



# L'ARCHITECTURE PARAMÉTRIQUE AU SERVICE DE L'OPTIMISATION ACOUSTIQUE D'UN ESPACE

---



# MÉMOIRE DE MASTER EN ARCHITECTURE

---

## L'ARCHITECTURE PARAMÉTRIQUE AU SERVICE DE L'OPTIMISATION ACOUSTIQUE D'UN ESPACE

**Comment l'outil paramétrique peut-il aider un architecte à déterminer la forme adéquate d'un mur dans le but d'améliorer la réflexion du son à l'intérieur d'un espace ?**

---

**Mots Clés :** acoustique, algorithme, analyse, architecture, conception générative, conditions acoustiques déformation, étude de forme, modélisation, optimisation, paramétrique, performance, processus de conception, propagation du son, réflexion du son, représentation, simulation, temps de réverbération, variable.



S8 - Séminaire Activité et Instrumentation de la Conception

Enseignants encadrants : François GUENA, Joaquim SILVESTRE, Anne TUSCHER DOKIC

ENSAPLV / 2020-2021

**Julie VINCENT**

17B57



## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier l'ensemble de l'équipe encadrante, François GUÉNA, Joaquim SILVESTRE et Anne TUSCHER DOKIC qui m'a permis de préciser mon sujet, d'organiser et de reformuler mes idées. Je remercie tout particulièrement Mr. GUÉNA de m'avoir aidé dans l'élaboration du terrain d'étude relatif à la partie expérimentation de ce mémoire.

Je remercie également Pedro Javier MOLINA SILES, enseignant à la Universidad Politechnica de Valencia, de m'avoir initié aux différents outils paramétriques qui m'ont permis de réaliser ce travail de recherche.

Merci à Ignacio GUILLEN GUILLAMON et à Ana LLOPIS REYNA, enseignants à la Universidad Politechnica de Valencia, de m'avoir accompagné dans l'approche acoustique du processus de conception architecturale.

Enfin, mes remerciements vont à mes proches qui m'ont encouragé et soutenu durant ce travail avec patience et bienveillance.



## RÉSUMÉ

Ce mémoire se développe autour d'une conception interactive où l'outil paramétrique accompagne et aide l'architecte à déterminer la forme géométrique optimale d'une salle de spectacle. Il propose une méthode de recherche de forme permettant à l'architecte de réduire le temps de traitement de diverses géométries et de trouver celle qui optimisera la réflexion du son à l'intérieur de l'espace.

En se basant non seulement sur les principes et les théories de l'acoustique mais également sur des modèles d'architectures existants, nous verrons comment il est possible de retracer le cheminement du son à l'intérieur d'une salle afin d'évaluer l'impact de la déformation d'un de ses murs sur la trajectoire du son réfléchi.

A travers l'association de différents outils numériques : logiciel de modélisation, éditeur d'algorithme, module d'optimisation et d'analyse acoustique, nous aborderons donc la création d'un modèle paramétrique permettant non seulement de générer une infinité de formes spatiales, mais également de déterminer la forme la plus satisfaisante en matière de réflexion sonore.

# **SOMMAIRE**

---

<b>0. Introduction .....</b>	<b>10</b>
<b>1. Le questionnement problématique .....</b>	<b>16</b>
a. Le contexte	
b. La problématique et les hypothèses	
c. La méthode de recherche	
<b>2. L'état de l'art : mise en relation de l'acoustique et de l'outil paramétrique .....</b>	<b>24</b>
a. La réflexion acoustique en architecture	
i. Les bases théoriques sur la réflexion du son	
ii. Détermination d'une déformation récurrente	
iii. Le processus de conception de l'architecte	
b. L'introduction de l'outil paramétrique en architecture	
i. Présentation de l'outil paramétrique	
ii. L'outil paramétrique dans le processus de déformation	
iii. Applications acoustiques de l'architecture paramétrique	
<b>3. L'expérimentation : élaboration d'un outil d'optimisation .....</b>	<b>42</b>
a. Présentation des logiciels et extensions de logiciels	
i. Le logiciel de modélisation	
ii. Le logiciel de programmation paramétrique	
iii. Le plug-in d'optimisation	
iv. Les plug-ins d'analyse	
b. La mise en place du protocole expérimental	
c. La conception des terrains d'étude	
i. Le modèle paramétrique virtuel 2D	
ii. Le modèle paramétrique virtuel 3D	
d. La recherche de la forme optimale	
i. Mise en place des paramètres d'optimisation	
ii. Détermination d'une ou plusieurs solutions optimales	
iii. Analyse acoustique des résultats obtenus	
<b>4. Les perspectives d'évolution .....</b>	<b>88</b>
a. Critique de l'expérimentation : limites du modèle et possibilités d'amélioration	
b. Réflexion sur le rôle de l'architecte vis-à-vis de l'outil paramétrique	
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>96</b>
<b>6. Bibliographie .....</b>	<b>100</b>
<b>7. Glossaire .....</b>	<b>106</b>
<b>8. Table des figures .....</b>	<b>112</b>
<b>9. Table des tableaux.....</b>	<b>118</b>
<b>10. Annexes.....</b>	<b>122</b>



## **0. INTRODUCTION**

---

## 0. Introduction

Au cours du processus de conception architectural, l'ensemble des cinq sens est sollicité. La majeure partie de temps, la perception visuelle prime sur le reste. Cependant, certains espaces tels que les salles de spectacle, théâtres, opéras, salles de concert, concentrent un intérêt évident pour leurs qualités acoustiques et sollicitent de façon importante un sens en particulier : l'ouïe. Ces espaces particuliers vont donc avoir des exigences programmatiques spécifiques telle qu'une bonne perception des sons et une ambiance sonore de qualité.

L'ambiance sonore d'un espace dépend, en grande partie, de sa forme architecturale. En effet, une salle de forme arrondie n'aura pas les mêmes caractéristiques acoustiques qu'une salle de forme carrée, de même qu'une salle carrée n'aura pas les mêmes caractéristiques acoustiques qu'une salle rectangulaire. Il semble donc nécessaire d'intégrer cette exigence acoustique au processus de conception et d'attacher une importance toute particulière à la définition de la géométrie intérieure de l'espace. Par géométrie intérieure, on n'entend pas uniquement la forme globale d'une pièce mais également, à une échelle plus restreinte, la configuration et le relief des murs, du plafond et du sol.

Afin de concevoir la géométrie de tels espaces de façon plus ou moins complexe, les architectes ont peu à peu intégré dans leur processus de conception de nouveaux outils. L'apparition de nouvelles technologies a permis aux architectes d'élargir le champ des possibles en termes de création tout en facilitant le processus de conception. Dans les années 1990, on assiste donc à l'informatisation des agences d'architecture avec l'apparition et l'utilisation de programmes de DAO<sup>1</sup> qui permettent non seulement de gagner du temps dans la réalisation des éléments graphiques, mais également de gagner en précision dans la représentation. Arrivent ensuite les logiciels de modélisation 3D, puis, plus récemment l'apparition d'outils paramétriques permettant de concevoir des projets sous la forme d'algorithmes. Aujourd'hui, on ne parle donc plus de DAO mais de CAO<sup>2</sup> puisque les logiciels peuvent véritablement jouer un rôle dans la conception d'un projet.

---

<sup>1</sup> DAO : Dessin Assisté par Ordinateur. Le DAO permet de réaliser des dessins techniques avec un logiciel. Il utilise la plupart du temps le mode vectoriel et constitue un outil de représentation essentiellement. Aujourd'hui, les logiciels de DAO sont de moins en moins utilisés au profit des logiciels de CAO.

<sup>2</sup> CAO : Conception Assistée par Ordinateur. La CAO regroupe l'ensemble des logiciels de dessin et les techniques de modélisation géométrique qui permettent de concevoir, de tester virtuellement et de réaliser des projets. Les logiciels de CAO ne sont pas uniquement utilisés comme des outils de représentation mais participent véritablement à la conception d'un projet.

À partir des années 2010, l'outil paramétrique a très fortement influencé les modes de conception dans divers domaines et notamment dans le domaine de l'architecture. Il a permis non seulement le développement de formes plus organiques, mais surtout de traiter le thème de la déformation. En effet la modélisation paramétrique permet actuellement de faire évoluer un modèle et de modifier sa forme en fonction de variables données. Il peut donc devenir un outil précieux lorsque l'on commence à envisager d'adapter la géométrie et la forme d'un espace afin d'optimiser ses qualités acoustiques.

A travers ce travail de recherche, nous allons nous intéresser à l'optimisation acoustique d'un espace via la déformation de son enveloppe. L'objectif de ce mémoire est de réfléchir au rôle que peuvent jouer les outils paramétriques aujourd'hui et à la manière dont ils peuvent venir en aide à l'architecte dans son processus de conception. Il s'agit donc de mettre en lien les domaines du paramétrique et de l'acoustique afin d'accompagner l'architecte dans ses choix architecturaux. Le domaine de l'acoustique étant large, nous étudierons plus précisément la déformation géométrique d'une pièce et son influence sur la réflexion du son, sans s'attarder sur les notions d'absorption et de transmission liées aux matériaux qui composent l'espace.

Dans la première partie de ce mémoire, nous aborderons le contexte qui a permis de soulever la problématique de ce travail de recherche. Nous réfléchirons sur les relations entre la conception d'espaces architecturaux nécessitant un traitement acoustique particulier et l'utilisation des différents outils paramétriques disponibles. Après avoir précisément défini la problématique et les hypothèses en relation avec celle-ci, nous tâcherons d'aborder la méthode de recherche mise en place dans ce travail afin d'expliquer le raisonnement qui nous a mené à réaliser la phase d'expérimentation de ce mémoire et de quelle manière cette expérimentation a été développée.

Dans cette seconde partie, nous ferons état de l'ensemble des connaissances et des recherches effectuées en lien avec le sujet de ce mémoire. Dans cet état de l'art, nous aborderons donc deux points : d'une part l'acoustique en architecture et d'autre part le paramétrique en architecture. Pour ce premier thème, nous définirons les bases théoriques de la propagation du son et le rôle de la réflexion du son dans la qualité acoustique d'un espace. Puis, à travers quelques exemples concrets, nous observerons comment l'architecture se modélise en fonction de la réflexion acoustique recherchée. Enfin nous nous focaliserons sur un type d'architecture comprenant un traitement acoustique spécial en s'interrogeant plus

précisément sur le processus de déformation de l'enveloppe de cet espace. Pour le second thème, nous définirons l'outil paramétrique. Nous aborderons la manière dont il a été utilisé en architecture ces dernières années et enfin nous nous focaliserons sur ses applications acoustiques.

Dans cette troisième partie, nous évoquerons l'introduction de l'outil paramétrique comme une aide possible dans le processus de conception de l'architecte. Cette étape est constituée de toute la phase expérimentale du mémoire. Dans un premier temps, nous présenterons l'ensemble les logiciels qui seront utilisés pour réaliser notre expérience, leurs caractéristiques propres, leur principe d'utilisation et ce en quoi ils peuvent nous être utiles pour cette phase d'expérimentation. A partir de ces logiciels disponibles, nous développerons le protocole expérimental que nous suivrons dans le détail. Nous décrirons ensuite les différents types de modèles virtuels à mettre en place pour réaliser l'expérience en expliquant ces choix et la façon dont ils vont être conçus. Par la suite, nous nous intéresserons à l'optimisation des modèles en expliquant concrètement sur quoi cette optimisation se base et comment nous comptons la mettre en œuvre. Nous clôturerons cette partie en explicitant les résultats obtenus et analysant la pertinence de ces derniers.

Enfin, dans cette ultime étape, nous évoquerons les perspectives de réflexion suite à l'ensemble de ce travail de recherche. Une analyse critique nous permettra de déterminer les points positifs et les points négatifs de l'outil paramétrique créé. Nous examinerons finalement les limites des modèles virtuels conçus en 2D<sup>3</sup> et 3D<sup>4</sup> sur lesquels l'expérimentation a été menée afin de déterminer les possibles pistes d'amélioration.

---

<sup>3</sup> 2D : Modélisation numérique en deux dimensions. Concevoir, dessiner ou modifier une géométrie qui peut être représentée sur un plan de repère (X, Y). À l'origine, cette façon de dessiner imite vectoriellement le dessin manuel sur papier en permettant une plus grande précision et une facilité dans la modification du projet.

<sup>4</sup> 3D : Modélisation numérique en trois dimensions. Concevoir, dessiner ou modifier une géométrie qui peut être représentée dans un espace de repère (X,Y,Z). La modélisation 3D amène la possibilité de dessiner et manipuler un objet en volume.





## **1. LE QUESTIONNEMENT PROBLÉMATIQUE**

## 1. Le questionnement problématique

### a. Le contexte

Au cours des dernières années, des recherches ont démontré que l'enveloppe d'un espace, et plus particulièrement sa forme, détermine en grande partie ses qualités acoustiques. En effet, l'étude détaillée à travers l'article : « *The Effect of Complex Wall Forms on the Room Acoustics - An experimental case study* »<sup>5</sup>, évoque le fait que la déformation d'un mur participe à l'amélioration des caractéristiques décrivant une ambiance sonore optimale. Concrètement, selon cet article, la déformation d'un mur pourrait permettre une augmentation de la diffusion du son dans l'espace, l'obtention d'une meilleure clarté ainsi qu'une meilleure réflexion du son. La recherche d'optimisation des performances acoustiques d'un espace intérieur semble donc grandement liée à l'optimisation de sa géométrie puisque, celle-ci influe en partie sur la propagation des ondes sonores à l'intérieur de l'espace et notamment sur l'orientation des ondes sonores réfléchies.

Aujourd'hui, nous savons comment déterminer la géométrie optimale d'une salle d'un point de vue acoustique à travers un long processus itératif. Celui-ci consiste, dans un premier temps, à choisir une forme pour l'espace à concevoir, puis à analyser les propriétés acoustiques qui en découlent. A partir de cette analyse, il est alors possible de déterminer si la forme conçue est optimale ou non, et si en définitive elle est amenée à être modifiée. Si une modification est effectuée, il faudra alors réaliser de nouveau une analyse acoustique de la forme, et ainsi de suite jusqu'à choisir la forme qui semble la plus adéquate. Finalement, ce processus de conception est constitué d'une succession de propositions de formes qui seront analysées et classées de la plus optimale à la moins optimale. Relativement chronophage et laborieux, ce procédé est réalisé par l'architecte qui dessine lui-même, numériquement ou non, l'ensemble ces différentes propositions. Il doit alors faire face à une problématique de temps et de choix. En effet, le nombre de possibilités étant infini, il ne pourra pas toutes les tester et devra cibler les propositions qui, instinctivement, lui semblent plus optimales en renonçant à d'autres.

---

<sup>5</sup> « *The Effect of Complex Wall Forms on the Room Acoustics - An experimental case study* » de Sousa, JP, Xavier, JP and Castro Henriques, G (eds.), *Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution - Proceedings of the 37th eCAADe and 23rd SIGraDi Conference - Volume 2*, University of Porto, Porto, Portugal, 11-13 September 2019, pp. 97-102.

