des salles où toutes les surfaces n’ont pas le même nombre de sommets⁸ est facilité.
- L’exécution surface par surface est plus adaptée et sera utilisée pour la méthode des surfaces occlusives développée au chapitre 6 où le premier parcours de la liste s’arrête dès qu’une intersection est trouvée.

Pour pouvoir comparer les performances théoriques respectives, l’algorithme du traitement par paquet de sommets est développé en annexe B.

Les performances des deux approches sont identiques pour le traitement de 4 surfaces à 4 sommets comme résumé au tableau 5.4.1. Par contre dès qu’une surface du paquet est évitée, l’avantage revient au traitement par paquet de sommets.

Traitement par paquet de sommets

L’algorithme du test d’appartenance par paquet de sommets, illustré à la figure 5.4.3, peut se décomposer en trois étapes principales :

1. Calcul vectoriel des produits scalaires $vpi_i = \vec{n}_i \cdot \overrightarrow{(P - V_i)}$ par paquet de 4 sommets.
2. Détermination vectorielle des signes des vpi et combinaison des résultats

8. Pour rappel, cet algorithme permet de traiter des surfaces planes convexes constituées d’un nombre quelconque de sommets. Ce nombre peut d’ailleurs varier d’une surface à l’autre.

	Coût en opérations
Paquet de surfaces (Coût pour 4 surfaces)	Calcul des v_{pi} : $5m$ Test du signe des v_{pi} : $2m + 4$
Paquet de sommets (Coût pour 1 surface)	Calcul des v_{pi} : $5 \lceil \frac{m}{4} \rceil$ Tests du signe des v_{pi} : $(3 \lceil \frac{m}{4} \rceil)$
Brut (Coût pour 1 surface)	Minimum : 6 Maximum : $6m$

TABLE 5.4.1 – Estimation du coût des tests d'appartenance d'un point à un polygone brut pour le traitement brut ou par paquet des surfaces ou par paquet de sommets. Le coût est estimé pour des surfaces de m sommets.

en une seule valeur $testVal$. Cette étape est décrite plus en détail ci-dessous.

3. Test sur FPU de la valeur $testVal$ pour déterminer si le point d'intersection est à l'intérieur ou à l'extérieur de la surface⁹.

Lorsque le nombre de sommets n'est pas un multiple entier de 4, les vecteurs de données sont complétés par des valeurs de pseudo-sommets qui ne modifient pas le fonctionnement de l'algorithme. Ces valeurs seront choisies de façon à ce que le signe de leur v_{pi} soit systématiquement négatif¹⁰.

Calcul vectoriel des produits scalaires

La technique est identique au calcul vectoriel des distances et ne sera pas explicitée plus en détail.

Le coût du calcul des produits scalaires pour une surface de m sommets est de $2 \lceil \frac{m}{4} \rceil$ multiplications, $2 \lceil \frac{m}{4} \rceil$ soustractions et $\lceil \frac{m}{4} \rceil$ additions au lieu d'un nombre d'opérations scalaires compris entre 5 et $5 * m$ pour la méthode brute, car les tests s'arrêtent dès qu'un des résultats est positif¹¹.

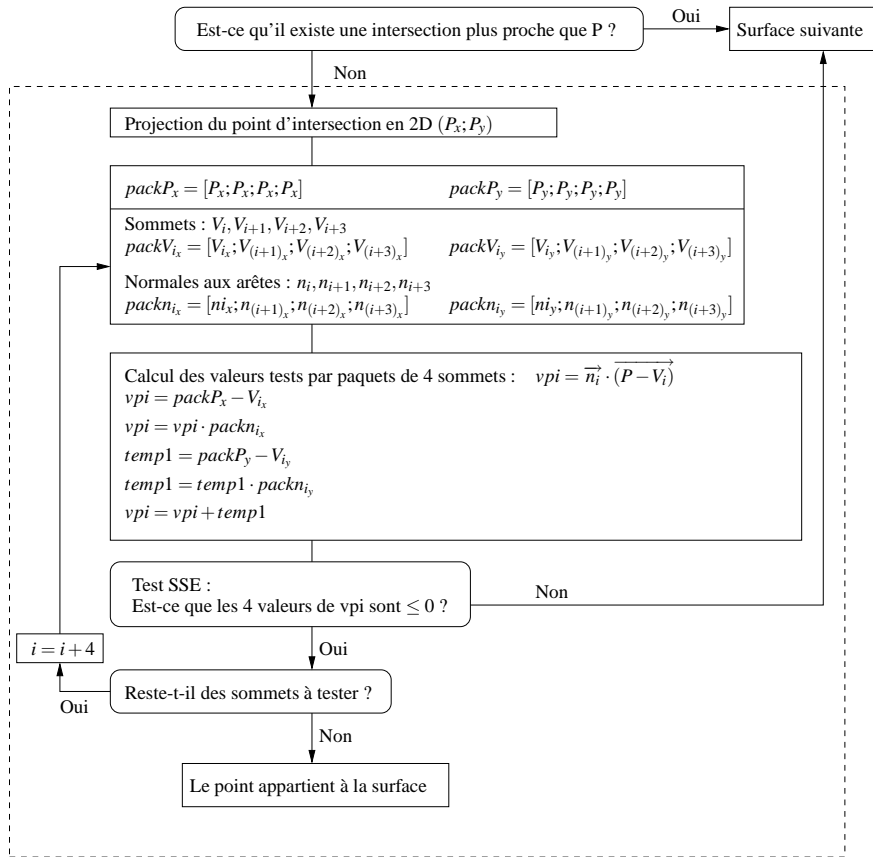


FIGURE 5.4.3 – Pseudo-code du test d'appartenance du point d'intersection P à une surface par bloc de 4 sommets réduit à un seul branchement par paquet.

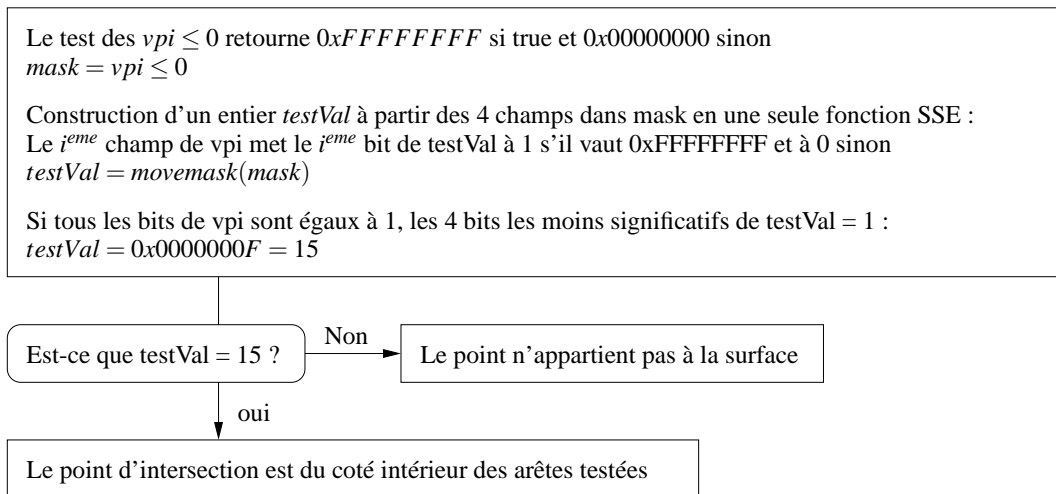


FIGURE 5.4.4 – Pseudo-code du test du signe des vpi en une seule comparaison.

Détermination vectorielle du signe des vpi

L'algorithme décrit à la figure 5.4.4 teste 4 positions relatives à la fois et est décomposé en 3 opérations principales :

1. Test des signes des vpi_i par 4 sommets en une comparaison vectorielle ≤ 0 . L'instruction vectorielle génère un masque pour chaque vpi dans le vecteur $mask$. Ces masques valent $0xFFFFFFFF$ si le résultat est « vrai » et $0x00000000$ si le résultat est « faux ».
2. Regroupement des 4 masques en 1 seul dans l'entier $testVal$ au moyen de l'opération $movemask$ ¹². Cette opération recopie le bit de signe de chaque masque du vecteur $mask = (M_1, M_2, M_3, M_4)$ de la façon suivante : le bit de signe M_i est recopié dans le $i^{ème}$ bit de poids faible de $testVal$. Si tous les mots valent $0xFFFFFFFF$ alors $testVal$ vaut $0x0000000F$ ou 15 en notation entière décimale.
3. Test sur FPU de $testVal \neq 15$.

Lorsqu'une intersection est trouvée, les données d'intersection sont mises à jour directement et le test continue avec les surfaces restantes. Les surfaces d'intersection trop éloignées ne seront pas testées (voir figure 5.4.3).

Le test vectoriel des signes des vpi s'effectue en $\lceil \frac{m}{4} \rceil$ tests SSE, $\lceil \frac{m}{4} \rceil$ instructions de combinaison, $\lceil \frac{m}{4} \rceil$ tests FPU et $\lceil \frac{m}{4} \rceil$ branchements au lieu d'un minimum de 1 test et 1 branchement FPU et maximum m tests FPU et m branchements.

5.5 Tests de la méthode 1 et résultats

Les performances des algorithmes FPU et SSE sont comparées sur 6 salles présentées en annexe A dont la complexité varie de minimale à élevée.

Puisque l'accélération porte sur la recherche d'intersection entre les rayons et les surfaces, c'est ce temps qui est pris en compte pour mesurer les performances des algorithmes d'intersections. Ces temps sont repris au tableau 5.5.1 sous l'appellation :

- t_{brut} pour l'algorithme brut présenté au chapitre 4.
- t_{brut_mod} pour l'algorithme modifié à la section 5.3.
- t_{SSE} pour l'algorithme SSE par paquet de surfaces.

Les différences entre t_{brut} et t_{brut_mod} proviennent de la réorganisation des instructions.

9. Pour rappel, le point appartient à la surface si les signes de tous les vpi sont ≤ 0 (équation (4.4.2)).

10. Une technique simple consiste à choisir un unique pseudo-sommet de remplissage hors de la salle et une orientation d'arête adéquate.

11. Pour chaque arête, le coût est de 2 multiplications, 2 soustractions et 1 addition.

12. Au moyen de la fonction intrinsèque `_mm_movemask_ps`.

Les temps mesurés pour la recherche d'intersections sont obtenus pour des simulations de 10^6 rayons sur un seul thread avec l'algorithme brut, l'algorithme brut modifié et l'algorithme SSE.

Salle	Surfaces	$t_{brut}(s)$	$t_{brut_mod}(s)$	$\frac{t_{brut}}{t_{brut_mod}}$	$t_{SSE}(s)$	$\frac{t_{brut}}{t_{SSE}}$
Boite2	6	12	13	0,9	9	1,3
Salle simple	10	16	17	0,9	11	1,5
GMVS	49	98	91	1,1	44	2,1
AmphiMath	72	73	70	1	33	2,1
Muno	103	135	124	1,1	57	2,2
Auditoire	151	149	139	1,1	61	2,3
Ferme	185	127	119	1,1	53	2,2

TABLE 5.5.1 – Gain sur le temps passé à la recherche d'intersection entre les rayons et les surfaces pour les algorithmes brut, brut modifié et SSE.

Puisque les résultats pour les algorithmes brut et brut modifié sont semblables, les gains de temps entre les algorithmes brut et SSE sont imputables au traitement SSE.

Les performances mesurées de l'algorithme SSE peuvent être comparées aux performances attendues suite aux réductions du nombre d'opérations présentées au tableau 5.4.1 pour des surfaces à 4 sommets, comme utilisées pour les salles testées.

Le gain théorique sur le calcul des distances est constant et est d'ordre 4 tandis le gain du test d'appartenance est d'ordre 2. Cette dernière valeur est obtenue selon l'estimation suivante du coût du test d'appartenance pour les versions SSE et scalaire :

1. Le coût du test d'appartenance SSE est de 8 opérations par surfaces
2. Le coût de l'algorithme brut varie entre 6 et 24 mais peut être remplacé par une valeur moyenne de 15 opérations si l'on suppose que l'arrêt des tests est équiprobable pour chaque arête.

Le gain total pour la recherche d'intersections entre le rayon et les surfaces dépend de la répartition du temps entre le calcul des distances et le test d'appartenance. Cette répartition est obtenue empiriquement par profilage du code au moyen du logiciel VTune¹³.

Pour les salles de complexité élevée, il apparaît que $\frac{1}{4}$ du temps est consacré au calcul des distances et $\frac{3}{4}$ du temps est alloué aux tests d'appartenance. Pour les salles basiques, ce rapport est de $\frac{1}{3}$ pour le calcul des distances contre $\frac{2}{3}$ pour le test d'appartenance.

En suivant cette répartition, le gain attendu est de :

13. VTune Amplifier XE 2011 d'Intel.

- $g = 0,25 * 4 + 0,75 * 2 = 2,5$ pour les salles de complexité moyenne.
- $g = \frac{1}{3} * 4 + \frac{2}{3} * 2 = 2,7$ pour les salles simples.

Il est à noter que ces valeurs sont optimistes car elles ne tiennent pas compte des surcoût engendrés par le transfert des données aux unités SSE et à leur mise en forme.

Les gains $\frac{t_{brut}}{t_{SSE}}$ mesurés pour les salles de complexité élevée sont proches de la valeur théorique attendue, au contraire des gains obtenus pour les petites salles. Cette différence pour les salles basiques est due à un rapport « temps de transfert SSE / temps de recherche d'intersection » plus défavorable, car le surcoût dû au passage aux unités SSE n'est plus négligeable face au temps de recherche.

5.6 Conclusion

En conclusion, le traitement par paquet de surfaces et de sommets fournit un gain d'ordre 2 sans contrainte sur la cohérence des rayons (contrairement au traitement vectoriel par paquet de rayons) et permet de traiter indifféremment un nombre quelconque de sommets¹⁴. De plus, ce gain est valable pour chaque cœur affecté au tir des rayons. Par exemple, pour un quadcore, on obtient un facteur d'accélération d'ordre 8, proche des gains obtenus sur GPU [33].

Passons maintenant à la méthode 2 d'accélération qui permettra de diminuer le nombre de surfaces testées lors de la recherche d'intersections, tout en conservant le traitement vectoriel des surfaces par paquet qui vient d'être étudié.

14. Si le nombre de sommets n'est pas un multiple de 4, des valeurs de padding adéquates sont utilisées.

Chapitre 6

Méthode 2 : Accélération par la recherche des surfaces occlusives

6.1 Introduction

Après avoir accéléré l'algorithme du calcul des intersections entre les rayons et les surfaces, on peut encore agir en réduisant le nombre de surfaces à tester pour déterminer avec certitude la surface de réflexion du rayon.

Contrairement aux méthodes de partitionnement spatial couramment utilisées, la méthode développée dans ce chapitre va tester l'utilisation des informations de visibilité entre les surfaces ainsi que d'une estimation des probabilités d'intersection entre les rayons et les surfaces.

Cette approche est envisagée afin d'obtenir un bon facteur d'accélération tout en :

- Évitant la subdivision ou les tests multiples des surfaces induits par le partitionnement spatial,
- Utilisant une structure permettant l'utilisation des instructions vectorielles,
- Permettant la régénération partielle de la structure de données lors d'une modification partielle de la géométrie,
- Utilisant une structure d'accélération dont la génération/régénération est fortement parallélisable.

Nous verrons par la suite que ces objectifs sont atteints en partie.

Le principe de cette méthode se base sur la constatation qu'avec la méthode brute (chapitre 4), l'entièreté de la liste des surfaces est parcourue pour trouver l'intersection la plus proche de l'origine du segment de rayon. Or, dès qu'une intersection est trouvée entre un rayon et une surface X , le test d'intersection peut se poursuivre en ne testant plus que les surfaces occlusives¹ entre O et

1. Pour chaque paire de surfaces A et B , une surface occlusive est une surface susceptible d'être touchée par un rayon quelconque voyageant entre ces deux éléments A et B .

X où O est la surface ou la source d'origine du segment de rayon. De plus, la détection de la première intersection sera accélérée en triant la liste des surfaces par probabilité décroissante d'intersection avec les rayons.

La méthode est développée en premier lieu selon un algorithme scalaire pour ensuite être accélérée vectoriellement en traitant les surfaces par paquets comme présenté au chapitre 5.

En se basant sur les données récemment fournies dans la thèse de D. Schröder [139], on montre que les performances, obtenues sur quelques salles représentatives de complexité géométrique moyenne, sont identiques à celle obtenues avec les arbres BSP. Par contre, la méthode développée dans ce chapitre est peu adaptée aux modèles géométrique très complexes², suite à la croissance du temps de génération en fonction du cube du nombre de surfaces³. Cependant, un avantage de cette technique est que la génération de la structure d'information géométrique est parallélisable et permet une régénération partielle lors d'une modification de la géométrie de la salle.

Ce chapitre est structuré comme suit :

1. La présentation globale et l'intégration de la méthode 2 dans l'algorithme du tir de rayons sont décrites à la section 6.2,
2. La description de la détection des surfaces occlusives est exposée à la section 6.3,
3. Le développement des algorithmes scalaire et vectoriel de recherche d'intersection entre les rayons et les surfaces en exploitant les surfaces occlusives figure à la section 6.4,
4. L'estimation et l'exploitation des informations de probabilité d'intersection entre les rayons et les surfaces pour accélérer la détection de la première surface intersectée sont décrites à la section 6.5,
5. Les résultats sont enfin analysés à la section 6.6.

6.2 Schéma global de l'intégration de la méthode 2 dans l'algorithme du tir de rayons

L'intégration de l'algorithme des surfaces occlusives dans l'algorithme du tir de rayons est illustrée à la figure 6.2.1 et se déroule en 4 étapes :

1. La détermination des surfaces occlusives au moyen de la méthode développée à la section 6.3,

2. Modèles comportant plus que quelques centaines de surfaces.

3. Ceci sera démontré dans la suite de ce chapitre.

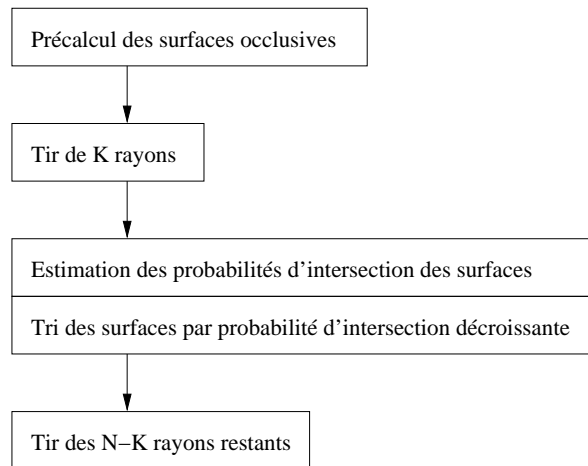


FIGURE 6.2.1 – Vue globale du tir de rayons avec la méthode des surfaces occlusives. Les surfaces occlusives sont précalculées pour chaque paire de surfaces tandis que l’estimation des probabilités d’intersection et le tri des surfaces est intégré au tir de rayons.

2. Le tir des K premiers rayons⁴ de la simulation pour comptabiliser le nombre d’intersections avec chaque surface,
3. L’estimation des probabilités d’intersections entre les rayons et les surfaces grâce aux données obtenues au point 2 et le classement des surfaces par probabilité d’intersection décroissante selon la méthode développée à la section 6.5,
4. Le tir des $N - K$ rayons restants.

De cette façon, l’utilisation de cette méthode est automatisée et transparente pour l’utilisateur final.

6.3 Détection des surfaces occlusives entre les paires de surfaces et les paires de source-surface

La détermination des surfaces occlusives entre les paires de surfaces et les paires de source-surface est traitée de la même façon. Dans la suite de ce document, la méthode de détermination sera décrite uniquement pour les paires de surfaces mais reste valable pour les sources.

Pour détecter les surfaces occlusives aux surfaces A et B , on détermine le volume minimal englobant tous les chemins de propagation rectiligne entre ces

4. Lors des tests, moins d’un millier de rayons a suffi pour obtenir une estimation suffisante des probabilités d’intersection.

deux surfaces, puis on teste l'intersection de ce volume avec les autres surfaces. Or, puisque ces surfaces sont convexes, ce volume correspond à l'enveloppe convexe⁵ de leurs sommets, dont un exemple est donné à la figure 6.3.1.

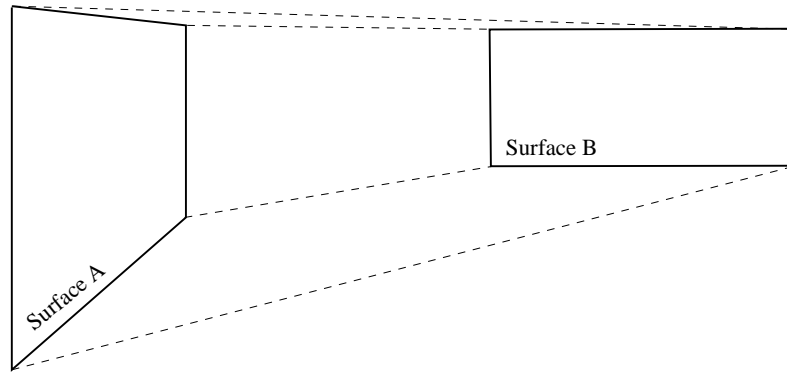


FIGURE 6.3.1 – Enveloppe convexe construite sur les sommets des surfaces convexes A et B . Elle comprend tous les chemins de propagation rectiligne entre ces deux surfaces.

La construction des enveloppes convexes est réalisée au moyen de la librairie open source qHull [6] qui implémente l'algorithme quickhull [18] et le nombre d'enveloppes à générer est développé à la sous-section 6.3.1. Ensuite le nombre de tests d'intersection entre ces enveloppes et les surfaces est donné à la sous-section 6.3.2 et cet algorithme est présenté à la sous-section 6.3.4. Pour terminer, le coût d'une mise à jour partielle des surfaces occlusives sera estimé à la sous-section 6.3.3.

6.3.1 Construction des enveloppes convexes

Pour une salle modélisée par M surfaces, le nombre d'enveloppes convexes générées pour les **paires de surfaces** se déduit facilement en soustrayant du nombre maximum de paires de surfaces $M(M - 1)$, le nombre de paires de surfaces générées à partir des surfaces coplanaires. En effet, les rayons ne se propagent pas entre deux surfaces coplanaires et leurs enveloppes convexes n'ont donc pas besoin d'être calculées.

Le nombre d'enveloppes convexes est donné par l'équation suivante

$$Q_{conv} = \frac{M(M - 1) - \left(\sum_{i=1}^C (M_i(M_i - 1)) \right)}{2} \quad (6.3.1)$$

5. Concrètement, une enveloppe convexe est un polyèdre convexe constitué par des surfaces planes convexes appelées facettes dans la suite de ce document. Ces facettes peuvent être définies par un nombre quelconque de points supérieur à 2. En pratique, les facettes utilisées sont triangulaires.

dans le cas où les M surfaces contiennent C groupes de M_i surfaces coplanaires. Le terme $\frac{1}{2}$ est dû au fait que l'enveloppe convexe des surfaces dans l'ordre A et B (« hullAB ») est identique à celle des surfaces dans l'ordre B et A (« hullBA ») tout comme leur liste de surfaces occlusives.

Pour une **source** S , le nombre d'enveloppes convexes générées vaut

$$Q_{conv_S} = M,$$

ce qui est négligeable par rapport Q_{conv} dans la plupart des salles.

Pour peu que le nombre de surfaces coplanaires soit faible, le nombre d'enveloppes convexes croît en $\frac{M^2}{2}$, ce qui limite la complexité géométrique maximale des salles pour rester dans un temps de génération acceptable.

Le temps de génération maximal acceptable doit être inférieur au gain de temps apporté par la méthode si les informations ne sont utilisées qu'une fois. Par contre, pour de multiples simulations dans une même salle⁶, ce temps maximum peut être plus élevé.

6.3.2 Nombre de tests d'intersection entre les enveloppes convexes et les surfaces

Maintenant que les enveloppes convexes sont construites, il reste à tester leur intersection avec les M surfaces du modèle géométrique desquelles on a retiré les surfaces de base de l'enveloppe considérée⁷.

Pour les paires de surfaces

Pour une enveloppe convexe construite sur les surfaces A et B, les M_A (respectivement M_B) surfaces coplanaires à la surface A (respectivement à la surface B) n'ont pas besoin d'être testées. Dès lors, la détection des surfaces occlusives à l'enveloppe convexe $hullAB$ nécessite

$$Q_{int_AB} = M - 2 - (M_A + M_B) \quad (6.3.2)$$

tests d'intersection.

En considérant l'ensemble des enveloppes convexes, le nombre de tests d'intersection devient

$$Q_{int} = \sum_{i=1}^{Q_{conv}} Q_{int_i}. \quad (6.3.3)$$

où Q_{int_i} est le nombre d'intersections testées pour la $i^{\text{ème}}$ enveloppe convexe.

6. Tel que lors d'un déplacement de la source ou du récepteur.

7. Les surfaces de base de l'enveloppe convexe sont celles dont les sommets ont servi à sa construction.

En supposant qu'il n'y ait pas de surfaces coplanaires, cette expression se réduit à

$$Q'_{int} = \frac{M(M-1)(M-2)}{2} \quad (6.3.4)$$

et croît en M^3 , ce qui est plus élevé que la génération des enveloppes convexes. C'est acceptable pour les scènes de complexité moyenne (jusqu'à une centaine de surfaces) mais cela devient vite limitant pour les scènes complexes.

Pour les paires de source - surface

Pour un couple source S et surface A , le nombre d'intersections avec l'enveloppe convexe $hullSB$ vaut

$$Q_{int_SB} = M - 1 - M_A \quad (6.3.5)$$

qui, pour une source et l'ensemble des surfaces, devient

$$Q_{int_S} = \sum_{i=1}^{Q_{conv_S}} Q_{int_Si} \quad (6.3.6)$$

où Q_{int_Si} est le nombre d'intersections testées pour la $i^{ème}$ enveloppe convexe basée sur la source S .

S'il n'y a pas de surfaces coplanaires, cette expression se réduit à

$$Q'_{int_S} = M(M-1) \quad (6.3.7)$$

dont la croissance est d'ordre M^2 et est négligeable par rapport à Q'_{int} .

Ces coûts sont valables pour la détection des surfaces occlusives sur l'entière du modèle mais lors d'une mise à jour partielle de la géométrie, le coût est fortement réduit et peut-être estimé par les équations développées à la sous-section 6.3.3

6.3.3 Mise à jour partielle des surfaces occlusives

Lorsque la géométrie de la salle est modifiée partiellement, les informations de visibilité ne doivent être recalculées que pour les surfaces modifiées puisque ces informations sont indépendantes pour chaque surface.

Pour les paires de surfaces

En supposant qu'il n'y a pas de surfaces coplanaires parmi les M surfaces de la salle⁸ et que K surfaces ont été modifiées, le nombre et le coût des enveloppes convexes régénérées est évalué comme suit :

8. Alors, $Q_{conv} = \frac{M(M-1)}{2}$.

1. Le nombre d'enveloppes convexes à recalculer est donné par la progression arithmétique suivante

$$\begin{aligned}
Q_{hr} &= \sum_{i=1}^K (M - i) \\
&= \frac{(M - K + M - 1) K}{2} \\
&= \frac{K (2M - K - 1)}{2}
\end{aligned} \tag{6.3.8}$$

2. Le coût de reconstruction peut être estimé par

$$t'_{hull} = \frac{t_{hull}}{g_{hr}}$$

où t_{hull} est le temps mis pour générer les enveloppes convexes pour toute la salle et

$$g_{hr} = \frac{Q_{conv}}{Q_{hr}} \tag{6.3.9}$$

est le gain sur le nombre d'enveloppes convexes.

Dans les mêmes conditions, le nombre d'intersections à recalculer est estimé en deux temps :

1. $(M - 2)$ intersections pour chacune des Q_{hr} nouvelles enveloppes convexes et
2. K intersections des surfaces modifiées avec les $(Q_{conv} - Q_{hr})$ enveloppes convexes conservées⁹

sont recalculées pour l'ensemble des paires de surfaces.

Le **nombre total d'intersections recalculées** vaut dès lors

$$\begin{aligned}
Q_{ir} &= Q_{hr} (M - 2) + (Q_{conv} - Q_{hr}) K \\
&= \frac{K}{2} (M - 2) (2M - K - 1) + \frac{K}{2} (M (M - 1) - K (2M - K - 1)) \\
&= \frac{K}{2} ((2M - K - 1) (M - 2 - K) + M (M - 1)).
\end{aligned} \tag{6.3.10}$$

Le **temps de recalcul** peut être estimé par

$$t'_{inter} = \frac{t_{inter}}{g_{ir}}$$

9. Puisque si ces enveloppes convexes n'ont pas été modifiées, les K surfaces ne peuvent pas être leurs surfaces de base.

où t_{inter} est le temps mis pour tester les Q'_{int} intersections entre toutes les enveloppes convexes et toutes les surfaces de la salle et

$$g_{ir} = \frac{Q'_{int}}{Q_{ir}} \quad (6.3.11)$$

est le **gain sur le nombre d'intersections** obtenu en ne traitant que les surfaces modifiées.

Pour les paires de source - surface

En supposant qu'il n'y a pas de surfaces coplanaires parmi les M surfaces de la salle¹⁰ et que K surfaces ont été modifiées, le nombre et le coût des enveloppes convexes régénérées sont évalués comme suit :

1. Le nombre d'enveloppes convexes à recalculer pour une source est donné par

$$Q_{Shr} = K,$$

2. Le gain sur le nombre d'enveloppes convexes vaut

$$g_{Shr} = \frac{M}{K}.$$

Dans les mêmes conditions, le nombre d'intersections à recalculer est estimé en deux temps et nécessite :

1. $K(M - 1)$ intersections pour l'ensemble des nouvelles enveloppes convexes et
2. $K(M - K)$ intersections pour l'ensemble des enveloppes convexes non modifiées.

Le **nombre total d'intersections** vaut

$$Q_{Sir} = K(2M - K - 1)$$

et le **gain sur le nombre d'intersections** vaut

$$g_{Sir} = \frac{Q'_{int_S}}{Q_{Sir}}.$$

10. Alors, $Q_{conv_S} = M$.

6.3.4 Méthode d'intersection entre une enveloppe convexe et une surface

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer si deux objets convexes s'intersectent. Une présentation des principales techniques utilisées en détection de collisions est disponible dans [75].

Les techniques les plus évoluées font intervenir des structures géométriques supplémentaires telles que les arbres de partitionnement, ce qui n'est souhaité dans ce cas-ci. De plus, ces techniques ne sont pas directement appliquées au cas de l'intersection d'une surface S et d'une enveloppe convexe $hullAB$ mais plutôt à l'intersection de boîtes englobantes ou d'enveloppes convexes et ne sont pas directement applicables au cas considéré.

Méthode de test utilisée

Dans le cadre de cette thèse, le choix s'est porté sur une méthode basique, sans structures géométriques supplémentaires, pour sa facilité d'implémentation.

Elle repose sur la constatation bien connue en géométrie numérique que deux objets convexes s'intersectent si au moins une arête de l'un des objets intersecte une facette de l'autre objet. Cette constatation est valable si aucun des objets n'est entièrement inclus dans l'autre, ce qui sera résolu en traitant ce cas séparément.

Principales étapes et points particuliers

La méthode de test d'intersection entre une surface S convexe et une enveloppe convexe $hullAB$ se décompose en 3 étapes principales qui testent :

1. L'inclusion de S dans $hullAB$,
2. L'intersection des arêtes de S avec les facettes de $hullAB$,
3. L'intersection des arêtes de $hullAB$ avec S .

Ces tests s'interrompent dès que l'hypothèse d'intersection est soit validée, soit invalidée.

Ce schéma va être adapté pour tenir compte de quelques spécificités :

1. Le test d'inclusion de S dans $hullAB$ peut se faire normalement en y testant l'inclusion de tous ses sommets. Cependant, puisqu'on cherche simplement à déterminer l'intersection des deux objets, il suffit qu'il existe au moins un sommet de S dans $hullAB$ pour que l'intersection existe avec ou sans inclusion de la surface. Ceci permet de réduire le nombre de tests de l'étape 1.
2. Lorsqu'une partie des sommets de S (respectivement de $hullAB$) est exactement sur un plan de support d'une facette (respectivement de S),

les arêtes associées à ces sommets ne traversent pas ce plan mais l'intersection de la surface entière peut exister ou pas. Quelques exemples d'indétermination sont présentés aux figures 6.3.2 et 6.3.3 pour lesquels la situation doit être clarifiée au moyen de tests supplémentaires.

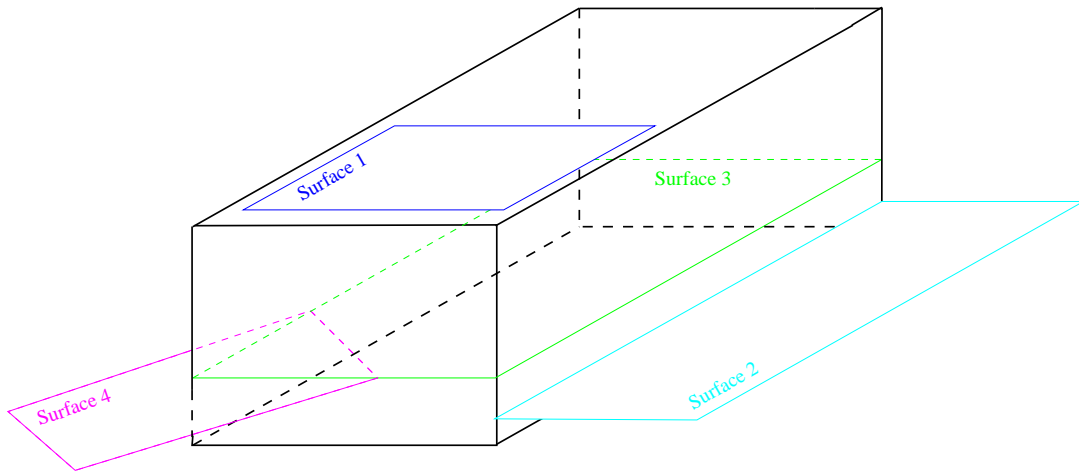


FIGURE 6.3.2 – Exemple de surfaces dont une partie des sommets appartient au plan de support des facettes de l'enveloppe convexe.

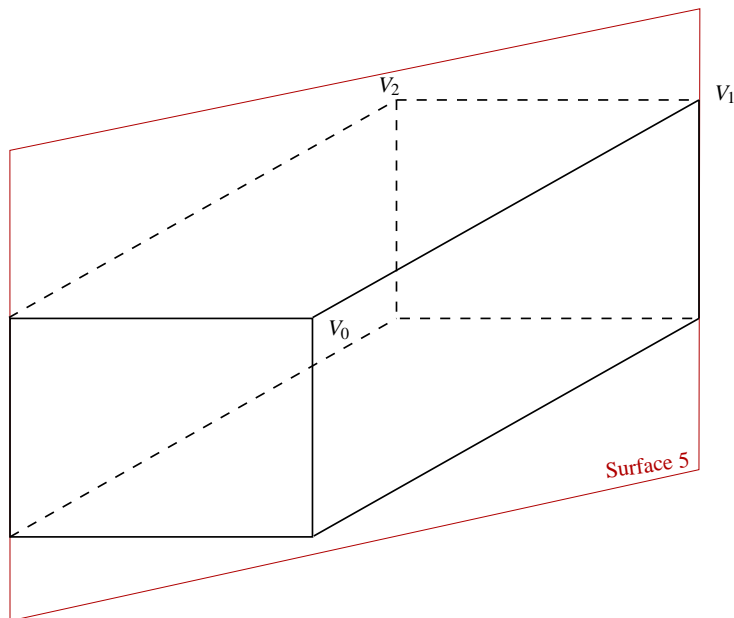


FIGURE 6.3.3 – Exemple d'un cas particulier dû à la présence de sommets de l'enveloppe convexe sur le plan support de la surface 5

Algorithme pour l'intersection d'une enveloppe convexe avec une surface plane convexe

En tenant compte des spécificités présentées au point précédent, l'algorithme devient :

1. Détermination de la position relative des sommets de S par rapport aux facettes de $hullAB$. S'il existe au moins un sommet de S dans $hullAB$, alors l'intersection existe¹¹ sinon on passe au point 2.
2. Test si tous les sommets de S sont du côté extérieur d'un plan de support d'une facette ou inclus dans ce plan, alors l'intersection est impossible sinon on passe au point 3. Ce test permet de rejeter l'intersection des surfaces 1 et 2 illustrées à la figure 6.3.2.
3. Test de l'intersection des arêtes de S avec les facettes de $hullAB$. Considérant une facette F_i , le problème peut se scinder en deux parties :
 - (a) Pour les arêtes de S dont aucun sommet n'appartient au plan support de F_i , le test d'intersection ne s'effectue que si ces sommets sont de part et d'autres de ce plan. S'il n'y a pas d'intersection, on passe au point 4.
 - (b) Pour les arêtes dont un des sommets V_j est sur F_i et l'autre sommet est situé du côté intérieur à la facette, l'intersection existe si V_j appartient à la facette. Les surfaces 3 et 4 de la figure 6.3.2 illustrent cette situation. S'il n'y a pas d'intersection, on passe au point 4.
4. Test de l'intersection des arêtes de $hullAB$ avec S . Si tous les sommets de $hullAB$ sont du même côté du plan de support S (au sens non strict), alors l'intersection est impossible. Dans le cas contraire,
 - (a) Pour les arêtes dont les sommets ne sont pas sur le plan de support de S , on teste l'intersection des arêtes E_i de $hullAB$ qui ont des sommets de part et d'autre de ce plan.
 - (b) Pour une arête de sommets V_0 et V_1 dont V_1 est sur π_S le plan support de S , on teste si ce sommet appartient à la surface. Si non, l'arête ne traverse pas la surface. Si oui, on teste si V_1 est relié par une arête à au moins un sommet V_2 situé du côté opposé de π_S à V_0 . Dans ce cas, l'enveloppe convexe traverse la surface, comme illustré par la surface 5 à la figure 6.3.3.

Le test d'intersection d'une arête avec une surface s'effectue en 2 parties :

1. Calcul du point d'intersection P entre le segment de droite et le plan support

11. Le cas où la surface S est incluse dans l'enveloppe convexe est traité automatiquement par ce point.

2. Test d'appartenance de P à la surface.

Le coût de ces tests dépend de la surface et de l'enveloppe convexe traitées. C'est pour cela qu'un coût moyen sera utilisé lors des tests à la section 6.6.

6.4 Recherche accélérée d'intersection entre un rayon et une surface par utilisation des obstructions sur le parcours du rayon

Lorsque les listes des surfaces occlusives sont connues, la recherche d'intersection peut s'effectuer soit scalairement surface par surface (sous-section 6.4.1), ou soit vectoriellement par paquets de surfaces (sous-section 6.4.2).

6.4.1 Traitement scalaire

Le calcul des distances et des tests d'appartenance aux surfaces se fait de façon semblable au cas brut du chapitre 4. Les surfaces testées sont issues de deux listes :

1. La liste des surfaces globales pour trouver une première intersection et ensuite,
2. La liste des surfaces occlusives pour déterminer l'existence d'une intersection plus proche.

Le parcours de ces deux listes est introduit dans l'algorithme développé à la section 5.3.

L'algorithme de recherche d'intersection est illustré à la figure 6.4.1 et son schéma global est le suivant :

1. La liste globale des surfaces est parcourue et testée surface par surface. Le parcours s'arrête dès qu'une intersection est trouvée entre le segment de rayon issu de la surface ou de la source O et la surface X . Celle-ci devient temporairement la surface de réflexion du rayon et on passe au point 2, sinon, le rayon est perdu.
2. La liste des surfaces occlusives entre O et X est parcourue entièrement à la recherche de l'intersection la plus proche.

L'organisation des listes de surfaces sera optimisée à la section 6.5 pour réduire le nombre de surfaces testées.

6.4.2 Traitement vectoriel par paquet de surfaces

Le parcours des listes de surfaces globales et occlusives est vectorisé par paquets de surfaces. De la même manière que pour le traitement occlusif scalaire,

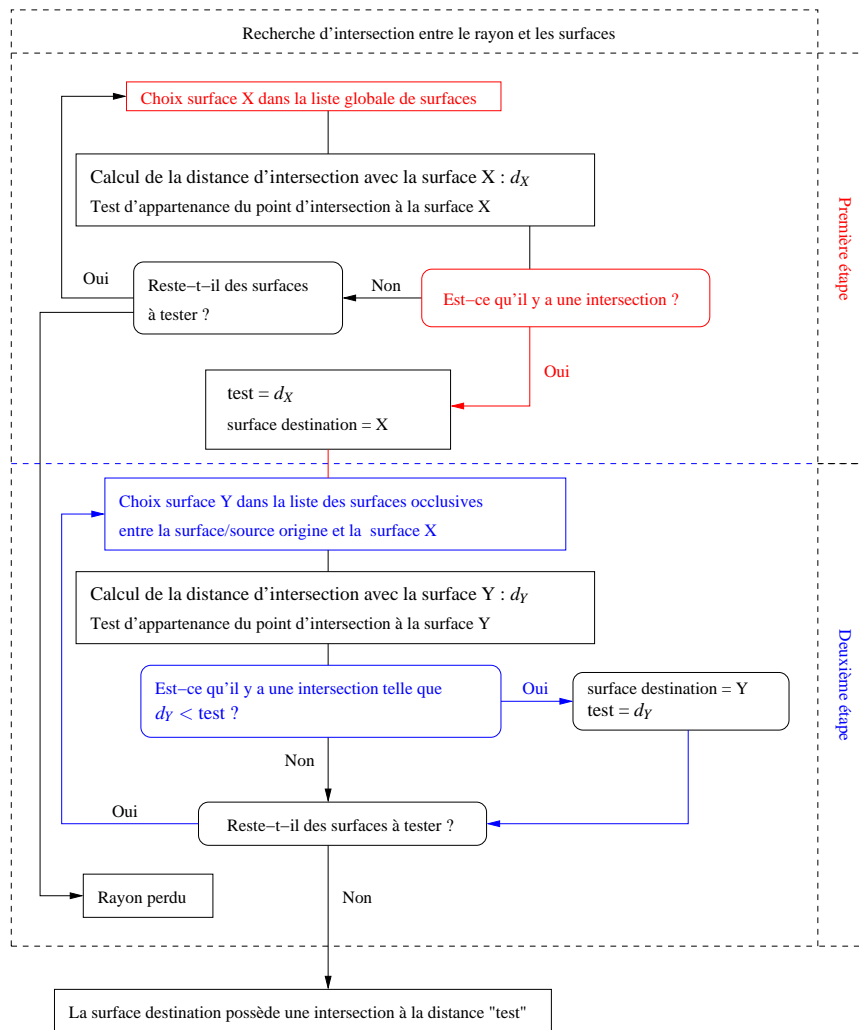


FIGURE 6.4.1 – Algorithme scalaire de recherche d'intersection grâce aux surfaces occlusives.

ce traitement nécessite une série de modifications de l'algorithme précédemment développé au chapitre 5.

Puisque le parcours de la liste globale s'arrête dès qu'une intersection est trouvée, le calcul des distances ne s'effectue plus d'une traite pour toutes les surfaces. Celles-ci sont traitées par blocs de 4 sur lesquels les distances et les tests d'appartenance sont effectués.

Les deux étapes principales de l'algorithme sont :

1. La recherche d'une première intersection par blocs de 4 surfaces. Les distances sont calculées sur l'entièreté du bloc puis l'appartenance des points d'intersection est testée surface par surface. Ainsi, le test d'appartenance peut s'arrêter dès la première intersection trouvée sur une

surface X de distance $dist = d_X$.

2. La recherche d'une intersection plus proche s'effectue ensuite sur la liste des surfaces occlusives entre O et X par bloc de 4 surfaces. Ces blocs sont traités de la même façon qu'au point 1. Lorsqu'une intersection est trouvée sur une surface Y plus proche que l'intersection sur X , la surface destination temporaire est mise à jour et la recherche continue.

Cet algorithme est illustré à la figure 6.4.2.

Le gain de temps obtenu par vectorisation sera inférieur à celui obtenu au chapitre 5. En effet, le passage de la liste globale à la liste des surfaces occlusives introduit des délais supplémentaires et l'utilisation de blocs de 4 surfaces implique un surcoût de transfert de et vers l'unité SSE. Cependant, ce gain reste correct¹² pour l'ensemble des salles de complexité géométrique moyenne testées à la section 6.6.

6.5 Minimisation du nombre de surfaces testées lors de la recherche d'intersections

Le nombre de surfaces testées lors du parcours des listes de surfaces globale et occlusives est donné à la sous-section 6.5.1 et sera réduit de deux façons :

1. En empêchant de tester une même surface dans la liste globale des surfaces et dans les listes occlusives, comme décrit à la sous-section 6.5.2.
2. En organisant les listes de façon à minimiser le nombre de surfaces testées. Pour simplifier le problème, seul le parcours de la liste globale sera optimisé à la sous-section 6.5.3.

Ce deuxième point nécessite l'estimation des probabilités d'intersections des surfaces par les rayons selon la méthode développée à la sous-section 6.5.4.

6.5.1 Nombre de surfaces testées pour la recherche d'intersection avec N rayons

Le nombre de surfaces testées pour la réflexion d'un segment de rayon est la somme du nombre de surfaces testées dans la liste globale et dans la liste des surfaces occlusives.

Pour un segment de rayon, le nombre de surfaces testées vaut

$$M_{test_segment} = (M_X + \#(L_{occl_{OX}})) \quad (6.5.1)$$

où M_X est le nombre de surfaces testées pour trouver la première intersection sur la surface X , $L_{occl_{OX}}$ est la liste des surfaces occlusives entre l'origine O du

12. Facteur d'accélération mesuré de 1,7.

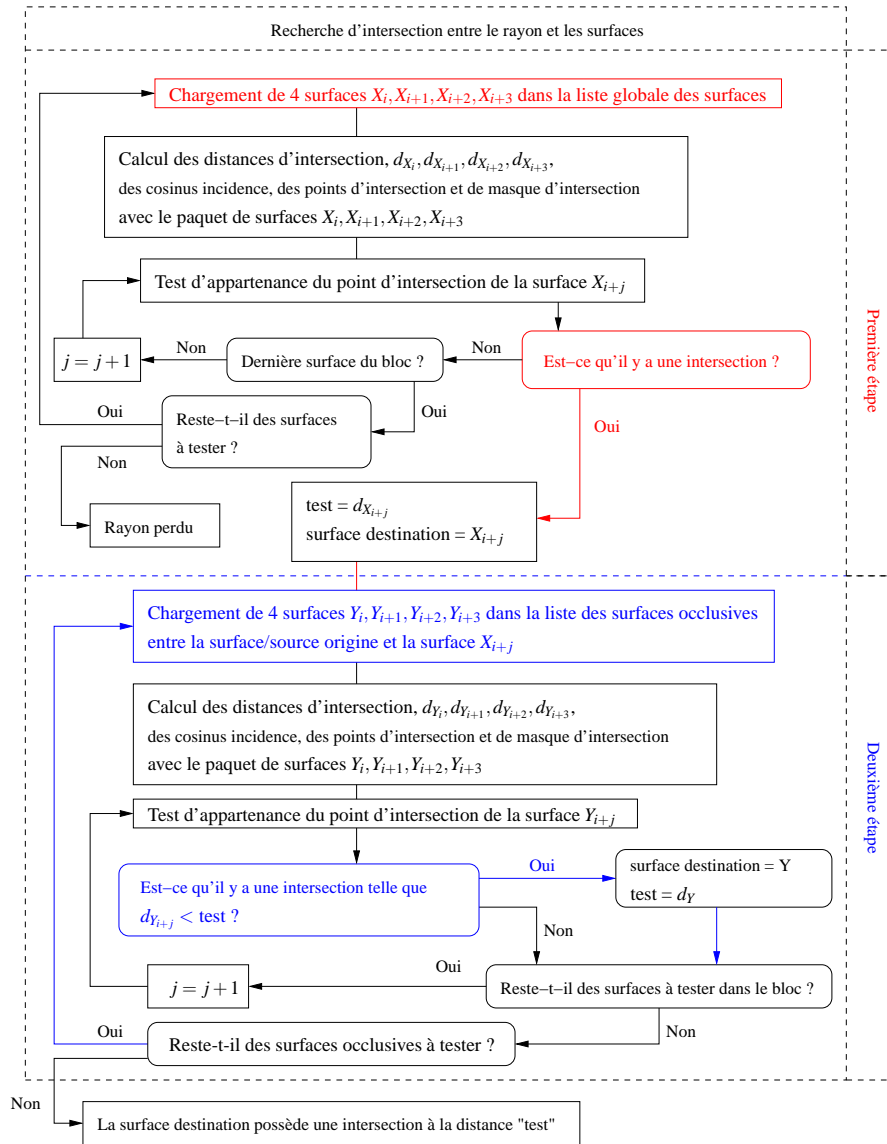


FIGURE 6.4.2 – Algorithme vectoriel de recherche d'intersection entre les rayons et les surfaces qui tire parti des surfaces occlusives en deux étapes : premièrement, parcours de la liste globale des surfaces à la recherche d'une première intersection et deuxièmement, parcours de la liste des surfaces occlusives à la recherche d'une intersection plus proche.

segment de rayon et la surface X et $\#(L)$ est le nombre d'éléments de la liste L .

Pour N rayons, le nombre total de surfaces testées lorsque chaque rayon i

subit K_i réflexions vaut

$$M_{test} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{K_i} (M_{ijX} + \#(L_{occl_{OX}})) \quad (6.5.2)$$

où M_{ijX} est le nombre de surfaces testées pour trouver une première intersection sur la surface X avec le rayon i à la réflexion d'ordre j .

Pour l'instant, une surface sera testée deux fois si elle est à la fois présente dans la liste globale avant M_X et présente dans la liste des surfaces occlusives entre O et X . Une technique pour éliminer ces doubles tests est présentée à la sous-section 6.5.2. Ensuite, la valeur de M_{test} sera réduite en minimisant la valeur M_{ijX} selon la méthode décrite à la sous-section 6.5.3.

6.5.2 Élimination des doubles tests

Pour éliminer le double test d'une même surface, les surfaces présentes avant la surface X dans la liste globale seront éliminées de la liste des surfaces occlusives $L_{occl_{OX}}$, pour toute surface X globale.

L'élimination du double test conduit à tester un nombre de surfaces M_{test_1} inférieur ou égal à M_{test} :

$$M_{test_1} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{K_i} (M_{ijX} + M_{occl_{OX}}) \quad (6.5.3)$$

où

$$M_{occl_{OX}} = \#(L_{occl_{OX}}) - \#(L_{ijX} \cap L_{occl_{OX}}) \quad (6.5.4)$$

est le nombre de surfaces occlusives comprises entre O et X après élimination des doubles tests et L_{ijX} est la liste des surfaces testées avant la surface X .

6.5.3 Minimisation du nombre de surfaces testées dans la liste globale

Pour réduire le temps de recherche d'intersections entre les rayons et les surfaces, on peut agir sur le nombre total de surfaces testées pendant le tir de rayons (M_{test_1}). Pour simplifier cette tâche, la technique utilisée va uniquement agir sur le nombre de surfaces testées avant de trouver la première intersection.

Dans l'équation (6.5.3), chaque somme ($M_{ijX} + M_{occl_{OX}}$) dépend de l'ordre de parcours des surfaces dans la liste globale :

- Plus la première intersection est trouvée tôt dans la liste globale, plus le terme M_{ijX} est petit,
- Plus il y a de surfaces communes dans les listes L_{ijX} et $L_{occl_{OX}}$, plus on pourra supprimer de surfaces dans cette dernière et réduire $M_{occl_{OX}}$,

Pour minimiser le coût global de la recherche d'intersection, l'idéal serait d'avoir un coût $(M_{ij_X} + M_{occl_{OX}})$ faible pour les intersections les plus fréquentes, ce qui peut se faire en réorganisant l'ordre de parcours des surfaces.

Pour simplifier cette optimisation, le coût de $M_{occl_{OX}}$ sera considéré constant et retiré de l'équation à minimiser qui devient

$$M'_{test} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{K_i} (M_{ij_X}). \quad (6.5.5)$$

Les surfaces dont l'intersection est la plus probable seront testées en premier grâce au tri des surfaces par probabilité décroissante d'intersection avec les rayons. Ces probabilités qui ne sont pas connues *a priori* seront estimées par la méthode décrite dans la sous-section 6.5.4. Cette estimation ainsi que le tri de la liste globale des surfaces seront effectués une seule fois en début de tir.

6.5.4 Estimation des probabilités d'intersection entre les rayons et les surfaces

La probabilité d'intersection entre un segment de rayon et une surface X dépend de plusieurs paramètres dont le point d'origine P_0 et l'angle d'incidence du segment de rayon, la présence de diffusion sur la surface d'origine ainsi que l'angle solide entre X et P_0 . Pour simplifier, ces probabilités seront simplement estimées par le nombre relatif d'intersections des surfaces avec les rayons.

D'autres paramètres pourraient être pris en compte pour affiner l'estimation des probabilités d'intersections dont notamment l'historique des surfaces rencontrées pendant la propagation du rayon. Cependant, même en se limitant à un historique réduit à quelques réflexions, la gestion des listes des surfaces deviendrait nettement plus complexe pour un gain attendu faible si le nombre de surfaces occlusives n'est pas faible¹³.

Pour éviter un tir de rayons spécifique à l'estimation des probabilités d'intersection, les K premiers rayons de la simulation seront utilisés à cet effet puis les surfaces seront triées avant de continuer la simulation avec les $N - K$ rayons restants (voir figure 6.2.1).

6.6 Résultats et analyse

Les performances de la méthode des surfaces occlusives sont analysées en deux temps :

13. Dans ce cas, la réduction des M_{ij_X} devient négligeable par rapport au terme $M_{occl_{OX}}$.

1. A la sous-section 6.6.3, les performances des méthodes scalaire et vectorielle sont évaluées au moyen de plusieurs critères et d'un ensemble de salles décrites en annexe A.1.
2. Ensuite, la détection des surfaces occlusives sera analysée à la sous-section 6.6.4.

Avant cela, les critères de performances seront définis à la sous-section 6.6.1 puis la configuration des salles de tests sera présentée à la sous-section 6.6.2.

6.6.1 Critères de performances

Les performances temporelles de la méthode aux surfaces occlusives¹⁴ seront évaluées sur le temps de recherche d'intersection et non sur le temps total de simulation pour éviter l'influence des coûts annexes tels que les intersections entre les rayons et les récepteurs, etc.

Les critères de performances choisis sont les gains sur :

- Le temps de recherche d'intersection de la version occlusive vectorielle par rapport à l'algorithme brut

$$g_v = \frac{t_{brut}}{t_v}$$

et de la version occlusive scalaire par rapport à l'algorithme brut

$$g_s = \frac{t_{brut}}{t_s}$$

où t_{brut} , t_v et t_s sont respectivement les temps mis par l'algorithme brut, par l'algorithme occlusif vectoriel et par l'algorithme occlusif scalaire pour la recherche d'intersection entre les rayons et les surfaces.

- Le temps de recherche d'intersection apporté par la vectorisation

$$g'_v = \frac{t_v}{t_s}$$

- Le nombre de calculs de distances d'intersection

$$g_{dist} = \frac{d_{brut}}{d_{occl}}$$

et le nombre de tests d'appartenance

$$g_{in} = \frac{in_{brut}}{in_{occl}}$$

où d_{brut} , d_{occl} sont respectivement les nombres moyens de distances calculées pour une réflexion par l'algorithme brut et par l'algorithme occlusif et où in_{brut} , in_{occl} sont les nombres de tests d'appartenance moyens par réflexion effectués par l'algorithme brut et l'algorithme occlusif.

14. Que l'on nommera méthode occlusive par la suite par simplification de langage.

6.6.2 Configuration des salles de test

La méthode a été testée sur un ensemble de salles de complexité géométrique croissante illustrées en annexe A.1 :

- Une salle simple à 10 surfaces, figure A.1.1,
- La salle de concert de Vienne dénommée GMVS (Großer Musikvereinsaal), figures A.1.2 à A.1.4,
- Un amphithéâtre de l’institut de mathématiques de l’Ulg, figures A.1.5 et A.1.6,
- L’église de Muno (Province du Luxembourg belge), figure A.1.7,
- Un auditoire de l’institut Gramme à Liège, figures A.1.8 et A.1.9,
- Une ferme, figures A.1.10 à A.1.12.

Plusieurs de ces salles¹⁵ possèdent différentes modélisations géométriques obtenues en faisant varier le nombre de surfaces débordantes¹⁶ et la densité d’occlusions en subdivisant certaines surfaces en plus petites surfaces planes convexes¹⁷ tout en conservant une salle identique. Les différences entre ces modélisations sont résumées au tableau 6.6.1 tandis que le nombre de surfaces ainsi que le nombre d’enveloppes convexes générées pour chaque modèle sont fournis au tableau 6.6.2.

Salles	Débordement	Subdivision
GMVS	Très élevé	Non
GMVS2	Moyen	
GMVS3	Quasi nul	
AmphiMath	Elevé	Non
AmphiMath2	Faible	
Auditoire	Elevé	Non
Auditoire2	Réduit	
Ferme	Moyen	Non
Ferme2	Réduction toiture	
Ferme3	Réduction barbacanes	

TABLE 6.6.1 – Principales différences entre les modèles géométriques des salles testées.

Pour comparer les performances de la méthode occlusive avec d’autres méthodes d’accélération du tir de rayons sonores, les modèles comportant le moins

15. Les salles GMVS, AmphiMath, Auditoire et Ferme.

16. Le logiciel Salrev comporte la particularité de supporter le débordement de surfaces pour faciliter la modélisation géométrique des salles. Grâce à cette astuce, des découpages compliqués peuvent être facilement modélisés en un nombre réduit de surfaces (voir les modèles en annexe A).

17. Suite à sa forte densité d’occlusions, la ferme comporte une subdivision de la toiture en surfaces de taille moyenne pour limiter la taille des listes de surfaces occlusives.

Salles	Nombre de surfaces	Nombre d'enveloppes convexes
Simple	10	55
GMVS	49	1225
GMVS2	51	1326
GMVS3	65	2145
AmphiMath	72	2628
AmphiMath2	88	3916
Muno	103	5356
Auditoire	151	11476
Auditoire2	145	10595
Ferme	177	15753
Ferme2	185	17205
Ferme3	186	17391

TABLE 6.6.2 – Nombre de surfaces et d’enveloppes convexes des modèles géométriques pour les salles de tests.

de surfaces débordantes seront utilisés puisque la plupart des modélisations rencontrées dans la littérature ne comportent aucune surface de ce type. Généralement, le nombre de surfaces augmente si les surfaces débordantes ne sont pas autorisées. Par conséquent, le temps de simulation par l’algorithme brut augmente mais reste plus ou moins constant pour l’algorithme occlusif comme présenté au tableau 6.6.6.

6.6.3 Performances de la méthode occlusive

Pour se situer par rapport aux méthodes d’accélération existantes, la méthode occlusive vectorielle est comparée à la méthode la plus efficace actuellement : les arbres BSP. Cette comparaison se fait à titre qualitatif puisque les gains pour cette méthode sont repris de [139] pour un tir de particules effectué sur d’autres salles que celles testées dans ce chapitre.

Les gains sur le temps de simulation sont comparés à la figure 6.6.1 en fonction du nombre de surfaces. On peut voir que la méthode occlusive vectorielle est aussi efficace que les arbres BSP pour les modèles moyennement complexes. On observe aussi que les performances diminuent lorsque la densité d’occlusion augmente (les salles de tests composées de 50 à 200 surfaces ont une densité d’occlusion plus importante que celles comportant moins de surfaces). Cette comparaison est limitée par le fait que les performances des deux méthodes ne dépendent pas des mêmes facteurs. Pour les arbres BSP, la densité moyenne de réflexions de la salle est le facteur dominant tandis que pour la méthode 2, il s’agit plutôt de la densité d’occlusions dans la salle.

Ci-après, le gain apporté par la méthode occlusive sera analysé plus en

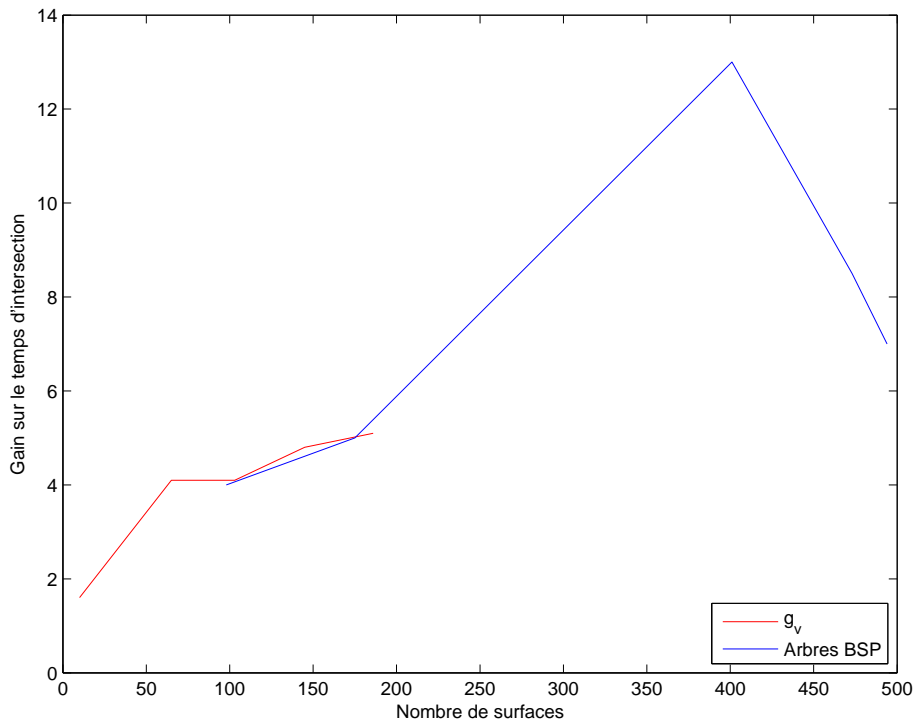


FIGURE 6.6.1 – Comparaison des gains sur le temps de simulation obtenus par la méthode occlusive vectorielle et les arbres BSP selon Schroöder [139].

détails en déterminant la répartition des tests entre les surfaces globales et occlusives et entre le calcul des distances et les tests d'appartenance.

Gains sur le temps de recherche d'intersection

Salles	g_v	g_s	g'_v
Salle simple	1,6	1,5	1,1
GMVS3	4,1	2,5	1,7
AmphiMath2	4,1	2,6	1,6
Muno	4,1	2,4	1,7
Auditoire2	4,8	2,9	1,7
Ferme3	5,1	2,9	1,8

TABLE 6.6.3 – Gains de temps sur la recherche d'intersection entre les rayons et les surfaces. Les gains sont ceux apportés par les méthodes occlusive vectorielle et occlusive scalaire.

Les gains sur le temps de recherche d'intersection sont donnés au tableau 6.6.3 pour la méthode occlusive scalaire et vectorielle.

Pour les salles de complexité moyenne, la version scalaire apporte un gain g_s à l'algorithme brut compris entre 2,5 et 3 et la vectorisation augmente le gain g_s d'un facteur 1,7 pour obtenir un gain g_v compris entre 4 et 5.

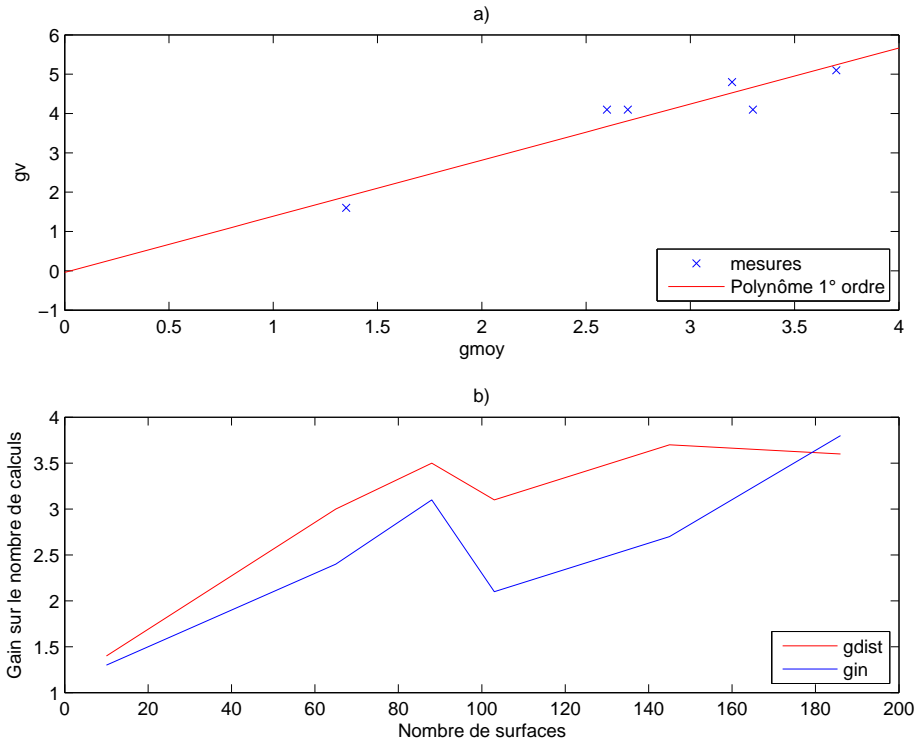


FIGURE 6.6.2 – Evolution du gain g_v en fonction a) d'un gain moyen $g_{moy} = \frac{g_{dist} + g_{in}}{2}$ et b) évolution de g_{dist} et de g_{in} en fonction du nombre de surfaces.

Le gain g_v va ensuite être analysé selon ses différentes composantes :

- La répartition du gain entre le calcul des distances et les tests d'appartenance,
- La répartition du nombre de surfaces traitées entre la liste globale et les listes occlusives,
- L'influence du débordement des surfaces et de la densité d'occlusion.

Ces analyses vont permettre de mieux comprendre les facteurs influençant les performances de g_v .

Il en ressort que :

- Le tri de la liste globale des surfaces est efficace et aide à trouver rapidement une première intersection,
- La subdivision des surfaces fortement occlusées permet de réduire facilement cette densité d'occlusions,
- La suppression du débordement des surfaces n'est intéressante que lorsque le débordement ne génère pas ou peu de surfaces supplémentaires.

Évolution de g_v en fonction du gain sur le calcul des distances et sur les tests d'appartenance

Le gain g_v est dépendant des gains g_{dist} sur le calcul des distances et g_{in} sur les tests d'appartenance. Leurs valeurs sont données au tableau 6.6.4 et g_v croît quasi-linéairement en fonction de leur moyenne, ainsi qu'illustré à la figure 6.6.2 a).

Salles	g_{dist}	g_{in}
Salles simples	1,4	1,3
GMVS3	3	2,4
AmphiMath2	3,5	3,1
Muno	3,1	2,1
Auditoire2	3,7	2,7
Ferme3	3,6	3,8

TABLE 6.6.4 – Gains sur le nombre de calculs de distance et de tests d'appartenance apportés par la méthode occlusive.

Dans le tableau 6.6.4 et à la figure 6.6.2 b), il apparaît que le gain g_{dist} est généralement plus élevé que g_{in} , ce qui peut s'expliquer comme suit : pour l'algorithme de référence, le nombre de distances calculées vaut $M - 1$ tandis que le nombre de tests d'appartenance aux surfaces est une fraction¹⁸ de ce nombre. Le fait que g_{in} soit inférieur à g_{dist} peut être dû à la difficulté d'obtenir une réduction supplémentaire sur la valeur déjà faible du nombre de tests d'appartenance.

Répartition des calculs entre les surfaces globales et les surfaces occlusives

La répartition, entre la liste globale des surfaces et les listes des surfaces occlusives, du nombre de distances calculées et du nombre de tests d'appartenance va permettre d'analyser d'où provient le gain de la méthode occlusive¹⁹. Cette répartition est donnée au tableau 6.6.5 en nombre de surfaces et en pourcentage du nombre de surfaces traitées par la méthode brute.

Pour le calcul des distances, le nombre de surfaces traitées :

- Reste plus ou moins du même ordre de grandeur dans la liste globale pour toutes les salles moyennes grâce au tri de cette liste.

18. Empiriquement, cette fraction a été déterminée de l'ordre de 25 à 35% du nombre de surfaces pour les salles testées.

19. Le temps de calcul est dorénavant réparti entre les surfaces de la liste globale et les surfaces des listes de surfaces occlusives. La réduction du nombre de surfaces traitées peut dès lors être analysée en fonction de ces listes globales et occlusives.

Salles	Distances				Test d'appartenance				
	Globale		Occlusives		Brute	Globales		Occlusives	
		%		%	%		%		%
Salles simples	5,5	61	1	11	31	2,2	79	0	0
GMVS3	13,3	21	8	13	36	7,1	31	2,5	11
AmphiMath2	15,4	18	9,7	11	36	8,2	26	2	6
Muno	16,6	16	16,7	16	33	8,4	30	4,9	17
Auditoire2	16,8	12	22,1	15	27	9	22	5,7	14
Ferme3	9,5	5	41,3	22	27	4,6	7	13,3	20

TABLE 6.6.5 – Nombre de calculs des distances et de tests d'appartenance et répartition entre la liste globale et les listes des surfaces occlusives. Les pourcentages correspondants sont exprimés par rapport au nombre de surfaces traitées par la méthode brute.

- Augmente avec la complexité du modèle dans les listes de surfaces occlusives car les salles comportant le plus de surfaces ont généralement une densité d'occlusions plus élevée et donc des listes de surfaces occlusives plus grandes.

Pour les tests d'appartenance, le nombre de surfaces traitées :

- dans la liste globale reste du même ordre de grandeur pour les salles moyennes ;
- dans les listes occlusives est faible et reste du même ordre de grandeur pour les salles moyennes.

Les possibilités de réductions supplémentaires des tests d'appartenance sont plus faibles que pour le calcul des distances.

Pour augmenter g_v , deux approches possibles émergent selon le type de salle. La réduction des calculs sur :

1. La liste globale est plus adaptée aux salles de plus faible complexité dans lesquelles la densité d'occlusion est faible,
2. Les listes occlusives est plus adaptée aux salles plus complexes qui ont généralement une densité occlusive plus élevée.

La réduction des tests sur la liste globale est dépendante de la fonction de tri de cette liste. Ceci donne déjà de bons résultats avec la fonction simple utilisée dans la cadre de cette thèse. Quant à la réduction des surfaces occlusives, elle peut être effectuée en première approche en réduisant le débordement des surfaces et en subdivisant intelligemment les grandes surfaces fortement occlusées, comme illustré au point suivant. A noter que la réduction de la densité occlusive par subdivision des grandes surfaces augmente le nombre de surfaces de la liste globale et pourrait de ce fait bénéficier également d'un

meilleur tri des surfaces.

Modifications des modèles géométriques

Une partie des modèles géométriques d'origine comportaient des surfaces fortement débordantes, ce qui ne changeait pas les performances de la méthode brute. Ce n'est cependant plus vrai pour la méthode occlusive. Pour savoir dans quelle mesure les performances sont affectées, ces salles sont proposées sous différentes modélisations géométriques visibles en annexe A.1. Leurs différences sont résumées au tableau 6.6.1.

L'impact des modifications géométriques est analysé au moyen des gains temporels donnés au tableau 6.6.6 et au moyen de la répartition des calculs entre liste globale et listes occlusives donnée au tableau 6.6.7.

Salles	g_v	g_s	g'_v	$t_{brut} (s)$	$t_v (s)$	Débordement
GMVS	2,6	1,5	1,7	59,9	23,2	Elevé
GMVS2	3,2	2	1,6	63	19,5	Moyen
GMVS3	4,1	2,5	1,7	79,4	19,2	Faible
AmphiMath	3,5	2,3	1,5	73,4	21,3	Elevé
AmphiMath2	4,1	2,6	1,6	89,4	21,8	Faible
Auditoire	5	2,9	1,7	155	31,1	Elevé
Auditoire2	4,8	2,9	1,7	147	30,5	Faible
Ferme	3	1,6	1,9	113	37,1	Elevé
Ferme2	4,8	2,7	1,7	130	27	Moyen
Ferme3	5,1	2,9	1,8	132	25,8	Faible

TABLE 6.6.6 – Comparaison des gains obtenus pour les modélisations originales et les versions modifiées des salles de tests. Les variables t_v et t_{brut} sont le temps passé à rechercher des intersections avec l'algorithme occlusif vectoriel et avec l'algorithme brut pour un tir de 10^6 rayons. Le gain $g_v = \frac{t_{brut}}{t_v}$.

Le gain sur g_v apporté par la **réduction des surfaces débordantes** est variable. Par exemple, il est élevé pour la salle GMVS et moindre pour la salle AmphiMath. De plus, l'augmentation de g_v ne se traduit pas toujours par une diminution équivalente du temps de calcul par la méthode occlusive.

Par exemple, au passage de GMVS2 à GMVS3, de AmphiMath à AmphiMath2 et de Auditoire à Auditoire2, le temps reste plus ou moins constant. Ceci est dû au fait que la suppression des surfaces débordantes peut mener à une augmentation du nombre total de surfaces comme présenté au tableau 6.6.2. Dès lors, le temps de simulation de la méthode brute augmente et par conséquent aussi le gain g_v sans que t_v diminue.

L'augmentation du nombre de surfaces peut-être :

- Faible comme c'est le cas pour le passage de GMVS à GMVS2 ou de Ferme à Ferme2 (+5%) et à Ferme3 (+0,5%). Dans ce cas, l'augmentation de g_v est bien liée à une diminution de t_v .
- Élevée comme pour le passage de GMVS2 à GMVS3 (+27%) ou de AmphiMath à AmphiMath2 (+22%). Dans ce cas, comme on peut le voir au tableau 6.6.7, la diminution des occlusions est contrebalancée par une augmentation du nombre de surfaces et t_v reste plus ou moins constant.

Dans l'absolu, la suppression du débordement des surfaces n'est donc intéressante que lorsqu'elle ne génère pas ou peu de surfaces supplémentaires. S'il y a beaucoup de nouvelles surfaces, il est intéressant de veiller à réduire au maximum la taille et le nombre de surfaces débordantes tout en conservant une augmentation limitée du nombre de surfaces.

La **diminution de la densité d'occlusions par subdivision des surfaces** est illustrée par le passage de Ferme à Ferme2 dont la subdivision de la toiture permet de réduire le temps de recherche d'intersection par 2. Cette subdivision augmente le nombre de surfaces traitées par la liste globale, ce qui est compensé par la diminution de la taille des listes de surfaces occlusives. Lorsque la densité d'occlusions est plus faible, cette compensation est plus faible et la subdivision devient moins intéressante.