Dans le cadre de cette recherche de forme, s'il le souhaite, l'architecte peut faire appel à un BET<sup>6</sup> acoustique qui va alors l'accompagner et réaliser une étude acoustique détaillée de la proposition retenue. Cependant, les partenariats entre architectes et BET acoustiques restent plutôt rares puisqu'ils sont couteux et qu'aucune loi ne les rend obligatoires<sup>7</sup>. Sans BET acoustique, c'est alors à l'architecte lui-même de déterminer la configuration acoustique optimale de l'espace qu'il crée et d'effectuer l'analyse acoustique de sa propre proposition. De fait, il peut s'avérer compliqué, pour un architecte ayant reçu une formation parfois peu approfondie en termes de connaissances techniques acoustiques, d'évaluer l'espace qu'il conçoit et d'avoir un retour rapide sur ses qualités acoustiques afin de l'optimiser.

Au cours des dernières années, l'apparition de nouveaux outils paramétriques est venue bouleverser ces processus de conception. Ces nouveaux outils permettent aujourd'hui à l'architecte de concevoir non seulement de façon plus libre et plus précise mais également d'analyser ses propres modélisations afin de pouvoir les évaluer techniquement parlant et les optimiser. Ainsi, la problématique de ce mémoire nait de l'intégration de l'outil paramétrique dans le processus de conception et d'optimisation acoustique d'un espace, et de la façon dont il peut venir aider l'architecte dans sa mission de conception. Bien que le lien entre l'architecture paramétrique et l'optimisation acoustique d'un espace ait déjà été abordé dans plusieurs recherches, le fait de réfléchir à un outil paramétrique capable de se baser sur un modèle virtuel, proposant une optimisation de ce modèle ainsi qu'une analyse afin de vérifier cette optimisation, n'a pas encore été clairement détaillé.

En effet, de nos jours, l'outil informatique est considéré, non plus comme un support de représentation ou de modélisation, mais comme un outil capable de proposer une solution spatiale à l'architecte. Cet usage de l'outil informatique entraîne, de fait, l'apparition de nouveaux débats notamment sur le rôle de l'architecte et la place de l'outil informatique par rapport à ce dernier. À travers ce mémoire, il s'agit donc de trouver un juste milieu et de réfléchir, non pas à un algorithme de conception complètement indépendant qui pourrait remplacer l'architecte, mais bien à un outil d'aide sur lequel il pourrait s'appuyer pour faciliter le processus de conception de son projet.

---

<sup>6</sup> BET : Bureau d'Étude Technique

<sup>7</sup> Selon le site internet : <https://www.lamaisonsaintgobain.fr/guides-travaux/questions-travaux/quand-et-pourquoi-faire-appel-aux-bureaux-d-etudes>. En revanche l'architecte à l'obligation d'effectuer un ensemble de mesures lors de la construction de son projet qui permettront d'attester du respect des normes acoustique en vigueur. L'arrêté du 27 novembre 2012 relatif à l'attestation de prise en compte de la réglementation acoustique applicable en France métropolitaine aux bâtiments d'habitation neufs disponible sur le site : <https://www.legifrance.gouv.fr> donne plus d'informations à ce sujet.

## b. La problématique et les hypothèses

Le processus de conception acoustique d'un bâtiment ou d'un espace étant un vaste domaine de recherche, nous choisirons au cours de ce travail, de limiter notre étude à un espace intérieur fermé. Dans ce cadre, le contexte décrit précédemment nous amène à nous interroger sur la manière dont l'outil paramétrique pourrait se mettre au service du processus d'optimisation acoustique d'un espace intérieur afin d'accompagner l'architecte dans la phase de conception du projet. Nous pouvons alors relever la problématique suivante : « **Comment l'outil paramétrique peut-il aider un architecte à déterminer la forme adéquate d'une salle dans le but d'optimiser la réflexion du son à l'intérieur de cet espace ?** » En établissant cette problématique, nous serons amenés à considérer différentes interrogations et hypothèses.

À travers ce travail de recherche, il s'agit de se questionner sur les éléments qui influencent de manière significative la réflexion du son à l'intérieur d'une salle ; soit potentiellement la forme de la salle, qui aura une influence particulière notamment sur la trajectoire du son réfléchi. Dans cette partie du mémoire, nous supposons que les connaissances en acoustique dont nous disposons, ou du moins qui sont à notre disposition, principes et théories, seront suffisantes pour nous permettre d'émettre certaines hypothèses sur la propagation du son réfléchi. Nous pourrons ainsi envisager de retracer le cheminement des ondes sonores réfléchies à l'intérieur d'un espace défini. Nous envisagerons également de pouvoir manipuler, adapter et paramétriser ce cheminement en fonction de l'allure de la surface sur laquelle les ondes sonores se réfléchissent afin de déterminer une forme optimale de cette surface. De fait, nous supposerons qu'il est possible pour un architecte n'ayant reçu aucune formation particulière concernant les outils paramétriques de parvenir à en avoir une utilisation sommaire. D'autre part, nous serons potentiellement amenés, au cours de cette étude, à choisir parmi les différentes surfaces intérieures d'une salle celle qui mérite d'être déformée et nous nous questionnerons sur la manière dont elle peut être déformée. Nous serons également amenés à déterminer le terrain d'étude qui semble le plus adéquat pour modéliser cette déformation et nous permettre d'offrir une réponse à la problématique soulevée. Enfin nous poserons des hypothèses sur les différents critères permettant de considérer qu'un modèle est optimal, acoustiquement parlant, en travaillant sur la mise en place possible d'un outil paramétrique associant modélisation, optimisation et analyse de la réflexion du son à l'intérieur d'une salle.

### c. La méthode de recherche

Dans ce mémoire, nous partons d'une difficulté de conception pour mener une réflexion autour d'un outil permettant d'aider l'architecte à déterminer un ensemble de solutions, de formes pour lesquelles les caractéristiques acoustiques de l'espace créé sont optimales.

Dans un premier temps, nous réaliserons un état de l'art. D'une part, nous nous intéresserons aux différents principes acoustiques utilisés en architecture et traitant de la réflexion du son. Nous prendrons donc le temps nécessaire pour étudier l'ensemble des règles géométriques nous permettant de déterminer précisément la trajectoire du son réfléchi dans un espace fermé. Au cours de ce travail de recherche, nous nous intéresserons d'ailleurs uniquement au cheminement du son réfléchi et non à son intensité. En effet, considérer l'intensité du son réfléchi impliquerait de prendre en compte le phénomène d'absorption et donc de considérer des paramètres tels que les matériaux composant les murs, le sol, le plafond de la salle étudiée, leurs caractéristiques, le nombre de personnes occupant la salle, etc. Il s'agit donc, à travers ce choix, de ne pas se disperser et de s'intéresser à un aspect précis de la réflexion du son : l'aspect géométrique.

D'autre part, dans cet état de l'art, nous prendrons connaissances des différentes pistes d'utilisation concernant l'outil paramétrique et plus précisément son utilisation en architecture. Nous observerons les exemples de recherches architecturales qui ont pu être développés à travers la mise en relation des deux domaines que sont l'acoustique et le paramétrique. Nous verrons alors que la manière la plus courante d'influencer la trajectoire des ondes sonores réfléchies à l'intérieur d'une salle est d'intervenir sur les murs latéraux de celle-ci et de modifier leur forme, ce sur quoi nous travaillerons dans la suite de ce mémoire. Cette première étude des connaissances et des exemples architecturaux existants nous permettra de choisir un type de salle avec un type de déformation murale précis à étudier.

À la suite de cet état de l'art, nous pourrons dans un deuxième temps mettre en place la phase expérimentale de ce travail de recherche. Pour se faire, nous choisirons un terrain d'étude virtuel qui nous permettra de modéliser un grand nombre de déformations. Pour concevoir ce modèle virtuel, nous nous intéresserons au processus de conception de l'architecte lorsqu'il conçoit une salle de concert ou un espace exigeant certaines propriétés acoustiques et nous tâcherons de le transposer à l'outil paramétrique en utilisant la même logique de conception. Dans le cadre de cette conception, nous déterminerons alors non

seulement les critères qui nous permettront de considérer que le modèle est optimal acoustiquement parlant, mais également les outils paramétriques mis à disposition et la manière dont ils peuvent intervenir dans le modèle. Il s'agira alors de préciser quels outils nous utiliserons à la fois pour représenter, modéliser, paramétriser, optimiser et analyser notre modèle. Après avoir pris le temps de prendre en main les différents logiciels disponibles, nous constituerons donc un ou plusieurs modèles virtuels qui serviront de terrains d'étude pour la suite de ce travail de recherche.

A partir de ces modèles virtuels expérimentaux, nous pourrons tester différentes déformations et déterminer un ensemble de solutions où la réflexion du son est considérée comme optimale. La phase d'optimisation se déroulera en deux dimensions sur un modèle plan représentant une salle dont les dimensions générales sont fixées et où les murs latéraux seront représentés de façon linéaire. Après avoir déterminé une solution optimale sur ce modèle plan, nous utiliserons un modèle virtuel en trois dimensions possédant les caractéristiques de la solution retenue précédemment afin de réaliser une analyse acoustique de celle-ci en volume qui nous permettra de vérifier son caractère optimal. Dans cette phase expérimentale, nous pourrons étudier plusieurs cas de salles possédant des dimensions générales différentes afin d'observer d'éventuelles divergences dans les solutions de déformations optimales retenues.

Enfin, il sera primordial d'établir une critique constructive du travail de recherche effectué en pointant les limites de notre étude et en évoquant des possibilités d'améliorations. Nous pourrons également envisager de situer ce travail de recherche dans le quotidien du métier d'architecte et dans l'utilisation qui pourrait en être faite.





## **2. L'ÉTAT DE L'ART**

---

## 2. L'état de l'art : mise en relation de l'acoustique et de l'outil paramétrique

### a. La réflexion acoustique en architecture

#### i. Les bases théoriques sur la réflexion du son

Le son peut se définir de deux manières<sup>8</sup> : tout d'abord « *d'une manière objective, c'est le phénomène physique d'origine mécanique consistant en une variation de pression (très faible), de vitesse vibratoire ou de densité du fluide, qui se propage en modifiant progressivement l'état de chaque élément du milieu considéré, donnant ainsi naissance à une onde acoustique (la propagation des ronds dans l'eau suite à un ébranlement de la surface donne une bonne représentation de ce phénomène)* », ensuite « *d'une manière subjective, il s'agit de la sensation procurée par cette onde, qui est reçue par l'oreille, puis transmise au cerveau et déchiffrée par celui-ci.* ». Dans ce travail de recherche, nous nous intéresserons à cette première manière, manière objective, de définir le son.

À travers cette partie du mémoire, il convient de recenser les connaissances relatives au son nécessaires pour réaliser notre étude. Dans leur publication « *Conception acoustique d'une salle – intérêt du prototypage et principe de conception de maquette* », Caroline DESA et Hélène HORSIN MOLINARO<sup>9</sup> mettent en lumière quelques principes acoustiques qui permettent de guider le processus de conception de la géométrie d'une salle. De fait, lorsque nous concevons un espace architectural en nous intéressant à l'optimisation acoustique de celui-ci, nous prenons en compte différents éléments. Dans un premier temps, il est important de noter que la perception des ondes sonores à l'intérieur de la salle dépend de deux types d'ondes. En effet, lorsque le son parvient aux oreilles d'une personne, il est composé à la fois d'une onde de son directe (*en jaune sur la Figure 1*) et des ondes de son réfléchies (*en bleu sur la Figure 1*). La superposition de l'ensemble de ces ondes détermine alors la qualité du son perçu. Dans ce mémoire, nous nous intéresserons uniquement à la trajectoire des ondes sonores réfléchies.

---

<sup>8</sup> <https://www.futura-sciences.com/sante/dossiers/medecine-bruit-effets-sante-259/page/3/>

<sup>9</sup> « *Conception acoustique d'une salle – intérêt du prototypage et principe de conception de maquette* » de Caroline DE SA et Hélène HORSIN MOLINARO, École Normale, Supérieure de Paris-Saclay, Édité le 24/03/2017, Publié le 27/03/2017, 17p.

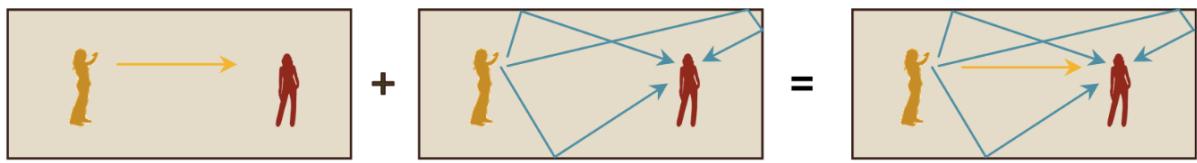


Figure 1 : Schéma représentatif de la superposition de l'onde sonore directe et des ondes sonores réfléchies

Par ailleurs, lors de la conception d'une salle différents phénomènes vont impacter la propagation du son tels que la diffraction<sup>10</sup>, la réflexion, la diffusion<sup>11</sup> ou l'absorption<sup>12</sup>. Il est possible d'étudier ces phénomènes, et notamment le phénomène de réflexion, via une approche géométrique de la propagation des ondes sonores représentées comme des rayons, en analysant la réponse impulsionale mesurée par un récepteur situé à un point de la salle suite à l'émission d'un son à un point distinct. A travers cette réponse et l'échogramme (Figure 2) qui en découle, on retrouve alors différents types de réflexions. En effet, après le pic correspondant au son direct qui arrive en premier au niveau du récepteur, on a, dans un premier temps les pics correspondant aux premières réflexions puis dans un second temps les pics associés aux réflexions tardives que l'on appelle réverbération<sup>13</sup>.