Salles	Nombre de distances calculées		Nombre d'appartenances testées		g_{dist}	g_{in}
	Globales	Occlusives	Globales	Occlusives		
GMVS	6,9	22,7	3,4	5,6	1,6	1,4
GMVS2	8,8	14	4,6	4,1	2,2	1,7
GMVS3	13,3	8	7,1	2,5	3	2,4
AmphiMath	11,4	14,2	5,7	3,2	2,8	3
AmphiMath2	15,4	9,7	8,2	2	3,5	3,1
Auditoire	16,6	23,1	8,9	5,9	3,8	2,9
Auditoire2	16,8	22,1	9	5,7	3,7	2,7
Ferme	5,7	85	2,1	20,8	2	1,6
Ferme2	8,9	43,3	4,2	13,8	3,5	3,3
Ferme3	9,5	41,3	4,6	13,3	3,6	3,8

TABLE 6.6.7 – Comparaison de la répartition du calcul des distances et des tests d'intersection entre la liste globale et les listes des surfaces occlusives pour les modèles originels et les modèles modifiés.

6.6.4 Constitution de la liste des surfaces occlusives

En fonction du domaine d'application de la méthode, le temps acceptable pour constituer la liste des surfaces occlusives varie. Lorsqu'il s'agit d'une unique simulation sur la salle, il doit au minimum être inférieur au gain de temps apporté par la méthode occlusive dans le tir de rayons. Par contre, lorsque les surfaces occlusives peuvent être réutilisées²⁰, il peut être plus élevé.

La détection des surfaces occlusives se déroule en deux temps :

- Génération des enveloppes convexes qui croît en $\frac{M^2}{2}$ et
- Intersection avec les surfaces qui croît en $\frac{M^3}{2}$.

Cette croissance est illustrée à la figure 6.6.3.

Le temps de détection des surfaces occlusives est dominé par la détection des intersections entre les surfaces et les enveloppes convexes. Ce temps croît en $\frac{M^3}{2} \times t_{inter_m}$ où $t_{inter_m} = 0,0015ms$ est le temps moyen mis pour intersecter une surface et une enveloppe convexe. Cette croissance rapide risque de limiter son utilisation aux modèles de complexité moyenne.

Pour réduire le temps de détection, l'algorithme d'intersection basique pourrait être optimisé en se basant sur les techniques avancées développées en détection de collisions [75].

Les temps de génération des enveloppes convexes et de leurs intersections par les surfaces sont présentés en annexe au tableau C.0.1 pour les salles de test.

La méthode des surfaces occlusives présente l'avantage de pouvoir paralléliser le traitement de toutes les surfaces lors de la constitution de la liste des surfaces occlusive. De plus, le nombre d'éléments générés est indépendant du volume de la salle, contrairement aux octrees. De surcroit, la mise à jour partielle des surfaces occlusives est rapide et peut être estimée en se servant des équations développées à la sous-section 6.3.3.

Prenons l'exemple de la salle la plus défavorable, Ferme3 où $M = 186$ et $t_{hull} + t_{inter} = 6000ms$.

En modifiant une surface ($K = 1$), le gain sur le temps de recalcul des enveloppes est de $g_{hr} = 186$ et celui du recalcul des intersections est de $g_{ir} = 62$. D'où la régénération des informations de la salle s'effectue en $\frac{1000}{186} + \frac{5000}{62} = 86ms$ sur un seul processeur sans optimisation particulière. Ce temps de régénération est acceptable d'autant plus qu'il peut encore être amélioré, notamment par parallélisation.

20. Par exemple pour un déplacement du récepteur ou de la source dans la salle.

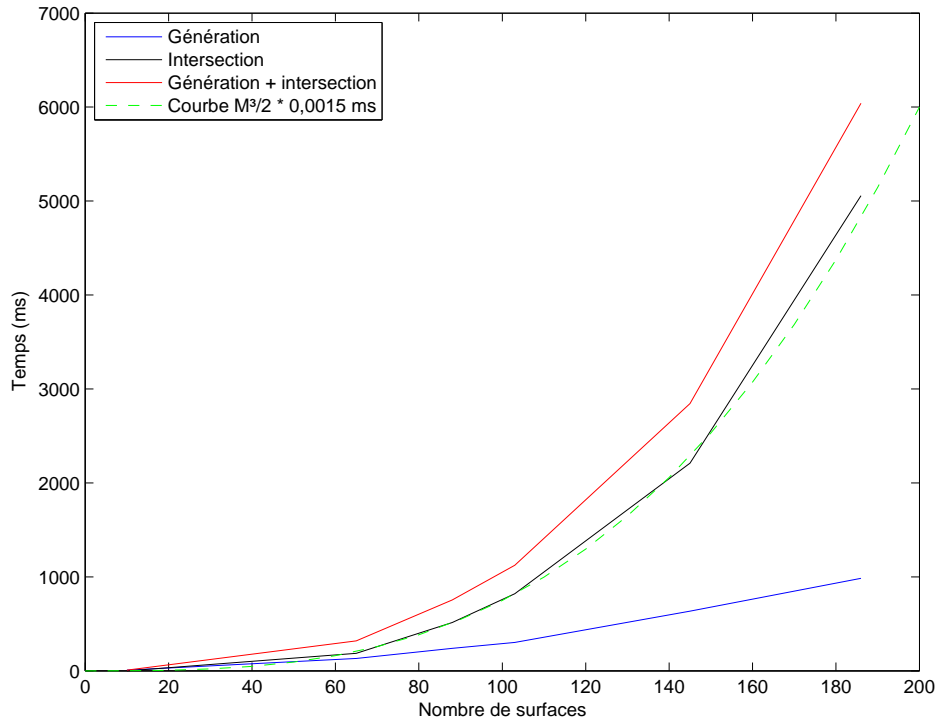


FIGURE 6.6.3 – Évolution du temps de génération et d’intersection des enveloppes convexes en fonction du nombre de surfaces M . La courbe $\frac{M^3}{2} \times 0,0015$ approche bien les temps d’intersections pour toutes les salles et permet d’estimer l’évolution du coût d’intersection pour les modèles plus complexes.

6.7 Conclusion

L’approche utilisée par la méthode 2 présentée dans ce chapitre est différente de celles utilisées par les méthodes usuelles. Cette approche est rendue possible car les simulations géométriques en acoustique de salles se contentent de modèles comportant peu de primitives. Dans ce cadre, l’utilisation des informations de visibilité se révèle intéressante pour leur temps de régénération et les performances obtenues :

- Puisque les informations de visibilité entre deux surfaces peuvent être calculées indépendamment pour chaque paire de surfaces, ce processus peut être facilement parallélisable, ce qui devrait autoriser une génération/régénération rapide.
- En se basant sur le nombre réduit de méthodes disponibles pour une comparaison, on observe que les performances en accélération sont du même ordre de grandeur que celles des arbres BSP ²¹ lorsque la salle com-

21. Le gain en temps de calcul est compris entre 4 et 13.

porte peu de surfaces occlusives pour des modèles comportant jusqu'à une centaine de surfaces. Des tests supplémentaires seraient nécessaires pour établir une comparaison sur des modèles plus complexes.

Pour les modèles géométriques comportant plus de surfaces et/ou plus d'occlusions, l'efficacité s'en trouve réduite car le temps de recherche d'intersections est dominé par le traitement des surfaces occlusives. En première approche, deux solutions simples peuvent être adoptées lors de la modélisation géométrique de la salle pour diminuer la densité d'occlusions sans modifier la fonction de coût :

- En limitant le débordement des surfaces au strict minimum, sans augmenter trop fortement le nombre de surfaces.
- En subdivisant les grandes surfaces très fortement occlusées, tant que la diminution des surfaces occlusives compense l'augmentation du nombre de surfaces.

Ces deux règles sont peu contraignantes et fournissent à moindre coût une amélioration du gain tant que l'augmentation du nombre de surfaces²² reste limité.

Les performances de la méthode sont influencées par deux facteurs qui sont le tri des surfaces ainsi que le traitement vectoriel des paquets de surfaces.

Pour le tri des surfaces, outre l'amélioration du gain en temps (voir tableau 6.7.1), ce procédé rend les performances de la méthode 2 indépendantes de l'ordre initial des surfaces dans le modèle géométrique. En effet, le gain sur la recherche d'intersection apporté par le tri (T_2) par rapport aux surfaces non triées (T_1) dépend de l'ordre initial des surfaces dans la liste. Le cas le plus défavorable est obtenu lorsque les surfaces sont classées par ordre de probabilité d'intersection croissante (T_3). Quant au traitement vectoriel SSE, il apporte un gain non négligeable proche d'un facteur 2 et l'utilisation des instructions AVX sur 256 bits devrait augmenter ces performances.

Salle	T_1	T_2	T_3	$\frac{T_3}{T_2}$
Muno	41	33,5	69	2
Gramme	47	31	80	2,6
Ferme	38,5	38,5	73	1,9

TABLE 6.7.1 – Influence du tri sur les performances de la méthode d'accélération par surfaces occlusives. Les 3 colonnes donnent respectivement les temps de recherche d'intersections pour la méthode de recherche occlusive : 1) sans tri, 2) avec les surfaces triées par probabilité d'intersection décroissante et 3) triées par probabilité d'intersection croissante.

Le temps de régénération des informations de visibilité est un facteur important à prendre en considération dans le cadre particulier d'une utilisation

22. Par subdivision des surfaces d'origine.

avec des scènes dynamiques. Dans ce cadre, cette méthode permet le recalcul partiel rapide des surfaces occlusives lorsque la géométrie change peu, d'autant plus que l'algorithme est fortement parallélisable. Par contre, pour la génération des informations d'une salle complète, le temps de détection croît très rapidement (en M^3), ce qui réserve l'utilisation de cette méthode aux salles de complexité moyenne (une petite centaine de surfaces) pour lesquelles le coût de détection reste négligeable face au coût du tir de plusieurs millions de rayons.

Chapitre 7

Méthode 3 : Accélération par l'utilisation de récepteurs de taille variable

7.1 Introduction

La méthode 3 présentée dans ce chapitre réduit le temps de simulation en profitant de la dimension temporelle de la RIR. En effet, la résolution spatiale et temporelle pour la partie tardive de la réverbération n'a pas besoin d'être aussi élevée que pour la partie précoce, ce qui permet d'y utiliser des récepteurs de plus grande taille et de diminuer le nombre de rayons lors de ce changement de taille.

Lorsqu'ils grandissent, l'inclusion d'obstacles dans ces récepteurs n'est plus négligeable et l'hypothèse de petits récepteurs utilisée lors du calcul de la contribution énergétique des rayons aux récepteurs n'est plus valable. L'algorithme de référence sera modifié pour prendre en compte ces changements car l'algorithme de référence utilise un nombre de rayons constant et des récepteurs de taille fixe¹ n'intersectant aucun élément de la scène (ou dont l'intersection est négligée pour de petits récepteurs).

Les tests effectués pour cette méthode sur un ensemble de salles représentatives montreront que les gains de temps vont de 2,5 à 5, tout en conservant des échogrammes aux critères acoustiques équivalents². Pour satisfaire cette exigence d'équivalence, le nombre variable de rayons est choisi de façon à conserver une erreur statistique identique à celle du cas de base et la taille variable du récepteur est choisie de façon à conserver une résolution spatiale et temporelle élevée en début d'échogramme et plus faible en fin d'échogramme (tableau 7.1.1). Par souci de clarté, le rayon du récepteur sphérique sera dénommé « ra-

1. Sphériques dans notre cas

2. La notion d'équivalence des critères acoustiques est définie à la section 7.7.3.

dius » dans ce chapitre. Un échogramme obtenu pour un radius passant de 0,25 à 2 mètres est comparé à l'échogramme obtenu pour un récepteur fixe de radius 0,25 mètres à la figure 7.1.1. On y voit que la décroissance de l'échogramme est bien respectée en début et en milieu d'échogramme. La différence entre les échogrammes obtenus pour les récepteurs de taille fixe et variable à 250Hz peut être justifiée par plusieurs causes. Celles-ci seront analysées en fin de chapitre à la section 7.7.

	Petit récepteur	Grand récepteur
Probabilité d'intersection	Faible	Elevée
Résolution spatiale	Elevée	Faible
Recommandé pour	Partie précoce	Partie tardive

TABLE 7.1.1 – Influence de la taille du récepteur sur les échogrammes

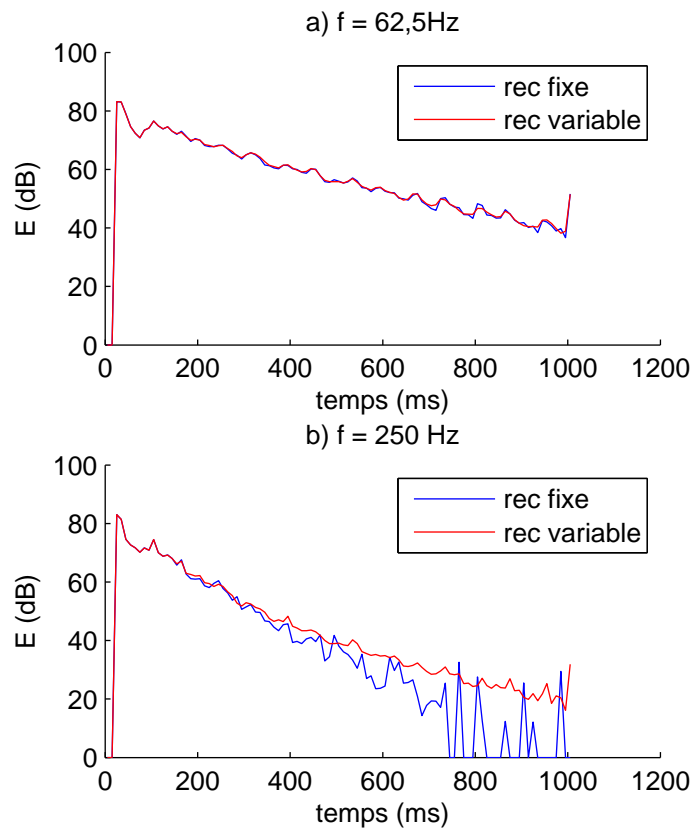


FIGURE 7.1.1 – Exemples d'échogrammes obtenus avec un récepteur de radius passant de 0,25 à 2 mètres en $t = 160ms$. Le radius du récepteur de taille fixe est égal à 0,25 m.

Afin de conserver une erreur statistique constante, l'augmentation de la

taille du récepteur est opérée au moment de la diminution du nombre de rayons, de manière à conserver constante la probabilité d'intersection du récepteur. Cette augmentation a un impact sur la résolution spatiale et temporelle des échogrammes et par conséquent sur les critères acoustiques, ce qui sera étudié à la section 7.7.

Par la suite, les différentes étapes de ce nouvel algorithme seront détaillées, dont :

- Les conditions imposées sur la croissance du récepteur,
- Les instants auxquels la taille d'un récepteur peut changer,
- La nouvelle gestion des intersections rayons - récepteurs et de leur contribution énergétique,
- Le choix du nombre de rayons à conserver selon la taille du récepteur,
- L'estimation du volume utile³ des récepteurs par un tir de rayons.

7.2 Croissance des récepteurs

L'utilisation de récepteurs de taille variable pouvant intersecter des éléments de la scène implique plusieurs modifications. Notamment,

- La définition des points d'entrée et de sortie du rayon dans le récepteur doit être modifiée pour tenir compte des obstacles présents dans le récepteur sphérique,
- Un module spécifique de tir de rayons doit être ajouté pour estimer le volume du récepteur (section 7.6),
- La contribution énergétique des rayons sera répartie sur toute la durée de la traversée du récepteur,
- Un mécanisme automatique gère la croissance des récepteurs et l'élimination des rayons surnuméraires⁴ en des instants donnés t_{seuil} ,
- Un module de détection des valeurs valides pour t_{seuil} est inclus.

Le fait de changer de taille de récepteur en des instants discrets (contrairement à la méthode de Lehnert [98]) et non pas de façon continue est un choix justifié par le fait que le volume du récepteur doit être calculé pour chaque intersection par un rayon. Or son estimation pour des récepteurs incluant des obstacles est complexe et relativement coûteuse en temps de calcul et ne pourra raisonnablement pas être calculée pour chaque intersection.

La croissance des récepteurs se fera par paliers, en des instants discrets t_{seuil} choisis à la frontière entre deux intervalles temporels. Cette contrainte permet de garantir une taille de récepteur et un nombre total de rayons constants par intervalle temporel. Ceci permet de traiter la génération des échogrammes

3. Volume accessible par un rayon quelconque voyageant dans la salle.

4. Les rayons surnuméraires sont les rayons qui ne sont pas conservés lors du franchissement d'un seuil.

de part et d'autres d'un seuil comme la concaténation de valeurs issues de 2 processus stochastiques.

Pour simplifier le traitement et par souci d'efficacité, puisque plusieurs bandes de fréquences sont traitées par le même tir de rayons, t_{seuil} sera choisi identique pour toutes ces bandes. Par conséquent, il sera choisi en un instant à la frontière de deux intervalles temporels pour toutes les fréquences.

Voyons comment sont utilisés ces paliers :

1. Si le récepteur possède les K radius $\rho_0, \dots, \rho_{(K-1)}$, on choisit $K - 1$ seuils ($t_{seuil_1}, \dots, t_{seuil_K}$) auxquels on ajoute les deux seuils suivants $t_{seuil_0} = 0$ et $t_{seuil_K} = +\infty$ afin de borner l'ensemble des intervalles temporels.
2. A chaque ensemble d'intervalle temporels compris entre $[t_{seuil_i}, t_{seuil_i+1}]$ est associé un radius ρ_i qui servira pour l'intersection avec un rayon tant que son temps de parcours est compris entre ces bornes.

Par exemple, à la figure 7.2.1, les deux radius ρ_0 et ρ_1 du récepteur sont associés aux intervalles temporels compris entre les trois seuils $t_{seuil_0} = 0$, $t_{seuil_1} = 90ms$ et $t_{seuil_2} = +\infty$ avec un $\Delta t = 10ms$. Lorsque le temps de parcours du rayon est compris entre $[t_{seuil_1}, t_{seuil_2}]$, son intersection est testée avec le récepteur de taille ρ_1 .

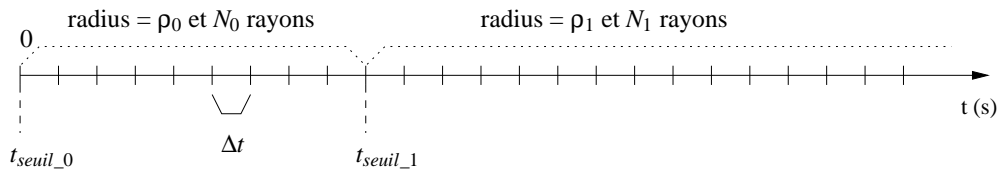


FIGURE 7.2.1 – Les seuils temporels de changement de taille de récepteurs sont à la frontière de deux intervalles temporels.

En utilisant le changement de taille des récepteurs et la réduction du nombre de rayons en des temps t_{seuil} situés à la frontière entre deux intervalles temporels dans une même simulation, on obtient un échogramme équivalent à la concaténation d'extraits d'échogrammes. Chacun de ces extraits est issu d'un échogramme qui serait obtenu au moyen d'une simulation à taille de récepteur et nombre de rayons fixes, pour chaque couple taille de récepteur - nombre de rayons. Ainsi, chaque extrait de l'échogramme associé au couple de paramètres N_i rayons et radius ρ_i est constitué de l'ensemble des intervalles temporels compris entre $[t_{seuil_i}, t_{seuil_i+1}]$ dont les valeurs en dB ont été calculées par une simulation avec les paramètres constants N_i rayons et radius ρ_i , voir figure 7.2.2.

Remarques :

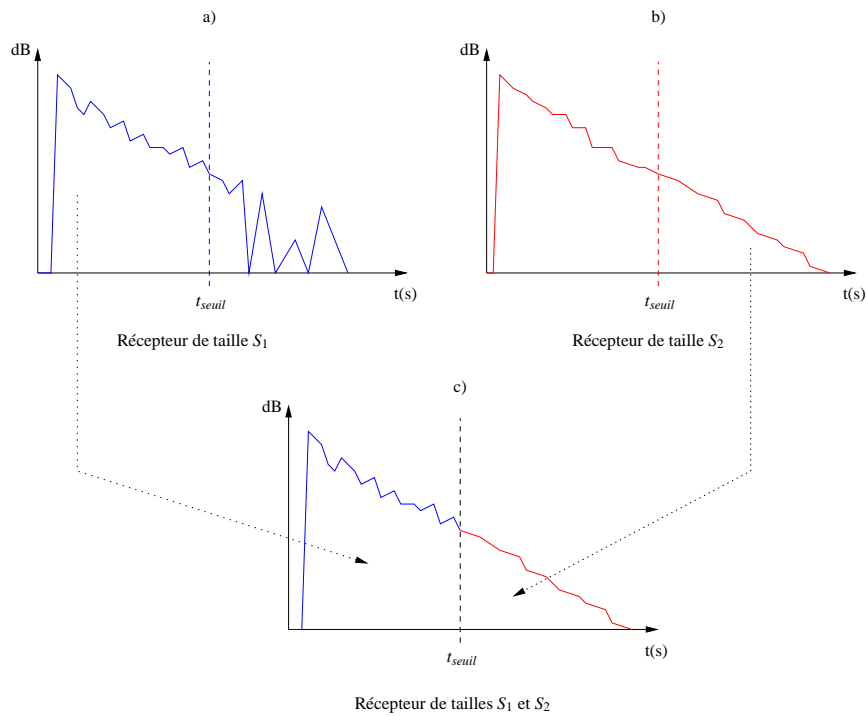


FIGURE 7.2.2 – Les échogrammes a) et b) sont obtenus avec respectivement, un nombre de rayons constant N_0 et N_1 et un récepteur de radius fixe ρ_0 et ρ_1 . Quant à l'échogramme c), il est obtenu avec un récepteur de taille variable qui passe du radius ρ_0 à ρ_1 et un nombre de rayons variable qui passe de N_0 à N_1 au temps t_{seuil} . Cet échogramme est équivalent à la concaténation de l'extrait $[0, t_{seuil}]$ de l'échogramme a) et de l'extrait $[t_{seuil}, +\infty]$ de l'échogramme b).

- Pour simplifier l'algorithme en cas d'utilisation de plusieurs récepteurs, tous les récepteurs partageront les mêmes paramètres de tailles, seuils et nombres de rayons dans la salle.
- Des problèmes d'homogénéité de la pression acoustique dans le récepteur peuvent survenir s'il recouvre plusieurs espaces acoustiques (figure 7.2.3). Dans ce cas, les échogrammes obtenus sont la moyenne des contributions obtenues dans ces espaces acoustiques. La moyenne n'est plus représentative si ces contributions sont trop différentes d'un espace à l'autre.

7.2.1 Choix des seuils temporels

Le choix des intervalles temporels ne peut se faire que dans l'ensemble des valeurs qui satisfont à la condition suivante : le placement d'un seuil temporel doit se faire à la frontière entre deux intervalles temporels, quelle que soit la bande de fréquences. Puisque la taille des intervalles temporels peut varier selon la bande de fréquence, une méthode automatique est proposée et implémentée

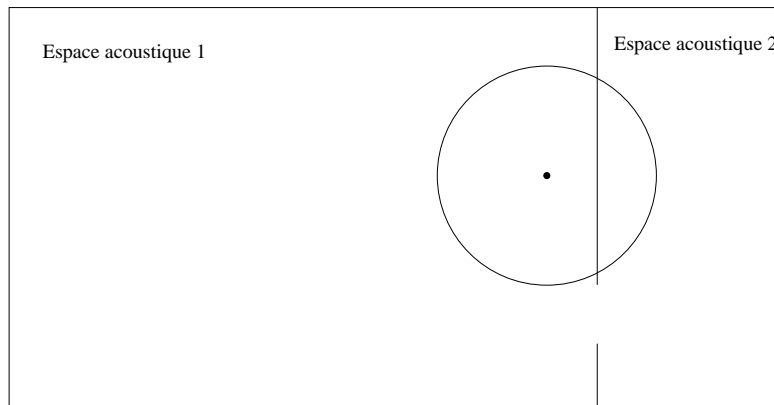


FIGURE 7.2.3 – Salle comportant plusieurs espaces au comportement acoustique différent.

pour déterminer automatiquement les instants « candidats » qui satisfont à cette condition. Dès que ces instants sont connus, il ne reste plus qu'à y choisir les valeurs de seuils. Si aucun instant candidat n'a été trouvé, la taille des intervalles temporels devra être adaptée ou l'utilisation de cette méthode sera impossible.

Les instants candidats correspondent aux multiples de t_{base} ⁵, le plus petit multiple commun aux longueurs des intervalles temporels de toutes les fréquences. La sélection des seuils parmi les instants candidats peut se faire assez librement. Cependant, le champ proche restera intact en imposant au premier seuil t_{seuil_1} une valeur supérieure à t_{proche} qui est l'instant où l'intensité des réflexions égale l'intensité du champ direct. Les champs avant et après cet instant critique sont appelés champ proche et réverbéré et les détails du champ proche ont une forte influence sur la perception de l'acoustique d'une salle.

Dans la littérature, on rencontre principalement trois possibilités [39] pour définir t_{proche} qui utilisent :

- Une durée de transition arbitraire, habituellement choisie à 80 ms à partir du temps d'arrivée du champ direct⁶ [25].
- Un nombre donné de réflexions (habituellement fixé à 3 réflexions) [103].
- Le temps de mélange de la salle mais ce temps n'existe pas toujours [19].

Dans les tests, la durée de transition de 80 ms sera utilisée pour sa simplicité d'implémentation.

5. Méthode de détermination automatique de t_{base} en annexe D.1.

6. Si plusieurs récepteurs sont utilisés, les 80 ms sont ajoutées au temps de parcours du champ direct du récepteur le plus éloigné de la source.

7.2.2 Choix de la taille du récepteur

Choisir un récepteur de taille plus élevée implique plusieurs conséquences :

- La résolution spatiale diminue puisque la moyenne des contributions énergétiques est prise sur un volume plus grand.
- La probabilité d'intersection avec un rayon augmente avec la surface du récepteur.

Il est donc nécessaire de trouver le bon équilibre entre ces deux tendances.

Les tests (section 7.7) seront effectués avec le récepteur de taille maximale qui englobe la salle et des récepteurs de taille moyenne pour en déterminer l'influence. Il résulte de ces tests que le récepteur de taille maximale influence négativement et de façon significative les résultats.

De plus, le choix de la taille du récepteur influence le nombre de rayons conservés lors du franchissement du seuil car ce nombre est lié à la surface du récepteur (voir section 7.4), mais il s'avère qu'à partir d'une taille moyenne, l'élimination des rayons en partie tardive de la réverbération conduit à un temps total de simulation dominé par le calcul de la partie précoce de la réverbération.

Les nombreux tests ont montré qu'un radius de 2 mètres semble conserver une résolution spatiale suffisante dans la majorité des salles testées.

7.3 Contribution d'un rayon à un récepteur de taille variable

La méthode proposée modifie la prise en compte des contributions énergétiques au récepteur en faisant tomber deux hypothèses simplificatrices de l'algorithme initial :

- Le récepteur peut englober des éléments de la scène ce qui modifie les points d'entrée et de sortie du rayon dans le récepteur,
- La prise en compte de la contribution du rayon en P_{proj} ⁷ n'est plus valable lorsque la taille du récepteur est suffisamment grande. En effet, cette méthode biaise⁸ systématiquement le temps de contribution vers le bas : plus le récepteur est grand, plus le biais moyen est important.

Ces changements impliquent une série de modifications de l'algorithme :

1. Lorsque l'origine (respectivement, l'extrémité) du segment de rayon est dans le récepteur, le point d'entrée P_{in} (respectivement, de sortie P_{out}) n'est plus sur la surface sphérique du récepteur mais est remplacé par l'origine (respectivement, l'extrémité) du segment.

7. P_{proj} est la projection du centre du récepteur sur le rayon.

8. Car t_{proj} , le temps de parcours du rayon jusqu'à P_{proj} est toujours $\leq t_{oc}$, le temps de parcours du rayon jusqu'au centre du récepteur, voir figure 7.3.1.

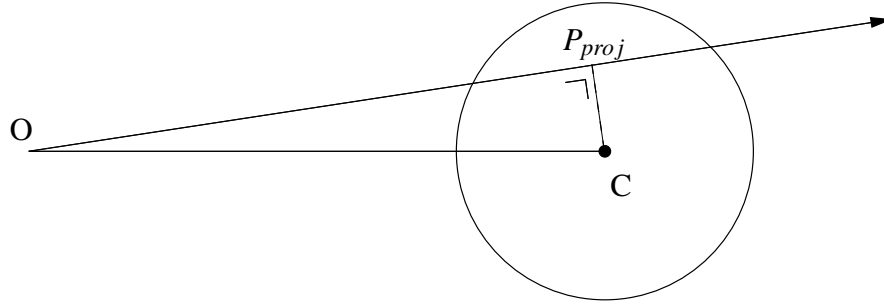


FIGURE 7.3.1 – Le temps de parcours du rayon de O jusqu'à P_{proj} est toujours inférieur ou égal au temps de parcours de O jusqu'au centre du récepteur.

2. Pour éviter le biais sur l'instant de contribution énergétique du rayon, celle-ci sera répartie sur toute la durée de son trajet dans le récepteur, entre $[t_{in}, t_{out}]$, les temps de parcours du rayon jusqu'à P_{in} et P_{out} .
3. Entre son point d'émission et de réflexion, le segment de rayon peut franchir un ou plusieurs seuils temporels. Comme on peut le voir à la figure 7.3.2, l'intersection du segment avec le récepteur doit dès lors être testée pour toutes les tailles de radius rencontrées. Et pour toute taille de radius ρ_i , la contribution est répartie entre $[t'_{in}, t'_{out}]$ où

$$t'_{in} = \max(t_{in}, t_{seuil_i})$$

et

$$t'_{out} = \min(t_{out}, t_{seuil_ (i+1)}) .$$

4. Suite à l'élimination d'une partie des rayons lors du franchissement d'un seuil, la contribution d'un rayon n'est testée avec un radius ρ_i donné que si le rayon est toujours actif pour $t \geq t_{seuil_i}$.

Ces modifications seront décrites plus en détail dans les sous-sections suivantes.

Avant cela, présentons ce que deviennent les principales étapes de la recherche d'intersection d'un segment de rayon avec un récepteur et de la prise en compte de sa contribution :

1. Recherche des l seuils temporels traversés par le segment de rayon et des $(l + 1)$ tailles de radius $(\rho_i, \dots, \rho_{i+l})$ associées au temps de traversée du segment de rayon,
2. Boucle sur $j \in [i, i + l]$ pour les points 3 à 8,
3. Si le rayon est toujours actif entre $[t_{seuil_j}, t_{seuil_ (j+1)}]$, on recherche l'intersection avec le récepteur de radius ρ_j , sinon le traitement s'arrête,
4. Si l'intersection existe, on calcule P'_{in} et P'_{out} , les points d'intersection du rayon et du récepteur sphérique de radius ρ_j , sinon retour au point 2 en incrémentant j ,

5. Prise en compte de l'origine et/ou de l'extrémité du segment de rayon dans le récepteur en ajustant P'_{in} et P'_{out} en P_{in} et P_{out} (figure 7.3.3),
6. Réduction du parcours du segment de rayon à sa portion comprise entre $[t_{seuil_j}, t_{seuil_(j+1)}]$ en ajustant P_{in} et P_{out} en P''_{in} et P''_{out} (sous-section 7.3.2),
7. Recherche des M intervalles temporels associés au temps de trajet du rayon entre P''_{in} et P''_{out} ,
8. Calcul et ajout de la contribution énergétique du rayon pour chacun de ces M intervalles temporels (sous-section 7.3.3).

Un exemple est illustré à la figure 7.3.2. Le rayon y intersecte le récepteur et franchit un seuil pendant la traversée du récepteur tandis que le radius ρ_1 englobe un mur de la scène. Dès lors, les points d'entrée et de sortie sont ajustés et les contributions énergétiques sont fournies par les contributions aux deux radius ρ_0 et ρ_1 .

Dans les sous-sections suivantes, les modifications des points d'entrée et de sortie par inclusion d'obstacles dans le récepteur et par franchissement de seuils sont décrites plus en détail ainsi que la méthode de répartition de la contribution énergétique sur l'ensemble des intervalles temporels traversés.

7.3.1 Modification des points d'entrée et de sortie du récepteur par inclusion d'obstacles

En présence d'obstacles dans le récepteur, les points d'entrée P_{in} et de sortie P_{out} d'un segment de rayon dans le récepteur ne sont plus obligatoirement sur la surface du récepteur sphérique. Lorsque l'origine (respectivement l'extrémité) du segment de rayon est dans le récepteur, elle devient le point d'entrée (respectivement le point de sortie) du segment dans le récepteur.

Puisque la définition des points d'entrée et de sortie est modifiée, le calcul de d_{in} et d_{out} , les distances parcourues par le segment de rayon depuis son origine jusqu'à P_{in} et P_{out} , est aussi modifié.

Le problème peut se décomposer en 4 configurations comme illustré à la figure 7.3.3 :

- a) il n'y a pas d'obstacle dans le récepteur et P_{in} et P_{out} sont sur la surface de la sphère ce qui donne

$$d_{in} = d_{proj} - \frac{d_{inside}}{2}$$

et

$$d_{out} = d_{proj} + \frac{d_{inside}}{2}$$

où d_{proj} est la distance entre l'origine du segment de rayon et P_{proj} et d_{inside} est la distance parcourue dans la sphère par la droite support du

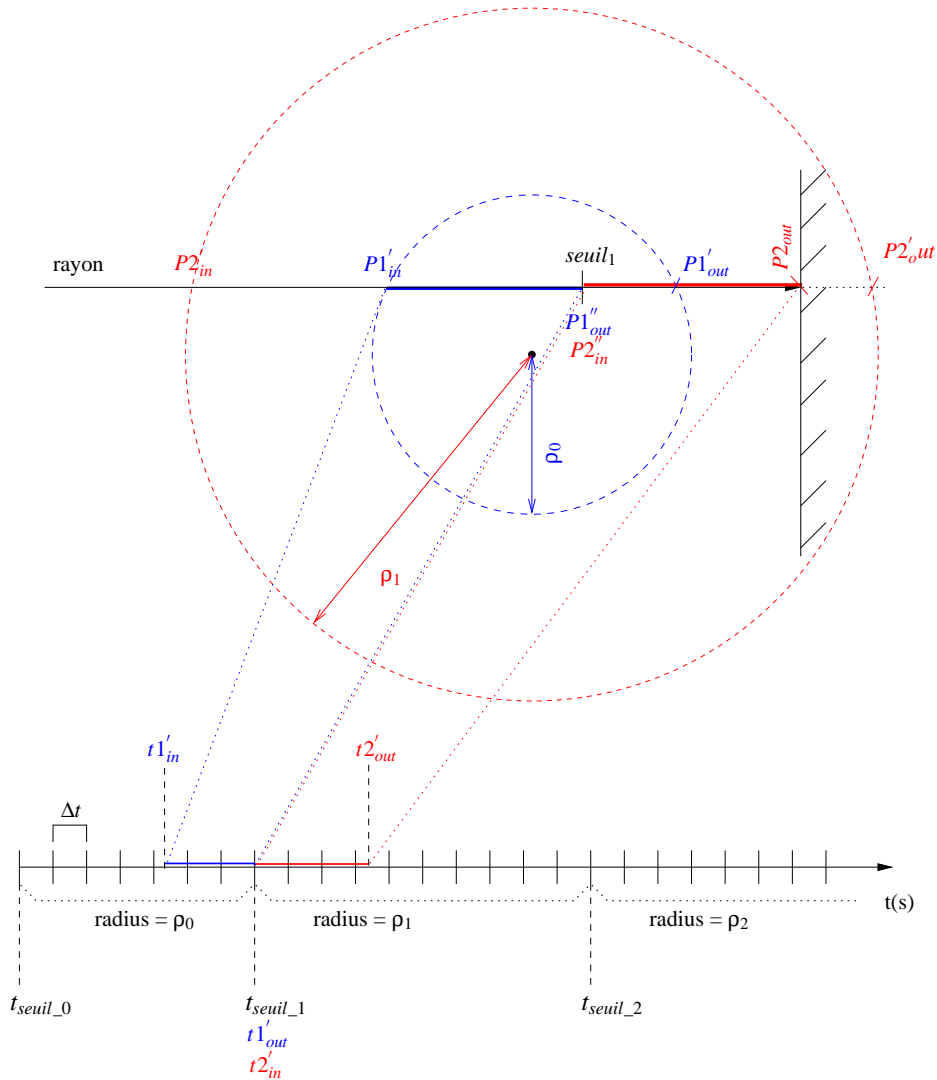


FIGURE 7.3.2 – Exemple de gestion du franchissement d'un seuil pendant la traversée du récepteur par un rayon. L'intersection du rayon avec le récepteur de radius ρ_0 (en bleu) est prise en compte entre $P1'_{in}$ et $seuil_1$ et l'intersection avec le récepteur de radius ρ_1 (en rouge) est prise en compte entre $seuil_1$ et $P2_{out}$.

rayon

$$\frac{d_{inside}}{2} = \sqrt{\rho^2 - \|\overrightarrow{CP_{proj}}\|^2}.$$

- b) le segment de rayon démarre hors du récepteur mais s'y termine sur un obstacle. P_{in} est sur la sphère tandis que P_{out} devient l'extrémité du

segment de rayon. Les distances sont calculées selon

$$d_{in} = d_{proj} - \frac{d_{inside}}{2}$$

et

$$d_{out} = l_{segment}$$

où $l_{segment}$ est la longueur du segment de rayon considéré.