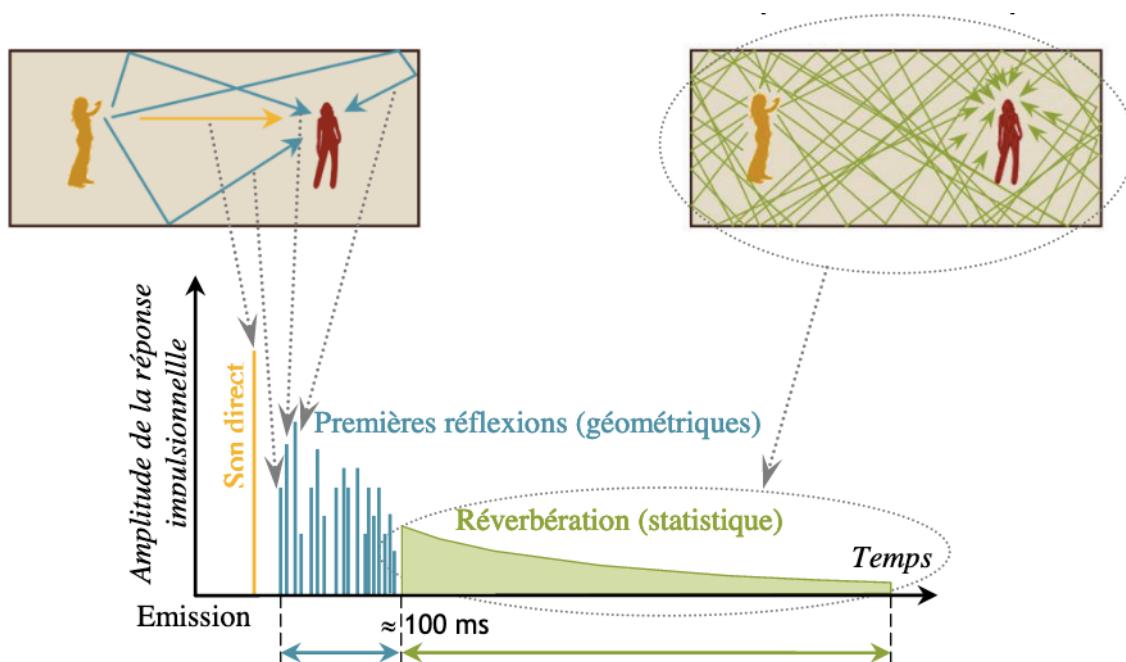


Figure 2 : Échogramme de la réponse impulsionale d'une salle

<sup>10</sup> Diffraction : Phénomène de déviation des ondes (acoustiques) lorsqu'elles passent au voisinage d'un obstacle ou au passage d'une ouverture de petite dimension.

<sup>11</sup> Diffusion : Phénomène par lequel un rayonnement (sonore) se propage dans diverses directions.

<sup>12</sup> Absorption : Atténuation de la puissance de l'onde sonore par la structure qui lui fait obstacle.

<sup>13</sup> Réverbération : persistance d'un son dans un espace clos ou mi-clos après interruption de la source sonore.

Les premières réflexions et les réflexions tardives (qui composent la réverbération) sont impactées par différents facteurs. La forme de la salle va avoir une influence sur les réflexions premières, tandis que les caractéristiques des matériaux composant les parois vont avoir une influence sur la réverbération du son. D'après la publication de Caroline DESA et Hélène HORSIN MOLINARO, le phénomène de réverbération peut être contrôlé si : « *la salle est peu absorbante, ses dimensions sont relativement grandes, sa forme générale est simple (parallélépipédique) et si l'absorption dans le fluide (qui est l'air) est négligeable au regard de celle due aux parois* ». Dans ce mémoire, nous considérerons que les critères énumérés ci-dessus seront vérifiés aux cours des expériences à venir afin de ne pas s'attarder sur l'effet de réverbération mais bien de se concentrer sur l'étude des réflexions premières.

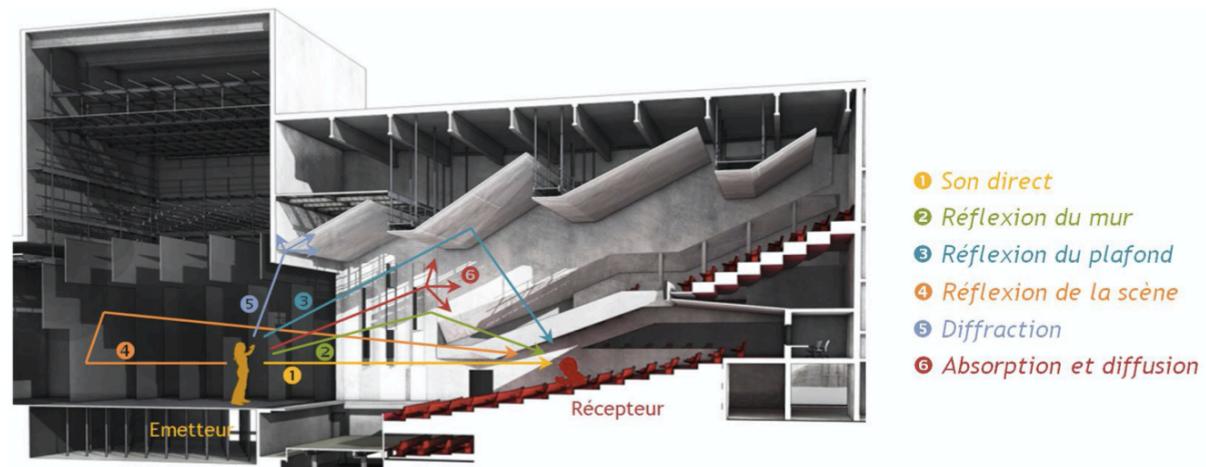


Figure 3 : Propagation d'une onde sonore dans un auditorium

De fait, lorsqu'une onde se propage dans un espace fermé, elle rencontrera nécessairement, un obstacle, une paroi, au cours de sa propagation. C'est la rencontre de cet obstacle qui va en partie réfléchir le son et donner naissance à l'onde sonore réfléchie (Figure 3). Géométriquement, il est possible de retracer le parcours de cette onde sonore réfléchie.

En effet, en traçant l'impact des rayons émis par la source sonore A sur la paroi centrale du schéma ci-contre, nous obtenons deux points. En positionnant le point A', symétrique du point A par rapport à la paroi, on peut alors tracer les rayons de son réfléchis partant de A' et passant par les deux points établis précédemment sur la paroi.

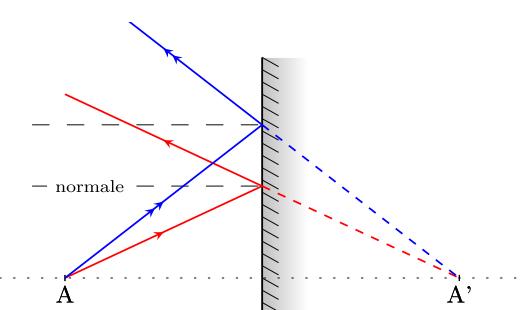


Figure 4 : Construction de rayons réfléchis

## ii. Détermination d'une déformation récurrente

Après avoir revu quelques bases théoriques sur la réflexion du son, il semble primordial de s'intéresser à l'utilisation de ces principes acoustiques en architecture où l'on va chercher à travailler la forme d'un espace dans le but d'offrir la qualité de son la plus adaptée possible. En effet, certains espaces architecturaux nécessitent un traitement acoustique particulier. Ces espaces peuvent être des lieux culturels tels que des salles de spectacle (concert, opéra, cinéma, théâtre) par exemple, mais aussi des lieux à forte fréquentation, des lieux de transits (gare, aéroport) ou des lieux publics dédiés au sport par exemple (gymnase, piscine). Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéresserons exclusivement à la déformation de l'enveloppe d'un espace de type salle de spectacle que nous diviserons en deux zones bien distinctes : l'espace de la scène et l'espace consacré à l'audience.

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous allons nous intéresser à la forme et au design intérieur des salles de spectacle. De façon générale, les objectifs acoustiques divergent selon les différents types de salles de spectacles. Une salle d'opéra par exemple se compose de la même manière qu'un théâtre : l'orchestre est situé dans une fosse devant la scène pour être le moins visible possible et les distances entre les acteurs et les spectateurs sont réduites avec la présence de balcons. La réverbération du son dans ce type de salle doit donc être courte. Au contraire, une salle de concert philharmonique va plutôt privilégier des sons riches et volumineux. L'objectif, dans ce type de salles, est alors de créer un grand volume acoustique et une réverbération latérale. Dans de nombreuses salles de concerts ou philharmonies, nous constatons ainsi tout un travail de modification de la géométrie des murs et du plafond passant ainsi d'une forme plane à une forme déformée, pliée presque de façon origamique<sup>14</sup> à la manière d'une feuille de papier.

Il existe ainsi une infinité de possibilités de géométries intérieures à une salle de spectacle qui permettent d'avoir une ambiance sonore de qualité. Après avoir balayé un large panel de projets architecturaux existants, nous pouvons constater qu'un type de modification, au niveau de la forme des murs latéraux des salles de spectacle, revient régulièrement. Nous pouvons ainsi observer ce phénomène à travers les projets suivants (*Figures 5, 6, 7, 8, 9*).

---

<sup>14</sup> "Bio-Origami : Form Finding and Evaluation of Origami Structures, de Baerlecken, Daniel, Swart, Matthew, Gentry, Russell, Wonoto, Nixon", Extrait de Achten, Henri; Pavlicek, Jiri; Hulin, Jaroslav; Matejovska, Dana (eds.), Digital Physicality - Proceedings of the 30th eCAADe Conference - Volume 1 / ISBN 978-9-4912070-2-0, Czech Technical University in Prague, Faculty of Architecture (Czech Republic) 12-14 September 2012, pp. 497-504



Figure 5 : Courtesy of Dolugan Meissl Associated Architects, Muhlgraben, Austria (2012)



Figure 6 : Presbyterian Church of Arcari & Iovino Archiects, Pohang-Si, South Korea (2014)



Figure 7 : The Joyful Church of The Beck Group, New jersey, USA (2013)



Figure 8 : The Gallery for the Festival Arerra, Kadarik Tüür Arhitektid, Viljandi, Estonia (2013)



Figure 9 : Amphitorium in the Banc Sabadell Heaquarters project of Bach Architects, Barcelona, Spain (2012)

**(Figure 5) Courtesy of Dolugan Meissl Associated Architects, Muhlgraben, Austria (2012).** La géométrie globale de ce projet d'adapte aux conditions topographiques de l'environnement dans lequel il se trouve. L'idée de conception a été guidée par deux paramètres déterminants : l'interrelation entre l'intérieur et l'extérieur et la configuration spéciale de la salle de concert qui possède une géométrie tectonique très dynamique.

**(Figure 6) Presbyterian Church of Arcari & Iovino Archietcts, Pohang-Si, South Korea (2014).** Cette église possède également un traitement acoustique particulier composé de motifs inspirés en partie de l'artisanat coréen.

**(Figure 7) The Joyful Church of The Beck Group, New jersey, USA (2013).** Cette église a été conçue dans l'objectif de devenir plus qu'un lieu de culte. Réfléchi comme un espace polyvalent, ce projet a été pensé non seulement comme une église, mais également comme un lieu de loisir, un lieu d'appréciation de l'art et de la musique. Acoustiquement parlant, il a donc été conçu pour accueillir à la fois des récitals et des spectacles musicaux.

**(Figure 8) The Gallery for the Festival Arerra, Kadarik Tüür Arhitektid, Viljandi, Estonia (2013).** Ce projet est un théâtre et un lieu de performance scénique ouvert sur l'extérieur. La surface intérieure du projet a été travaillée et articulée de façon à améliorer la qualité du son et éliminer le besoin d'amplificateur électronique.

**(Figure 9) Amphitorium in the Banc Sabadell Heaquarters project of Bach Architects, Barcelona, Spain (2012).** On constate que les murs latéraux de cet amphitorium se composent également de grands panneaux verticaux positionnés avec un décalage très léger.

A travers divers pays : Autriche, Espagne, États-Unis, Estonie, Corée, voire même différents continents, nous retrouvons un principe de déformation de paroi similaire permettant d'améliorer acoustiquement un espace. Les exemples présentés ci-dessus illustrent également des projets avec des fonctions différentes : église, théâtre d'extérieur, auditorium, dance-hall (salle des fêtes). Ainsi, nous notons qu'un même principe de déformation, celui de diviser un mur en plusieurs panneaux verticaux et de les incliner (en leur donnant un angle de rotation par rapport à l'axe vertical), semble pouvoir être applicable à des projets aux contextes et objectifs de conception différents. Cependant, à travers cet ensemble d'exemples, nous remarquons également, malgré l'utilisation de ce principe commun, que les dimensions varient d'un projet à l'autre. En effet, les murs sont travaillés avec des panneaux de taille plus ou moins grande et avec une position plus ou moins inclinée par rapport à la géométrie et à l'enveloppe d'origine de la salle. Suite à ce constat, il serait donc intéressant de se pencher sur la manière avec laquelle les architectes ont pu obtenir des résultats similaires, basés potentiellement sur la même réflexion, mais dimensionnés différemment afin de nous en inspirer pour concevoir notre modèle expérimental.

### iii. Le processus de conception de l'architecte

Après avoir déterminé l'existence d'une déformation récurrente en architecture permettant d'améliorer les qualités acoustiques d'une salle, nous pouvons à présent affiner notre recherche et étudier le processus de conception qui a pu être établi pour obtenir ce type de résultats.

La conception acoustique d'une salle de concert prend en compte un grand nombre de paramètres et d'étapes différentes. À travers ce travail de recherche, le paramètre que nous étudions est la réflexion du son, et plus précisément son orientation qui, comme nous l'avons expliqué précédemment, est directement liée à la géométrie de la salle. L'étape de conception à laquelle nous allons donc nous intéresser est le choix de la forme des murs enveloppant l'espace intérieur d'une salle. Afin de définir un processus de conception clair, nous pourrons nous intéresser à l'exemple du théâtre de Viljandi (*Figure 10*). Dans cet exemple, la forme des murs latéraux du projet a été conçue comme une déformation du mur à la manière d'un pliage origamique. En effet le mur, se divise verticalement en plusieurs panneaux qui viennent s'incliner par rapport à la position plan du mur d'origine. Nous pouvons alors considérer que la déformation de ce mur s'établit selon deux paramètres : le nombre de panneaux composant le mur « déformé » qui va entraîner le choix d'une dimension bien précise des panneaux et l'angle d'inclinaison de ces panneaux par rapport au mur<sup>15</sup>.