- c) l'origine du segment est dans le récepteur et l'extrémité en dehors. Dès lors, P_{in} est sur le point d'origine du segment de rayon et P_{out} est sur la surface de la sphère. Leurs distances sont calculées par

$$d_{in} = 0$$

et

$$d_{out} = d_{proj} + \frac{d_{inside}}{2}.$$

- d) l'origine et l'extrémité du segment de rayon sont internes à la sphère et P_{in} et P_{out} deviennent l'origine et l'extrémité du segment de rayon. Leurs distances sont calculées par

$$d_{in} = 0$$

et

$$d_{out} = l_{segment}.$$

7.3.2 Modification des points d'entrée et de sortie du rayon en fonction des seuils temporels

La contribution d'un rayon au récepteur de radius ρ_i est limitée à l'intervalle $[t_{seuil_i}, t_{seuil_ (i+1)}]$, c'est pourquoi le parcours du rayon après prise en compte des obstacles dans le récepteur est tronqué en

$$[P''_{in}, P''_{out}] = [P_{in}, P_{out}] \cap [seuil_i, seuil_{(i+1)}].$$

Si cette intersection n'est pas vide, les temps de parcours du rayon jusqu'à P''_{in} et P''_{out} (t''_{in} et t''_{out}) peuvent se calculer par

$$t''_{in} = \max(t_{in}, t_{seuil_i})$$

et

$$t''_{out} = \min(t_{out}, t_{seuil_ (i+1)})$$

où t_{in} , t_{out} sont les temps de parcours du rayon jusqu'à P_{in} et P_{out} .

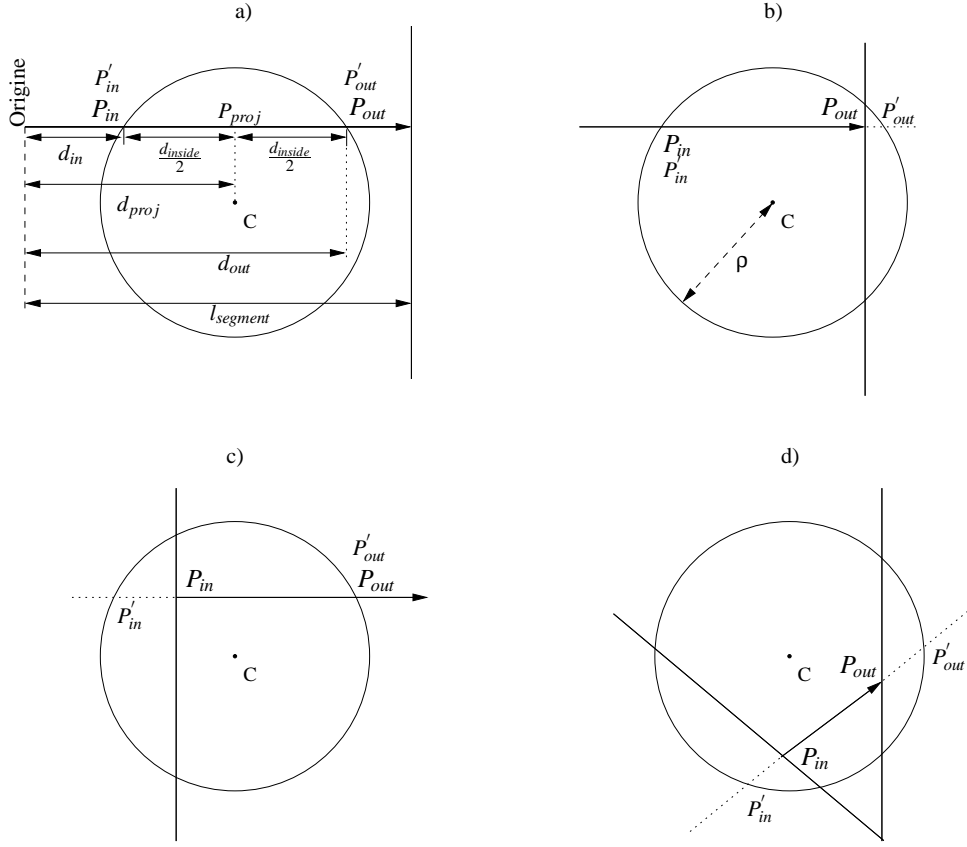


FIGURE 7.3.3 – Illustration des quatre configurations de modifications du point d'entrée P_{in} et de sortie P_{out} du segment de rayon par inclusion d'obstacles dans le récepteur. a) pas d'obstacle, b) réflexion sur obstacle, c) émission à partir d'obstacle et d) émission et réflexion sur obstacle.

7.3.3 Calcul de la contribution au récepteur

La contribution énergétique d'un rayon au récepteur est calculée entre son point d'entrée et de sortie dans le récepteur. Ensuite, cette énergie est répartie dans les intervalles temporels $(\Delta t_k, \dots, \Delta t_{(k+m)})$ appartenant entièrement ou partiellement à $[t''_{in}, t''_{out}]$.

Avant de déterminer, la contribution énergétique aux intervalles temporels, déterminons les bornes temporelles de l'intervalle :

$$\Delta t_k = [t_{\Delta k}, t_{\Delta(k+1)}].$$

et appelons les distances $D_k = c \cdot t_{\Delta k}$ et $D_{(k+1)} = c \cdot t_{\Delta(k+1)}$.

Dès lors, pour chaque Δt_k compris entièrement dans $[t''_{in}, t''_{out}]$, le rayon contribue pendant toute sa durée et l'équation (4.3.3) est appliquée à ses bornes

$$E_f[\Delta t_k] = P_K(f) \left(\frac{e^{-\alpha(f)D_k} - e^{-\alpha(f)D_{(k+1)}}}{\alpha(f)} \right)$$

tandis que pour un Δt_k compris partiellement dans $[t''_{in}, t''_{out}]$, le rayon contribue pendant une partie seulement de sa durée. L'équation (4.3.3) devient

$$E_f[\Delta t_k] = P_K(f) \left(\frac{e^{-\alpha(f)D'_k} - e^{-\alpha(f)D'_{(k+1)}}}{\alpha(f)} \right)$$

où $D'_k = c \cdot \max(t_{\Delta k}, t''_{in})$ et $D'_{(k+1)} = c \cdot \min(t_{\Delta(k+1)}, t''_{out})$.

7.4 Diminution du nombre de rayons lors de la croissance du récepteur

Lorsque la taille du récepteur augmente, le nombre de rayons nécessaires pour atteindre une erreur statistique donnée diminue ce qui permet de réduire le nombre de rayons parcourant la salle, à chaque passage de seuil, tout en conservant la précision désirée. Il reste à déterminer quels rayons conserver, en quel nombre et comment répartir entre eux la puissance des rayons éliminés :

1. Le choix des rayons à conserver n'a pas d'importance puisque les rayons indépendants sont émis dans des directions aléatoires. On peut donc conserver n'importe quel sous-ensemble de rayons. Si on désire garder N_i rayons parmi les N de départ lors du passage du seuil t_{seuil_i} , il suffit par exemple de conserver les N_i premiers rayons émis et d'éteindre les $(N - N_i)$ rayons restants.
2. La puissance transportée par les rayons avant et après extinction des rayons surnuméraires doit rester constante, c'est pourquoi lors du franchissement d'un seuil $t_{seuil_ (i+1)}$, la puissance des rayons conservés devient

$$P_{N_{(i+1)}}(f) = \frac{N_i}{N_{(i+1)}} P_{N_i}(f) \quad (7.4.1)$$

où $P_{N_i}(f)$ et $P_{N_{(i+1)}}(f)$ sont la puissance des rayons pour la fréquence f avant et après passage du seuil $t_{seuil_ (i+1)}$.

3. Une méthode d'ajustement automatique du nombre de rayons à conserver pour garder une erreur statistique constante à chaque changement de seuil est d'abord développée ci-dessous pour le cas des récepteurs sphériques qui n'englobent aucun obstacle. Ensuite, cette méthode est étendue au cas des récepteurs qui intersectent la scène.

7.4.1 Récepteur sphérique sans inclusion d'obstacle

La relation qui donne $N_{(i+1)}$, le nombre de rayons à utiliser avec un récepteur de taille $\rho_{(i+1)}$ pour obtenir la même erreur relative qu'avec un récepteur de radius ρ_i et un tir de N_i rayons, est développée ci-dessous, en faisant l'hypothèse que le récepteur ne contient aucun obstacle et que le nombre de rayons est élevé.

Cette relation est obtenue en égalant l'expression de l'erreur statistique relative sur P'_k , la valeur de l'échogramme issue du même $k^{\text{ème}}$ intervalle temporel pour les deux simulations. Or, cette erreur relative pour un intervalle temporel de taille Δt peut être approchée par [167] :

$$relError(P'_k) = \sqrt{\frac{V}{N\pi\rho^2c\Delta t}}. \quad (7.4.2)$$

où ρ est le radius du récepteur, V est le volume de la salle et c est la vitesse de propagation sonore. Cette relation est liée à l'expression de la surface visible du récepteur $\pi\rho^2$.

En égalant l'expression (7.4.2) pour deux simulations de paramètres (ρ_i, N_i) et $(\rho_{(i+1)}, N_{(i+1)})$ différents :

$$\sqrt{\frac{V}{N_i\pi\rho_i^2c\Delta t}} = \sqrt{\frac{V}{N_{(i+1)}\pi\rho_{(i+1)}^2c\Delta t}} \quad (7.4.3)$$

où V , Δt et c sont constants pour les deux simulations, on obtient l'expression de $N_{(i+1)}$ en fonction des 3 paramètres restants :

$$N_{(i+1)} = \frac{N_i\rho_i^2}{\rho_{(i+1)}^2}. \quad (7.4.4)$$

Dans le cas du récepteur sphérique, le radius du récepteur est connu à l'avance et cette équation peut être évaluée rapidement à l'initialisation du tir de rayons. Dans le cas du récepteur incluant des obstacles, le développement de l'expression 7.4.2 est compromis car sa surface n'est plus donnée par $\pi\rho^2$. La résolution de ce problème est développée à la sous-section suivante.

7.4.2 Récepteur sphérique avec inclusion d'obstacle

La relation qui exprime le nombre de rayons à conserver au passage d'un seuil est développée ci-dessous pour les récepteurs incluant un ou plusieurs obstacles.

L'expression de l'erreur relative (équation (7.4.2)) utilisée au point précédent suppose que la surface du récepteur visible par le rayon est donnée par

$\pi\rho^2$. Or, lorsque le récepteur contient des éléments géométriques, la surface « visible⁹ » S du récepteur de volume V_{rec} et de radius ρ n'est plus proportionnelle à $\pi\rho^2$ et son calcul peut être complexe et lent.

Pour simplifier le problème du calcul de la surface du récepteur, elle sera approchée par la surface visible S_{min} du récepteur « équivalent », c'est à dire, le récepteur sphérique de radius ρ_{min} sans obstacle qui possède le même volume V_{rec} :

$$\rho_{min} = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}V_{rec}}. \quad (7.4.5)$$

En utilisant les valeurs ρ_{i_min} et $\rho_{(i+1)_min}$ dans l'équation (7.4.3), on obtient

$$N_{(i+1)} = \frac{N_i \rho_{i_min}^2}{\rho_{(i+1)_min}^2}. \quad (7.4.6)$$

Puisque le nombre de rayons à conserver dépend des ρ_{min} , les volumes des récepteurs doivent être connus à l'avance ce qui n'est pas encore le cas avant la simulation car l'estimation du volume par tir de rayons (section 7.6) nécessite des informations sur l'accessibilité des surfaces obtenues par propagation de rayons dans la salle. Une première solution pour extraire ces informations est d'utiliser un tir de rayons préalable à la simulation, ce qui augmenterait la charge de calcul. Une deuxième solution plus évoluée permet de se passer de ce tir préalable en fixant un nombre minimum et suffisant de rayons à conserver en toute circonstance pendant la simulation dont le parcours servira à extraire les informations d'accessibilité des surfaces.

7.5 Calcul de l'erreur statistique suite au changement de taille du récepteur et du nombre de rayons

Le calcul de l'erreur statistique sur le carré de la pression efficace est effectué indépendamment pour chaque intervalle temporel de l'échogramme. Il fait intervenir le nombre de rayons et le volume du récepteur utilisés pour les intersections ayant lieu pendant cet intervalle temporel (équation (2.4.7)). Dans l'algorithme initial, ces données sont constantes durant toute la simulation.

Pour le nouvel algorithme, le nombre de rayons et le volume du récepteur restent constants sur chaque intervalle temporel et l'équation (2.4.7) reste valable, à condition de remplacer N et V par $N[\Delta t]$ et $V[\Delta t]$ qui sont associés à l'intervalle temporel Δt . Puisque la contribution ν_k du rayon k au récepteur

9. Par le rayon.

peut être répartie sur plusieurs intervalles temporels, elle sera remplacée par $\nu_k [\Delta t]$ qui est la contribution du rayon k pendant l'intervalle temporel Δt . Le calcul de la variance associée à l'intervalle temporel Δt devient alors :

$$\sigma^2 [\Delta t] \approx \frac{1}{N [\Delta t]} \left(\frac{4\pi\rho_0c}{V [\Delta t]} \right)^2 \left(\frac{\sum_k^N \nu [\Delta t]_k^2}{N [\Delta t]} - \frac{\left(\sum_k^N \nu [\Delta t]_k \right)^2}{N [\Delta t]^2} \right). \quad (7.5.1)$$

7.6 Calcul du volume d'un récepteur quelconque

Dans le cas d'un récepteur sphérique sans inclusion d'éléments géométriques, le calcul du volume utile¹⁰ du récepteur est trivial. Par contre, dès que le récepteur contient des obstacles, son calcul n'est plus trivial (figure 7.6.1) : il faut décompter les volumes inaccessibles par les rayons. Cette accessibilité est déterminée pendant la simulation en exploitant l'information des surfaces touchées par les rayons selon la méthode décrite à la sous-section 7.6.1. Quant au volume utile du récepteur, il est estimé en tirant des rayons à partir du centre du récepteur selon la méthode développée à la sous-section 7.6.2.

En pratique, le tir de rayons sera décomposé en deux parties :

1. Le tir préalable d'un ensemble de rayons avec des récepteurs de taille fixe et l'utilisation de ces rayons pour déterminer l'accessibilité des surfaces.
2. Le tir principal des rayons restants en utilisant les récepteurs de taille variable et les informations déterminées à l'étape précédente.

7.6.1 Zones accessibles et inaccessibles

Une méthode automatique de détection des volumes inaccessibles est développée dans cette section afin d'automatiser le calcul du volume des récepteurs. Cette méthode utilise les informations d'accessibilité des faces de chaque surface acquises lors des réflexions des rayons pendant la simulation¹¹. Pour ce faire, une face est considérée comme :

- accessible si au moins un rayon se propageant dans la salle s'y réfléchit et
- inaccessible sinon.

En pratique, cette définition est parfois mise en défaut suite aux imprécisions inhérentes au calcul numérique mais une simple modification permet d'y remédier. Il arrive en effet que la face d'arrivée du rayon soit mal identifiée lorsque

10. Le volume utile est celui dans lequel les rayons peuvent circuler.

11. Le traitement se fait pendant la simulation pour éviter d'utiliser un tir de rayons préalable.

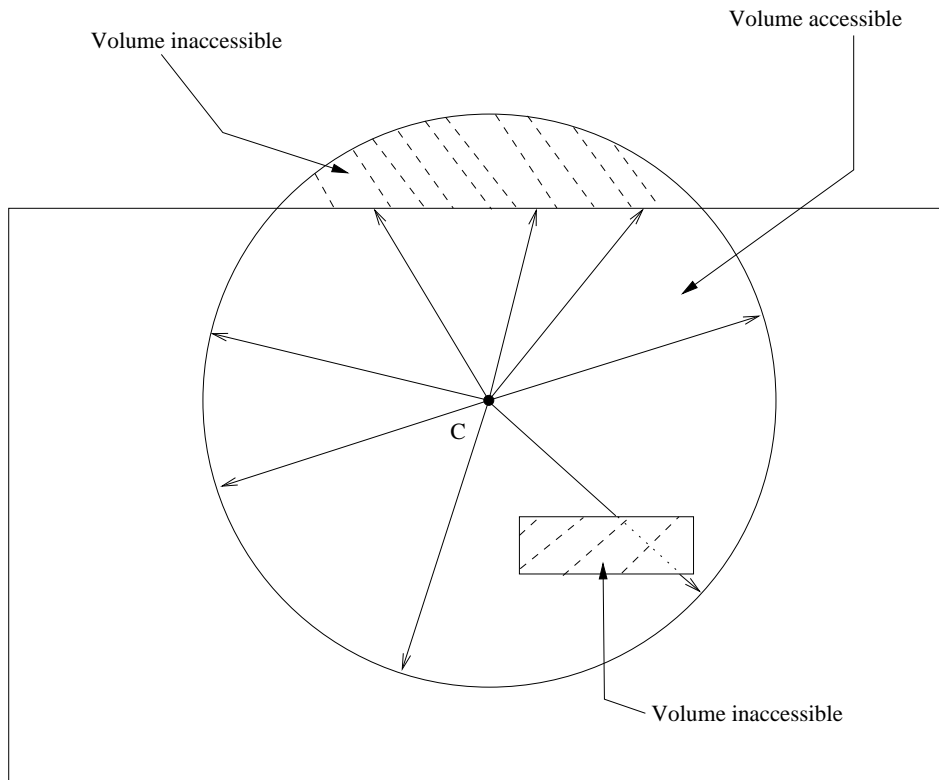


FIGURE 7.6.1 – Le volume du récepteur sphérique peut contenir des zones inaccessibles aux rayons qui ne doivent pas être prises en compte dans le calcul du volume « utile ». Ce volume utile est estimé par un tir de rayons issus du centre du récepteur, rayons dont le parcours dans les volumes inaccessibles (trait pointillé) n'est pas pris en compte.

le rayon est rasant et qu'une face inaccessible soit caractérisée comme étant accessible. Ce phénomène est heureusement peu fréquent et l'utilisation d'un simple seuil sur le nombre minimum de fois qu'une face doit être touchée pour être considérée accessible permet d'y remédier.

Lorsque l'accessibilité des surfaces est connue pour chacune de ses faces¹², ces informations sont utilisées pour déterminer les volumes accessibles ou non, rencontrés par les rayons issus du centre du récepteur. Un tel rayon est décomposé en segments à chaque surface traversée et sa contribution au volume du récepteur dépend de l'accessibilité du volume traversé.

L'accessibilité d'un segment de rayon, qui ne traverse pas de surfaces, est déterminée comme suit : le segment de rayon voyage dans un volume accessible s'il est compris entre deux points accessibles (figure 7.6.2) qui peuvent être

12. Cette accessibilité est connue après le tir des premiers rayons et avant le tir des rayons restants.

situés sur les surfaces ou bien être un des deux points suivants :

- Le centre du récepteur C , dont sont issus les rayons, est supposé toujours accessible,
- Le point d'intersection P du rayon avec la surface du récepteur sphérique.

Le centre du récepteur est supposé toujours accessible¹³ et l'accessibilité du point P est déduite de la zone dans laquelle il se trouve :

- S'il n'y a pas de surface dans le prolongement du rayon plus loin que P , alors P est hors de la salle et il est inaccessible. Par exemple, figure 7.6.2, le point P_1 est hors de la salle et est détecté inaccessible
- Sinon, P est accessible si le segment de rayon auquel il appartient voyage entre deux points accessibles. Par exemple, figure 7.6.2, les points P_2 et P_3 ont tous deux une surface plus loin qu'eux. Le segment de rayon supportant P_2 voyage entre deux faces inaccessibles et celui supportant P_3 voyage entre deux faces accessibles, ce qui implique que P_2 est détecté inaccessible et P_3 est détecté accessible.

Puisque cette méthode repose sur la détermination de l'accessibilité des surfaces, l'utilisation des surfaces débordantes peut poser problème. Lorsqu'une surface débord hors de la salle, une même face peut être à la fois accessible et inaccessible (figure 7.6.3).

Lorsqu'un segment de rayon voyage entre deux faces dont une seule est faussement accessible, il n'y a pas de problème car cette zone sera quand même déclarée inaccessible (figure 7.6.3). Par contre, si le segment voyage entre deux faces faussement accessibles, la zone sera déclarée accessible par erreur (figure 7.6.4). On peut limiter cette erreur en réduisant le débordement des surfaces au strict nécessaire ou l'éliminer en interdisant l'utilisation des surfaces débordantes¹⁴.

7.6.2 Calcul du volume par tir de rayons

Pour estimer le volume des récepteurs, on tire parti du module de tir de rayons existant. En effet, le volume du récepteur sphérique avec inclusion d'obstacles peut être évalué en tirant N rayons depuis le centre du récepteur. Ces rayons parcourent le récepteur jusqu'à sa bordure extérieure, traversent les obstacles éventuels et ne participent au calcul du volume que lorsqu'ils voyagent dans le volume « utile ». Or ce volume utile est connu après le tir des premiers rayons

L'équation du volume d'un tel récepteur, dans un système de coordonnées sphériques (ρ, θ, φ) centré en C , est donnée par la formule suivante :

13. Le respect de cette spécification incombe à l'utilisateur.

14. Ce qui incombe à l'utilisateur.

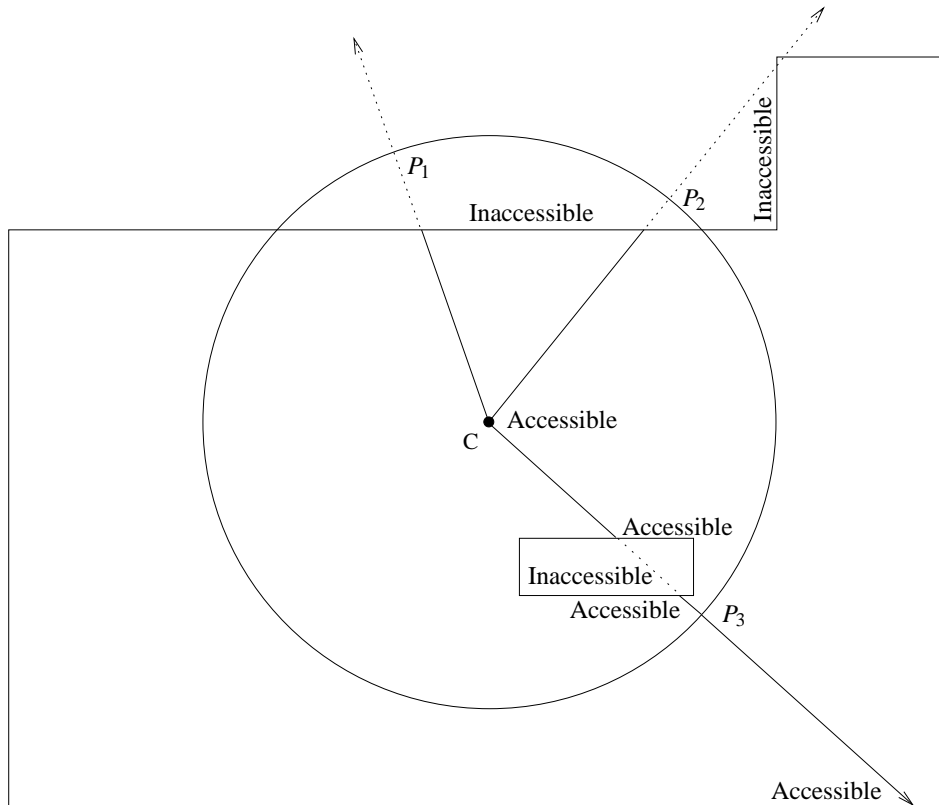


FIGURE 7.6.2 – La détection de l’accessibilité d’un point sur la surface du récepteur se fait en fonction de la plus proche surface derrière ce point. Les points P_1 , P_2 , P_3 reprennent les trois cas qui peuvent se présenter sans utiliser de surfaces « débordantes ».

$$V = \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\rho r^2 \delta_{in}(r, \theta, \varphi) dr \quad (7.6.1)$$

où ρ est le radius du récepteur, $\delta_{in} = 1$ en tout point appartenant à une zone accessible et 0 sinon. Cette expression peut être mise sous la formulation intégrale suivante

$$V = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} F(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi$$

où

$$F(\theta, \varphi) = \int_0^\rho r^2 \delta_{in}(r, \theta, \varphi) dr$$

qui peut se mettre sous la forme

$$\sum_{k=0}^P \int_{l_k} r^2 \delta_{in}(r, \theta, \varphi) dr = \sum_{k=0}^P \left[\delta_{in}(r, \theta, \varphi) \frac{r^3}{3} \right]_{a_k}^{b_k}$$

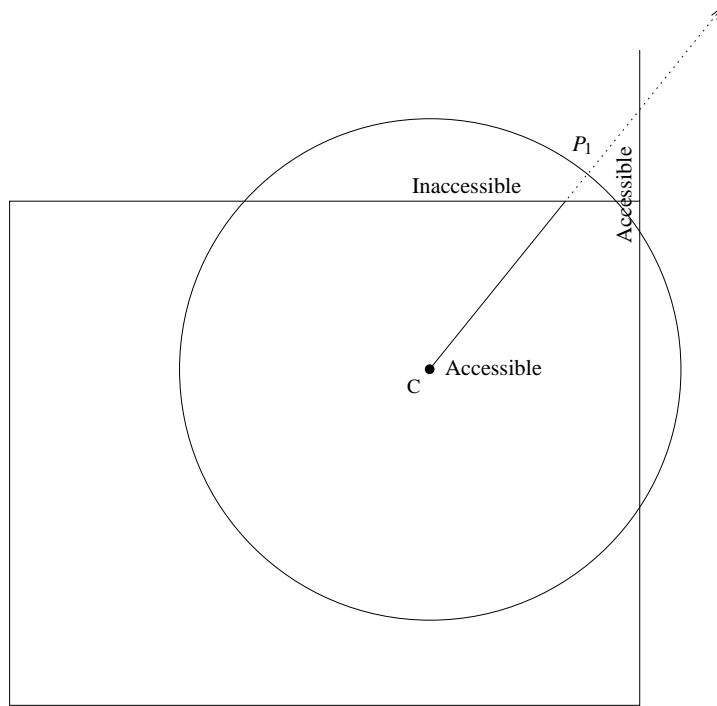


FIGURE 7.6.3 – Ambiguïté due à l'utilisation de surfaces débordantes. Dans ce cas-ci, l'accessibilité du point P_1 est correctement caractérisée car une seule surface est faussement caractérisée « accessible ».

car $\delta_{in} = 0$ ou 1 et où les $l_k = b_k - a_k$ sont les longueurs des P segments de rayons composant le rayon jusqu'à sa sortie du récepteur.

Pour une évaluation en tirant N rayons (selon la densité de probabilité $\sin \theta_i$) à partir du centre du récepteur, l'expression (7.6.1) est approchée par la formule

$$V \approx \frac{4\pi}{N} \sum_{i=0}^N F(\theta_i, \varphi_i) \quad (7.6.2)$$

avec

$$F(\theta_i, \varphi_i) = \sum_{k=0}^P \frac{(b_k^3 - a_k^3)}{3} \delta_{in}(r_i, \theta_i, \varphi_i)$$

Chaque rayon est décomposé en segments de rayons chaque fois qu'il rencontre une surface entre le centre du récepteur et sa bordure extérieure. A la figure 7.6.5, le rayon est décomposé en deux segments de longueur l_0 et l_1 car il traverse une surface entre le centre du récepteur et sa bordure extérieure.

On obtient une estimation du volume du récepteur dont la précision dépend du nombre de rayons et de la complexité du volume du récepteur. Plus le récepteur est grand et complexe, plus le nombre de rayons nécessaire est grand pour une estimation suffisante du volume tronqué. Dans les tests effectués à la

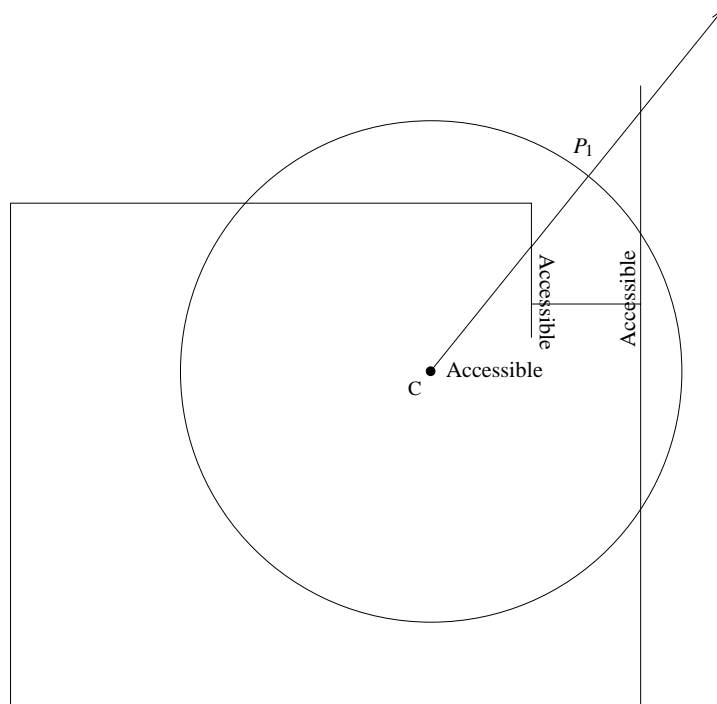


FIGURE 7.6.4 – Ambiguïté due à l'utilisation de surfaces débordantes. Dans ce cas-ci, l'accessibilité du point P_1 est mal caractérisée car son segment de rayon support est compris entre deux faces faussement caractérisées « accessibles ».

section 7.7, le volume des récepteurs de taille maximale est calculé en tirant un million de rayons pour chaque récepteur, ce qui s'est avéré suffisant pour les cinq salles testées.

Par souci de simplicité d'implémentation, la version actuelle du calcul du volume des récepteurs n'est pas optimale pour plusieurs raisons :

1. Le nombre de rayons a été fixé suffisamment grand pour calculer le volume des récepteurs de taille maximale en toute circonstance. Pour des récepteurs de taille moyenne, le nombre de rayons nécessaire est inférieur.
2. Un nouveau tir de rayons est utilisé pour chaque taille de récepteur, ce qui pourrait être ramené en un seul tir par récepteur.
3. La recherche d'intersections avec les surfaces ne tire pas parti des améliorations introduites au chapitre 5.

Ces modifications devraient apporter un gain de temps de calcul non négligeable.

La section suivante décrit les tests de la méthode 3 et leurs résultats.

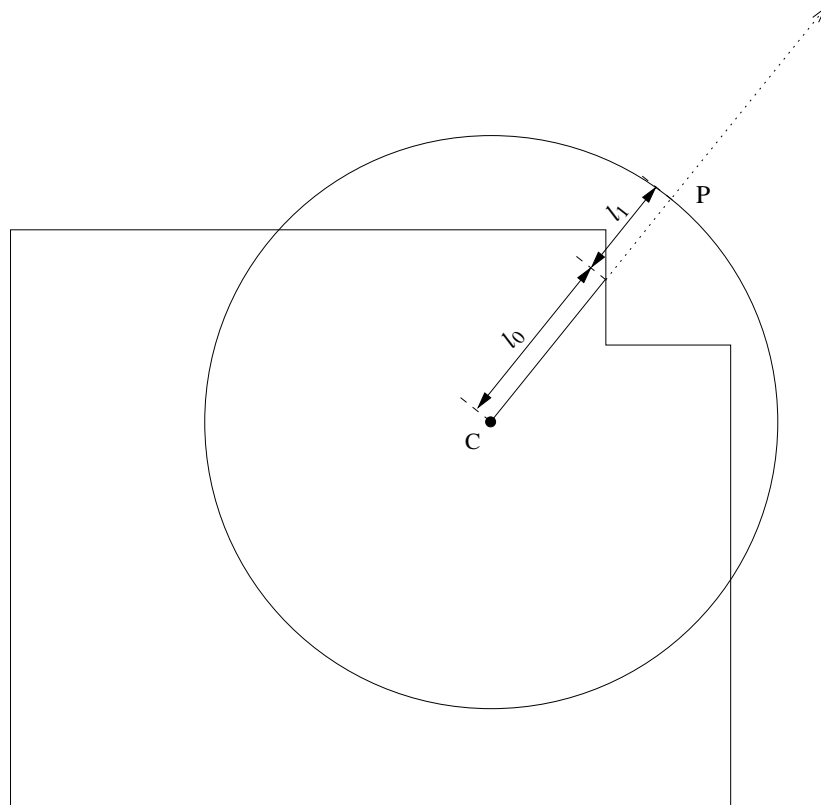


FIGURE 7.6.5 – Décomposition du rayon en segments lorsqu’il traverse une surface entre le centre du récepteur C et sa bordure extérieure. Dans cet exemple, le rayon est décomposé en deux segments de longueur l_0 et l_1 dont la somme vaut $\|\overrightarrow{CP}\| = \rho$.

7.7 Résultats

Dans cette section, les performances et la précision de la méthode proposée dans ce chapitre seront évaluées à l’aide de cinq salles et en plusieurs positions de récepteurs. Pour rappel, les paramètres d’intérêt de la méthode sont :

- Le nombre de rayons initial,
- La taille des récepteurs et le nombre de rayons conservés,
- La position des seuils temporels.

Les valeurs utilisées pour ces paramètres sont :

- 1 million de rayons pour évaluer les performances en utilisation normale et 50 millions de rayons pour assurer une convergence optimale/extrême des résultats,
- Un seul seuil temporel fixé à 80 ms¹⁵,

15. Auquel il faut ajouter le temps de parcours du champ direct entre la source et le

- Et un choix parmi 3 tailles pour le radius après passage du seuil temporel : le radius correspondant à la taille maximale¹⁶ et deux valeurs moyennes, respectivement 3,5 et 2 mètres, afin d'évaluer l'influence de la taille du récepteur sur l'accélération et la précision des résultats. Le radius initial est quant à lui fixé à 0,25 mètres.

Pour leur évaluation, ces résultats seront comparés aux simulations de référence obtenues avec l'algorithme initial en tirant 50 millions de rayons et en utilisant un récepteur de radius constant égal à 0,25 m. Une simulation supplémentaire avec l'algorithme initial et 1 million de rayons est utilisée pour évaluer l'effet d'une diminution du nombre de rayons sur la simulation de référence.

L'ensemble de ces simulations sont regroupées en six configurations décrites à la sous-section suivante.

7.7.1 Configurations de tests

Les simulations de tests sont effectuées selon différentes configurations afin d'étudier l'influence des paramètres de la méthode. Notamment, pour étudier l'effet de l'augmentation de la taille du récepteur et l'influence de l'élimination des rayons, ces deux paramètres seront étudiés en deux étapes distinctes :

1. L'influence de l'augmentation de la taille du récepteur sera testée sans élimination de rayons avec les trois tailles de radius variable. Cette augmentation entraîne une charge de calcul accrue par augmentation du nombre d'intersections et par étalement de la contribution énergétique.
2. Les simulations seront reproduites avec réduction du nombre de rayons après franchissement du seuil en se limitant aux longueurs moyennes (3,5 et 2,0m) de radius, suite aux mauvaises performances en précision des récepteurs-salles, c'est-à-dire des récepteurs englobant la salle pour lesquels tous les rayons contribuent en permanence.

En résumé, en tenant compte du nombre de rayons tirés à la source, on obtient les quatre configurations de tests et les deux configurations de référence présentées au tableau 7.7.1. Ces 6 configurations sont testées avec les cinq salles suivantes :

- Auditoire Gramme
- Ferme
- GMVS
- Église de Muno
- Amphithéâtre de mathématique¹⁷

récepteur le plus éloigné pour une salle donnée.

16. Englobant la salle.

17. Etant donné la relativement faible largeur de cette salle, le radius de 3,5m sera réduit à 3m.

Configuration	Algorithme à radius	Seuil	Nombre de rayons
Var_50_f	Variable	80 ms	50 millions - fixe
Var_50_v	Variable	80 ms	50 millions - variable
Var_1_f	Variable	80 ms	1 million - fixe
Var_1_v	Variable	80 ms	1 million - variable
Ref_50	Fixe	-	50 millions
Ref_1	Fixe	-	1 million

TABLE 7.7.1 – Configurations de test. Les valeurs de seuil données sont celles auxquelles il reste à ajouter le temps de propagation du champ direct pour obtenir le temps de seuil au récepteur.

aux positions de récepteur¹⁸ montrées en annexe (A.2). Leurs paramètres sont résumés au tableau 7.7.2.

Salles	#rec	$t_{seuil} (ms)$	$\rho_{min} = Max$	$\rho_{min} = 3.5m$	$\rho_{min} = 2.0m$
Gramme	12	160	7.34	2.99	1.87
Ferme	12	150	9.9	3.3	1.98
GMVS	15	195	13.9	3.2	1.97
Église	13	150	7.10	3.1	1.92
Amphi	10	120	3.84	2.72	1.93

TABLE 7.7.2 – Paramètres des salles utilisés pour les simulations. Dans l'ordre : nombre de récepteurs, temps de seuil comprenant le champ direct, moyenne du radius équivalent sur tous les récepteurs en fonction du radius imposé ρ_{min} .

Les gains en temps sont présentés à la sous-section suivante tandis que les critères d'évaluation de l'algorithme proposé par rapport aux résultats de l'algorithme initial seront présentés plus loin, à la sous-section 7.7.3.

7.7.2 Gains en temps de calcul suite à la suppression d'une partie des rayons

Nommons t_{ref_50} et t_{var_50v} les temps de simulation pour les configurations Ref_50 et Var_50_v. Puisque le gain en temps de calcul est dû à la suppression d'une partie des rayons après passage du seuil temporel, le gain

$$g = \frac{t_{Ref_50}}{t_{Var_50v}}$$

est maximum (ce gain maximum est noté g_{max}) lorsque tous les rayons sont supprimés après le passage du seuil. Comme on peut le voir au tableau 7.7.3,

¹⁸. Représentés par les points jaunes.

dans les conditions de test, g_{max} est compris entre 3 et 6 et offre dès lors une bonne possibilité d'accélération, qui est bien d'ailleurs approchée par les trois tailles de récepteur testées.

Salle	g_{max}	$\rho_1 = max$		$\rho_1 = 3.5m$		$\rho_1 = 2.0m$	
		Gain	$\frac{N_0}{N_1}$	Gain	$\frac{N_0}{N_1}$	Gain	$\frac{N_0}{N_1}$
Auditoire Gramme	3	2,9	852	2,9	143	2,7	44
Ferme	3,7	3,6	1574	3,5	179	3,4	62
GMVS	5,9	5,9	3051	5,8	145	5,5	62
Eglise Muno	4,2	4,2	806	3,9	153	3,8	63
Amphi Mathématiques	3,9	3,7	235	3,5	100	3,4	59

TABLE 7.7.3 – Gain $\frac{t_{Ref_50}}{t_{Var_50v}}$ en temps de calcul par suppression des rayons pour la configuration Var_50_v par rapport à Ref_50. Le coefficient diviseur du nombre de rayons est donné par $\frac{N_0}{N_1}$ conformément à l'équation (7.4.6).

On peut voir que le gain est quasi constant pour chaque salle et qu'une forte augmentation du facteur $\frac{N_0}{N_1}$ ne se traduit pas par une augmentation équivalente du gain. Cela signifie que le temps de calcul de la partie tardive devient nettement inférieur au temps de calcul constant de la partie précoce de l'échogramme.

En comparant le gain maximal aux gains obtenus pour les trois tailles de radius, le facteur d'accélération obtenu peut être qualifié de très bon. Il reste à déterminer si cette accélération est obtenue au détriment de la précision, ce qui est fait en déterminant une méthode d'évaluation de l'équivalence des résultats : celle-ci est décrite à la sous-section 7.7.3 et analysée à la sous-section 7.7.4.

Pour obtenir le temps total des simulations, il faut ajouter le temps de calcul du volume des récepteurs au temps de calcul des simulations qui ont servi au calcul des gains de la méthode développée dans ce chapitre. Le volume des récepteurs est calculé en tirant un nombre donné de rayons pour chaque taille de chaque récepteur. Ce nombre de rayons a été fixé empiriquement à 1 million afin d'obtenir une bonne estimation du volume de toutes les salles et peut être diminué pour les récepteurs plus petits ou les salles plus petites et moins complexes.

L'algorithme a été parallélisé mais les temps de calculs sont fournis pour une exécution sur un processeur. Même si les temps de calculs semblent élevés, ils doivent être pris uniquement à titre indicatif (tableau 7.7.4) car l'algorithme est loin d'être optimisé :

1. Une première amélioration de l'algorithme permettrait de calculer les volumes d'un même récepteur en un même tir de rayons, divisant les temps de calcul par le nombre de radius. Dans le cas présenté au tableau

Salles	#rec	T(s)
Auditoire Gramme	12	8
Ferme	12	10
GMVS	15	3
Eglise Muno	13	6
Amphi Mathématiques	10	3

TABLE 7.7.4 – Temps de calcul du volume des récepteurs en tirant 1 million de rayons pour chaque taille de chaque récepteur.

7.7.4, tous les temps de génération seraient divisés par 2.

2. Le traitement vectoriel pourrait être appliqué à la recherche des intersections entre les rayons et les surfaces en apportant une accélération du même ordre de grandeur qu’au calcul des échogrammes.

Ces deux modifications devraient permettre de ramener le calcul des volumes en un temps acceptable, même pour un tir d’un million de rayons avec une dizaine de récepteurs.

7.7.3 Méthode d’évaluation de la précision

Puisque les résultats sont moyennés sur des sphères plus grandes, les échogrammes seront différents des échogrammes de référence. Leur précision sera évaluée sur base de l’équivalence de critères à définir.

Le comportement acoustique d’une salle est souvent évalué à l’aide de critères acoustiques dont le TR_{30} , l’ EDT , le D_{50} , le C_{80} et le T_s , obtenus sur base de la décroissance énergétique des échogrammes. Le respect de ces critères acoustiques est très important en acoustique des salles et leur équivalence peut être évaluée au moyen de la méthode utilisée par M. Vorländer dans [169] qui détermine si une valeur de test X_{test} tombe dans un intervalle¹⁹ centré sur X_{ref} . Lorsque c’est le cas, le critère acoustique de test est qualifié d’« équivalent ».

La valeur de test X_{test} est qualifiée d’équivalente à la valeur de référence X_{ref} si leur écart Δ (relatif ou non) est tel que

$$\|\Delta\| = \left\| \frac{X_{ref} - X_{test}}{X_{ref}} * 100 \right\| < 5\%$$

pour le TR_{30} et l’ EDT ,

$$\|\Delta\| = \|X_{ref} - X_{test}\| < 5\%$$

19. La largeur de ces intervalles a été déterminée selon des critères psychoacoustiques dans la bande d’octave centrée en 1kHz.

pour le D_{50} ,

$$\|\Delta\| = \|X_{ref} - X_{test}\| < 0,5dB$$

pour le C80 et

$$\|\Delta\| = \|X_{ref} - X_{test}\| < 10ms$$

pour le Ts. Ces expressions sont utilisées pour toutes les bandes d'octaves. Les valeurs de références sont issues de la configuration « ref_50 » (tableau 7.7.1) et les valeurs de tests sont issues des autres configurations.

Maintenant que l'équivalence des échogrammes est caractérisée, le comportement global de la méthode testée pour chaque configuration va être étudié. Ceci sera fait en déterminant le pourcentage de valeurs équivalentes pour chaque critère acoustique ainsi que l'écart-type et l'écart-moyen autour de la moyenne des Δ afin de caractériser leur divergence.

Avant de poursuivre, une remarque s'impose sur la variabilité du calcul de l'EDT d'une simulation à l'autre : la méthode d'estimation de l'EDT introduit une grande variabilité des résultats suite au faible nombre de valeurs utilisées pour la régression linéaire sur la courbe de décroissance énergétique²⁰.

Comme illustré à la figure 7.7.1, la régression sur la courbe de décroissance énergétique $y [i] = f (\Delta t [i])$ s'arrête dès que la condition suivante est satisfaite :

$$y [i] < y [0] - 10.$$

Pour deux courbes semblables $y_1 = f_1 [i]$ et $y_2 = f_2 [i]$, on devrait obtenir des valeurs d'EDT proches mais l'arrêt de la régression se fait en des intervalles temporels différents lorsque les deux valeurs $y_1 [i]$ et $y_2 [i]$ sont de part et d'autres de l'horizontale $y [i] = y [0] - 10$, ce qui peut influencer fortement le résultat même si les deux courbes sont très proches.

Par exemple, à la figure 7.7.2, la régression linéaire s'arrête en deux intervalles temporels voisins et donne une différence relative de 20% entre les valeurs d'EDT calculées pour la courbe de référence et la courbe de test même si les courbes sont presque identiques. Cet exemple est extrême mais illustre clairement que de faibles différences locales entre les deux courbes peuvent donner lieu à de fortes variations d'EDT, en particulier si le nombre de points entrant dans la régression est faible (< 10). C'est pourquoi, il faudra considérer les résultats des comparaisons d'EDT avec la plus grande prudence.

Dans la sous-section suivante, la perte en précision des résultats est étudiée en analysant l'impact de l'augmentation de la taille du récepteur puis de la suppression d'une partie des rayons sur l'équivalence des échogrammes.

20. L'EDT est directement lié à la pente de la droite de régression évaluée entre 0 et -10 dB ($EDT = -\frac{60}{pente}$).

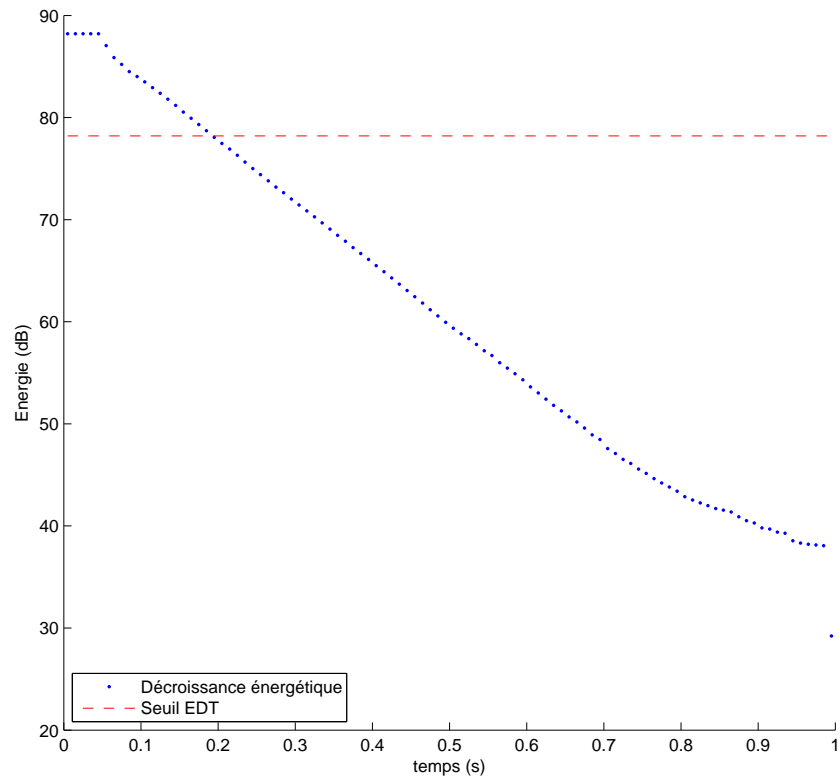


FIGURE 7.7.1 – Courbe de décroissance énergétique discrétisée aux intervalles temporels et seuil d’arrêt de la régression linéaire pour le calcul de l’EDT.

7.7.4 Étude de la modification de la précision des résultats

La modification de la précision des résultats suite à la variation de la taille du récepteur et du nombre de rayons est étudiée en deux étapes, par analyse de l’équivalence des critères acoustiques suite à la croissance du récepteur

1. Sans suppression de rayons selon la configuration Var_50_f,
2. Avec suppression de rayons selon la configuration Var_50_v.

Les valeurs de radius testées sont 2 m, 3.5 m et celle correspondant au récepteur de taille « max ». Les simulations correspondantes seront référencées sous la forme « taille du radius »_f pour la configuration Var_50_f et « taille du radius »_v pour la configuration Var_50_v. La configuration Ref_1 a été ajoutée à des fins illustratives.

Les résultats sont synthétisés sous forme de pourcentages de critères acoustiques équivalents (figure 7.7.3) et de divergences des écarts Δ (figures D.2.1,

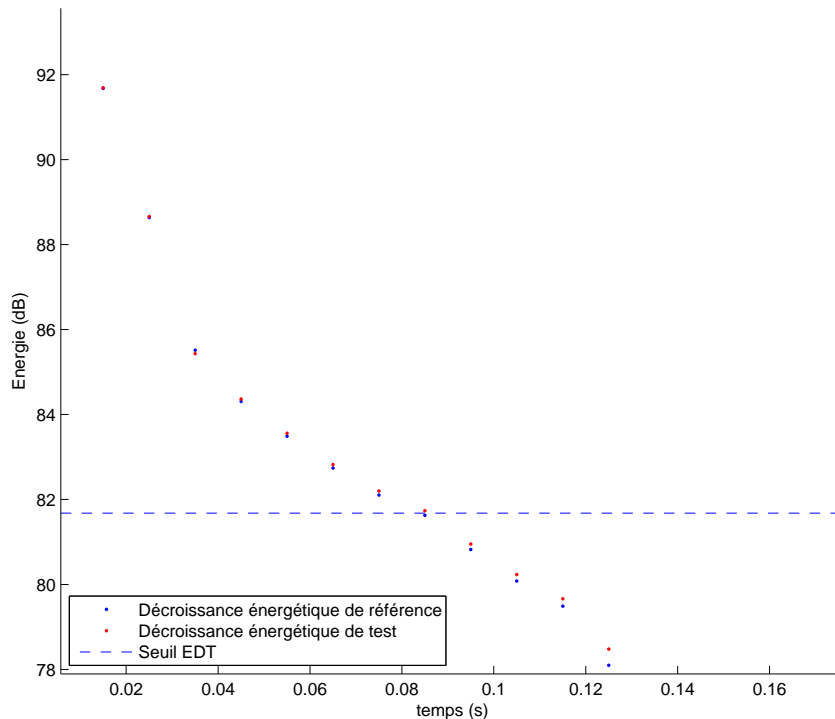


FIGURE 7.7.2 – L’arrêt de la régression linéaire sur la courbe rouge se fait un intervalle temporel plus tard que pour la courbe bleue ce qui donne deux valeurs d’EDT significativement différentes.

D.2.2, D.2.3, D.2.4, D.2.5) par rapport à la configuration Ref_50.

En observant les pourcentages d’équivalence pour « max_f » (figure 7.7.3), on remarque qu’une faible proportion des critères acoustiques sont équivalents, principalement pour le C80 et l’EDT. Pour cette taille de récepteur, le calcul

- de l’EDT est fortement dégradé pour toutes les salles hormis Math,
- du C80 est fortement dégradé pour 4 salles sur 5 (Ferme, GMVS, Muno et Math),
- du TR30 est fortement dégradé pour 3 salles sur 5 (Ferme, Muno et Math),
- du D50 est dégradé pour Gramme et quelque peu pour Muno,
- du Ts est quelque peu dégradé pour 4 salles (Gramme, Ferme, GMVS et Muno),

et ceci à cause d’une perte maximale de résolution spatiale.

Pour les récepteurs de taille moyenne « 3.5_f » et « 2.0_f », le niveau d’équivalence est bien plus élevé et acceptable. La divergence des écarts Δ est bien mieux contenue même si les résultats du TR30 pour la ferme sont

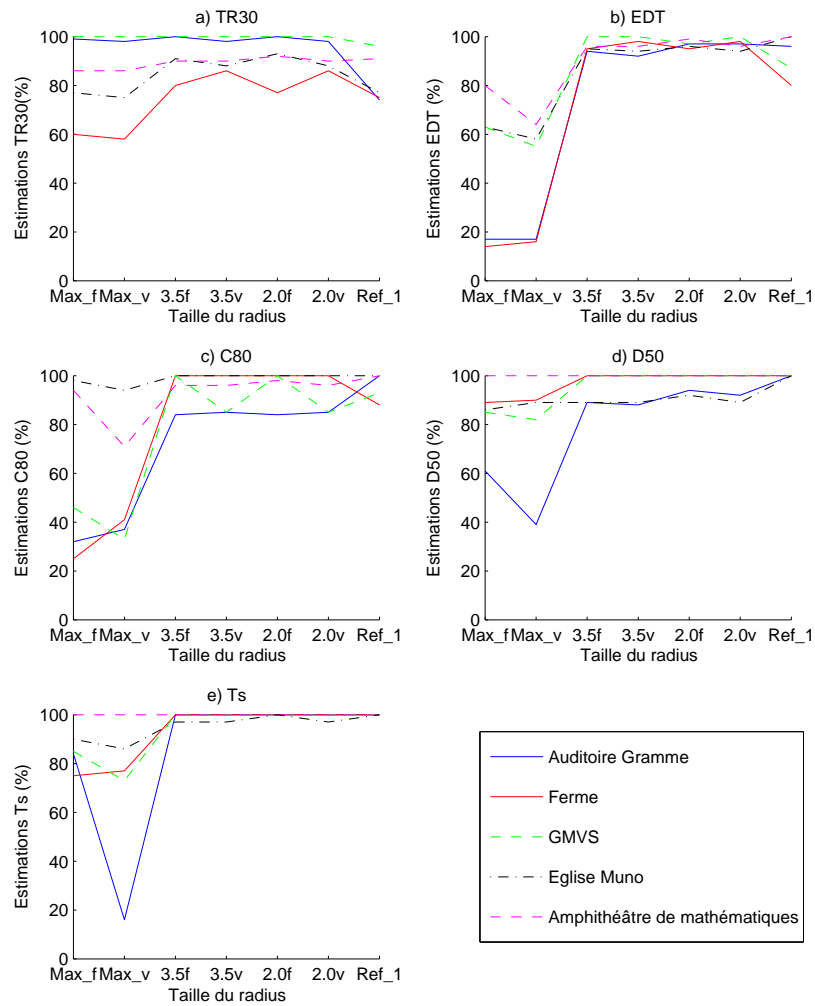


FIGURE 7.7.3 – Pourcentage des critères acoustiques jugés équivalents à la configuration Ref_50 pour les configurations Var_50_f et Var_50_v avec les radius de taille maximale, 3,5m, 2 m et de taille 0,25m pour la configuration Ref_1.

moyens (figure D.2.2). Par exemple, aux figures 7.7.4 a) et b) , on peut voir qu'aux fréquences où la décroissance énergétique est quasi-linéaire, les deux méthodes se valent parfaitement, mais lorsqu'elle n'est plus linéaire, la perte de résolution spatiale mène à une décroissance moyenne différente qui affecte principalement le TR30.

Temps de calcul sans suppression de rayons

Les temps de calcul sans suppression de rayons sont donnés au tableau 7.7.5 pour des simulations de configuration Ref_50, Var_50_f et Ref_1 effec-

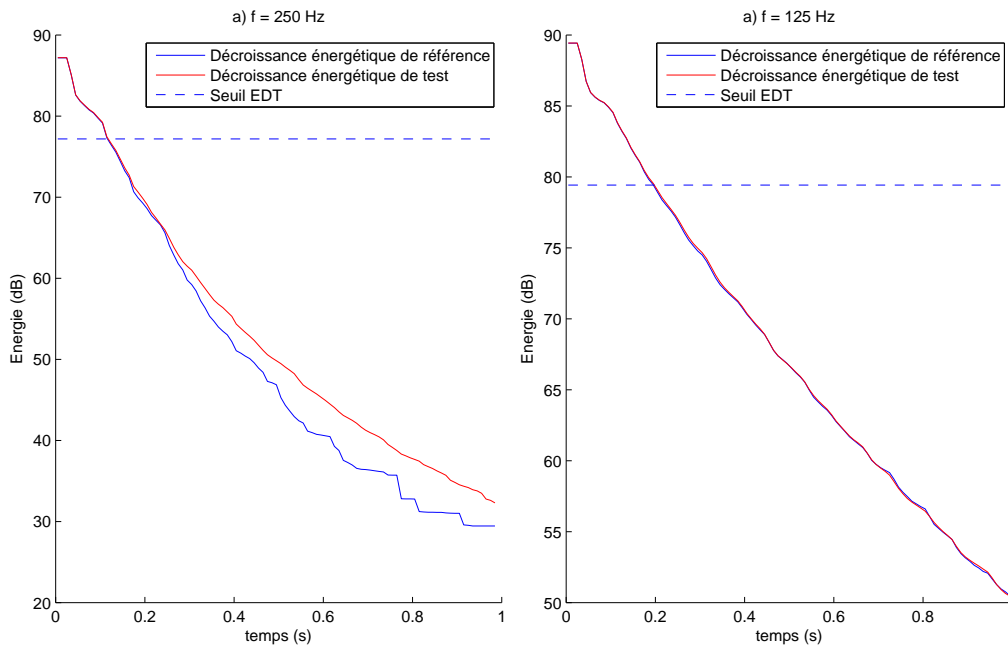


FIGURE 7.7.4 – Ferme - Exemple de décroissance énergétique menant à un TR30 a) divergeant de 17% ou b) identique, pour les simulations de référence et de test (Ref_50 et Var_50_f) à 250 et 125 Hz, avec un radius de 2m pour le récepteur R2.

tuées sur un ordinateur portable doté d'un processeur core i5-2410M et de 6 Go de RAM en n'utilisant qu'un cœur du processeur. D'emblée, on remarque que le surcoût en temps de calcul pour traiter l'étalement de la contribution énergétique des rayons sur plusieurs intervalles temporels et l'augmentation du nombre d'intersections consécutif au changement de récepteur est très élevé, surtout avec un grand nombre de récepteurs. Pour le récepteur de type salle, le temps de calcul est de 4 à 20X plus élevé. Cependant, le cas du récepteur-salle est particulier puisqu'un seul récepteur de cette taille suffit pour toutes les positions de la salle, ramenant le temps de calcul au même ordre de grandeur que les récepteurs de radius de 2 m (temps de calcul de *max* 1 récepteur). Les temps donnés pour la colonne « max » sont obtenus en utilisant un récepteur de taille max pour chaque position de récepteur afin d'évaluer la croissance du temps de calcul en fonction de la taille de récepteur. On constate que l'influence du récepteur devient prépondérante pour les récepteurs de très grandes tailles. En ne considérant que les temps de calcul, les petites tailles seront privilégiées, ou alors la taille maximale en utilisant un seul récepteur.

Salles	Temps de calcul (s)				
	pour <i>Ref_50</i> avec $\rho_0 = 0.25$	pour <i>Var_50_f</i> avec $\rho_1 =$			
		<i>max</i>	3,5	2,0	<i>max 1 rec</i>
Gramme	3080	15940	4507	3467	4190
Ferme	3023	13664	3650	3213	3566
GMVS	2571	44731	3653	2965	5186
Église	3417	24159	6092	4445	4518
Amphi	2415	16285	4754	3565	3603

TABLE 7.7.5 – Temps de calcul en secondes pour les configurations *Ref_50* et *Var_50_f* avec les trois tailles de récepteurs et un seul récepteur-salle. Pour la salle *Amphi*, le radius $\rho_1 = 3.0m$ au lieu de $3.5m$.

Modification de la précision des critères acoustiques suite à la suppression d'une partie des rayons

La précision des résultats pour le récepteur-salle est insuffisante pour les simulations sans et avec suppression de rayons. Pour les récepteurs de taille moyenne avec suppression des rayons (« *3.5_v* » et « *2.0_v* »), on observe aux figures 7.7.3, D.2.1, D.2.2, D.2.3, D.2.4 et D.2.5 que la précision des critères acoustiques avec élimination de rayons reste équivalente au cas du nombre de rayons fixe. Puisque le nombre de rayons en fin d'échogramme se rapproche ou est inférieur au million de rayons, la configuration *Ref_1* a été ajoutée afin d'en comparer les résultats. Dans la majorité des cas, la précision obtenue avec la méthode testée *3.5v* ou *2.0v* lui reste bien supérieure.

Si l'on tient compte du facteur d'accélération et du degré d'équivalence des résultats, le récepteur-salle ne présente pas d'intérêt comparativement au récepteur de radius 3,5 mètres : il ne sera pas utilisé dans la section suivante pour l'étude de la méthode avec un million de rayons initial.

7.7.5 Résultats avec 1 million de rayons

Les simulations précédentes ont été effectuées avec un grand nombre initial de rayons ($50 \cdot 10^6$), ce qui permet de conserver un échantillon de rayons suffisamment représentatif de la propagation dans la salle lors du passage du seuil temporel. Ce n'est plus nécessairement vrai lorsque le nombre initial de rayons est plus faible. Pour illustrer cela, les simulations ont été réalisées également avec initialement 10^6 rayons.

En observant le pourcentage d'équivalences et la divergence des écarts Δ du TR30 pour la Ferme (figures 7.7.5 et 7.7.6), on peut voir que la suppression des rayons influence fortement la précision alors que ce n'était pas le cas avec un nombre de rayons initial plus important. Ceci dit, les performances restent du même ordre de grandeur que celle de la configuration *Ref_1* (hormis pour

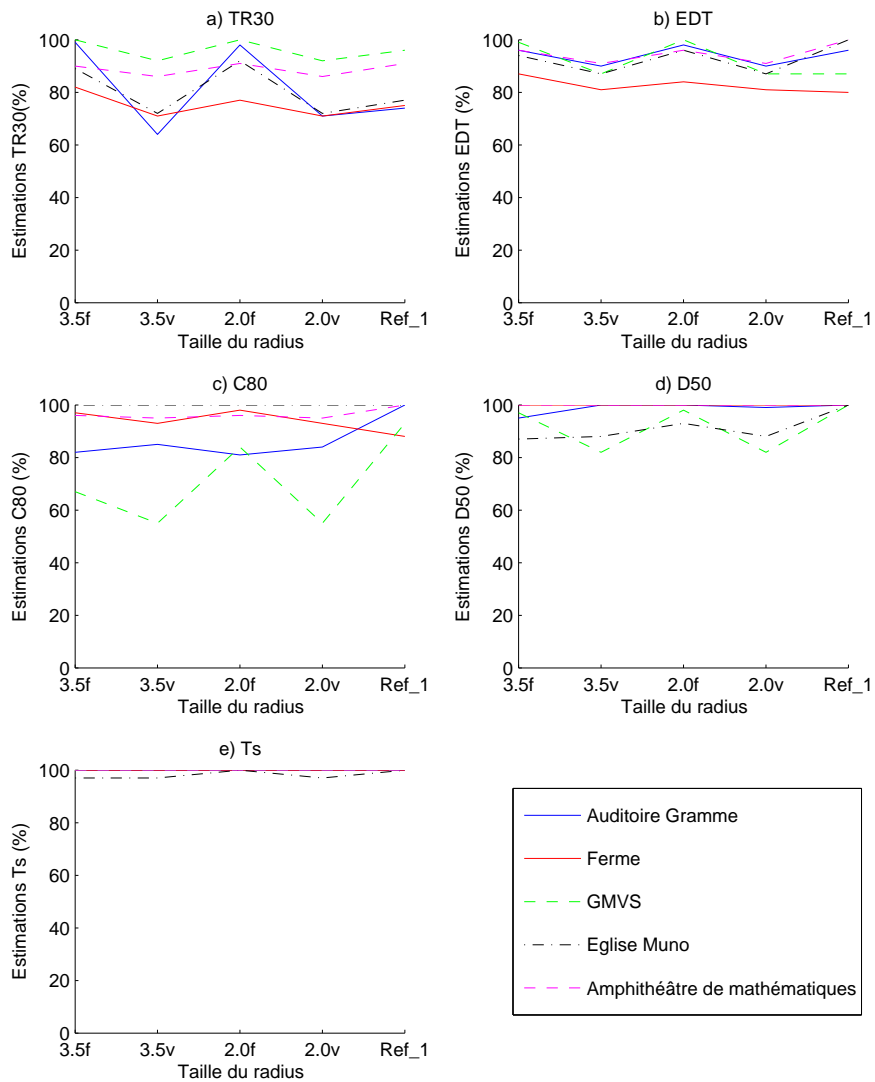


FIGURE 7.7.5 – Pourcentage des critères acoustiques équivalents à la configuration Ref_50 pour les configuration Var_1_f et Var_1_v avec les radius de taille maximale, 3,5m, 2 m et de taille 0,25m pour la configuration Ref_1.

Muno).

Les plus fortes variations d'équivalence se produisent pour le TR30 de l'auditoire de Gramme et l'église Muno ainsi que pour le D50 de GMVS qui offrent une équivalence inférieure à la configuration Ref_1. Ceci suggère qu'il existe un nombre de rayons sous lequel il ne faut pas descendre sous peine de pénaliser la précision des résultats. Empiriquement, ce nombre de rayons minimum est compris entre 10000 et 20000 rayons. Les critères les plus affectés sont ceux qui dépendent le plus de la partie tardive puisque la partie précoce reste inchangée.

TR30

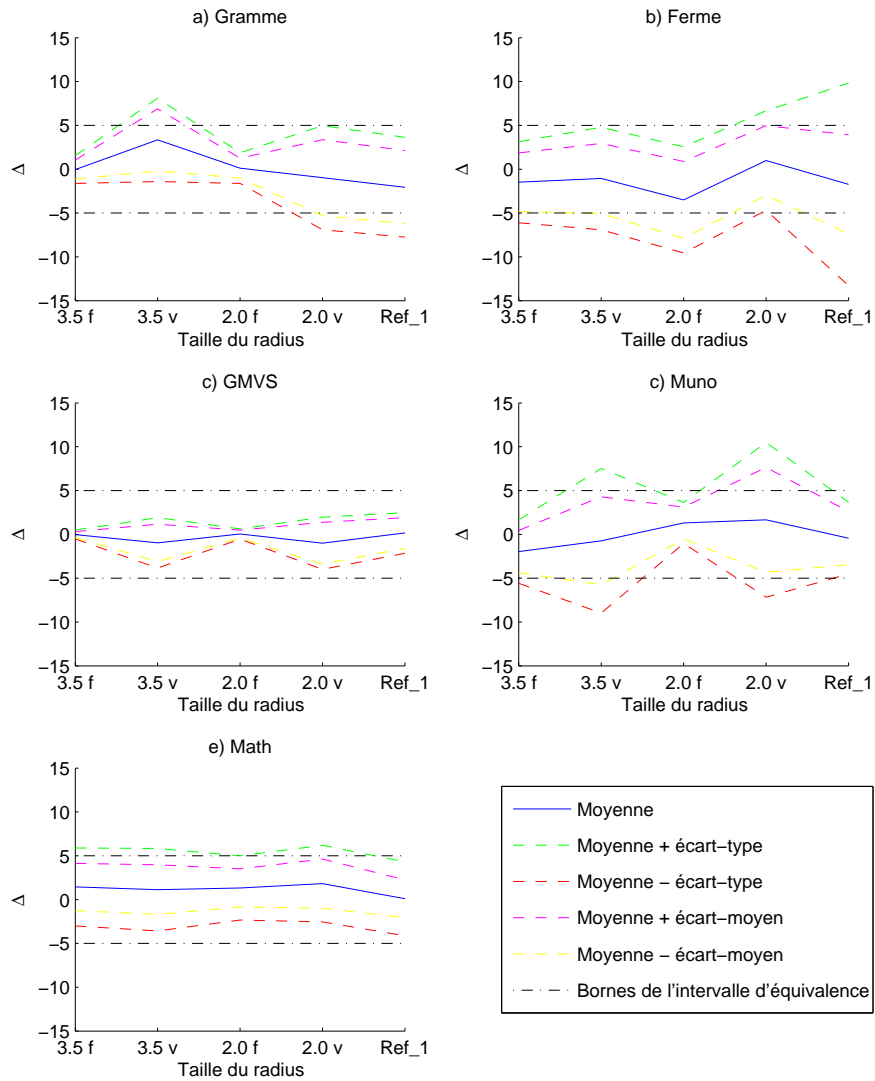


FIGURE 7.7.6 – Position de l'intervalle écart-type centré sur la moyenne des Δ pour les configurations Var_1f, Var_1v et Ref_1, par rapport à l'intervalle d'équivalence de la configuration Ref_50, pour le TR30 de toutes les salles.

Néanmoins, d'un point de vue global, les résultats sur l'ensemble des salles restent au moins du même ordre de grandeur qu'avec la configuration Ref_1 caractérisée par un nombre de rayons initial constant et un petit récepteur de taille fixe avec l'avantage d'un temps de calcul significativement réduit.

7.8 Conclusion

Dans ce chapitre, l'étude de la méthode des récepteurs adaptatifs a montré que cette approche permet de conserver un niveau d'équivalence des échogrammes égal ou supérieur à celui atteint par la configuration de référence *Ref_1*. Ceci a été observé pour l'ensemble des salles étudiées en profitant d'un facteur d'accélération proche de 3 à 6 selon les salles. Il convient néanmoins de rester prudent lors de la réduction du nombre de rayons et d'en conserver un nombre suffisant lors du franchissement d'un seuil temporel.

Si l'on veut réduire encore le temps de calcul, les efforts d'accélération doivent se tourner vers la partie précoce car les gains obtenus sont proches du maximum atteignable en traitant la partie tardive de l'échogramme. Pour ce faire, l'utilisation d'un seuil inférieur à 80 ms ne semble pas intéressante car cela modifierait trop la partie critique de l'échogramme, qui est sa partie précoce. Limiter cette dernière à 80 ms semble donc être un bon choix.

Lorsque les trois méthodes développées dans cette thèse sont mises ensemble, le gain en temps de calcul total se situe entre un facteur 12 et 15 pour une exécution sur un seul processeur (figure 7.8.1). Lorsque plusieurs processeurs sont utilisés, ce facteur croît linéairement avec le nombre de processeurs utilisés si on ne prend pas en compte les coûts d'initialisation de l'algorithme et si la contribution des rayons aux récepteurs pour un processeur donné se fait sans bloquer l'exécution des autres processus²¹. Par exemple, une parallélisation sur 16 threads avec 2 CPU quadcore E5520 à 2,2 GHz dotés d'hyper-threading donne un gain d'ordre 10. En couplant la parallélisation avec l'utilisation des trois techniques développées dans le cadre de cette thèse, le facteur d'accélération global est compris entre 120 et 150, ce qui permet d'obtenir des temps de calculs compris entre 1 s et 2 s pour un tir de 1 millions de rayons, ce qui est très rapide.

21. Si l'ajout des contributions de plusieurs rayons à un récepteur se fait de manière bloquante, ces blocages finissent par annuler voire rendre négatif le gain apporté par l'ajout de processeurs supplémentaires.

Salles	Gain 1	Gain 2	Gain 3	Gain total
Gramme	2	5	3	13
Ferme	2	5	3,5	14,5
GMVS	2	4	6	15,5
Église	2	4	4	15
Amphi	2	4	3,5	12

TABLE 7.8.1 – Gains obtenus par (dans l'ordre) le traitement des surfaces par paquets, par la méthode des surfaces occlusives vectorisée, par la méthode des récepteurs adaptatifs et par l'utilisation conjointe des 3 méthodes développées dans le cadre de cette thèse.

Chapitre 8

Conclusion générale et perspectives

Les méthodes numériques de simulation en acoustique des salles cherchent à obtenir la réponse impulsionnelle entre une position source et une position récepteur. Ces méthodes sont réparties entre méthodes ondulatoires et méthodes énergétiques, ces dernières négligeant le caractère ondulatoire de la propagation acoustique. Les méthodes ondulatoires sont utilisées pour les simulations aux basses fréquences et les méthodes énergétiques sont plutôt utilisées pour les fréquences supérieures à la fréquence de Schroeder (voir chapitre 2.4).

Les méthodes numériques de simulation en acoustique des salles sont coûteuses en temps de calcul et plusieurs techniques ont été développées pour en accélérer l'exécution. Néanmoins, il n'existe pas actuellement de méthode satisfaisante pour la simulation rapide et précise de la partie tardive des réponses impulsionnelles. C'est pourquoi cette thèse s'est concentrée sur ce problème à partir du tir de rayons, une méthode énergétique capable de générer une longue réponse impulsionnelle tout en tenant compte des réflexions diffuses.

Cependant, la génération des échogrammes par la méthode du tir de rayons dans sa version brute est relativement lente. Pour l'accélérer, les méthodes les plus fréquentes ou intéressantes, rencontrées dans la littérature, utilisent :

- Les arbres BSP pour accélérer la recherche d'intersections entre les rayons et les surfaces. Cependant, ces arbres ne sont pas bien adaptés au traitement vectoriel et ne permettent pas une mise à jour partielle de leur structure en cas d'une modification de la géométrie de la salle.
- Un récepteur dont la taille croît linéairement pour compenser la croissance des erreurs statistiques sur les résultats en fonction du temps. Cependant, l'inclusion des obstacles à l'intérieur du volume récepteur n'est pas prise en compte et le nombre de rayons, constant, est déterminé par la précision souhaitée en début d'échogramme.
- L'utilisation de GPU en lieu et place de CPU afin de profiter du carac-

tère massivement parallèle de l'algorithme. Cependant, la dispersion des rayons due au nombre élevé de réflexions et accentuée par la diffusion n'est pas compatible avec les architectures GPU, ce qui limite en pratique leur utilisation aux premiers ordres de réflexion purement spéculaire sur des modèles géométriques de plusieurs milliers à plusieurs centaines de milliers de triangles.

Ces techniques présentent donc un ensemble de limitations que les trois méthodes développées dans cette thèse lèvent, tout en conservant de bonnes performances.