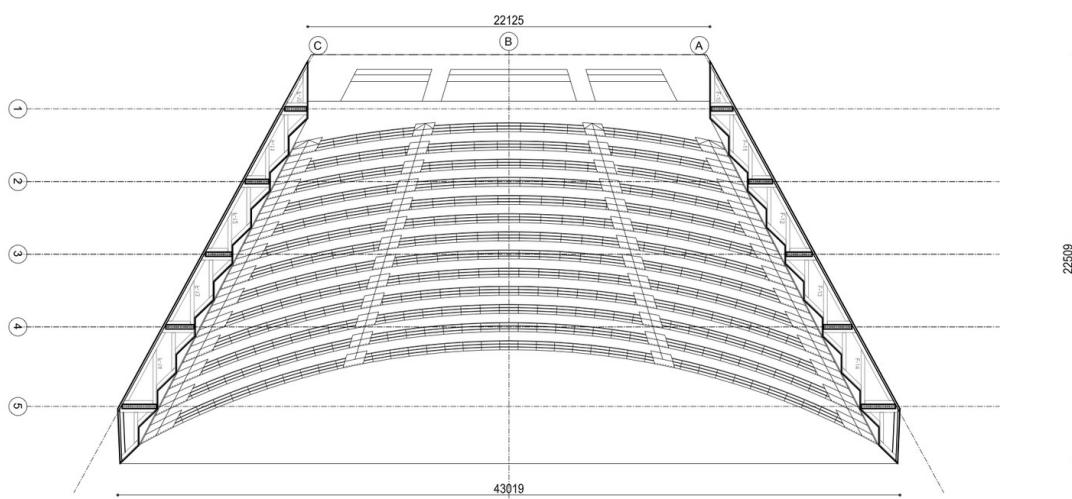
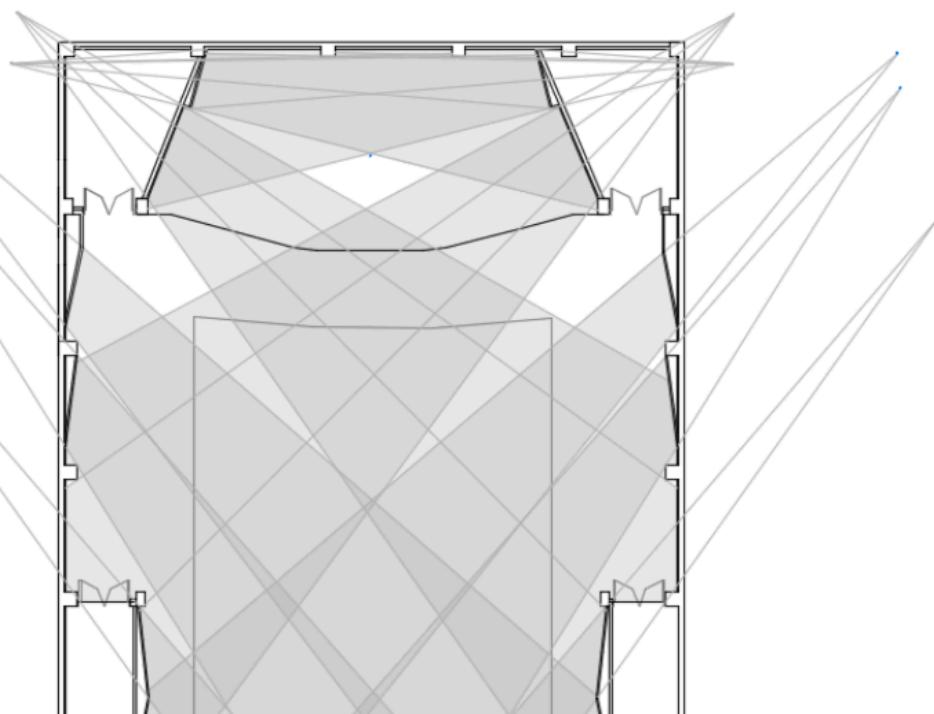


Figure 10 : Plan of The Gallery for the Festival Arerra, Kadarik Tüür Arhitektid, Viljandi, Estonia (2013)

<sup>15</sup> Cet exemple a été retenu particulièrement puisqu'il présente des murs composés de panneaux de dimensions identiques et positionnés également de façon identique. Ce principe de construction de panneaux identiques en série sera repris dans la création des modèles paramétriques d'étude lors de la phase expérimentale.

De fait, lors du processus de conception d'une telle déformation, l'architecte va pouvoir, à travers une construction géométrique semblable à l'illustration ci-dessous (*Figure 11*)<sup>16</sup>, évaluer l'impact de la déformation du mur sur la réflexion du son afin de choisir le nombre optimal de panneaux et leur position idéale. Dans un premier temps, il s'agit de déterminer de façon claire et précise les dimensions de la pièce (longueur et largeur), puis la position de la source émettrice de son (qui se situera généralement au niveau de la scène, en son centre) et enfin la position de la source réceptrice de son (qui correspond à la position des spectateurs et de l'audience). Dans un second temps, après avoir sélectionné les murs à déformer, il est possible d'appliquer deux méthodes. Nous pouvons commencer par choisir le nombre de panneaux et leurs dimensions pour ensuite déterminer leurs angles d'inclinaison, ou bien procéder de façon inverse et choisir un angle d'inclinaison puis un nombre de panneaux. Quelle que soit la méthode retenue, nous constatons que la définition d'un protocole de conception ne nous permet pas de déterminer rapidement et de façon certaine une forme optimale pour l'espace conçu. En effet, l'architecte doit finalement tester une multitude de propositions pour choisir celle qui lui semble la plus optimale. Devant l'infinité des possibilités, la détermination d'une forme de mur optimale peut rapidement devenir complexe et chronophage.



*Figure 11: Exemple de construction géométrique réalisée pour étudier l'impact d'un changement de forme du mur sur la trajectoire de son réfléchi*

<sup>16</sup> Les modèles paramétriques décrits au cours de la phase expérimentale de ce mémoire seront basés sur une construction géométrique similaire permettant de positionner les surfaces couvertes par le son réfléchi.

## b. L'introduction de l'outil paramétrique en architecture

Aujourd’hui, les outils informatiques de dessin et de modélisation nous permettent d’effectuer l’ensemble des tracés géométriques nécessaires à la réalisation d’une étude géométrique de façon relativement rapide et précise. Néanmoins, ces outils de représentation et de modélisation ne permettent pas de passer facilement d’une proposition architecturale à une autre. En effet, chaque proposition doit être tracée et ne peut se modéliser d’elle-même. L’architecte doit donc mobiliser son temps et son attention pour tracer lui-même chacune des variantes du projet qu’il envisage comme solution sans savoir de façon quasi certaine si elle sera optimale ou non. Ces dernières années, le développement d’outils permettant la création de modélisations paramétriques nous permet d’envisager l’outil informatique non plus comme un simple support de représentation et de modélisation, mais désormais comme une aide à la conception ainsi qu’un véritable terrain de recherche, c’est ce que nous développerons dans la partie suivante.

### i. Présentation de l’outil paramétrique

Le terme de conception paramétrique, est utilisé pour évoquer un processus de conception basée sur la définition d’un ensemble de paramètres qui vont influencer la forme du projet. La forme finale n'est alors ni figée, ni créée directement par l'architecte, elle est en réalité générée et induite par l'ensemble des paramètres. En effet, dans un modèle paramétrique la modification d'un ou plusieurs paramètres n'engendre pas la modification d'une partie du modèle mais bien un ensemble de variations sur la totalité du modèle. Le processus de conception ne se base alors plus sur des mesures précises, mais sur un ensemble de relations que lient les différents paramètres et objets constituant la forme. Ainsi, la géométrie d'un modèle impactée par la façon dont on associe les différents éléments qui la composent.

Cette conception paramétrique peut mettre en jeu différents types de paramètres : des paramètres mathématiques, des paramètres géométriques, des paramètres de matière qui influent sur le comportement physique ou les dimensions par exemple, des paramètres de fabrication qui peuvent influer sur la taille des machines ou le poids des produits, des paramètres environnementaux ou des paramètres humains qui influent sur les usages. Dans ce mémoire, nous manipulerons essentiellement des paramètres géométriques et mathématiques.

Avec l'utilisation de modèles paramétriques, il est possible d'effectuer différents types de simulations : des simulations volumétriques, structurelles, environnementales, thermiques, lumineuses, économiques. Au cours de la phase expérimentale de ce travail de recherche, nous effectuerons dans un premier temps, des simulations planes en 2D pour toute la phase de recherche d'optimisation de la forme de notre espace et ensuite, des simulations volumétriques en 3D pour la phase d'analyse acoustique du modèle optimal.

Par ailleurs, lorsqu'un modèle paramétrique est créé, il est possible de l'évaluer afin de déterminer s'il mérite ou non d'être changé. Le potentiel de performance du projet ou du modèle peut être quantifié et analysé, ce qui permet d'extraire en continu des informations et des descriptions du projet sous forme par exemple de représentations géométriques. Ces informations relatives au projet peuvent être de deux natures différentes. On peut travailler avec des représentations plutôt qualitatives telles que des dessins en 2D, des modèles 3D ou des diagrammes mais également avec de représentations plus quantitatives telles que des surfaces, des quantités, des longueurs. Ces simulations peuvent nourrir des projets de différentes natures : constructive, urbaine, programmatique et ce, à des échelles variées. En devenant interactives, elles permettent au concepteur d'explorer une multitude de solutions dans l'espace, de les évaluer objectivement et d'en générer de nouvelles plus facilement. Le concepteur manipule alors un « système de conception », et non pas un objet conçu.

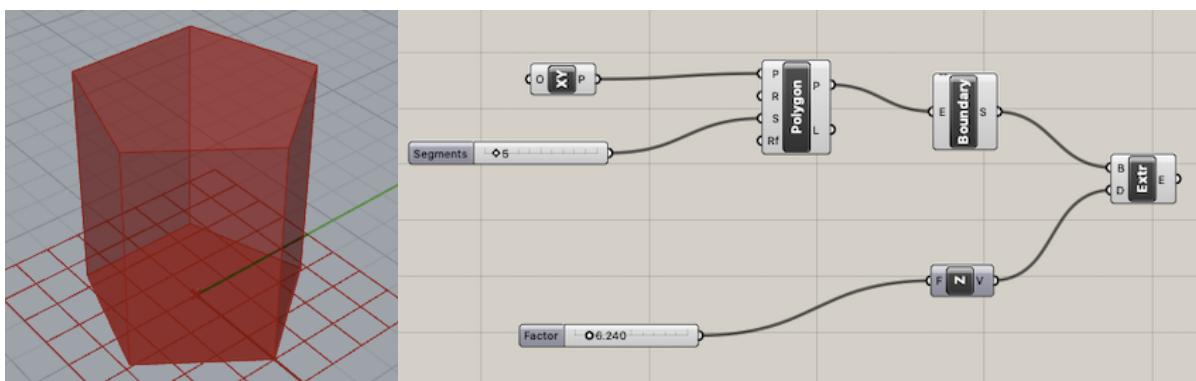


Figure 12 : Exemple de modèle paramétrique

L'illustration ci-dessus (*Figure 12*) présente un exemple de volume créé à l'aide d'un outil paramétrique. Sur la gauche, la fenêtre de modélisation nous permet de visualiser le volume. Sur la droite, nous distinguons l'algorithme à l'origine de ce modèle. On y retrouve alors les éléments constitutifs du volume : le plan **XY**, le **Polygone** de base du volume, la surface de ce polygone **Boundary** que l'on va venir **Extruder** selon l'axe **Z**. Deux Paramètres définissent le volume : le nombre de **Segments** du polygone : 5 et la hauteur (**Factor**) : 6,240.

## ii. L'outil paramétrique dans le processus de déformation

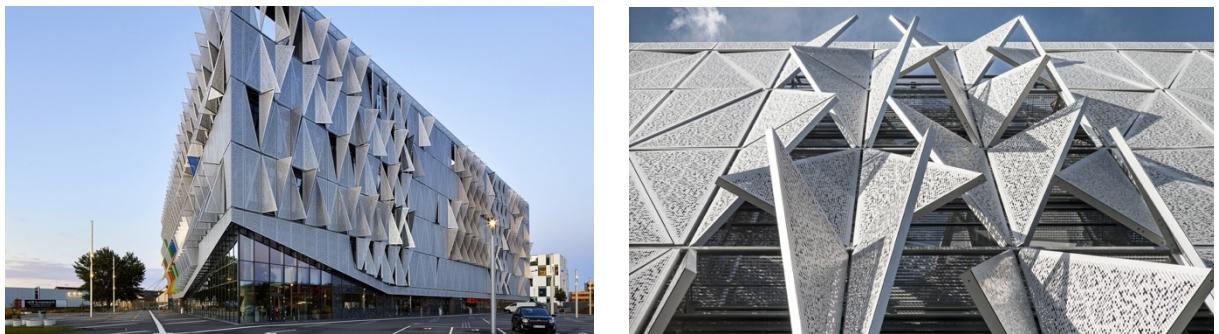
La conception paramétrique, telle que nous l'avons définie précédemment, rend possible l'émergence de formes plus libres et l'exploitation de formes non-standardisées. Son utilisation en architecture permet de créer des formes plus organiques plus adaptées à leur environnement. L'outil paramétrique, de plus en plus utilisé ces dernières années, permet donc de concevoir une architecture qui devient finalement variable et modulable.

Nous pouvons notamment remarquer l'apparition de nouvelles façades composées de structures adaptatives capables de changer leur forme ou de modifier leurs caractéristiques géométriques. Cette notion de déformation de surface et plus précisément de mur se retrouve à travers les projets architecturaux suivants (*Figures 13, 14, 15*).

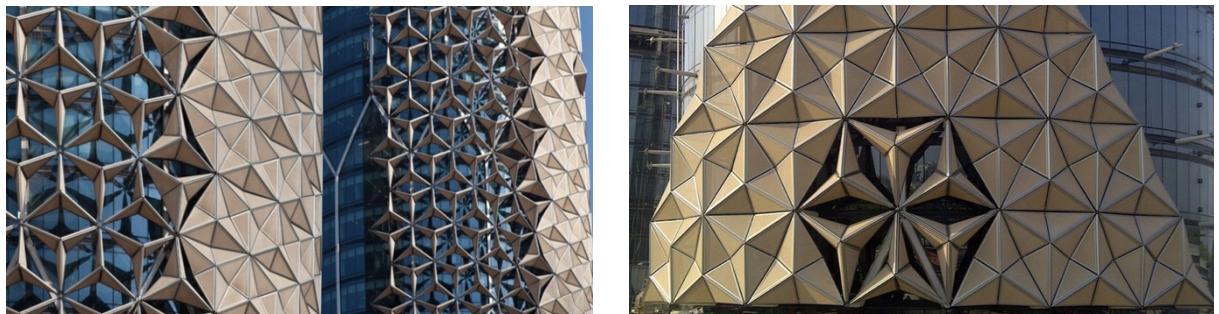
**(Figure 13) Kolding Campus University of Henning Larsen Architects, Southern Denmark (2014).** Ce bâtiment dispose d'un système de façade dynamique particulière équipée de panneaux triangulaires mobiles qui font office de protection solaire et qui permettent d'offrir des zones d'ombre à l'intérieur de l'édifice. Cette façade s'adapte donc en fonction des conditions climatiques et en fonction des habitudes des utilisateurs en fournissant une lumière du jour optimale et un espace intérieur avec une luminosité confortable.

**(Figure 14) Al Bahar Tower of Adeas Architects, Abu d'Abi (2012).** Ce projet possède une double peau avec un motif hexagonal qui fait office de système d'ombrage également. Ce motif est composé de panneaux triangulaires qui réagissent, changent de position et tournent en fonction de la position du soleil et de l'inclinaison de ses rayons. Ce système a été conçu en utilisant une description paramétrique de la géométrie des panneaux de façade actionnés qui a permis de simuler leur fonctionnement en réponse à l'exposition au soleil. On estime que cette façade réduit de 50% les apports solaires et permet de réduire les besoins énergétiques relatifs à la climatisation à l'intérieur de la tour.