En effet, les trois techniques développées dans le cadre de cette thèse sont complémentaires l'une de l'autre et apportent un gain important tout en conservant des résultats acoustiquement équivalents. De plus, elles autorisent les mises à jour partielles de la géométrie pour autant que le nombre de surfaces modifiées reste faible (modification d'une petite dizaine de surfaces pour les salles complexes). Ce gain se répartit entre les trois méthodes de la façon suivante :

1. Un facteur d'accélération d'ordre 2 pour le traitement vectoriel sur CPU des surfaces¹ par paquets lors de la recherche d'intersections avec les rayons. Cette méthode permet en outre de traiter des surfaces planes convexes avec un nombre quelconque de sommets.
2. Un facteur d'accélération compris entre 4 et 5² pour la minimisation du nombre de surfaces traitées lors de la recherche d'intersections avec les rayons, en tenant compte des occlusions entre les surfaces et en tenant compte des probabilités d'intersections entre les rayons et les surfaces. Ces gains sont obtenus en couplant cette technique au traitement vectoriel des surfaces (méthode 1) et sont équivalents aux gains obtenus par les arbres BSP pour les modèles de salles de complexités géométriques simples et moyennes, tant que la densité d'occlusions reste faible. Par contre, contrairement aux arbres BSP, les informations de visibilité peuvent être mises à jour en un temps court lors d'une modification partielle de la géométrie.
3. Un facteur d'accélération compris entre 3 et 6 pour la diminution dynamique du nombre de rayons parcourant la salle lors du calcul de la partie tardive de la réverbération. L'augmentation des erreurs statistiques provoquée par cette diminution du nombre de rayons est compensée par l'augmentation de la taille du récepteur. Par hypothèse, ce changement de taille intervient une seule fois à la jonction entre la partie précoce et tardive de la réponse impulsionnelle. De plus, cette méthode gère l'inclusion d'obstacles dans les récepteurs tout en restant conforme à la théorie

1. Ces facteurs ont été obtenus pour des modèles géométrique ne comportant que des surfaces à quatre sommets.

2. En écartant le gain très faible de la salle simple.

du tir de rayons. Pour éviter de biaiser les résultats en présence de grands récepteurs, les contributions énergétiques par les rayons sont étalées sur leur durée de traversée du récepteur.

Dans les exemples présentés (différentes salles testées), en couplant ces trois techniques, la génération de la réverbération complète est accélérée d'un facteur compris entre 12 et 15 tout en conservant des résultats acoustiquement équivalents.

Les recherches menées dans le cadre de cette thèse ont montré que les performances de ces méthodes sont influencées par plusieurs facteurs notamment :

- La taille des vecteurs traités par les jeux d'instructions lors du traitement vectoriel des paquets de surfaces. Dans le cas de SSE, la taille des vecteurs de données est de 128 bits.
- La densité d'occlusions des surfaces dans la salle lors de l'utilisation de la méthode des surfaces occlusives qui en affecte négativement les performances.
- La taille du récepteur, qui affecte le nombre de rayons conservés, ainsi que le seuil temporel auquel la taille du récepteur est modifiée lors de l'utilisation de la méthode des récepteurs adaptatifs. Le temps de calcul des échogrammes par cette méthode tend vers une valeur asymptotique égale au temps de génération de la partie précoce.
- En fonction des paramètres choisis pour les récepteurs adaptatifs, l'étalement temporel des contributions énergétiques limite les variations particulières dans l'échogramme, telle que les échos flottants, après le changement de taille du récepteur. Dès lors, les variations de pente de la décroissance énergétique des échogrammes sont simulées avec plus ou moins de fidélité selon la taille des récepteurs choisie.

De plus, la parallélisation de l'algorithme fournit un facteur d'accélération qui augmente quasi linéairement avec le nombre de processeurs comme illustré à la figure 8.0.1. Par exemple, une parallélisation sur 16 threads avec 2 CPU quadcore E5520 à 2,2 GHz dotés d'hyper-threading donne un gain d'ordre 10.

En couplant la parallélisation avec l'utilisation des trois techniques développées dans le cadre de cette thèse, le facteur d'accélération global est compris entre 120 et 150, ce qui permet d'obtenir des temps de calculs compris entre 1 s et 2 s pour un tir de 1 millions de rayons dans les salles traitées au chapitre 7.

Ces méthodes pourraient encore être améliorées. Premièrement, le traitement par paquets de surfaces pourrait tirer parti d'une augmentation de la taille des jeux d'instructions tels que AVX qui traitent des vecteurs de 256 bits, ce qui permettrait de traiter des paquets de 8 surfaces moyennant une modification de l'algorithme.

Deuxièmement, la méthode des surfaces occlusives pourrait être améliorée en minimisant le nombre de surfaces traitées et pas seulement le nombre de

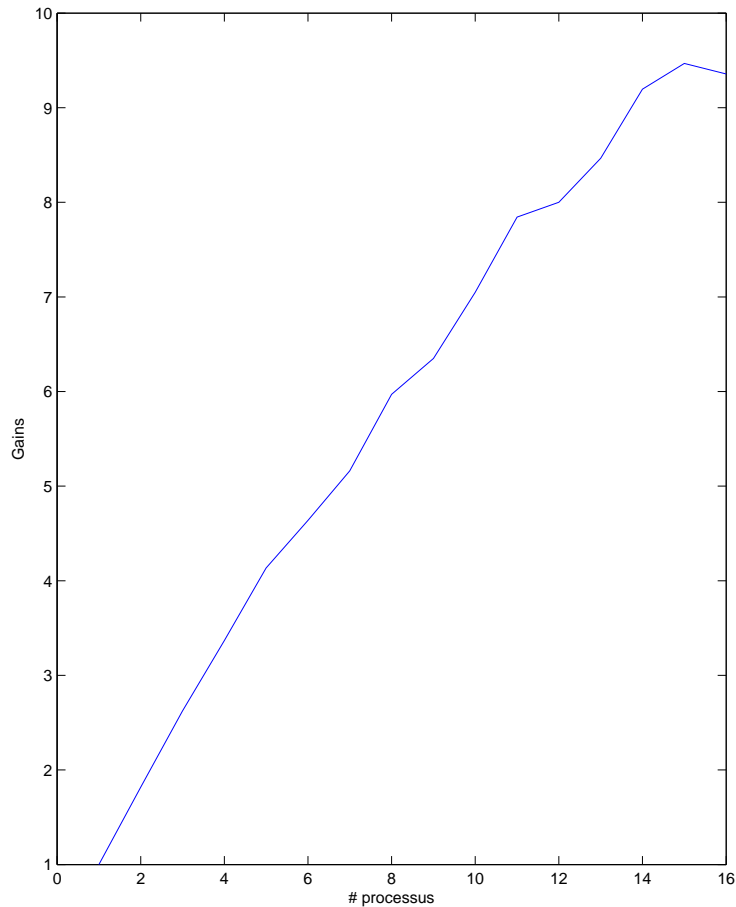


FIGURE 8.0.1 – Évolution du gain de temps de simulation par les 3 méthodes couplées pour la salle Ferme2 en fonction du nombre de threads par rapport à l’algorithme de base, sur 2 CPUs quadcore E5520 à 2,2 GHz dotés d’hyper-threading. Les simulations ont été obtenues avec les trois méthodes d’accélération développées dans ce document.

surfaces de la liste globale. De plus, la densité d’occlusions affecte négativement les performances de cette méthode. Dès lors, il serait intéressant de se pencher sur le développement d’une méthode permettant de réduire cette densité (Par exemple, par l’utilisation de volumes englobants).

Troisièmement, la détection des surfaces occlusives est fortement dépendante du nombre de surfaces du modèle géométrique. Une réduction du nombre de surfaces utilisée en améliorerait également les performances. On pourrait, par exemple, adapter l’algorithme pour travailler sur des subdivisions de la salle en sous-volumes distincts grâce à l’utilisation de surfaces transparentes et ainsi travailler sur des sous-ensembles réduits de surfaces. De plus, la détection des surfaces occlusives pourrait être parallélisée, utiliser les jeux d’instructions

vectérielles et utiliser une méthode plus efficace pour la détection des intersections entre les surfaces et les enveloppes convexes.

Quatrièmement, l'accélération par la méthode des récepteurs adaptatifs se fait au prix d'une perte de résolution temporelle qui est d'autant plus grande que le récepteur est grand. Il serait intéressant de déterminer la taille idéale du récepteur donnant le meilleur compromis entre résolution temporelle et facteur d'accélération. En outre, il serait également intéressant de déterminer précisément le nombre de rayons minimum à conserver pour garder une erreur statistique suffisante.

Cinquièmement, le temps de calcul du volume des récepteurs pourrait aussi être parallélisé et tirer parti du traitement vectoriel.

Enfin, cette thèse n'a volontairement pas abordé la modélisation analytique de la partie tardive de l'échogramme, éventuellement affinée par des informations délivrées par le tir de rayons lors du calcul de la partie précoce. Plutôt que complémentaire, cette méthode se substituerait à la méthode des récepteurs adaptatifs. Même s'il y aurait un intérêt à évaluer les performances de cette modélisation, il est probable que le gain d'accélération maximal obtenu soit similaire à celui des récepteurs adaptatifs.

Quant à l'utilisation de ces techniques sur GPU, elle n'a pas été testée mais d'après les résultats obtenus par S. Chèvremont dans [33], les résultats les plus intéressants avec l'algorithme brut sont obtenus en traitant l'entièreté du processus sur le GPU. Dans ce cadre, l'utilisation des récepteurs de taille variable semble peu adaptée suite aux nombreux tests induits par la méthode. De même, l'utilisation des surfaces occlusives ne semble de prime abord pas plus adaptée suite à la discontinuité dans le flux de traitement des intersections avec les surfaces. Cependant, il pourrait être intéressant de tester une version adaptée de ces méthodes avec un traitement partiel par GPU et CPU.

Pour conclure, les méthodes développées présentent des avantages (exploitation des instructions SIMD et évolutivité selon leur taille, gestion des mises à jour partielles de la géométrie, prise en compte des obstacles dans le récepteur, fonctionnement automatiquement sans paramétrage ni réglages complexes) par rapport aux méthodes existantes en fonction des conditions d'utilisation et permettent de se rapprocher du temps réel en conservant des résultats acoustiquement équivalents à l'algorithme brut.

Bibliographie

- [1] The auralias project. www.auralias.be.
- [2] CATT-Acoustic (software) user manual, v. 8.0.
- [3] Intel integrated performance primitives (software) reference manual.
- [4] Intel math kernel library (software) - vector statistical library notes.
- [5] OpenMP (software) official website.
- [6] QHull - convex hull library website.
- [7] Genesis software and acoustic consulting. RAMSETE user manual, version 1.0, 1995.
- [8] Acoustics – measurement of sound absorption in a reverberation room, international standard 354, 2003.
- [9] Acoustics – measurement of room acoustic parameters, international standard 3382, part 1, 2009.
- [10] Intel advanced vector extensions programming reference, July 2009.
- [11] M. Agate, R. Grimsdale, and P. Lister. The HERO algorithm for ray-tracing octrees. In *Proceedings of the Advances in Computer Graphics Hardware*, pages 61–73, Hamburg, Germany, September 1989.
- [12] T. Aila and S. Laine. Understanding the efficiency of ray traversal on GPUs. In *Proceedings of the ACM conference on High Performance Graphics*, pages 145–149, New Orleans, Louisiana, August 2009.
- [13] P. Ajmera, R. Goradia, S. Chandran, and S. Aluru. Fast, parallel, GPU-based space filling curves and octrees. In *Proceedings of ACM SIG-GRAPH i3D*, Redwood City, California, February 2008.
- [14] J. Allen and D. Berkly. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 60(4) :943–950, April 1979.
- [15] W.-T. Ang. *A beginner's course in boundary element methods*. Universal Publishers, Boca Raton, Florida, 2007.
- [16] L. Antani, J. Backman, A. Järvinen, and T. Takala. Waveguide mesh method for low-frequency simulation of room acoustics. In *Proceedings*

- of the *International Congress on Acoustics*, volume 2, pages 637–640, Trondheim, Norway, June 1995.
- [17] L. Antani, A. Chandak, M. Taylor, and D. Manocha. Direct-to-indirect acoustic radiance transfer. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(2) :261–269, February 2012.
 - [18] C. Barber, D. Dobkin, and H. Huhdanpaa. The quickhull algorithm for convex hulls. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 22(4) :469–483, December 1996.
 - [19] A. Billon and J.-J. Embrechts. Numerical evidence of mixing in rooms using the free path temporal distribution. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(3) :1381–1389, September 2011.
 - [20] A. Billon, C. Foy, J. Picaut, V. Valeau, and A. Sakout. Modeling the sound transmission between rooms coupled through partition walls by using a diffusion model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(6) :4261–4271, June 2008.
 - [21] A. Billon, J. Picaut, C. Foy, V. Valeau, and A. Sakout. Introducing atmospheric attenuation within a diffusion model for room-acoustic predictions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(6) :4040–4043, June 2008.
 - [22] A. Billon, J. Picaut, and A. Sakout. Prediction of the reverberation time in high absorbent room using a modified-diffusion model. *Applied Acoustics*, 69(1) :68–74, January 2008.
 - [23] A. Billon, V. Valeau, A. Sakout, and J. Picaut. On the use of a diffusion model for acoustically coupled rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(4) :2043–2054, October 2006.
 - [24] J. Borish. Extension of the image model to arbitrary polyhedra. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 75(6) :1827–1836, June 1984.
 - [25] C. Borß. A novel approach for optimally matching a late reverberation model to an image source model - or : what does a football have to do with shoebox shaped rooms? In *Proceedings of the EAA Symposium on Auralization*, Espoo, Finland, June 2009.
 - [26] L. Bos and J.-J. Embrechts. An interactive real-time based auralization system for room acoustics implementing directional impulse response and multiple audio reproduction modules for spatialization (the AURALIAS project). In *Proceedings of NAG/DAGA International Conference on Acoustics*, volume 3, pages 1459–1462, Rotterdam, The Netherlands, March 2009.
 - [27] D. Botteldooren. Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(6) :3302–3308, December 1995.

- [28] S. Boulos, D. Edwards, J. Lacewell, J. Kniss, J. Kautz, P. Shirley, and I. Wald. Packet-based whitted and distribution ray tracing. In *Proceedings of Graphics Interface*, pages 177–184, Montreal, Canada, May 2007.
- [29] S. Boulos, I. Wald, and C. Benthin. Adaptive ray packet reordering. In *Proceedings of the IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing*, pages 131–138, Los Angeles, California, August 2008.
- [30] A. Chandak, L. Antani, M. Taylor, and D. Manocha. FastV : from-point visibility culling on complex models. In *Proceedings of the Eurographics Conference on Rendering*, page 1237–1246, Girona, Spain, June 2009.
- [31] A. Chandak, L. Antani, M. Taylor, and D. Manocha. Fast and accurate geometric sound propagation using visibility computations. In *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics*, volume 18, pages 123–144, Melbourne, Australia, March 2011.
- [32] A. Chandak, C. Lauterbach, M. Taylor, Z. Ren, and D. Manocha. AD-Frustum : adaptive frustum tracing for interactive sound propagation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 14 :1707–1722, November 2008.
- [33] S. Chèvremont. *Adaptation d’un algorithme de rayons sonores pour une implémentation sur processeur graphique (GPGPU)*. Master’s thesis, Université de Liège, Liège, Belgium, June 2011.
- [34] R. Ciskowski and C. Brebbia. *Boundary element methods in acoustics*. Computational Mechanics Publications ; Elsevier Applied Science, Southampton ; Boston ; London ; New York, springer edition, 1991.
- [35] P. Coddington. Random number generators for parallel computers. *The NHSE Review*, 2, May 1997.
- [36] D. Cohen-Or, Y. Chrysanthou, C. Silva, and F. Durand. A survey of visibility for walkthrough applications. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 9(3) :412 – 431, July 2003.
- [37] B.-I. Dalenback. Room acoustic prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(2) :899–909, August 1996.
- [38] E. De Geest and H. Patzold. Comparison between room transmission functions calculated with a boundary element method and a ray tracing method including phase. In *Proceedings of the International Congress on Noise Control Engineering*, pages 3177–3180, Liverpool, United Kingdom, July 1996.
- [39] G. Defrance and J.-D. Polack. Estimating the mixing time of concert halls using the eXtensible fourier transform. *Applied Acoustics*, 71(9) :777–792, September 2010.

- [40] J-F. Dindart, J-J. Embrechts, and C. Sémidor. Use of bidirectional reflectance distribution function in a particle tracing method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(2) :1198, March 1999.
- [41] U. Drepper. What every programmer should know about memory, 2007.
- [42] I. Drumm and Y. Lam. The adaptive beam-tracing algorithm. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(3) :1405–1412, March 2000.
- [43] V. Easwaran. On further validation and use of the finite element method to room acoustics. *Journal of Sound and Vibration*, 187(2) :195–212, October 1995.
- [44] J.-J. Embrechts. Sound field distribution using randomly traced sound ray techniques. *Acta Acustica United with Acustica*, 51(6) :288–295, 1982.
- [45] J.-J. Embrechts. Analyse de la précision d’une méthode prévisionnelle utilisant le concept de rayon sonore. *Bulletin d’acoustique du laboratoire d’Acoustique ULg*, 2 :35 – 55, 1987.
- [46] J.-J. Embrechts. Broad spectrum diffusion model for room acoustics ray-tracing algorithms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(4) :2068–2081, April 2000.
- [47] J.-J. Embrechts. Modelling sound diffusion in ray tracing programs. In *Proceedings of TecniAcustica’00*, Madrid, Spain, October 2000.
- [48] K. Entacher, A. Uhl, and S. Wegenkittl. Linear congruential generators for parallel monte carlo : the leap-frog case. *Monte Carlo Methods and Applications*, 4(1) :1–16, January 1998.
- [49] P. Etter. Recent advances in underwater acoustic modelling and simulation. *Journal of Sound and Vibration*, 240(2) :351–383, February 2001.
- [50] A. Farina. RAMSETE - a new pyramid tracer for medium and large scale acoustic problems. In *Proceedings of Euro-Noise 95*, Lyon, France, March 1995.
- [51] A. Farina. Introducing the surface diffusion and edge scattering in a pyramid tracing numerical model for room acoustics. In *Proceedings of the Audio Engineering Society Convention*, Paris, France, February 2000.
- [52] T. Foley and J. Sugerman. KD-tree acceleration structures for a GPU raytracer. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware*, pages 15–22, Los Angeles, California, 2005.
- [53] C. Foy, V. Valeau, A. Billon, J. Picaut, and A. Sakout. An empirical diffusion model for acoustic prediction in rooms with mixed diffuse and specular reflections. *Acta Acustica united with Acustica*, 95(1) :97–105, January 2009.

- [54] L. Franzoni, D. Bliss, and J. Rouse. An acoustic boundary element method based on energy and intensity variables for prediction of high-frequency broadband sound fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(6) :3071–3080, December 2001.
- [55] T. Funkhouser, N. Tsingos, I. Carlbom, G. Elko, M. Sondhi, J. West, G. Pingali, P. Min, and A. Ngan. A beam tracing method for interactive architectural acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(2) :739–756, March 2004.
- [56] T. Funkhouser, N. Tsingos, and J-M. Jot. Survey of methods for modeling sound propagation in interactive virtual environment systems. *Presence and Teleoperation*, 2003.
- [57] W. Gardner. *Reverberation algorithms*. Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, m. kahrs and k. brandenburg edition, 1998.
- [58] A. Glassner. Space subdivision for fast ray tracing. In C. Grant and L. Hatfield, editors, *Tutorial : computer graphics, image synthesis*, pages 160–167. Computer Science Press, Inc., New York, NY, USA, 1988.
- [59] J. Goldsmith and J. Salmon. Automatic creation of object hierarchies for ray tracing. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 7(5) :14–20, May 1987.
- [60] C. Goral, K. Torrance, D. Greenberg, and B. Battaile. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. In *Proceedings of the Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, volume 18, pages 213–222, July 1984.
- [61] J. Gunther, S. Popov, H.-P. Seidel, and P. Slusallek. Realtime ray tracing on GPU with BVH-based packet traversal. In *Proceedings of the IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing*, pages 113–118, Ulm, Germany, September 2007.
- [62] J. Hargreaves and T. Cox. A transient boundary element method model of schroeder diffuser scattering using well mouth impedance. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(5) :2942–2951, November 2008.
- [63] H. Haverkort. Introduction to bounding volume hierarchies. Technical report, May 2004.
- [64] V. Havran. *Heuristic Ray Shooting Algorithms*. Ph.D. thesis, Department of Computer Science and Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic, November 2000.
- [65] P. Heckbert and P. Hanrahan. Beam tracing polygonal objects. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, volume 18, pages 119–127, Minneapolis, Minnesota, July 1984.

- [66] M. Hodgson. Evidence of diffuse surface reflections in rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 89(2) :765–771, February 1991.
- [67] M. Hodgson. When is diffuse-field theory applicable? *Applied Acoustics*, 49(3) :197–207, November 1996.
- [68] M. Hodgson and E.-M. Nosal. Experimental evaluation of radiosity for room sound-field prediction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(2) :808–819, September 2006.
- [69] D. Horn, J. Sugerman, M. Houston, and P. Hanrahan. Interactive kd tree GPU raytracing. In *Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, page 167–174. Seattle, Washington, April 2007.
- [70] T. Houtgast and H. Steeneken. A multi-language evaluation of the RASTI-method for estimating speech-intelligibility in auditoria. *Acta Acustica united with Acustica*, 54(4) :185 – 199, February 1984.
- [71] T. Ize, I. Wald, and S. Parker. Ray tracing with the BSP tree. In *Proceedings of the IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing*, pages 159–166, Los Angeles, California, August 2008.
- [72] M. Jedrzejewski and K. Marasek. Computation of room acoustics using programmable video hardware. In *Proceedings of International Conference on Computer Vision and Graphics*, volume 32, page 587–592, Warsaw, Poland, September 2004.
- [73] C.-H. Jeong, J.-G. Ih, and J. Rindel. An approximate treatment of reflection coefficient in the phased beam tracing method for the simulation of enclosed sound fields at medium frequencies. *Applied Acoustics*, 69(7) :601–613, July 2008.
- [74] Z. Jiang and X. Qiu. Receiving radius determination in ray-tracing sound prediction of rectangular enclosure. *Journal of Sound and Vibration*, 301(1-2) :391–399, March 2007.
- [75] P. Jiménez, F. Thomas, and C. Torras. 3D collision detection : A survey. *Computers and Graphics*, 25 :269–285, April 2001.
- [76] Y. Jing and N. Xiang. A modified diffusion equation for room-acoustic prediction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(6) :3284–3287, June 2007.
- [77] Y. Jing and N. Xiang. Experimental validations of the transport equation model for room-acoustic predictions in long spaces. In *The Journal of the Acoustical Society of America*, Baltimore, Maryland, April 2010.
- [78] J. Johnson, N. Carlson, and D. Tow. Ray trace calculations of ultrasonic fields. *Research in Nondestructive Evaluation*, 3(1) :27–39, March 1991.
- [79] J.-M. Jot. *Etude et réalisation d'un spatialisateur de sons par modèles physique et perceptifs*. Ph.D. thesis, Telecom, Paris, France, 1992.

- [80] Y. Kagawa. Discrete Huygens' model approach to sound wave propagation. *Journal of Sound and Vibration*, 218(3) :419–444, December 1998.
- [81] Y. Kagawa. Discrete Huygens' model approach to sound wave propagation - reverberation in a room, sound source identification and tomography in time reversal. *Journal of Sound and Vibration*, 225(1) :61–78, August 1999.
- [82] Y. Kagawa. Discrete Huygens' modelling and simulation for wave propagation. In *Systems Modeling and Simulation : Theory and Applications*, volume 3398, pages 1–11. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [83] A. Kelloniemi. *Room acoustics modeling with the digital waveguide mesh : boundary structures and approximation methods*. Ph.D. thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, November 2006.
- [84] J. Klosowski and C. Silva. The prioritized-layered projection algorithm for visible set estimation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 6(2) :108–123, April 2000.
- [85] R. Kouyoumjian and P. Pathak. A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface. *Proceedings of the IEEE*, 62(11) :1448–1461, November 1974.
- [86] K. Kowalczyk. *Boundary and medium modelling using compact finite difference schemes in simulations of room acoustics for audio and architectural design applications*. Ph.D. thesis, Queen's University, Belfast, Ireland, November 2008.
- [87] K. Kowalczyk and M. Van Walstijn. Modeling frequency-dependent boundaries as digital impedance filters in FDTD and k-DWM room acoustics simulations. *Journal of the Audio Engineering Society*, 56(7/8) :569–583, July 2008.
- [88] U. Kristiansen and S. Peter. Computational modelling and simulation of acoustic spaces. In *Proceedings of the Audio Engineering Society Conference : International Conference : Virtual, Synthetic, and Entertainment Audio*, pages 1–20, Espoo, Finland, June 2002.
- [89] A. Krokstad, S. Strom, and S. Sorsdal. Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. *Journal of Sound and Vibration*, 8(1) :118–125, July 1968.
- [90] H. Kuttruff. Simulierte nachhallkurven in rechteckräumen mit diffusem schallfeld," [simulated reverberation curves in rectangular rooms with diffuse sound fields]. *Acustica*, 25(6) :333 – 342, 1971.
- [91] H. Kuttruff. "Nachhall und effective absorption in räumen mit diffuser wandreflexion," [reverberation and effective absorption in rooms with diffuse wall reflections]. *Acustica*, (35) :141 – 153, 1976.

- [92] S. Laine, S. Siltanen, T. Lokki, and L. Savioja. Accelerated beam tracing algorithm. *Applied Acoustics*, 70(1) :172–181, January 2009.
- [93] C. Lauterbach, A. Chandak, and D. Manocha. Interactive sound rendering in complex and dynamic scenes using frustum tracing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(6) :1672–1679, November 2007.
- [94] C. Lauterbach, M. Garland, S. Sengupta, D. Luebke, and D. Manocha. Fast BVH construction on GPUs. *Computer Graphics Forum*, 28(2) :375–384, April 2009.
- [95] A. Le Bot and A. Bocquillet. Comparison of an integral equation on energy and the ray-tracing technique in room acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(4) :1732–1740, October 2000.
- [96] E. Lehmann and A. Johansson. Prediction of energy decay in room impulse responses simulated with an image-source model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(1) :269–277, July 2008.
- [97] E. Lehmann and A. Johansson. Diffuse reverberation model for efficient image-source simulation of room impulse responses. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 18(6) :1429–1439, August 2010.
- [98] H. Lehnert. Systematic errors of the ray-tracing algorithm. *Applied Acoustics*, 38(2-4) :207 – 221, 1993.
- [99] T. Lentz, D. Schroder, M. Vorlander, and I. Assenmacher. Virtual reality system with integrated sound field simulation and reproduction. *EUR-ASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2007(1) :1–20, January 2007.
- [100] S. Lesoinne. *Techniques d’accélération du tir de rayons pour la simulation acoustique*. Diplôme d’études approfondies, Université de Liège, Liège, Belgique, September 2006.
- [101] A. Lesperance. Heuristic model for outdoor sound propagation based on an extension of the geometrical ray theory in the case of a linear sound speed profile. *Applied Acoustics*, 37(2) :111–139, 1992.
- [102] T. Lewers. A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics. *Applied Acoustics*, 38(2–4) :161 – 178, 1993.
- [103] T. Lokki. *Physically-based auralization : design, implementation, and evaluation*. Ph.D. thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, November 2002.
- [104] J. Lopez, J. Navarro, D. Carnicero, and J. Escolano. Some comments about graphic processing unit (GPU) architectures applied to finite-difference time-domain (FDTD) room acoustics simulation : Present and

- future trends. In *Proceedings of Meetings on Acoustics*, volume 19, page 070098, Montreal, Canada, June 2013.
- [105] R. Malgouyres. *Algorithmes pour la synthèse d'images et l'animation 3D : cours et exercices corrigés*. Dunod, Paris, 2005.
- [106] S. McGovern. Fast image method for impulse response calculations of box-shaped rooms. *Applied Acoustics*, 70(1) :182–189, January 2009.
- [107] S. Miklavcic and J. Ericsson. Practical implementation of the 3D tetrahedral TLM method and visualization of room acoustics. In *Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects*, pages 262 – 267, Naples, Italy, October 2004.
- [108] Q. Mo, M. Taylor, A. Chandak, C. Lauterbach, C. Schissler, and D. Manocha. Interactive gpu-based acoustic walkthrough in dynamic scenes. In *Proceedings of Meetings on Acoustics*, volume 19, page 070097, Montreal, Canada, June 2013.
- [109] A. Moore. An introductory tutorial on kd-trees. Technical Report 209, Computer Laboratory, University of Cambridge, Pittsburgh, Pennsylvania, 1991.
- [110] P. Morse and H. Feshbach. *Methods of theoretical physics*. McGraw-Hill, New York ; St Louis ; San Francisco, 1953.
- [111] D. Murphy. *Digital waveguide mesh topologies in room acoustics modeling*. Ph.D. thesis, University of York, York, UK, February 2000.
- [112] D. Murphy, A. Kelloniemi, J. Mullen, and S. Shelley. Acoustic modeling using the digital waveguide mesh. *IEEE Signal Processing Magazine*, 24(2) :55–66, March 2007.
- [113] J. Navarro, F. Jacobsen, J. Escolano, and J. López. A theoretical approach to room acoustic simulations based on a radiative transfer model. *Acta Acustica united with Acustica*, 96(6) :1078–1089, November 2010.
- [114] G. Naylor. ODEON—Another hybrid room acoustical model. *Applied Acoustics*, 38(2–4) :131–143, February 1993.
- [115] E.-M. Nosal, M. Hodgson, and I. Ashdown. Improved algorithms and methods for room sound-field prediction by acoustical radiosity in arbitrary polyhedral rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(2) :970–980, August 2004.
- [116] S. Olesen. Low-frequency room simulation using finite difference equations. In *Proceedings of the Audio Engineering Society Convention*, Munich, Germany, March 1997.
- [117] F. Ollendorff. Statistical room-acoustics as a problem of diffusion a proposal. *Acustica*, 21(4) :236–245, 1969.

- [118] S. Pelzer and M. Vorlander. Frequency-and time-dependent geometry for real-time auralizations. In *Proceedings of International Congress on Acoustics*, volume 5, pages 3563–3569, Sydney, Australia, August 2010.
- [119] J. Picaut, L. Simon, and J.-D. Polack. Sound field in long rooms with diffusely reflecting boundaries. *Applied Acoustics*, 56(4) :217–240, April 1999.
- [120] J. Picaut, V. Valeau, A. Billon, and A. Sakout. Sound field modeling in architectural acoustics using a diffusion equation. In *Proceedings of 35th Inter-noise*, volume 5, pages 3081–3088, Honolulu, Hawaii, December 2006.
- [121] J. Pineda. A parallel algorithm for polygon rasterization. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 17–20, Atlanta, Georgia, August 1988.
- [122] A. Pohl and U. Stephenson. A combination of the sound particle simulation method and the radiosity method. In *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics*, pages 396–406, Melbourne, Australia, August 2010.
- [123] S. Popov, I. Georgiev, R. Dimov, and P. Slusallek. Object partitioning considered harmful : space subdivision for BVHs. In *Proceedings of the ACM Conference on High Performance Graphics*, pages 15–22, New Orleans, Louisiana, August 2009.
- [124] S. Popov, J. Günther, H. Seidel, and P. Slusallek. Stackless KD-Tree traversal for high performance GPU ray tracing. *Computer Graphics Forum*, 26(3) :415–424, September 2007.
- [125] T. Purcell, I. Buck, W. Mark, and P. Hanrahan. Ray tracing on programmable graphics hardware. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, pages 703–712, San Antonio, Texas, July 2002.
- [126] J. Revelles, C. Urena, and M. Lastra. An efficient parametric algorithm for octree traversal. In *Proceedings of the International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Interactive Digital Media*, volume 8, page 212–219, Plzen - Bory, Czech Republic, February 2000.
- [127] N. Rober, U. Kaminski, and M. Masuch. Ray acoustics using computer graphics technology. In *Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects*, page 117–124, Bordeaux, France, September 2007.
- [128] W. Sabine. *Collected papers on acoustics*. Harvard University Press, Cambridge, UK, harvard university press edition, 1993.
- [129] L. Savioja, A. Järvinen, K. Melkas, and K. Saarinen. Determination of the low frequency behavior of an IEC listening room. In *Proceedings*

- of the *Nordic Acoustical Meeting*, pages 55–58, Helsinki, Finland, June 1996.
- [130] L. Savioja, D. Manocha, and M. Lin. Use of GPUs in room acoustic modeling and auralization. In *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics*, pages 417–423, Melbourne, Australia, August 2010.
 - [131] L. Savioja and V. Valimaki. Interpolated 3-d digital waveguide mesh with frequency warping. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, volume 5, pages 3345–3348, Salt Lake City, Utah, May 2001.
 - [132] L. Savioja, P. Ville, and L. Tapio. Implementation and visualization of edge diffraction with image-source method. In *Proceedings of the Audio Engineering Society Convention*, Munich, Germany, April 2002.
 - [133] P. Schneider. *Geometric tools for computer graphics*. The Morgan Kaufmann series in computer graphics and geometric modeling. Boston : Morgan Kaufmann Publishers, Amsterdam, 2003.
 - [134] D. Schroder and I. Assenmacher. Real-time auralization of modifiable rooms. In *Proceedings of the Sfa Acoustics*, Paris, France, May 2008.
 - [135] D. Schroder, P. Dross, and M. Vorlander. A fast reverberation estimator for virtual environments. In *Proceedings of the AES International Conference : Intelligent Audio Environments*, Saariselka, Finland, March 2007.
 - [136] D. Schroder and T. Lentz. Real-time processing of image sources using binary space partitioning. *Journal of the Audio Engineering Society*, 54(7-8) :604–619, July 2006.
 - [137] D. Schroder, A. Ryba, and M. Vorlander. Spatial data structures for dynamic acoustic virtual reality. In *Proceedings of the International Congress on Acoustics*, volume 2, pages 1550–1555, Sydney, Australia, August 2010.
 - [138] D. Schroder, F. Wefers, S. Pelzer, D. Rausch, M. Vorlander, and T. Kuhlén. Virtual reality system at RWTH aachen university. In *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics*, pages 322 – 330, Melbourne Australia, August 2010.
 - [139] Dirk Schröder. *Physically based real-time auralization of interactive virtual environments*. Ph.D. thesis, RWTH Aachen, Aachen, Germany, February 2011.
 - [140] M. Schroeder. The “Schroeder frequency” revisited. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 99(5) :3240–3241, May 1996.
 - [141] S. Siltanen. Frequency domain acoustic radiance transfer for real-time auralization. *Acta Acustica United with Acustica*, 95(1) :106 – 117, February 2009.

- [142] S. Siltanen. *Efficient Physics-Based Room-Acoustics Modeling and Auralization*. Ph.D. thesis, Aalto university school of science and technology (Espoo, Finland), Espoo, Finland, January 2010.
- [143] S. Siltanen, T. Lokki, and L. Savioja. Room acoustics modeling with acoustic radiance transfer. In *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics*, Melbourne, Australia, August 2010.
- [144] C. Spa, A. Garriga, and J. Escolano. Impedance boundary conditions for pseudo-spectral time-domain methods in room acoustics. *Applied Acoustics*, 71(5) :402–410, May 2010.
- [145] A. Srinivasan. Testing parallel random number generators. *Parallel Computing*, 29(1) :69–94, January 2003.
- [146] E. Stavrakis, N. Tsingos, and P. Calamia. Topological sound propagation with reverberation graphs. *Acta Acustica united with Acustica*, 94(6) :921–932, November 2008.
- [147] U. Stephenson. The sound particle simulation technique—an efficient prediction method for room acoustical parameters of concert halls. In *Proceedings of the Audio Engineering Society Convention*, Hamburg Germany, March 1989.
- [148] U. Stephenson. Comparison of the mirror image source method and the sound particle simulation method. *Applied Acoustics*, 29(1) :35–72, 1990.
- [149] U. Stephenson. Introducing higher order diffraction into beam tracing based on the uncertainty relation. In *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics*, pages 388–395, Melbourne, Australia, August 2010.
- [150] U. Stephenson and U. Svensson. An improved energetic approach to diffraction based on the uncertainty principle. In *Proceedings of the International Congress on Acoustics*, Madrid, Spain, September 2007.
- [151] M. Stich, H. Friedrich, and A. Dietrich. Spatial splits in bounding volume hierarchies. In *Proceedings of the ACM Conference on High Performance Graphics*, pages 7–13, New Orleans, Louisiana, August 2009.
- [152] J. Summers, R. Torres, and Y. Shimizu. Statistical-acoustics models of energy decay in systems of coupled rooms and their relation to geometrical acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(2) :958–969, August 2004.
- [153] U. Svensson, R. Fred, and J. Vanderkooy. An analytic secondary source model of edge diffraction impulse responses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(5) :2331, November 1999.
- [154] C. Tan. On parallel pseudo-random number generation. In *Computational Science — ICCS 2001*, volume 2073, pages 589–596. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2001.