**(Figure 15) Pavillon, Yeosu-Si of SOMA Lima, South Korea (2012).** Sa façade est constituée de lamelles de polymères renforcés de fibres de verre pouvant être transformées en un certain nombre de motifs animés. L'intégration des lamelles mobiles dans la peau du bâtiment a été inspirée par le mécanisme biologique de mouvement.



*Figure 13 : Kolding Campus University of Henning Larsen Architects, Southern Denmark (2014)*



*Figure 14 : Al Bahar Tower of Adeas Architects, Abu d'Abi (2012)*



*Figure 15 : Pavillon, Yeosu-Si of SOMA Lima, South Korea (2012)*

Les exemples ci-dessus (*Figures, 13, 14, 15*) nous montrent qu'il est possible de mettre en place une architecture paramétrique et d'envisager la déformation d'un mur, ou dans le cas présent d'une façade, dans un processus d'optimisation. Dans ces différents projets, l'outil paramétrique est utilisé pour observer l'impact de la déformation de la façade sur différents facteurs internes au bâtiment tels que la lumière ou la température par exemple. Dans le cas de ce travail de recherche, nous pourrons envisager de procéder de manière similaire en observant l'impact de la déformation du mur de notre modèle sur la réflexion du son qui se propage à l'intérieur de l'espace créé. Cette idée d'adaptation et de déformation d'une surface murale a nourri ce mémoire dans le sens où le modèle créé pour effectuer la phase d'expérimentation a été pensé comme un modèle de salle déformable où la forme des murs modélisés va varier selon certains paramètres pour lesquels nous chercherons à déterminer des valeurs optimales.

### iii. Applications acoustiques de l'architecture paramétrique

Après avoir vu comment l'outil paramétrique peut intervenir dans la déformation d'un mur, il s'agit à présent d'observer comment il peut être mis en relation avec l'architecture et surtout comment il se mêle de façon plus précise au domaine de l'acoustique. Dans cette partie nous évoquerons deux travaux pouvant influencer à la fois l'approche de la problématique soulevée précédemment et l'élaboration du protocole de la phase expérimentale qui va suivre.

D'une part, l'article : « *From digital design to physical model - Origami techniques applied to dynamic paneling shapes for acoustic performance control* »<sup>17</sup>, publié en 2017, présente une étude qui met en évidence de récentes recherches en architecture sur la conception de structures adaptatives dans un objectif d'optimisation acoustique. Au cours de cette étude, une expérience fondée sur le principe de pliage origamique est mise en place dans le but de créer un plafond déformable et adaptatif qui peut en se pliant et en se dépliant proposer une surface avec différentes propriétés sonores. De fait, dans l'origami traditionnel, les plis déterminent la forme et constituent l'essence même de la transformation au fil du temps en liant la 2D et la 3D. Chaque pli avec sa répétitivité et sa réversibilité éventuelle devient une partie de la structure de la forme qui a été définie au cours de son processus de transformation. Nous pourrons réutiliser cette notion de déformation à la manière d'un pliage origamique lorsque nous commencerons à réfléchir à la conception du modèle expérimental manipulé dans la suite de ce mémoire.

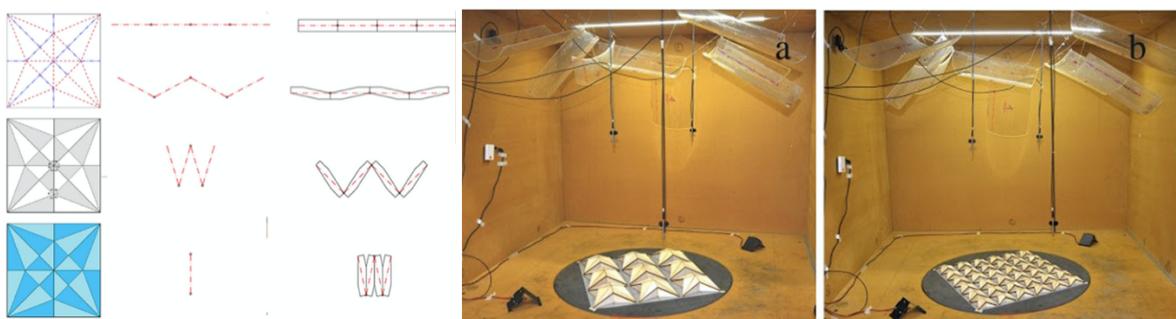
Par ailleurs, cet article pointe le fait que : « L'un des aspects les plus inexploré de la conception architecturale est la composante acoustique. La recherche autour du son et de tous les aspects connexes est toujours en cours et le manque d'outils, tant pour la conception que pour les tests complique la vie du concepteur. »<sup>18</sup> Or aujourd'hui, les outils paramétriques dont nous disposons peuvent justement permettre d'enrichir cette recherche. En effet, lorsque l'on utilise une modélisation paramétrique ou algorithme, on peut sans choisir directement la forme d'un modèle, établir un processus de recherche de forme que le logiciel paramétrique

---

<sup>17</sup> « *From digital design to physical model - Origami techniques applied to dynamic paneling shapes for acoustic performance control* » by Lo Turco, Massimiliano, Zich, Ursula, Astolfi, Arianna, Shtrepi, Louena and Botto, Poaola, Matteo, published in 2017. Extract from Fioravanti, A, Cursi, S, Elahmar, S, Gargaro, S, Loffreda, G, Novembri, G, Trento, A (eds.), *Sharing Computational Knowledge - Proceedings of the 35th eCAADe Conference - Volume 2*, Sapienza University of Rome, Rome, Italy, 20-22 September 2017, pp. 77-86

<sup>18</sup> Citation traduite en français de l'article évoqué précédemment.

va suivre pour déterminer lui-même une forme optimale selon les critères établis. Dans le cas de l'étude présentée dans cet article, l'utilisation d'un algorithme a par exemple permis d'assurer la gestion mathématique appliquée à chaque point du mouvement, en plus de la représentation graphique de l'entité géométrique et de son animation. Cet algorithme, conçu à partir du logiciel Grasshopper<sup>19</sup>, a permis aux chercheurs de retenir un motif de déformation. Construit en bois pour éviter une trop forte absorption des ondes sonores, ce motif a finalement été produit sur des maquettes réelles afin d'être analysé et permettra de conclure sur son efficacité (*Figure 16*).



*Figure 16 : Représentation du motif retenu et des maquettes créées à partir de celui-ci*

Cette publication nous permet d'entamer une première réflexion sur la déformation d'un mur via le principe de pliage origamique. Elle nous amène à nous interroger sur le motif de déformation que nous allons mettre en place lors de la transformation du mur effectuée dans la partie expérimentale de ce mémoire ainsi que sur la modélisation de cette transformation. Dans ce document, on peut en effet trouver des bribes d'algorithme générateur du modèle conçu à partir de Grasshopper mais rien de suffisamment détaillé pour être repris directement dans notre cas. Ainsi, sans nous aider concrètement dans la conception de l'algorithme de notre modèle expérimental, ce document nous donne potentiellement une piste d'outil paramétrique à utiliser. Enfin, au vu des moyens mis en place par les personnes ayant réalisé cette étude pour pouvoir analyser le modèle créé, il semble plus réaliste et raisonnable pour nous d'envisager une analyse numérique et une modélisation virtuelle du modèle sans construction de maquette.

---

<sup>19</sup> Grasshopper est un logiciel de programmation paramétrique présenté dans la partie expérimentale de ce mémoire à la page 43. Il permet la génération de modèles en 2D ou 3D via l'édition d'algorithmes. À titre d'exemple, on retrouve à droite de la *Figure 12* située page 32 de ce mémoire, un algorithme créé à partir de ce logiciel.

D'autre part, l'article : « *Parametric Propagation of Acoustical Absorbers* »<sup>20</sup> s'intéresse lui, à une conception morphogénétique<sup>21</sup> axée sur des performances visant à améliorer les conditions de l'acoustique d'une salle. Ce travail de recherche propose une réflexion autour d'un système générateur de forme automatique permettant de créer un plafond acoustique modulaire basé sur des Résonateurs de Helmholtz. Sans entrer précisément dans la définition des Résonateurs d'Helmholtz ni dans celle de leur principe, nous pouvons retenir de cette étude que l'objectif est, non seulement, de travailler sur l'élaboration d'un algorithme permettant de créer une forme de plafond, mais également de donner à cet algorithme la possibilité de faire évoluer la forme qu'il génère afin d'affiner sa conception en fonction de certains critères. Ainsi, au cours du processus de conception mis en place lors de cette étude, les chercheurs introduisent ce qu'ils appellent une « phase de génération géométrique performative » qui est une phase du processus où l'objectif est de déterminer la position et les dimensions des Résonateurs de Helmholtz qui correspondent aux meilleures performances et donc à une forme de plafond optimale.

Malgré le fait que cet article présente une étude menée autour du phénomène d'absorption que nous ne traiterons pas dans ce mémoire, il permet d'engager une réflexion sur l'optimisation et la recherche de solutions performantes. En effet, la méthode proposée, qui consiste à concevoir un algorithme à la fois créateur et optimisateur de forme est intéressante et pourrait être appliquée à notre cas. Il s'agira alors dans la phase expérimentale de notre travail, d'étudier les différents outils paramétriques dont nous disposons afin de déterminer comment ils peuvent permettre de mener une étude similaire. Par ailleurs, cette réflexion sur la génération de solutions optimales, nous amène à nous interroger sur les critères à mettre en place lors de l'optimisation de notre modèle expérimental. Nous devrons également nous questionner sur les paramètres qui vont intervenir dans ce modèle de salle virtuelle ainsi que sur les variables à créer pour permettre aux murs de cette salle de se déformer.

Ainsi, de façon générale, on constate que de nombreuses recherches ont déjà été portées sur la déformation de surfaces, de façades, de murs en se basant sur des objectifs acoustiques précis et que la notion de performance ou d'optimisation a, elle aussi, suscité

---

<sup>20</sup> *Parametric Propagation of Acoustical Absorbers*" by Banda Pablo, published in 2010.

Extract from ACADIA 10: LIFE information, On Responsive Information and Variations in Architecture [Proceedings of the 30th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-1-4507-3471-4] New York 21-24 October, 2010), pp. 313-319.

<sup>21</sup> Conception morphogénétique : conception d'une forme qui se construit d'elle-même.

beaucoup d'intérêt au cours des dernières années. Les travaux évoqués ci-dessus m'ont permis d'avoir une première approche de l'outil paramétrique, du modèle paramétrique et de la manière dont ils peuvent être utilisés dans le domaine de l'acoustique. Ces lectures ont également orienté ma recherche vers la création d'un modèle qui, à travers la modification des paramètres qui le compose, aura vocation à être optimisé via une modification de sa forme. Dans la phase suivante de ce mémoire, il s'agira de concrétiser de façon expérimentale les différentes idées et hypothèses évoquées dans cette première partie.



### **3. EXPÉRIMENTATION**

---

### **3. Expérimentation : élaboration d'un outil d'optimisation**

#### a. Présentation des logiciels et extensions de logiciels

##### i. Le logiciel de modélisation

D'un point de vue pratique, nous avons vu précédemment qu'il serait plus commode d'envisager la création d'un terrain d'étude virtuel. Il s'agit donc de trouver le logiciel adéquat qui nous permettra non seulement de modéliser un modèle en 2D ou en 3D, mais également de nous donner la possibilité de rendre ce modèle paramétrique et donc variable.

Rhinocéros 3D appelé aussi Rhino 3D ou tout simplement Rhino semble être un outil privilégié pour ce genre de modélisation. Ce logiciel de CAO est aujourd'hui couramment utilisé au service de l'architecture, du prototypage, de l'ingénierie, de la joaillerie, mais aussi du dessin industriel et du graphisme dans des domaines tels que l'industrie navale ou automobile. Rhinocéros 3D est constitué d'une grande diversité d'outils de modélisation 3D qui permettent à l'utilisateur de créer des formes complexes avec une grande précision et beaucoup de détails à partir de différents supports : dessins, esquisses et même scans 3D. Basé sur la modélisation libre, permise grâce à l'utilisation de NURBS<sup>22</sup>, il propose à l'utilisateur un travail à partir de courbes ou de formules mathématiques capables de décrire avec précision une forme en 3D.

Au cours de ce travail de recherche, nous utiliserons la dernière version de Rhino existant à ce jour, la version 6, qui possède une grande diversité de modules d'extension disponibles sur le site « food4rhino ». Aussi appelé plug-ins<sup>23</sup>, ces modules permettent d'ajouter des outils plus spécifiques à la palette déjà existante du logiciel. Nous retiendrons notamment le module d'extension Grasshopper<sup>24</sup>, décrit dans la suite de ce mémoire et très intéressant puisqu'il offre la possibilité de travailler une programmation paramétrique.

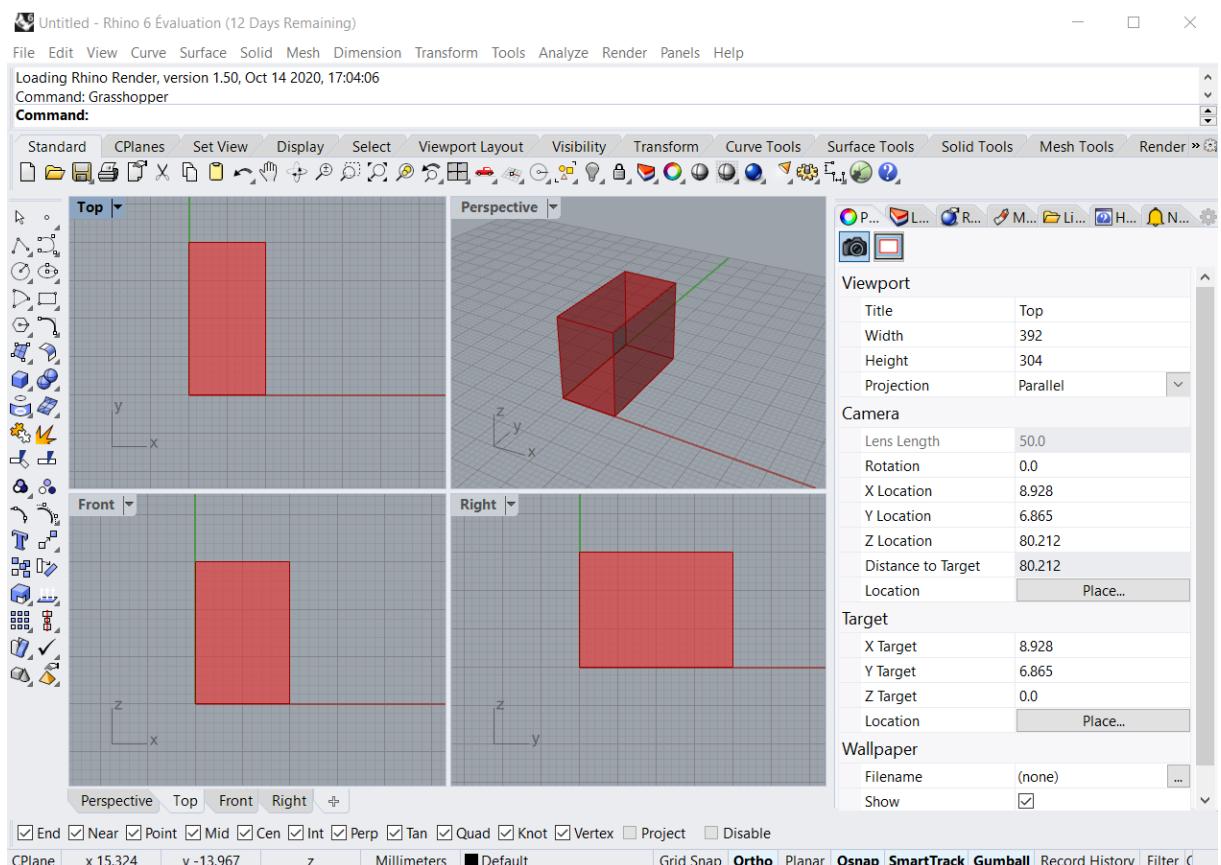
---

<sup>22</sup> NURBS : Non-Uniform Rational Basis Splines. Une courbe NURBS est une courbe définie par quatre données : le degré, les points de contrôle, les nœuds et une règle d'évaluation. Une définition plus détaillée de ces 4 données est disponible dans le glossaire situé à la fin de ce mémoire.

<sup>23</sup> Plug-in : outil composé d'un ensemble de fichiers informatiques et qui permet d'installer des nouvelles fonctionnalités en marge d'un logiciel auquel il est rattaché. On parlera parfois de module d'extension ou de plugiciel pour le désigner.

<sup>24</sup> Grasshopper est un logiciel de programmation paramétrique présenté à la page 43.

La Figure 17 permet de se rendre compte de l'interface de travail que propose le logiciel Rhino 6. Sur cette interface, on dispose de 4 vues différentes et visibles simultanément : une vue en 3D, une vue en 2D selon le plan XY, une vue en 2D selon le plan YZ et une vue en 2D selon le plan XZ. Cet ensemble permet à l'utilisateur de prendre conscience du modèle créé dans sa globalité. Les outils les plus courants proposés par ce logiciel se retrouvent sur les bandes haute et latérale de la fenêtre. Rhino propose également une bande de « Command<sup>25</sup> » où il est possible de faire appel à la totalité des outils disponibles sur ce logiciel. Cette bande nous sera notamment très utile dans la recherche et l'utilisation des différents plug-ins évoqués dans la suite de ce mémoire : Grasshopper<sup>26</sup>, Galápagos<sup>27</sup> et Pachyderm<sup>28</sup>.



*Figure 17 : Fenêtre de travail de Rhinocéros lors de la création d'un volume parallélépipédique*

<sup>25</sup> « Command », le logiciel Rhino a été utilisé dans sa version anglaise, ce qui explique l'apparition potentielle de termes anglophones à la fois dans le texte et dans l'illustration relative à sa présentation.

<sup>26</sup> Grasshopper est un logiciel de programmation paramétrique présenté à la page 43.

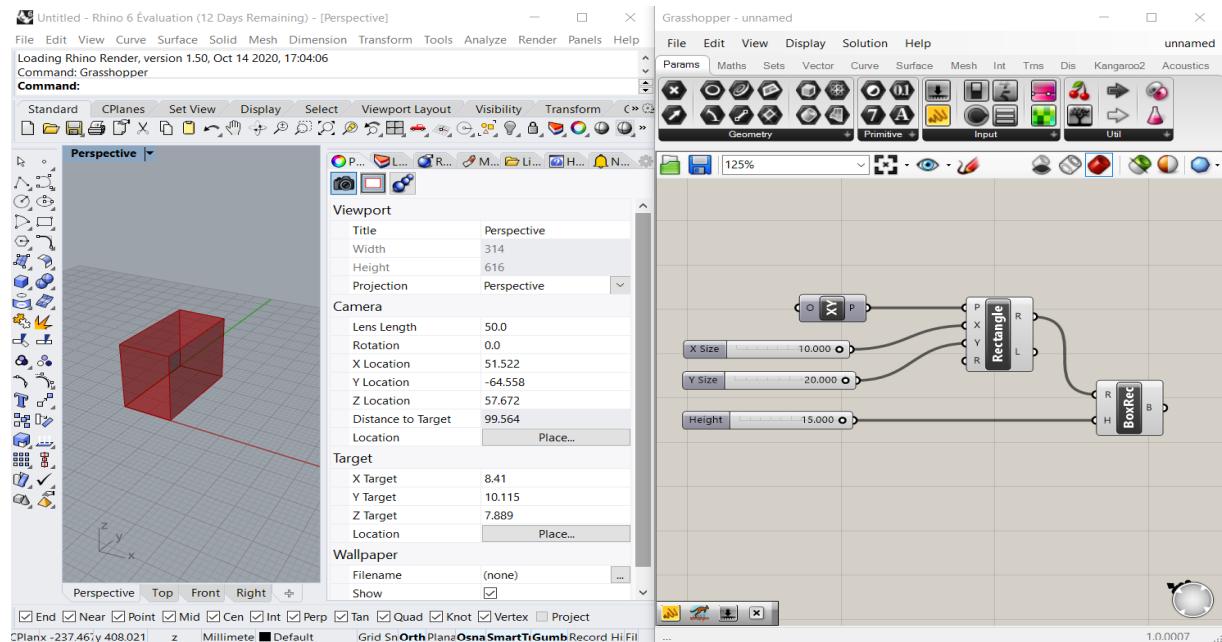
<sup>27</sup> Galápagos est un plug-in d'optimisation présenté à la page 45.

<sup>28</sup> Pachyderm est un plug-in d'analyse présenté à la page 47.

## ii. Le logiciel de programmation paramétrique

L'aspect paramétrique de cette expérience est essentiel puisqu'il doit nous offrir la possibilité de faire varier la forme du modèle en fonction de paramètres bien précis. D'après les recherches effectuées précédemment, l'utilisation du logiciel de programmation paramétrique Grasshopper, doit nous permettre de créer un modèle expérimental comportant cet aspect.

Cet éditeur d'algorithme est un logiciel qui a été directement intégré à la dernière version de Rhinocéros 3D, la version 6. Aujourd'hui, Grasshopper se présente donc comme un module d'extension de Rhino 6 et peut s'utiliser directement à travers cet outil de modélisation. La combinaison de ces deux logiciels permet donc une modélisation paramétrique interactive où nous allons pouvoir éditer l'algorithme paramétrique du modèle sur la fenêtre de Grasshopper (*Figure 18*) et visualiser la modélisation qui en résulte sur la fenêtre de Rhino. Grâce à l'interaction des deux logiciels, on peut également procéder de façon inverse et dessiner des formes sur Rhino pour les introduire dans l'algorithme paramétrique de Grasshopper. Au cours de ce travail de recherche, nous travaillerons de la première façon, en utilisant Rhino simplement comme un outil de visualisation et en construisant le modèle expérimental à l'aide d'un algorithme sur Grasshopper.



*Figure 18 : Combinaison des fenêtres de travail de Rhino et Grasshopper*

La Figure 18 représente un modèle d'algorithme paramétrique relativement simple conçu sur Grasshopper (sur la droite) qui est à l'origine de la modélisation d'un volume parallélépipédique visualisable sur Rhino (sur la gauche). Dans cet algorithme on distingue bien les variables d'entrées qui contrôlent la forme du modèle (plan XY, X Size, Y Size et Height), les éléments intermédiaires (Rectangle) et la géométrie finale (BoxRec) (Figure 19).

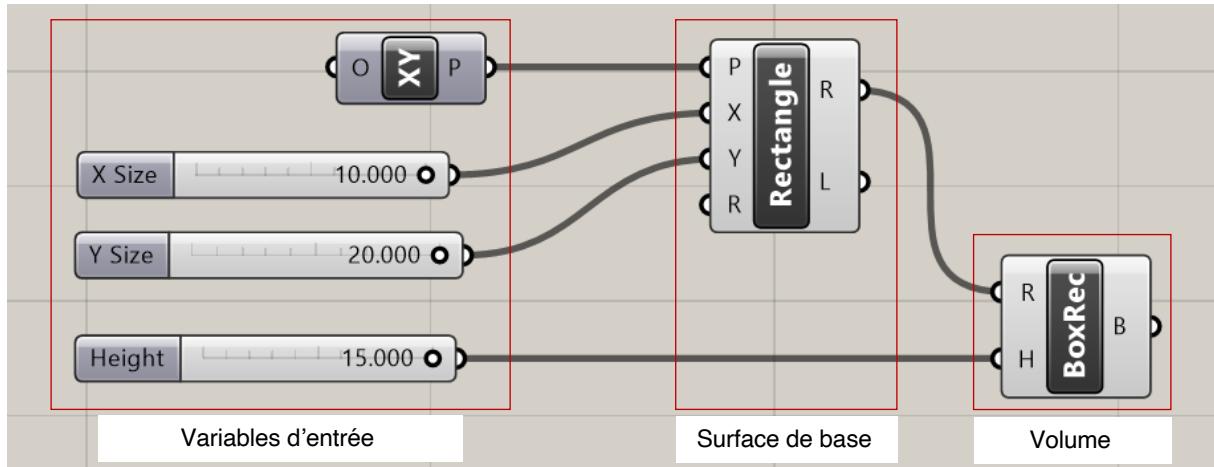


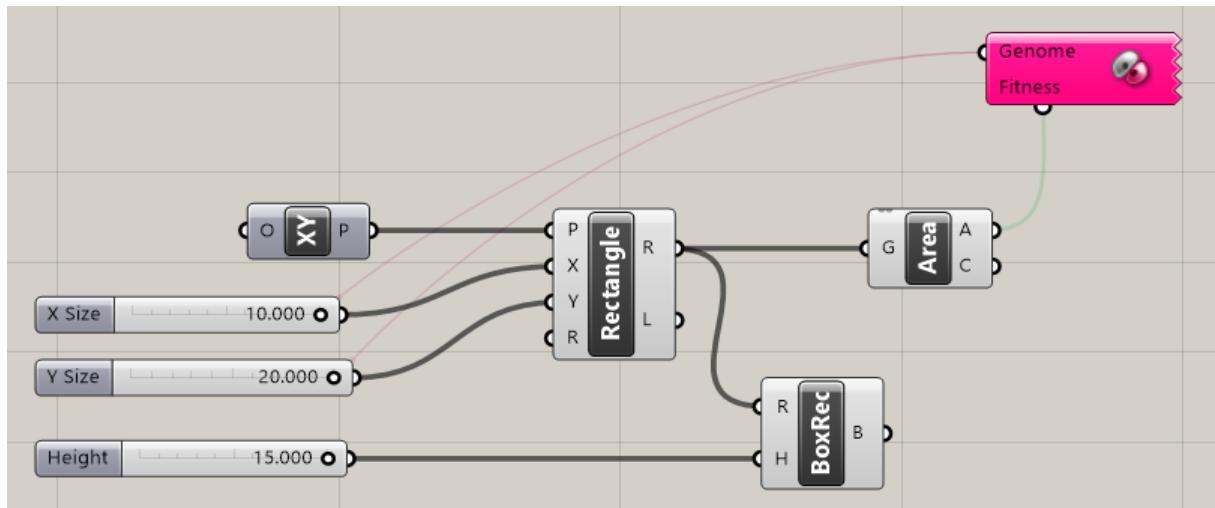
Figure 19 : Détail d'un algorithme générateur d'un volume parallélépipédique

D'autre part, Grasshopper ne nécessite pas de connaissances préalables sur la programmation ou le langage programmatique, et pourtant il permet aux concepteurs de générer un large éventail de conceptions non standards et interactives. C'est un outil unique dans le monde du design et de la CAO, qui a révolutionné la façon de « penser » les projets, d'interagir et de produire. Concrètement, l'interface de Grasshopper ressemble à un schéma logique, où chaque composant possède des entrées et des sorties. L'utilisateur va pouvoir connecter les composants entre eux et ainsi créer l'algorithme comme un enchainement continu, où la sortie d'un composant devient l'entrée d'un autre. Ce schéma va permettre d'effectuer des modifications successives de données de base, renseignées à l'origine de l'algorithme, jusqu'à ce que la définition de la forme du projet soit complète. L'avantage de ce schéma où tous les composants sont liés entre eux est qu'une fois que la relation est définie entre les composants, en changeant un paramètre bien précis, on entraîne le recalcul et le redimensionnement de la solution et donc de la forme finale. En somme, Grasshopper permet de recalculer en permanence la totalité de l'algorithme du modèle et affiche le résultat en temps réel dans la fenêtre Rhino associée. Ainsi, dans un modèle paramétrique ce n'est finalement plus la géométrie que nous construisons réellement, mais une relation d'interdépendance entre différents éléments, qui génère une forme.

### iii. Le plug-in d'optimisation

Dans ce travail de recherche, l'optimisation de notre modèle est au cœur de la problématique. En effet, il s'agit de montrer de quelle manière un outil paramétrique permet d'aider l'architecte à optimiser un espace acoustiquement parlant. De fait, puisque Rhino et Grasshopper ne constituent pas des logiciels d'optimisation à proprement parler, nous utiliserons le plug-in Galápagos pour réaliser cette phase particulière de l'expérimentation.

Ce module d'extension est aujourd'hui intégré à Grasshopper et, par conséquent, intégré également à la version 6 de Rhino. En tant que module de design génératif, il permet de créer un algorithme génétique qui s'inspire de la nature pour faire évoluer les paramètres d'un problème et optimiser un modèle. D'un point de vue de l'utilisation, Galápagos se manipule dans Grasshopper comme un composant classique et possède ainsi deux données d'entrée : le « Génome »<sup>29</sup> et la « fonction Fitness »<sup>30</sup>. A travers l'illustration suivante (*Figure 20*), nous pouvons visualiser son insertion au sein de l'algorithme précédemment présenté.