- [155] M. Taylor, A. Chandak, L. Antani, and D. Manocha. RESound : interactive sound rendering for dynamic virtual environments. In *Proceedings of the ACM International Conference on Multimedia*, pages 271–280, Beijing, China, 2009.
- [156] M. Taylor, A. Chandak, L. Antani, and D. Manocha. Interactive geometric sound propagation and rendering. Technical report, Intel, March 2012.
- [157] M. Taylor, A. Chandak, C. Lauterbach, C. Schissler, and D. Manocha. iSound : interactive GPU-based sound auralization in dynamic scenes. Technical Report TR10-006, University of North Carolina at Chapel Hill, 2010.
- [158] M. Taylor, A. Chandak, Q. Mo, C. Lauterbach, C. Schissler, and D. Manocha. Guided multiview ray tracing for fast auralization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(11) :1797–1810, November 2012.
- [159] M. Taylor, A. Chandak, Z. Ren, C. Lauterbach, and D. Manocha. Fast edge-diffraction for sound propagation in complex virtual environments. In *Proceedings of the EAA Auralization Symposium*, pages 15–17, Espoo, Finland, June 2009.
- [160] N. Tsingos. *Simulating High Quality Virtual Sound Fields for Interactive Graphics Applications*. Ph.D. thesis, Universite J. Fourier, Grenoble I, Grenoble, France, December 1998.
- [161] N. Tsingos. Using programmable graphics hardware for auralization. In *Proceedings of the EAA Symposium on Auralization*, pages 78–87, Espoo, Finland, June 2009.
- [162] N. Tsingos and J. Gascuel. Acoustic simulation using hierarchical time-varying radiant exchanges. *Unpublished technical report, iMAGIS-GRAVIR/IMAG*, 1997.
- [163] R. Väänänen, L. Tapio, L. Savioja, and J. Huopaniemi. Creating interactive virtual acoustic environments. *Journal of the Audio Engineering Society*, 47(9) :675–705, September 1999.
- [164] V. Valeau, J. Picaut, and M. Hodgson. On the use of a diffusion equation for room-acoustic prediction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(3) :1504–1513, March 2006.
- [165] D. van Maercke. Simulation of sound fields in time and frequency domain using a geometrical model. In *Proceedings of the International Congress on Acoustics*, volume E11-7, page 2, Toronto, Canada, July 1986.
- [166] D. van Maercke and J. Martin. The prediction of echograms and impulse responses within the epidaure software. *Applied Acoustics*, 38(2-4) :93–114, 1993.

- [167] M. Vorlander. Die genauigkeit von berechnungen mit dem raumakustischen schallteilchenmodell und ihre abhangigkeit von der rechenzeit. *Acta Acustica united with Acustica*, 66(2) :90–96, 1988.
- [168] M. Vorlander. 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, 1989.
- [169] M. Vorlander. International round robin on room acoustical computer simulations. In *Proceedings of the International Congress on Acoustics*, volume 2, pages 689–692, Trondheim, Norway, June 1995.
- [170] M. Vorlander. *Auralization fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Springer, Berlin, Germany, 2008.
- [171] I. Wald, C. Benthin, and S. Boulos. Getting rid of packets - efficient SIMD single-ray traversal using multi-branching BVHs -. In *Proceedings of the IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing*, pages 49–57, Los Angeles, California, September 2008.
- [172] I. Wald, S. Boulos, and P. Shirley. Ray tracing deformable scenes using dynamic bounding volume hierarchies. *ACM Transactions on Graphics*, 26(1), January 2007.
- [173] I. Wald, P. Slusallek, C. Benthin, and M. Wagner. Interactive rendering with coherent ray tracing. *Computer Graphics Forum*, 20(3) :153–165, September 2001.
- [174] C. Webb and S. Bilbao. Computing room acoustics with CUDA - 3D FDTD schemes with boundary losses and viscosity. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pages 317–320, Prague, Czech Republic, May 2011.
- [175] A. Wilde, P. Eccardt, and W. O'Connor. Modeling acoustic transducer surface waves by transmission line matrix method. In *Proceedings of the CADFEM Users Meeting International Congress on FEM Technology*, Berlin Germany, October 2001.
- [176] J. Wright. An exact model of acoustic radiation in enclosed spaces. *Journal of the Audio Engineering Society*, 43(10) :813–820, October 1995.
- [177] S.-E. Yoon, S. Curtis, and D. Manocha. Ray tracing dynamic scenes using selective restructuring. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques*, San Diego, California, August 2007.
- [178] X. Zeng. An improved broad-spectrum room acoustics model including diffuse reflections. *Applied Acoustics*, 66(11) :1309–1319, November 2005.

- [179] X. Zeng, C. Ke'an, and S. Jincai. Modeling the sound fields in rooms with multiple sources using a hybrid image method including phase. *Acta Acustica united with Acustica*, 88(1) :88–92, February 2002.
- [180] K. Zhou, M. Gong, X. Huang, and B. Guo. Data-parallel octrees for surface reconstruction. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(5) :669 –681, May 2011.
- [181] K. Zhou, Q. Hou, R. Wang, and B. Guo. Real-time kd-tree construction on graphics hardware. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 27(5) :1–11, December 2008.

Troisième partie

Annexes

Matériel de test Sauf mention contraire, les simulations ont été exécutées sur un seul thread avec un PC portable doté d'un processeur Intel Core i5-2410M cadencé à 2,30 GHz, de 6 GB de RAM fonctionnant sous Windows 7 64 bits.

Annexe A

Représentation des salles de test

Les salles sont modélisées par un ensemble de surfaces polygonales convexes et planes. Ces surfaces peuvent s'intersecter, déborder. Un coefficient d'absorption et de diffusion leur sont associés pour chaque bande de fréquence.

A.1 Salles pour le test du modèle des surfaces occlusives

L'analyse des résultats est effectuée sur cinq modèles de complexité géométrique moyenne inspirés de salles réelles et un modèle de complexité simple.

A.1.1 Salle simple

Cette salle simple modélisée par 10 surfaces ne comporte pas de surfaces occlusives.

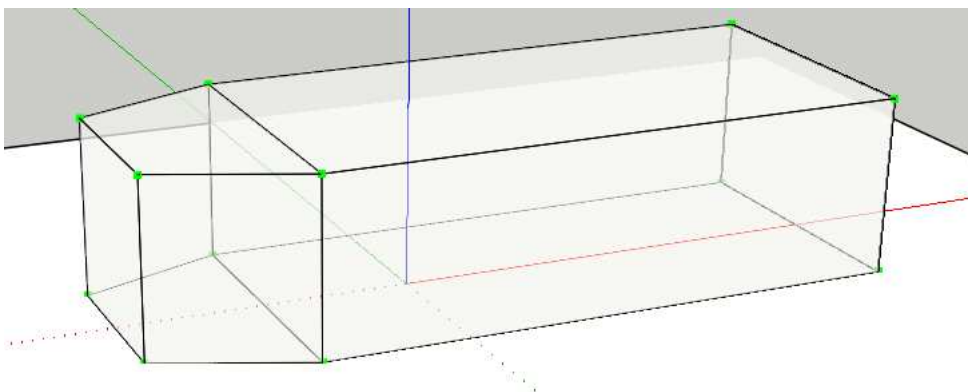


FIGURE A.1.1 – Salle simple.

A.1.2 Salle de concert de Vienne (GMVS)

Salle de concert « Grosser Muzikvereinssaal » de Vienne. La modélisation d'origine de cette salle comporte de nombreux débordements de surfaces non nécessaires qui sont réduits dans sa deuxième version.

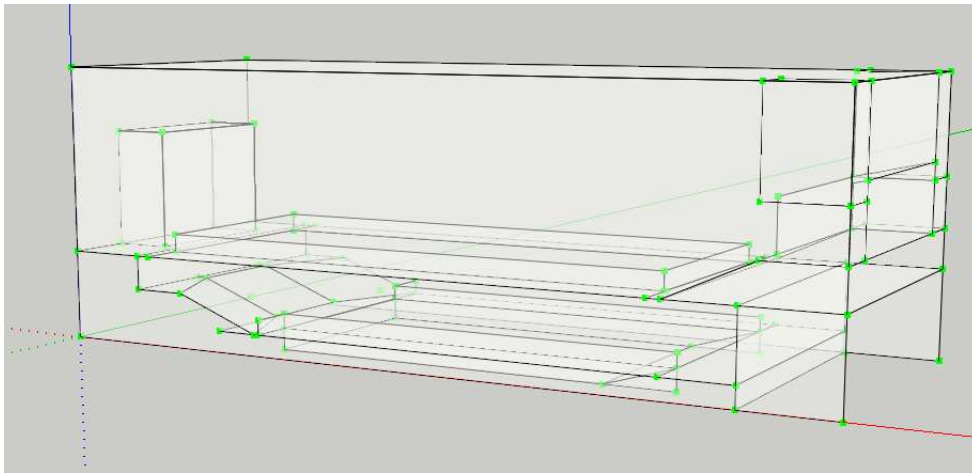


FIGURE A.1.2 – GMVS.

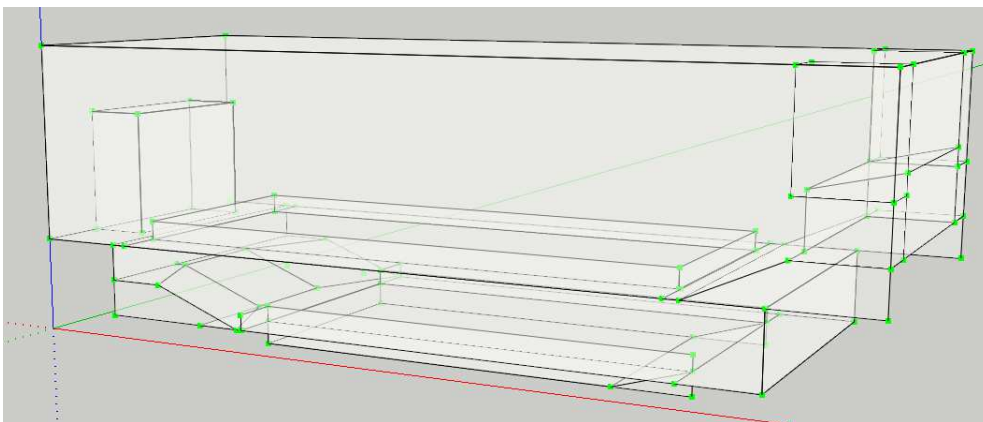


FIGURE A.1.3 – GMVS2

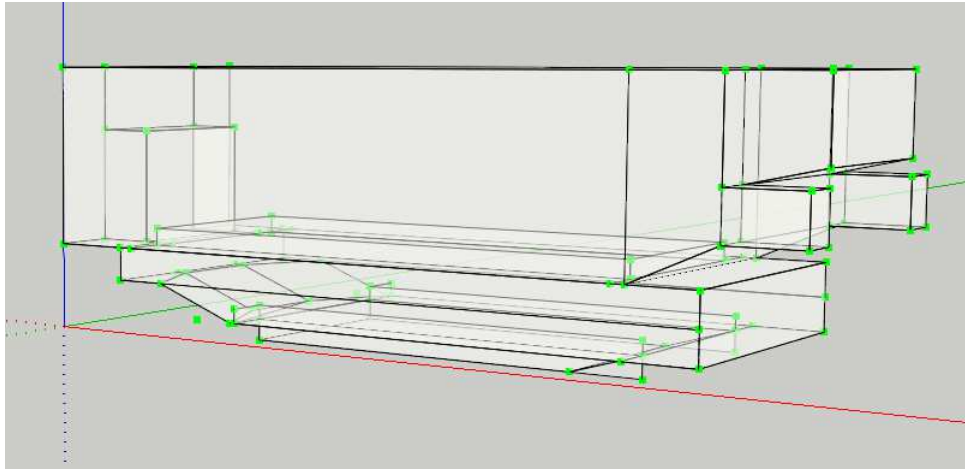


FIGURE A.1.4 – GMVS3.

A.1.3 Amphithéâtre de l'institut de mathématique de l'ULg

La modélisation d'origine comporte des débordements inutiles qui sont réduits dans sa deuxième version.

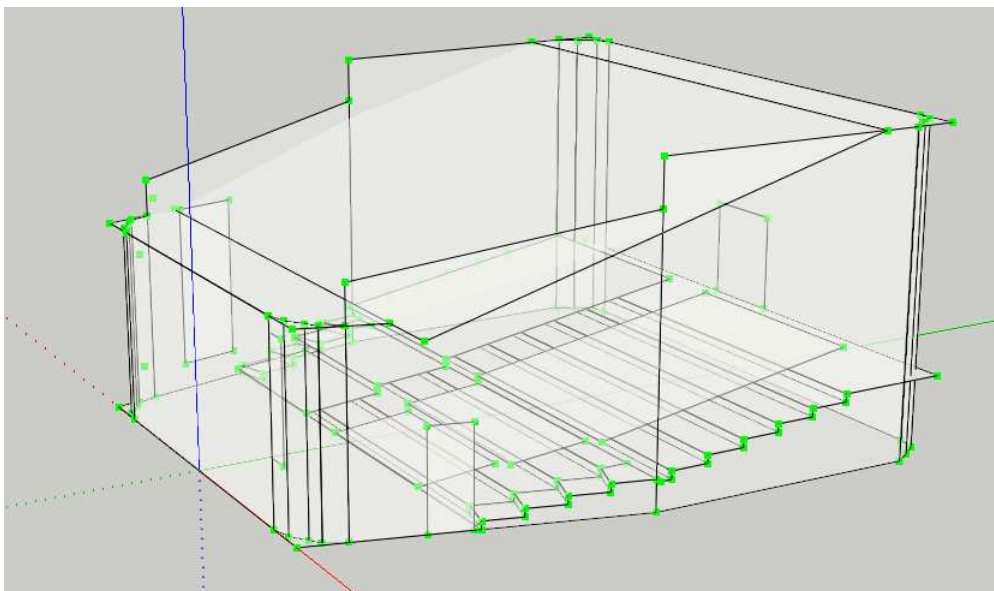


FIGURE A.1.5 – AmphiMath.

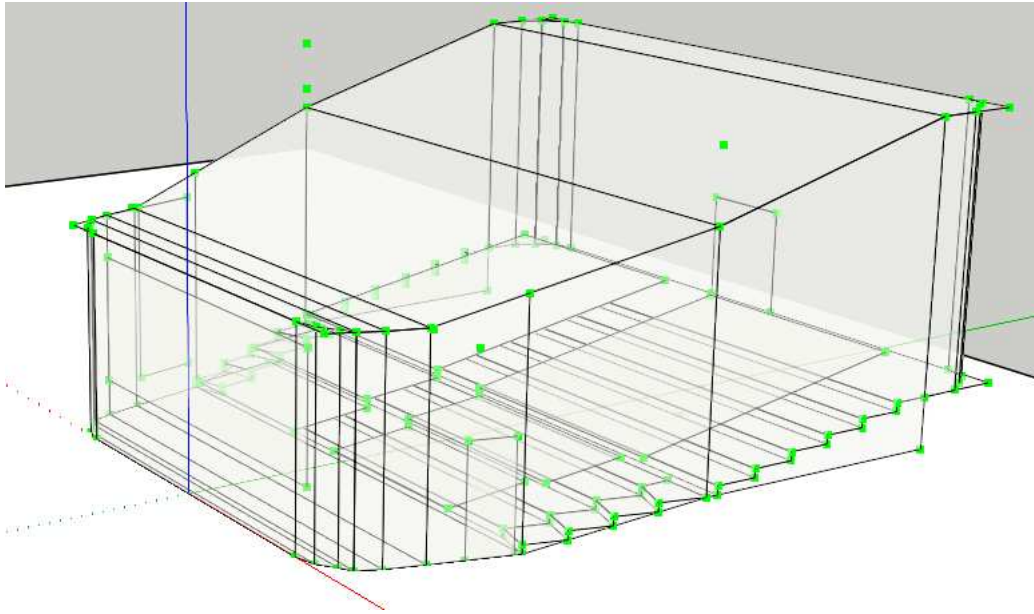


FIGURE A.1.6 – AmphiMath2.

A.1.4 Église de Muno (Province du Luxembourg)

La modélisation d'origine comporte très peu de débordements et ne sera pas modifiée.

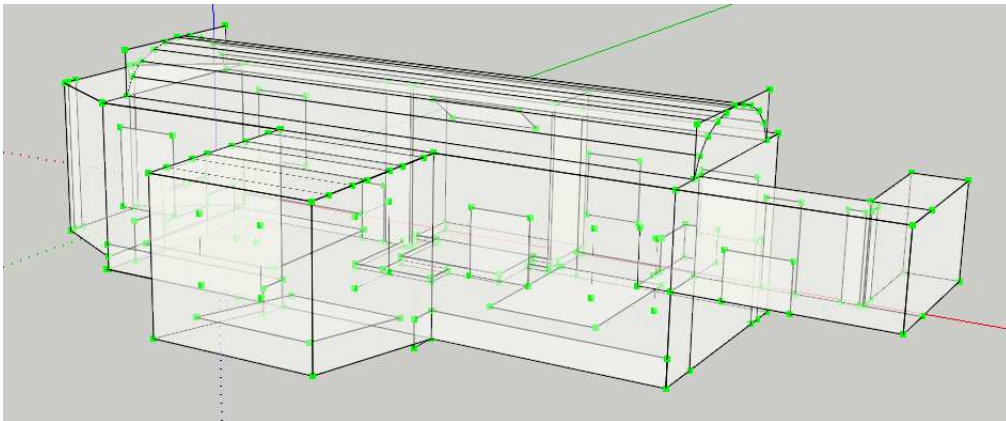


FIGURE A.1.7 – Muno.

A.1.5 Auditoire de l'institut Gramme (Liège)

La modélisation d'origine comporte des débordements inutiles qui seront réduits dans son deuxième modèle. De plus, quelques surfaces situées entièrement hors de la salle ont été supprimées.

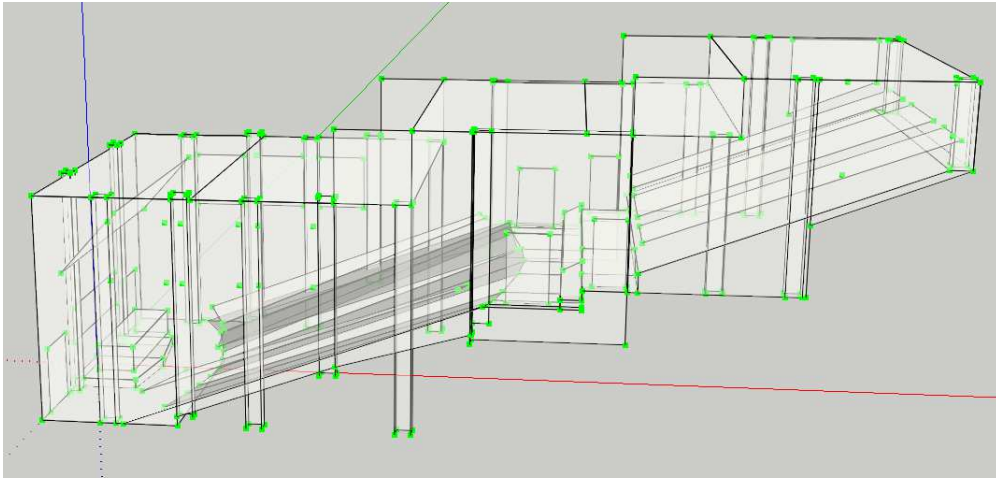


FIGURE A.1.8 – Auditoire.

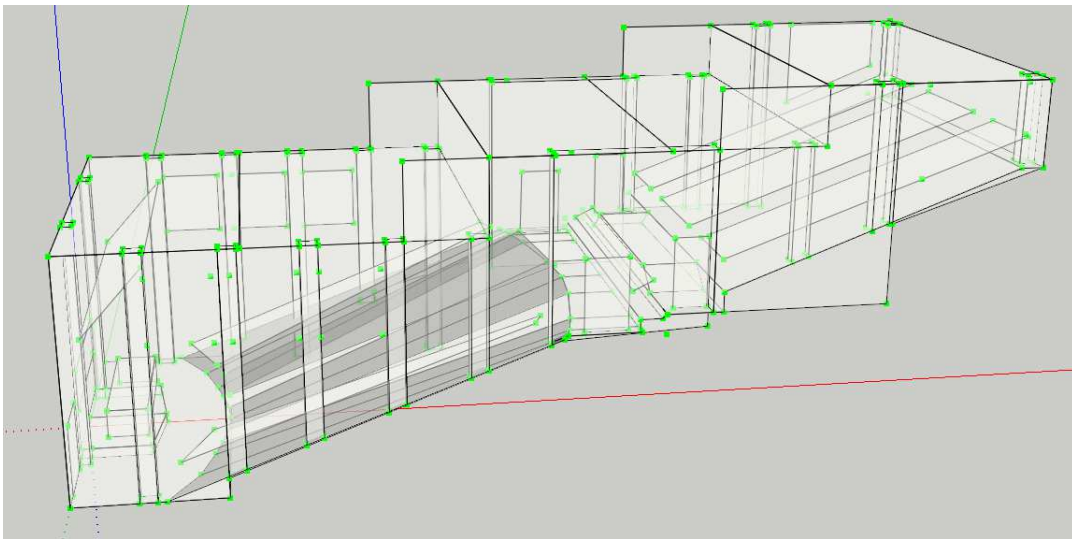


FIGURE A.1.9 – Auditoire2.

A.1.6 Ferme

Les débordements de cette salle sont faibles pour la toiture et élevés pour les barbacanes. Ces débordements seront respectivement réduits en passant de Ferme1 à Ferme2 et de Ferme2 à Ferme3. De plus, la densité d'occlusion de la toiture est très élevée suite à la présence du plafond voûté et des barbacanes. Une première réduction de cette densité d'occlusion est atteinte en subdivisant une partie de la toiture en trois surfaces, ce qui mène à Ferme3.

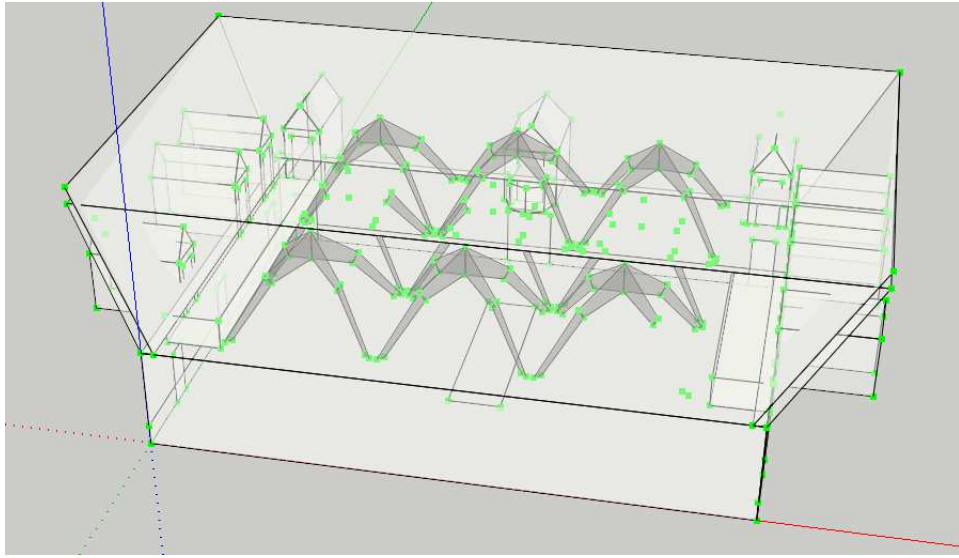


FIGURE A.1.10 – Ferme.

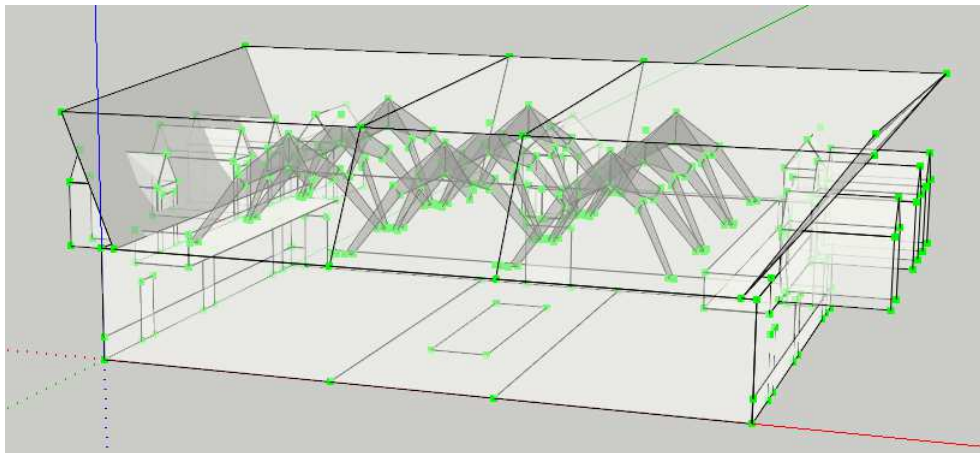


FIGURE A.1.11 – Ferme2.

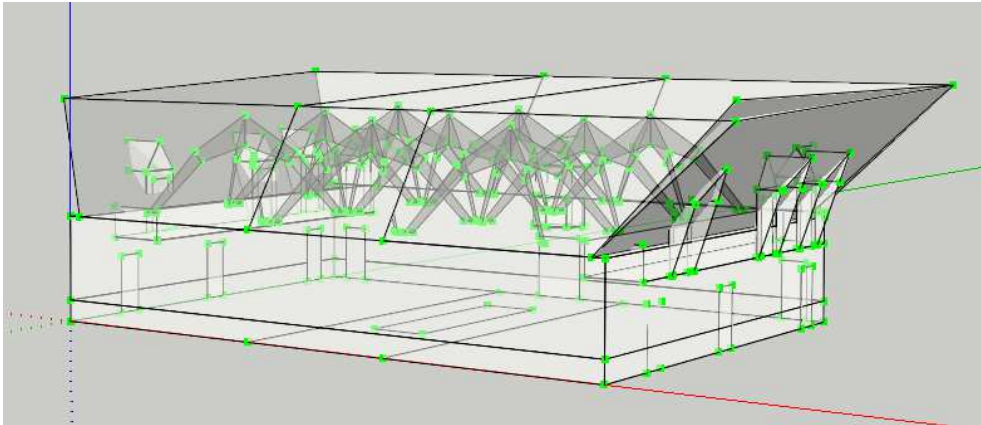


FIGURE A.1.12 – Ferme3.

A.2 Salles pour le test de la méthode des récepteurs de taille variable

Les récepteurs sont les points jaunes.

A.2.1 GMVS

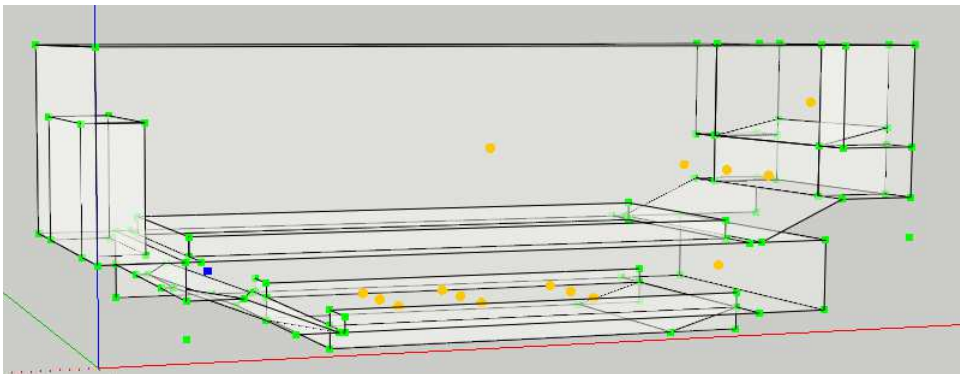


FIGURE A.2.1 – GMVS.

A.2.2 Amphithéâtre de mathématiques

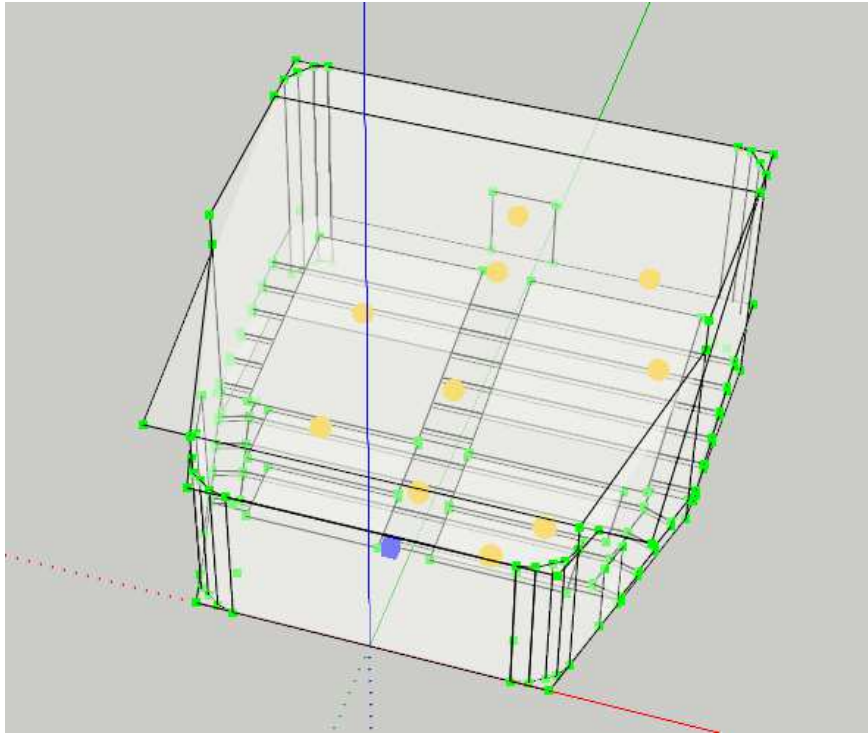


FIGURE A.2.2 – AmphiMath.

A.2.3 Église Muno

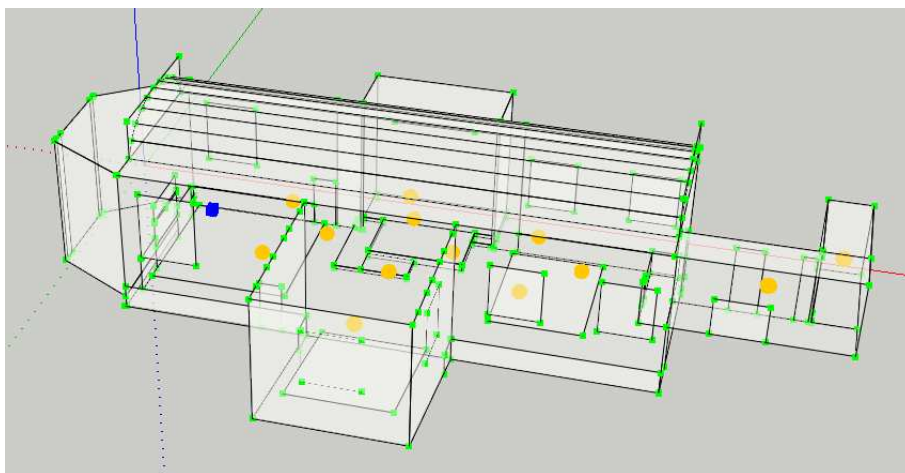


FIGURE A.2.3 – Muno.

A.2.4 Auditoire de Gramme

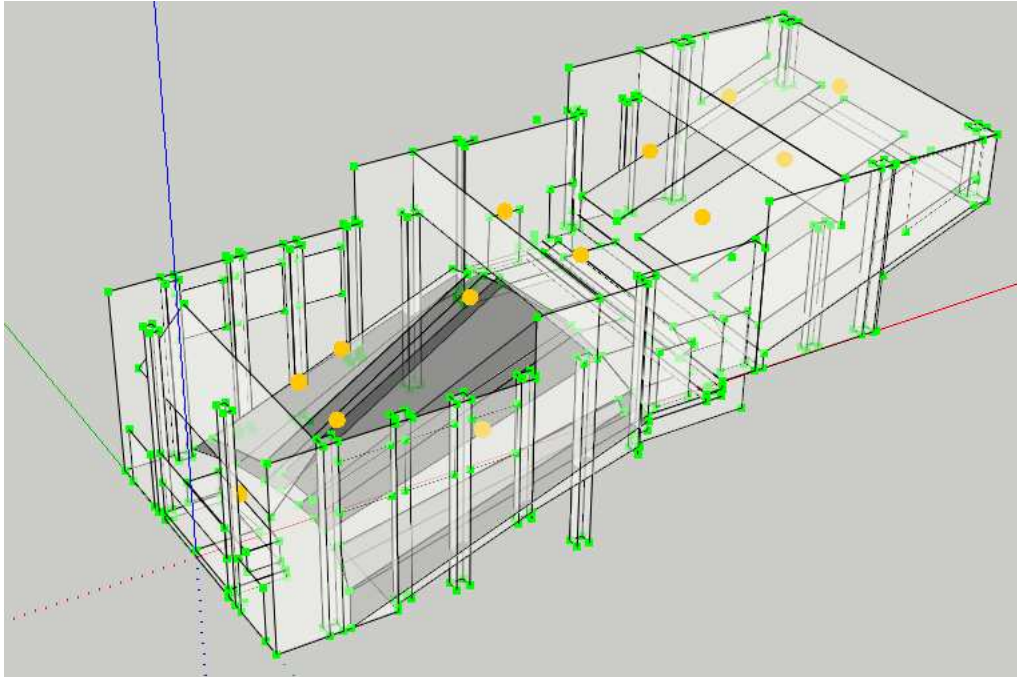


FIGURE A.2.4 – Auditoire.

A.2.5 Ferme

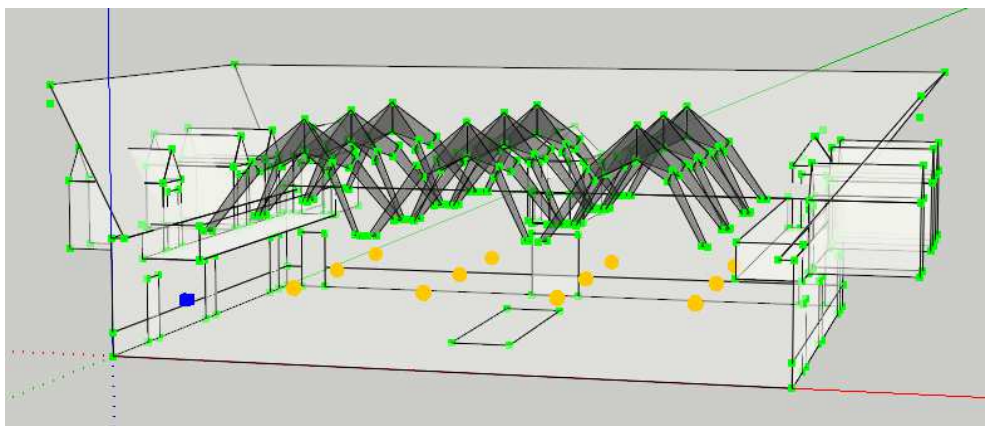


FIGURE A.2.5 – Ferme.

Annexe B

Méthode 1 : Algorithme du test d'appartenance d'un point à une surface par paquet de surfaces

Pour le point d'intersection $P = (P_x, P_y)$ et les 4 surfaces A, B, C, D de m sommets (V_{1A}, \dots, V_{mA}) , (V_{1B}, \dots, V_{mB}) , (V_{1C}, \dots, V_{mC}) , (V_{1D}, \dots, V_{mD}) et de normales aux arêtes (n_{1A}, \dots, n_{mA}) , (n_{1B}, \dots, n_{mB}) , (n_{1C}, \dots, n_{mC}) , (n_{1D}, \dots, n_{mD}) , le test d'appartenance du point P à ces quatre surfaces peut s'effectuer vectoriellement en 2 dimensions comme décrit ci-dessous :

1. Calcul des vecteurs $\overrightarrow{(P - V_i)}$ pour les 4 surfaces en traitant séparément les coordonnées x et y en $2m$ soustractions :

$$\begin{aligned} PV_{1x} &= (P_x - V_{1Ax}, P_x - V_{1Bx}, P_x - V_{1Cx}, P_x - V_{1Dx},) \\ PV_{1y} &= (P_y - V_{1Ay}, P_y - V_{1By}, P_y - V_{1Cy}, P_y - V_{1Dy},) \\ &\vdots \\ PV_{mx} &= (P_x - V_{mAx}, P_x - V_{mBx}, P_x - V_{mCx}, P_x - V_{mDx},) \\ PV_{my} &= (P_y - V_{mAy}, P_y - V_{mBy}, P_y - V_{mCy}, P_y - V_{mDy},) \end{aligned}$$

2. Calcul des produits vectoriels $nPV_i = \vec{n}_i \cdot \overrightarrow{(P - V_i)}$ pour les 4 surfaces en traitant d'abord séparément les coordonnées x et y en $2m$ multiplications :

$$\begin{aligned} nPV_{1x} &= (n_{1Ax}, n_{1Bx}, n_{1Cx}, n_{1Dx}) * PV_{1x} \\ nPV_{1y} &= (n_{1Ay}, n_{1By}, n_{1Cy}, n_{1Dy}) * PV_{1y} \\ &\vdots \\ nPV_{mx} &= (n_{mAx}, n_{mBx}, n_{mCx}, n_{mDx}) * PV_{mx} \\ nPV_{my} &= (n_{mAy}, n_{mBy}, n_{mCy}, n_{mDy}) * PV_{my} \end{aligned}$$

3. Somme des contributions des coordonnées x et y en m additions :

$$\begin{aligned} nPV_1 &= nPV_{1x} + nPV_{1y} \\ &\vdots \\ nPV_m &= nPV_{mx} + nPV_{my} \end{aligned}$$

4. Test des signes des nPV_i pour les 4 surfaces et l'ensemble des arêtes en m comparaisons. Le test renvoie la valeur $0xFFFFFFFF$ dans chaque mot du vecteur $test_i$ si le signe du mot correspondant dans nPV_i est ≤ 0 et $0x00000000$ sinon :

$$\begin{aligned} test_1 &= nPV_1 \leq 0 \\ &\vdots \\ test_m &= nPV_m \leq 0 \end{aligned}$$

5. Regroupement des m vecteurs $test_1, \dots, test_m$ en un seul vecteur res en $(m - 1)$ instructions & bit à bit :

$$res = test_1 \& test_2 \dots \& test_m$$

6. Transformation des 4 mots du vecteur res en float 1.0 s'ils sont égaux à $0xFFFFFFFF$ en une instruction & bit à bit.
 7. Test par FPU si les 4 mots de res sont égaux à 0 en 4 opérations.