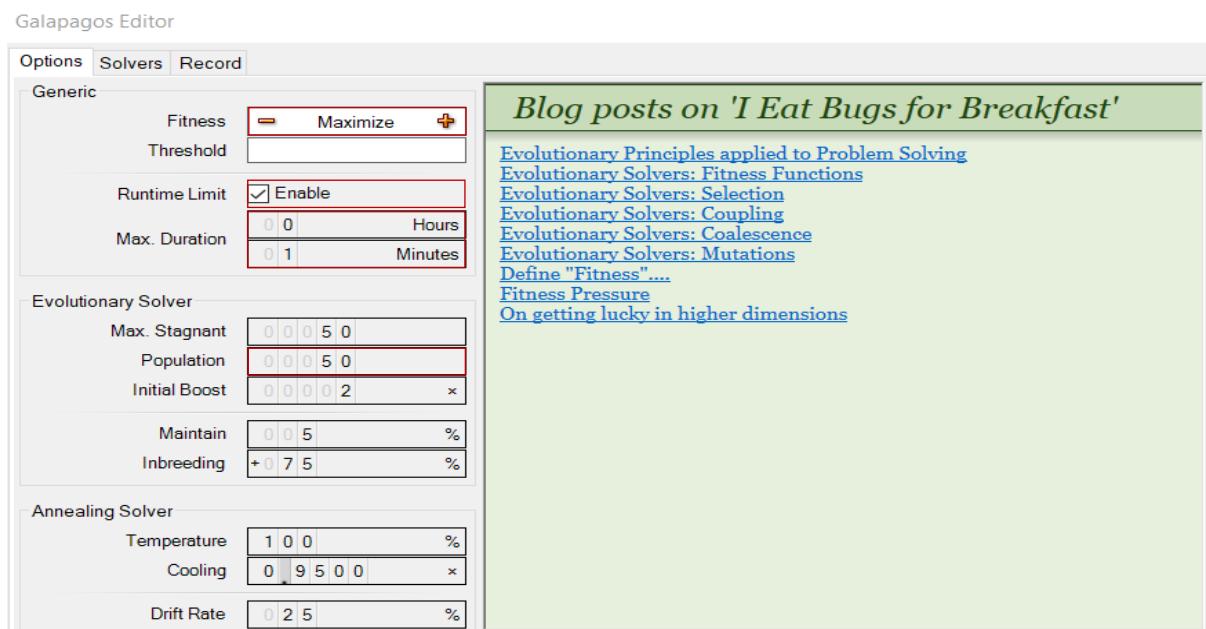


*Figure 20 : Détail d'un algorithme générateur d'un volume parallélépipédique avec introduction Galápagos en tant qu'élément dans l'algorithme*

<sup>29</sup> Génome : En biologie, le « génome » est l'ensemble des chromosomes et gènes d'une espèce ou d'un individu. L'utilisation de ce terme par Galápagos n'est donc pas anodine. En effet, dans le cadre de ce travail de recherche, le génome constituera l'ensemble des paramètres à faire varier lors de la phase d'optimisation. Ces paramètres définiront donc chaque modèle testé lors de cette optimisation et pourront être assimilés au patrimoine génétique de ces différents modèles.

<sup>30</sup> Fonction Fitness : Le terme « Fitness » en anglais peut être relier à celui d'aptitude. En effet, la Fonction Fitness utilisé dans Galápagos correspond au paramètre que l'on va suivre lors de l'optimisation et qui va nous permettre d'affiner notre sélection afin de déterminer quel modèle est le plus optimal soit le plus apte à répondre à nos critères.

Ainsi, le « Génome » correspond à l'ensemble des paramètres à faire varier dans la recherche d'optimisation du modèle et la « fonction Fitness », elle, correspond à la variable cible que l'on va chercher à minimiser ou à maximiser lors de cette optimisation. Dans l'exemple ci-dessus (*Figure 20*), nous pourrons chercher à maximiser l'aire du rectangle créé (« Area ») en faisant varier la taille de ce rectangle entre 0 et 10 selon l'axe X (« X Size ») et entre 0 et 20 selon l'axe Y (Y « Size »). Une fois que le Génome et la fonction Fitness sont déterminés, nous pourrons ouvrir la fenêtre de travail<sup>31</sup> de Galápagos et programmer l'optimisation du modèle. Pour ce faire, nous commencerons par déterminer les caractéristiques de notre optimisation à travers l'onglet « Option » de Galápagos (*Figure 21*). Au cours cette étude, nous porterons notre attention uniquement sur les caractéristiques suivantes<sup>32</sup> : « Fitness » où l'on mentionnera notre volonté de maximiser ou de minimiser la fonction Fitness, « Runtime Limite »<sup>33</sup> où l'on précisera si l'on souhaite appliquer un temps limité à cette phase d'optimisation, « Max. Duration » où l'on renseignera la durée limite que l'on souhaite accorder à Galápagos pour réaliser l'optimisation et enfin « Population » où l'on ajoutera le nombre d'individus, soit le nombre de propositions de modèles différents que l'on souhaite créer à chaque étape de l'optimisation.



*Figure 21 : Fenêtre de travail de Galápagos, onglet « Option » permettant de régler les caractéristiques de l'optimisation avant son lancement*

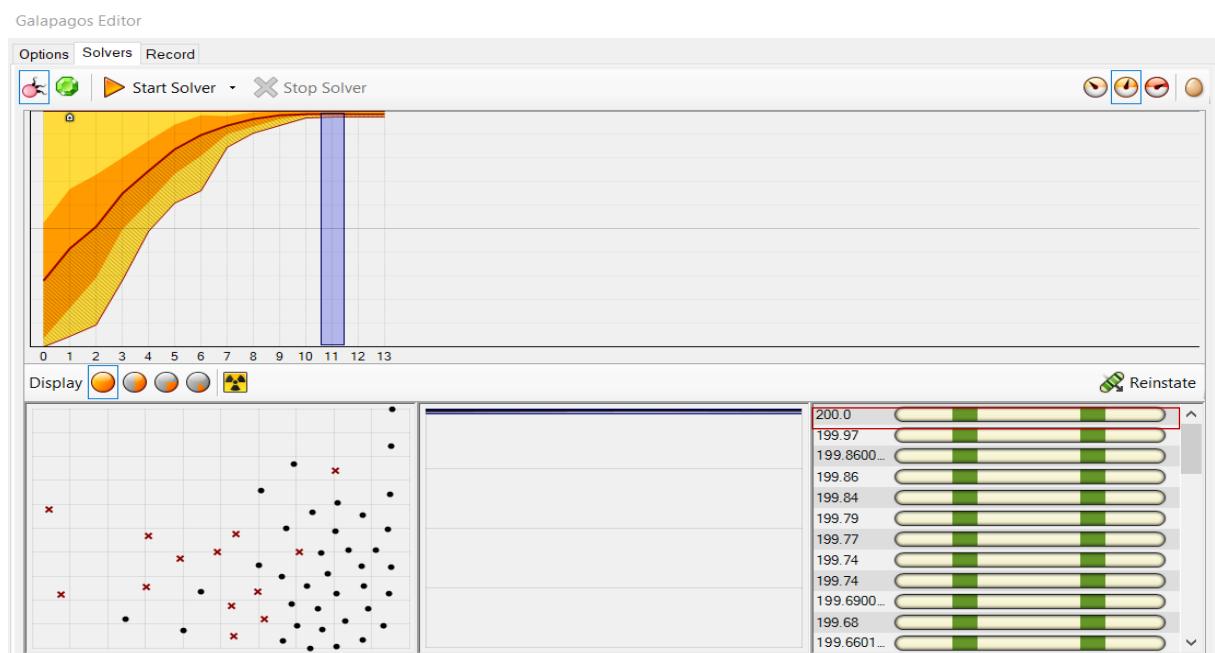
<sup>31</sup> L'ouverture de cette fenêtre de travail se fera en double-cliquant sur l'élément coloré représentant Galápagos.

<sup>32</sup> Caractéristiques encadrées en rouge dans la *Figure 21*.

<sup>33</sup> L'ensemble des caractéristiques de l'optimisation citées dans ce paragraphe sont en anglais puisque c'est dans sa version anglaise que Galápagos a été utilisé au cours de ce travail de recherche.

Après avoir déterminé les caractéristiques nécessaires au lancement de l'optimisation, nous utiliserons l'onglet « Solver » (*Figure 22*) de Galápagos qui nous permettra de suivre cette phase ainsi que les différents résultats qui en découlent.

Concrètement, lors de la phase d'optimisation, Galápagos va créer, à partir du « Génome » et du nombre renseigné dans la rubrique « population », un nombre donné d'individus qui constituera une population, la population de la génération 1. A titre d'exemple, dans le cas présenté ci-dessus (*Figure 20*), on parlera d'individus pour désigner les différents rectangles créés à partir du Génome (X Size ; Y Size), soit des rectangles qui auront une dimension selon X comprise entre 0 et 10 et une dimension selon Y comprise entre 0 et 20. Sur toute la durée choisie pour cette phase d'optimisation, de nouvelles générations vont être créées les unes après les autres par Galápagos. Dans chaque génération, chaque individu (chaque rectangle) va être évalué selon la fonction Fitness (l'aire du rectangle) et les caractéristiques de l'optimisation choisie précédemment (maximiser la fonction Fitness soit maximiser l'aire du rectangle) de façon à déterminer quels sont les Génomes (X Size ; Y Size) les plus optimaux et de les classer du plus optimal ou moins optimal. Ci-dessous, on remarque que la solution optimale retient une aire de rectangle égale à 200 ; elle correspond au rectangle de dimension 10x20 considéré donc dans notre exemple comme le modèle optimal.



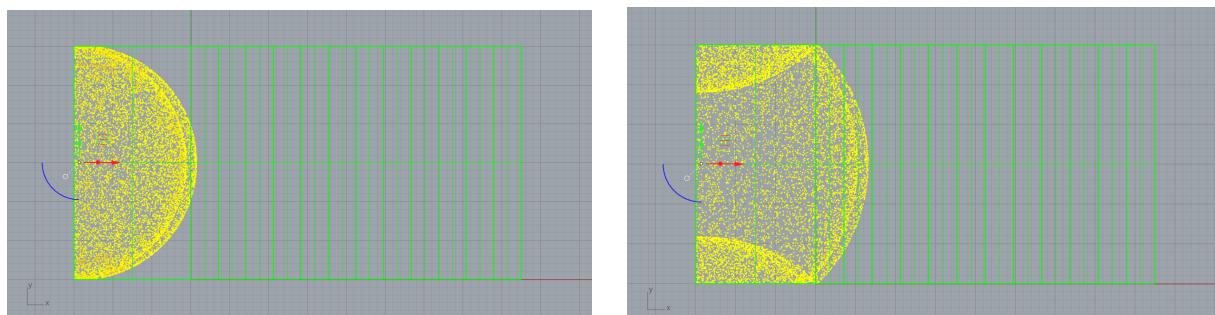
*Figure 22 : Fenêtre de travail de Galápagos, onglet « Solver » permettant de suivre les résultats de l'optimisation* <sup>34</sup>

<sup>34</sup> Sur cette figure, nous remarquons la présence de l'onglet « Record », non utilisé dans ce mémoire.

#### iv. Les plug-ins d'analyse

Après avoir déterminé la ou les solutions optimales, nous pourrons en proposer une analyse acoustique à l'aide du plug-in Pachyderm<sup>35</sup> qui, au même titre que Grasshopper, est un module d'extension de Rhino.

Ce module d'extension est largement utilisé par les concepteurs et les scientifiques pour simuler l'acoustique dans des espaces fermés ou des espaces extérieurs tels que les bâtiments, les villes et autres environnements. Il se compose d'une collection d'outils de simulation acoustique : PachyDerm Auralisation, Custom Maps, Hybrid Models, Mapping Method, TimeDomain Models, ou encore PachyDerm Particle Animation qui peuvent être utilisés pour étudier à la fois qualitativement et quantitativement les espaces conçus. Par ailleurs, comme nous l'avons précisé précédemment, nous ne traitons au cours de notre étude ni le phénomène d'absorption, ni le choix des matériaux recouvrant les parois de la salle modélisée. Or ces données sont nécessaires pour effectuer une étude acoustique quantitative approfondie proposée par la majorité des outils mis à disposition dans Pachyderm. Parmi l'ensemble de ces outils, nous en sélectionnerons donc un : PachyDerm Particle Animation qui nous permettra d'amorcer une analyse acoustique qualitative. En modélisant la propagation de l'onde sonore à l'aide d'un nuage de points tel une propagation de particules, il nous offre la possibilité de visualiser de façon concrète la propagation du son dans le volume créé (*Figure 23*). Avec une telle simulation, nous pourrons juger du caractère homogène ou non de la propagation de l'onde sonore dans l'espace et de sa bonne répartition.



*Figure 23 : Image en plan d'un nuage de particules se propageant dans un volume parallélépipédique*

<sup>35</sup> Ce plug-in est uniquement disponible sur Windows, il est donc impossible en utilisant MacOs de l'utiliser. Cependant il existe un module d'extension similaire appelé Dolphin qui, malgré le fait qu'il soit plus complexe à prendre en main, permet de réaliser plus ou moins le même type d'analyse à la fois sur Windows et sur MacOs.

### b. La mise en place du protocole expérimental

Après avoir présenté et décrit les outils dont nous disposons pour réaliser l'expérience, nous pouvons à présent mettre en place un protocole expérimental bien défini. Pour se faire, il convient dans un premier temps, de rappeler l'ensemble des différentes hypothèses et prises de décision qui ont accompagné l'état de l'art.

Nous avons tout d'abord établi que, parmi tous les phénomènes acoustiques observables lors de la propagation d'une onde sonore dans une salle de spectacle, notre intérêt portera uniquement sur le phénomène de réflexion et plus précisément sur les réflexions premières de cette onde. En effet, nous ne nous attarderons notamment pas sur l'effet d'absorption puisque nous ne traiterons pas la problématique des revêtements muraux, ni sur l'effet de réverbération puisque la salle conçue pour cette partie expérimentale correspondra aux critères décris page 25. Elle sera donc parallélépipédique et de grande dimension. Par ailleurs, cet espace sera divisé en deux zones bien distinctes : l'espace de la scène et l'espace consacré à l'audience. La déformation que nous étudierons sera celle d'un des murs latéraux de l'espace audience. Pour concevoir cette déformation, nous nous inspirerons du modèle du théâtre de Viljandi<sup>36</sup> en considérant la déformation de ce mur construite à la manière d'un pliage origamique avec une surface décomposée en panneaux verticaux de dimensions identiques et inclinés par rapport au plan d'origine du mur.

Suite au rappel de ces différentes hypothèses, il s'agit de déterminer à présent les terrains d'étude sur lesquels nous allons réaliser la recherche de formes optimales. Ces terrains d'étude seront a priori des modélisations en 2D ou en 3D de salles de concert parallélépipédiques dont nous chercherons à faire varier la forme des murs latéraux afin de conclure sur une ou plusieurs solutions optimales. L'enjeu autour de la conception de ces modèles sera de permettre une déformation du modèle selon certains paramètres afin d'obtenir un panel de simulations très large. La construction de ces modèles pourra se faire avec l'association interactive des logiciels Rhinocéros et Grasshopper dans le but de créer un modèle paramétrique.

---

<sup>36</sup> Théâtre de Vijandi évoqué page 27, 28, 29

Au cours de la conception de ces modèles virtuels, nous déterminerons un ensemble de variables réparties en deux catégories. Les premières variables seront fixées au début de l'expérience et resteront inchangées durant tout le processus d'optimisation :

- Dimensions de la salle : largeur, longueur, hauteur
- Dimensions de l'espace scène : largeur, longueur, hauteur
- Dimension de l'espace audience : largeur, longueur, hauteur
- Position de la source émettrice de son
- Position de la surface réceptrice de son, soit la surface de l'audience

Ces données initiales sont concrètement les variables dont dispose l'architecte lorsqu'il entame la phase ESQ<sup>37</sup> du processus de conception de son projet. Ainsi, théoriquement, chaque architecte pourrait utiliser les modèles virtuels créés dans ce travail de recherche en adaptant les valeurs des variables décrites ci-dessus en fonction des caractéristiques de la salle qu'il étudie ou qu'il conçoit<sup>38</sup>. Dans la suite du protocole expérimental, nous serons donc amenés à choisir les valeurs précises que nous souhaitons appliquer à ces variables afin de les fixer pour la durée totale de l'expérience.