Annexe C

Méthode 2 : Quelques valeurs de temps nécessaire à la détection des surfaces occlusives

Salles	Temps (ms)	
	Génération env. conv.	Intersections env. conv.
Salle simple	8	Non mesurable
GMVS	80	76
GMVS2	85	87
GMVS3	132	187
AmphiMath	160	295
AmphiMath2	240	514
Muno	303	820
Auditoire	645	2570
Auditoire2	635	2210
Ferme	948	4360
Ferme2	974	5000
Ferme3	984	5056

TABLE C.0.1 – Temps de génération des enveloppes convexes et de détection de leurs intersections avec les surfaces.

Annexe D

Méthode 3 : Résultats des simulations avec récepteurs variables

D.1 Détermination automatique de la valeur de t_{base}

La valeur de t_{base} (sous-section 7.2.1), le plus petit multiple commun aux tailles des intervalles temporels de toutes les fréquences, peut être déterminée automatiquement par la méthode suivante :

- On impose que les tailles des intervalle temporels Δt_f soient toutes multiples d'une même base Δt_{base} pour les n bandes de fréquence

$$\Delta t_f (s) = \alpha_f \Delta t_{base}, \forall f = 1, \dots, n$$

ce qui est toujours vrai si tous les Δt_f sont finis. Pour simplifier, cette base est choisie égale à 1 ms et les valeurs des Δt_f peuvent s'écrire sous la forme

$$\Delta t_f (s) = \alpha_f . 0, 001, \forall f = 1, \dots, n.$$

- La valeur de t_{base} en *ms* peut dès lors être obtenue en déterminant le plus petit multiple commun sur les entiers $\alpha_f, \forall f = 1, \dots, n$.

D.2 Résultats des simulations pour un tir de 50 millions de rayons avec et sans élimination des rayons

Les graphiques présentés ci-après alimentent les réflexions présentées à la section 7.7.4. Il s'agit de la divergence des écarts Δ entre les critères acous-

tiques obtenus par tir de rayons avec récepteurs variables et ceux obtenus par un tir de $50E^6$ rayons par l'algorithme brut. Ceci afin de déterminer l'impact de la variabilité de la taille du récepteur sur la qualité perçue des simulations. Chaque valeur donnée est une moyenne des valeurs obtenues en diverses positions de la salle et pour l'ensemble des fréquences.

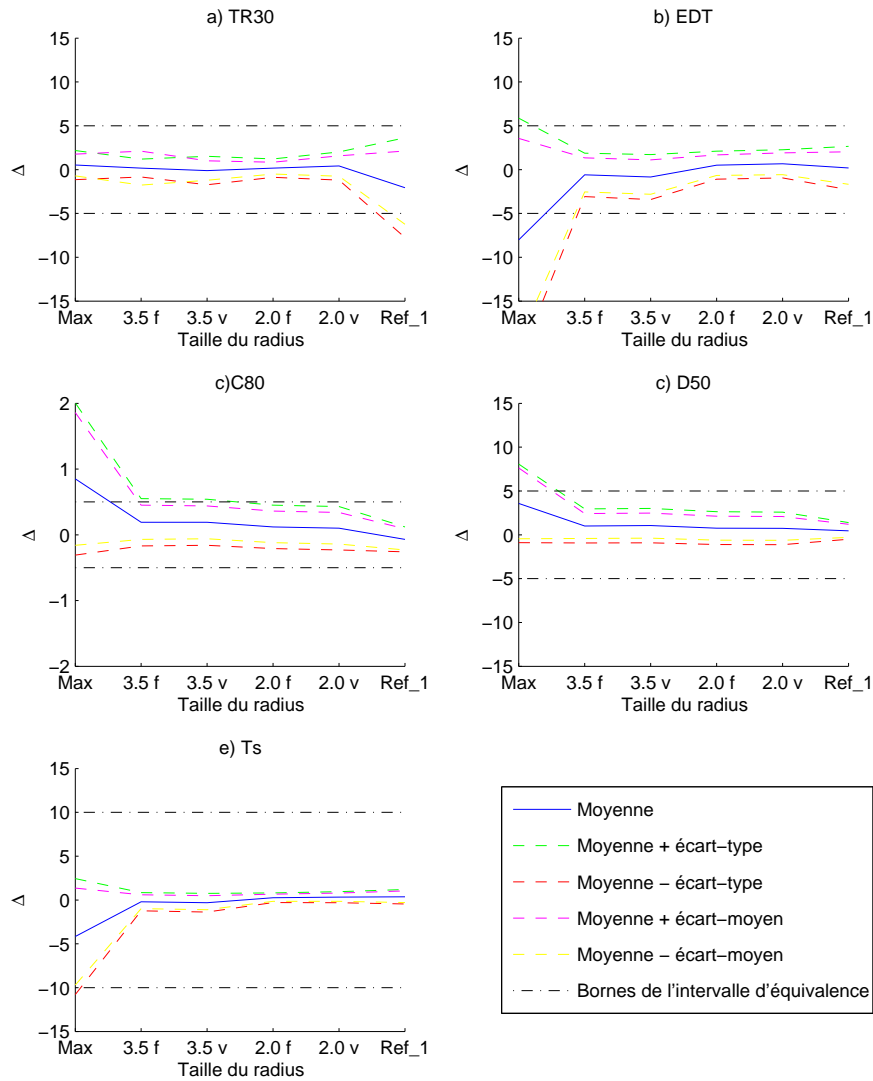


FIGURE D.2.1 – Position de l'intervalle de l'écart-type centré sur la moyenne des Δ pour les configurations Var_50f, Var_50v et Ref_1 par rapport à l'intervalle d'équivalence de la configuration Ref_50 pour la salle « Auditoire de Gramme ».

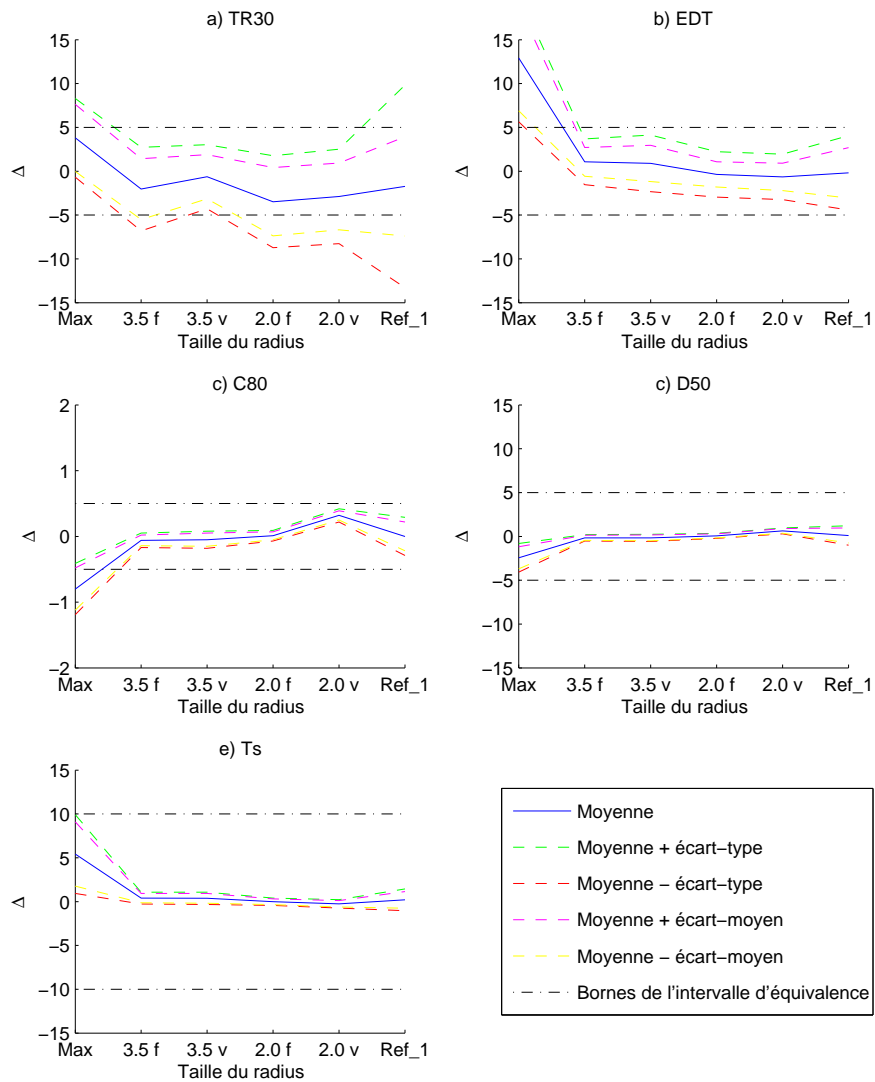


FIGURE D.2.2 – Position de l'intervalle de l'écart-type centré sur la moyenne des Δ pour les configurations Var_50f, Var_50v et Ref_1 par rapport à l'intervalle d'équivalence de la configuration Ref_50 pour la salle « Ferme ».

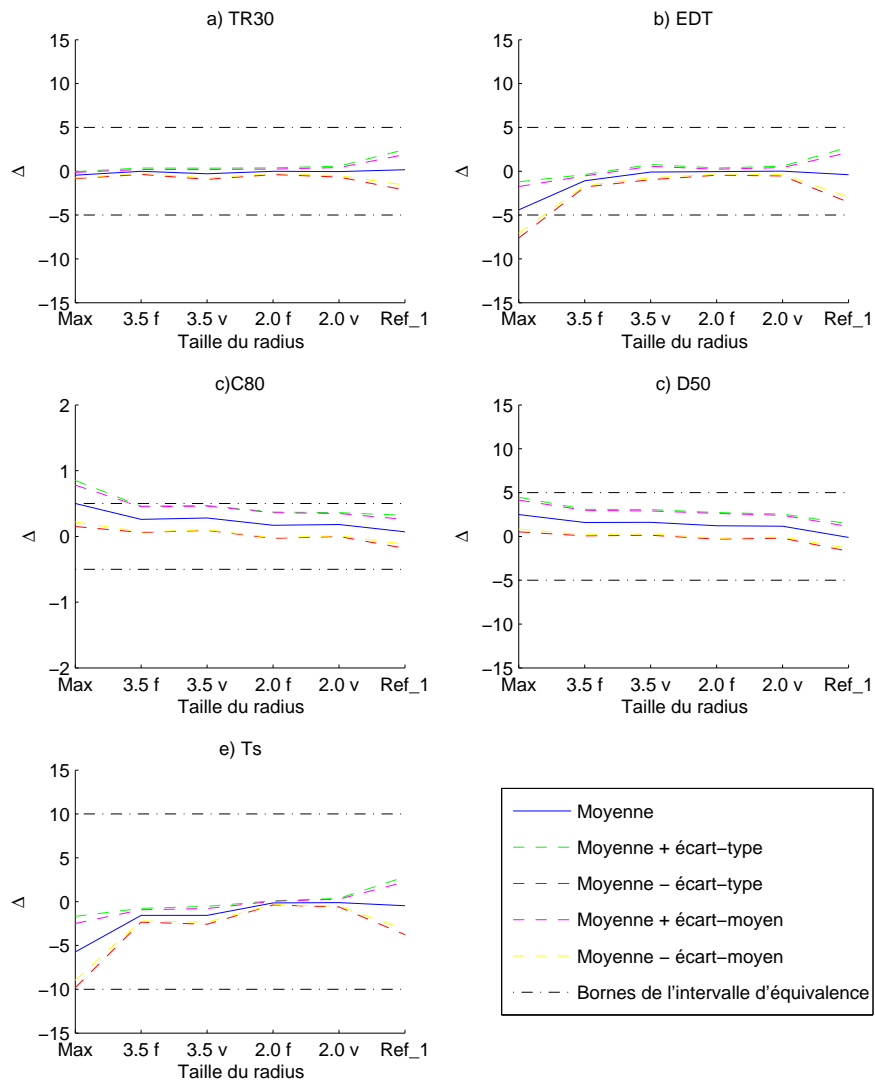


FIGURE D.2.3 – Position de l'intervalle de l'écart-type centré sur la moyenne des Δ pour les configurations Var_50f, Var_50v et Ref_1 par rapport à l'intervalle d'équivalence de la configuration Ref_50 pour la salle « GMVS ».

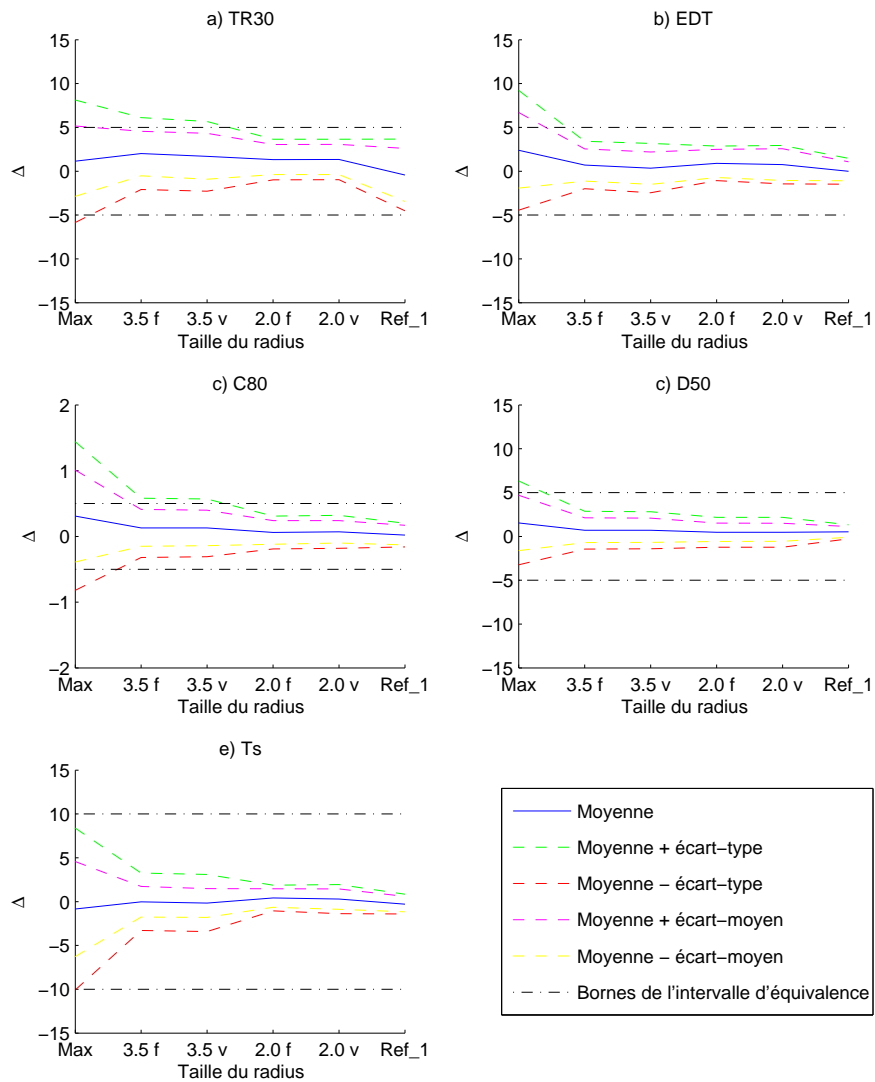


FIGURE D.2.4 – Position de l'intervalle de l'écart-type centré sur la moyenne des Δ pour les configurations Var_50f, Var_50v et Ref_1 par rapport à l'intervalle d'équivalence de la configuration Ref_50 pour la salle « Eglise de Muno ».

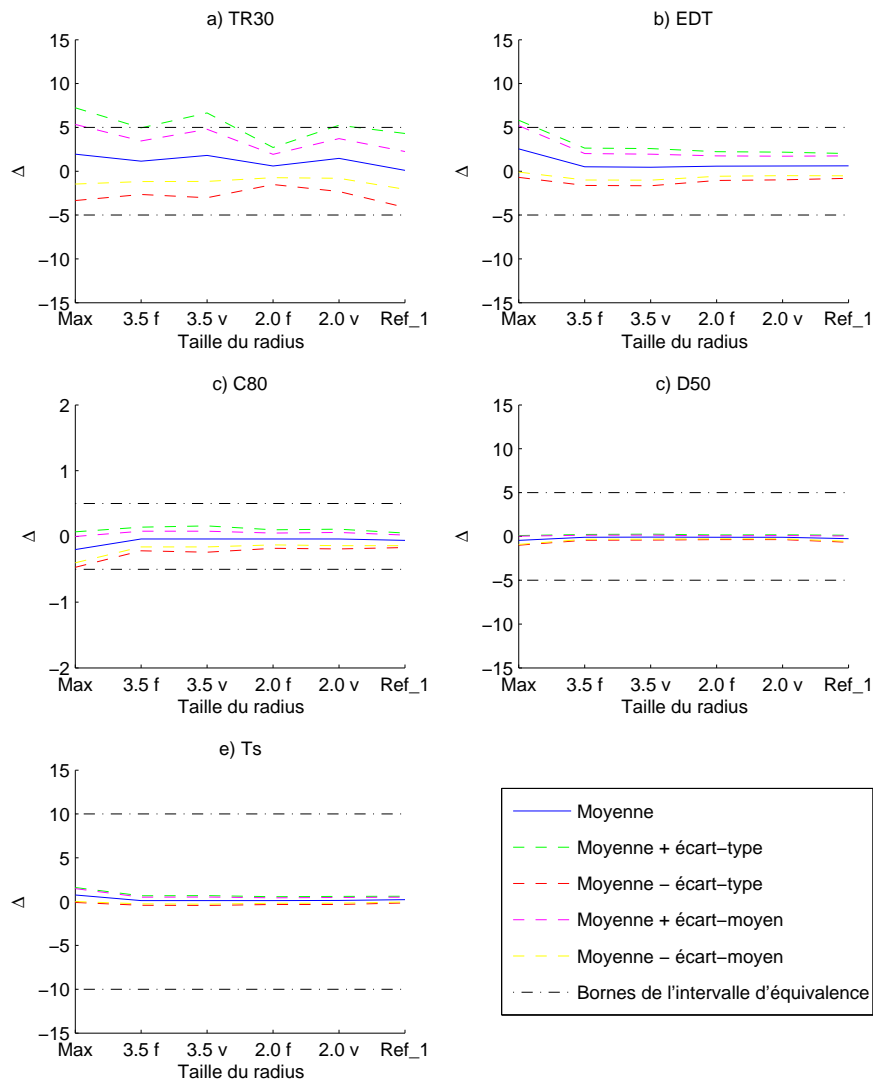


FIGURE D.2.5 – Position de l'intervalle de l'écart-type centré sur la moyenne des Δ pour les configurations Var_50f, Var_50v et Ref_1 par rapport à l'intervalle d'équivalence de la configuration Ref_50 pour la salle « Amphithéâtre de mathématiques ».

D.3 Résultat des simulations pour un tir d'un million de rayons avec et sans élimination des rayons

Les graphiques présentés ci-après alimentent les réflexions présentées à la section 7.7.5. Il s'agit du même procédé qu'à la section D.2 mais en ne tirant

plus qu'un million de rayons, afin de déterminer l'influence de la diminution du nombre de rayons.

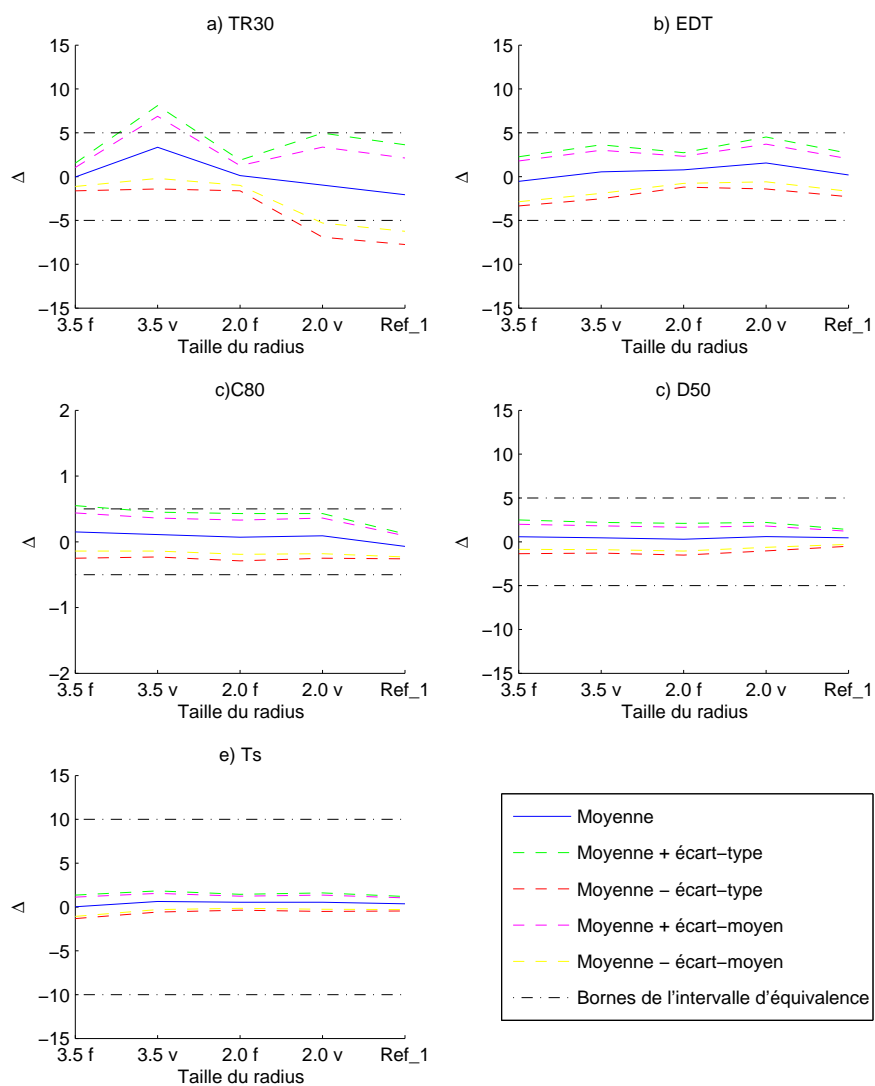


FIGURE D.3.1 – Position de l'intervalle de l'écart-type centré sur la moyenne des Δ pour les configurations Var_1f, Var_1v et Ref_1 par rapport à l'intervalle d'équivalence de la configuration Ref_50 pour la salle « Auditoire de Gramme ».

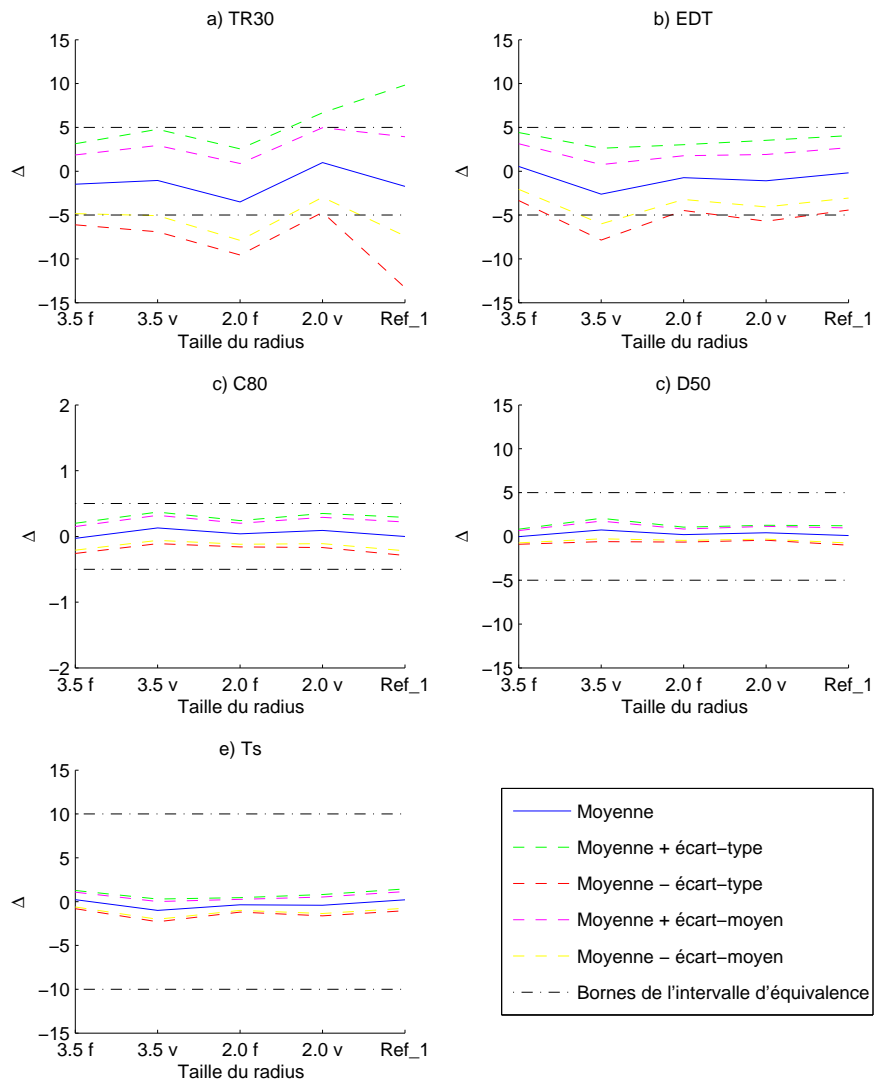


FIGURE D.3.2 – Position de l'intervalle de l'écart-type centré sur la moyenne des Δ pour les configurations Var_1f, Var_1v et Ref_1 par rapport à l'intervalle d'équivalence de la configuration Ref_50 pour la salle « Ferme ».

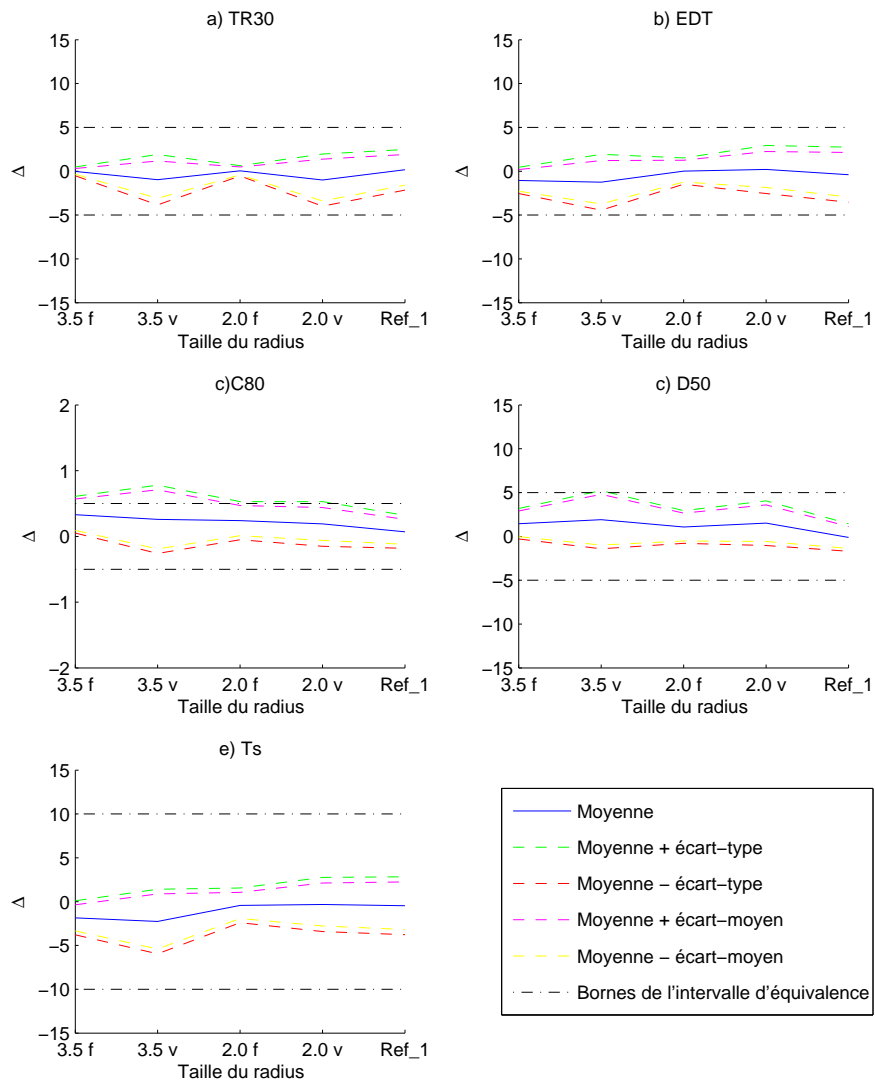


FIGURE D.3.3 – Position de l'intervalle de taille écart-type centré sur la moyenne des Δ pour les configurations Var_1f, Var_1v et Ref_1 par rapport à l'intervalle d'équivalence de la configuration Ref_50 pour la salle « GMVS ».

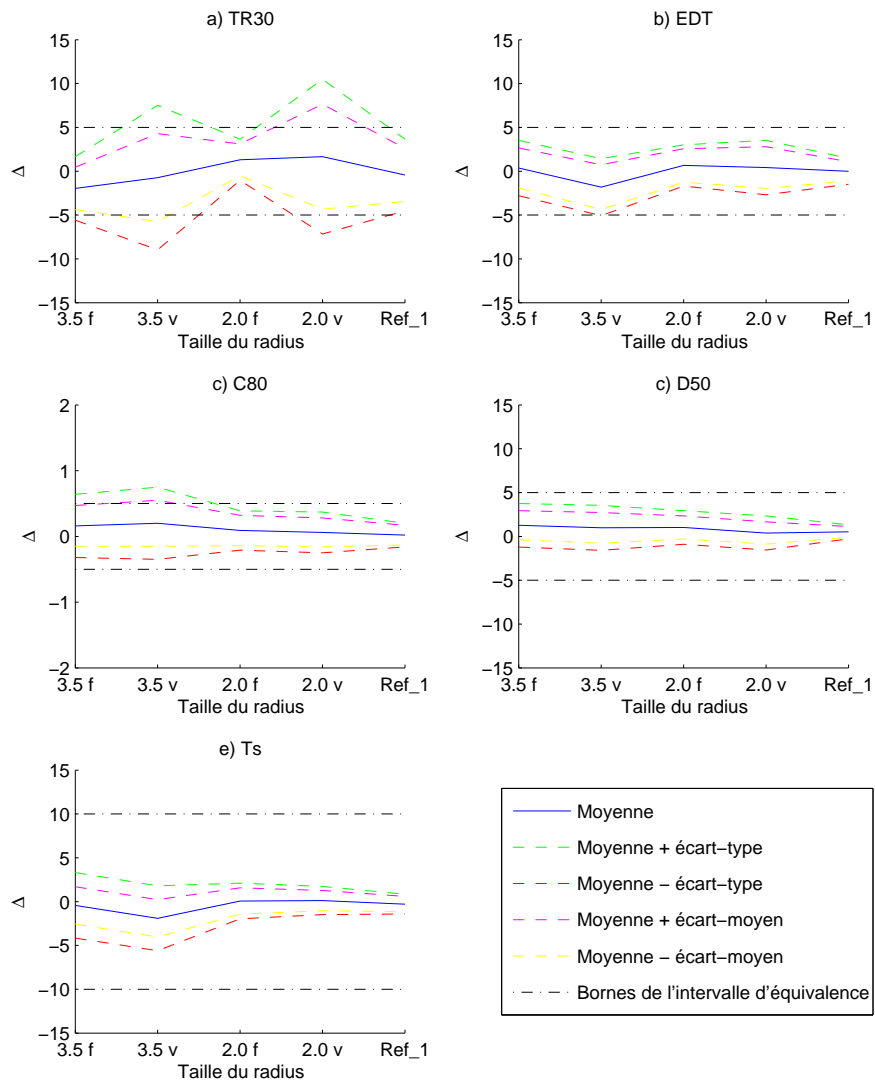


FIGURE D.3.4 – Position de l'intervalle de l'écart-type centré sur la moyenne des Δ pour les configurations Var_1f, Var_1v et Ref_1 par rapport à l'intervalle d'équivalence de la configuration Ref_50 pour la salle « Eglise de Muno ».

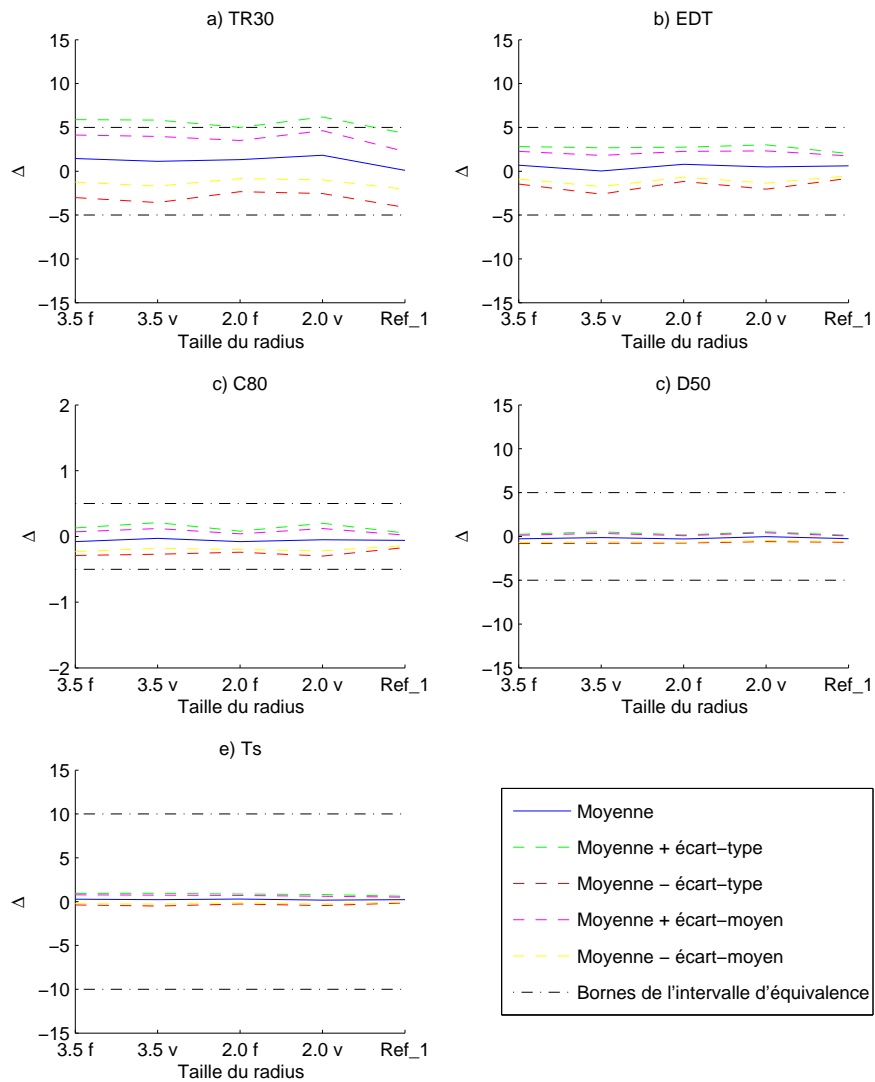


FIGURE D.3.5 – Position de l'intervalle de l'écart-type centré sur la moyenne des Δ pour les configurations Var_1f, Var_1v et Ref_1 par rapport à l'intervalle d'équivalence de la configuration Ref_50 pour la salle « Amphithéâtre de mathématiques ».

Annexe E

Liste des publications de Stéphane Lesoinne

1. J.-J Embrechts, N. Werner, S. Lesoinne. Computation of Directional Impulse Responses in Rooms for Better Auralization. *Proceedings of the 118th Convention of the Audio Engineering Society*, page 5, Barcelona, Spain, May 2005.
2. J.-J Embrechts, N. Werner, S. Lesoinne. Auralization in Room Acoustics using Directional Impulse Responses Computed by Sound Ray Techniques. *Proceedings of the 4th Forum Acusticum Congress*, pages 2535-2538, Budapest Hungary, September 2005.
3. J.-J Embrechts, N. Werner, S. Lesoinne. Présentation d'un système d'auralisation reproduisant de manière fidèle toutes les caractéristiques spatiales. *Paper presented at Journées des acousticiens belges*, Liège Belgium, 2006.
4. S. Lesoinne, N. Werner, J.-J Embrechts, 3D real-time auralization with separate rendering of direct sound, reflections and directional late reverberation. *Proceedings of the 2006 international Conference on Auditory Display*, page 4, London UK, June 2006.
5. J.-J Embrechts, S. Lesoinne, N. Werner. A moving listener in a virtual audio environment with particularly irregular reverberation decay. *Proceedings of the 28th Symposium on Information Theory in the Benelux*, pages 205-210, Enschede Netherlands, May 2007.
6. S. Lesoinne, J.-J Embrechts. Size-adaptive spherical receptor acceleration method for acoustical ray tracing. *Proceedings of the 5th Forum Acusticum "Acoustics '08"*, page 5, Paris France, July 2008.
7. S. Lesoinne, J.-J Embrechts. Recherche des intersections rayon-surfaces par classement préférentiel dans un logiciel d'acoustique des salles. *Actes du 10è Congrès Français d'Acoustique*, page 6, Lyon France, April 2010.