La deuxième catégorie de variables se composera de paramètres modifiables et modifiés au cours la phase d'optimisation afin de proposer différentes simulations et de déterminer finalement pour quelles valeurs de ces paramètres le système est optimal (*Figure 24*) :

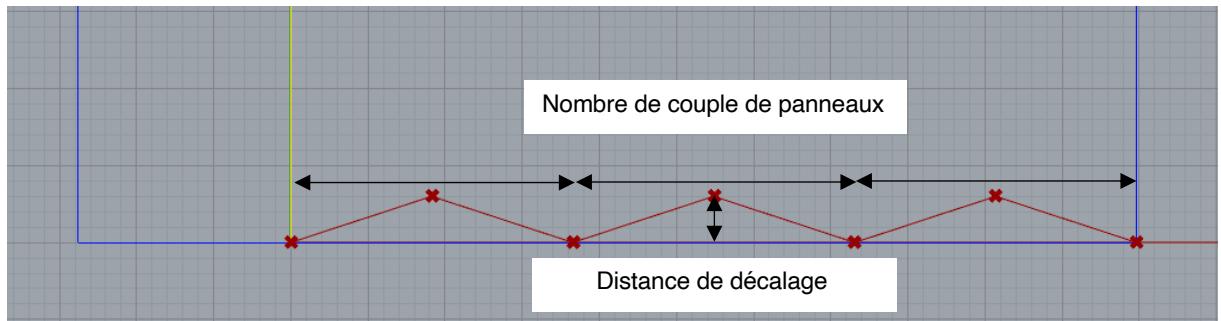
- Le nombre de couple de panneaux verticaux qui divisent le mur,
- La distance de décalage d'une de leurs extrémités par rapport au mur qui entraîne la rotation du panneau et donc son inclinaison.

Ces variables sont en relation directe avec la déformation du mur. Elles ne seront pas déterminées précisément par l'architecte qui utilise ce modèle mais bien par le plug-in d'optimisation. Néanmoins, l'architecte aura la main sur l'intervalle parmi lequel l'outil informatique effectuera sa sélection de valeurs optimales. Rappelons également que les modèles et outils créés dans ce mémoire sont conçus pour aider l'architecte dans sa prise de décision et non choisir à sa place. Aussi, ce dernier gardera toujours la possibilité de ne pas prendre en compte les valeurs suggérées par l'outil informatique s'il considère par exemple qu'elles ne sont pas applicables ou qu'elles ne correspondent pas à son projet.

---

<sup>37</sup> ESQ : la phase esquisse du processus de conception d'un projet d'architecture.

<sup>38</sup> Ceci à condition que la salle étudiée ou conçue par l'architecte soit de forme parallélépipédique.



*Figure 24 : Mise en évidence des paramètres d'optimisation sur le modèle virtuel en 2D*

Après avoir conçu les différents modèles virtuels d'étude, nous pourrons mettre en la phase d'optimisation réalisée à l'aide de l'outil Galápagos. Cette phase s'effectuera en plan à l'aide d'un modèle réalisé en 2D et débutera avec la détermination d'une fonction d'optimisation permettant d'évaluer la réflexion du son au sein du modèle. Cette fonction d'optimisation correspond à la « fonction Fitness »<sup>39</sup> du plug-in Galápagos que l'on cherchera à minimiser ou à maximiser et qui dépendra du « Génome » constitué des deux variables présentées précédemment : le nombre de couple de panneaux et la distance de décalage. Une fois que cette fonction sera établie, nous pourrons finalement lancer Galápagos et observer l'évaluation par ce plug-in des différentes simulations.

Lorsque Galápagos aura déterminé l'ensemble des solutions optimales, nous pourrons proposer une analyse acoustique qualitative de ces solutions à l'aide du plug-in Pachyderm et de l'outil PachyDerm Particle Animation<sup>40</sup>. Dans cette dernière étape de la partie expérimentale il sera alors judicieux de comparer des solutions retenues comme optimales par Galápagos et des solutions considérées comme non optimales afin de pouvoir mesurer, en partie, l'impact de cette optimisation.

De manière générale, il pourrait être intéressant de réaliser ce protocole expérimental plusieurs fois avec différents gabarits de salles afin d'observer si les résultats sont similaires en fonction de la taille de la salle, de la taille de l'espace scène ou de la taille de l'espace audience ou bien si, au contraire, ils divergent.

*(Voir Annexe 1 : Schéma synthétique du protocole d'expérimentation)*

---

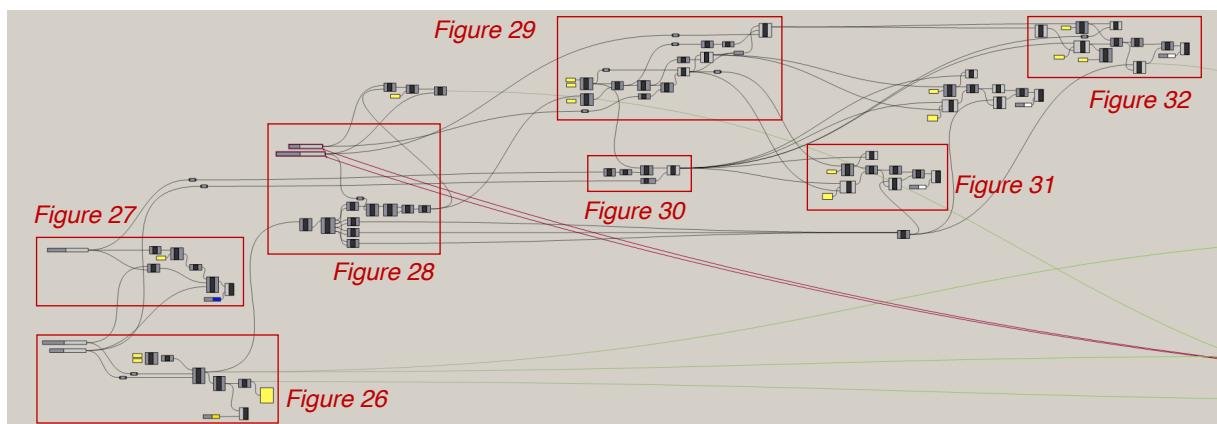
<sup>39</sup> L'utilisation générale de la Fonction fitness au sein du plug-in Galápagos est détaillée page 45, 46, 47. Sa détermination correspondant à notre cas d'étude sera, elle, précisée dans la partie 3.d.i de ce mémoire.

<sup>40</sup> L'utilisation de PachyDerm particule Animation sera explicité dans la partie 3.d.iii de ce mémoire.

### c. La conception des terrains d'étude

#### i. Le modèle paramétrique virtuel 2D

La phase de réalisation du modèle en 2D peut se répartir en trois étapes : tout d'abord la création de la salle, puis celle de la déformation du mur et enfin celle de l'ensemble des tracés qui nous permettront de modéliser la surface recouverte par l'onde sonore réfléchie. La *Figure 25* ci-dessous nous permet de visualiser l'algorithme complet regroupant l'ensemble de ces trois étapes que nous détaillerons, une à une, dans les paragraphes suivants.<sup>41</sup>



*Figure 25 : Algorithme complet correspondant au modèle virtuel en 2D*

Dans un premier temps, il s'agit de modéliser la salle en plan en créant bien deux espaces distincts qui sont, d'une part, la zone associée à l'espace de la scène où sera notamment positionné la source émettrice de son, et d'autre part, la zone correspondant à l'espace de l'audience où sera située la surface réceptrice de son. Cette étape introduira les différentes variables à fixer initialement avant le lancement de l'optimisation du modèle.

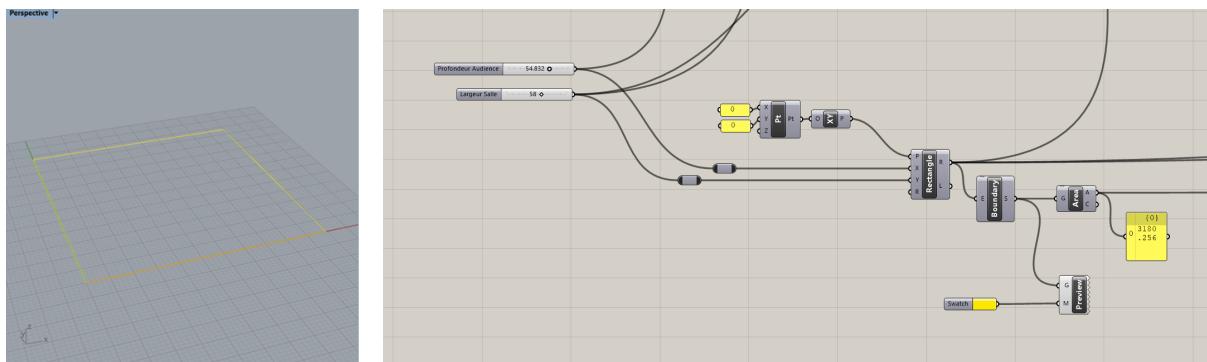
Pour ce faire, nous pouvons commencer par construire le rectangle représentant la zone d'audience en introduisant un rectangle classique sur Grasshopper avec un point d'origine, une largeur dénommée « Largeur Salle »<sup>42</sup> et une longueur dénommée « Profondeur Audience »<sup>43</sup> (*Figure 26*). Afin d'offrir la possibilité à l'architecte d'ajuster ces valeurs avant le lancement de l'optimisation, nous les introduisons dans l'algorithme en tant que « Slider ». Elles disposent donc chacune d'un curseur qu'il sera possible de faire varier au sein d'un

<sup>41</sup> Les paragraphes suivants encadrés correspondent aux détails pratiques de la conception du modèle 2D.

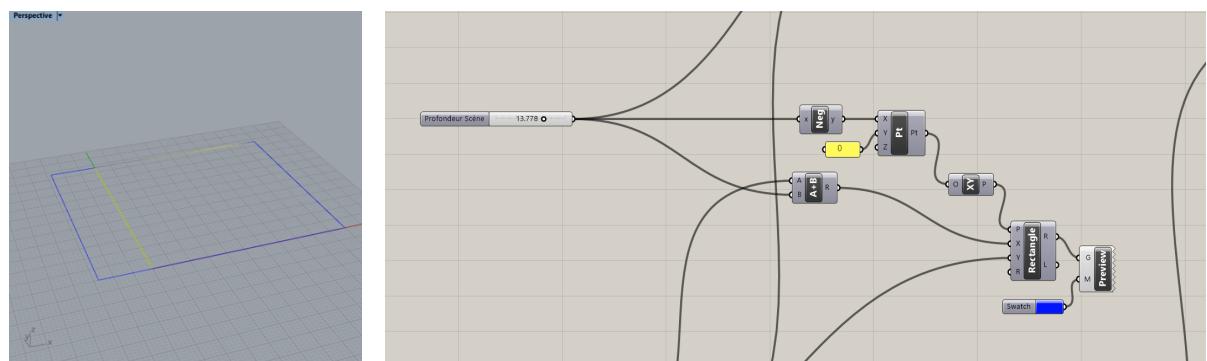
<sup>42</sup> Dénomination visible sur la *Figure 26*.

<sup>43</sup> Idem note précédente.

intervalle choisi par l'architecte. De plus, dans le but de distinguer aisément cet espace audience dans la fenêtre de modélisation, une couleur jaune est appliquée au rectangle correspondant à l'aide de l'outil « Custom Preview »<sup>44</sup>. Nous pouvons ensuite créer un second rectangle représentant la salle étudiée dans sa globalité comprenant à la fois la surface de l'audience et celle de la scène. La profondeur du rectangle de la salle est donc constituée de la somme de la profondeur de l'audience : « Profondeur Audience »<sup>45</sup> et de la profondeur de la scène : « Profondeur Scène »<sup>46</sup>. Repérable en bleu dans la *Figure 27*, ce rectangle possède la même largeur que celui de l'audience puisque nous considérons que celle-ci est répartie sur l'ensemble de la largeur de la salle. Enfin, le point d'origine de ce deuxième rectangle se base sur le même point d'origine que le premier situé dans le plan XY, à la seule différence que sa coordonnée selon l'axe X prend la valeur : - « Profondeur Scène ».



*Figure 26 : Extrait de l'algorithme du modèle virtuel 2D correspondant au tracé de l'espace audience*



*Figure 27 : Extrait de l'algorithme du modèle virtuel 2D correspondant au tracé du périmètre de la salle entière*

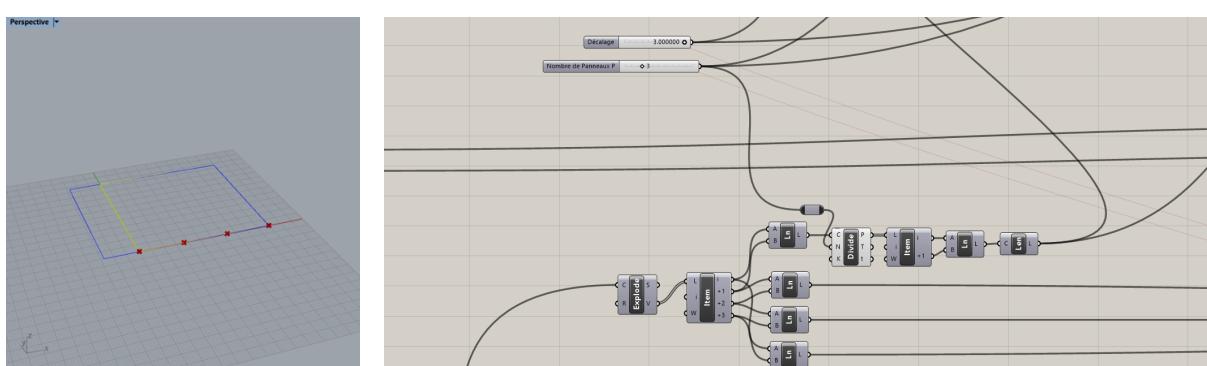
<sup>44</sup> Dénomination visible sur la *Figure 26*.

<sup>45</sup> Idem note précédente.

<sup>46</sup> Dénomination visible sur le *Figure 27*.

Dans un second temps, nous allons mettre en place la déformation du mur étudié en divisant ce dernier en différents panneaux inclinés par rapport à la position d'origine du mur. Cette étape nous permettra d'introduire les paramètres qui seront variables lors de l'optimisation du modèle soit : le nombre de couple de panneaux et la distance de décalage. Notons que dans le cadre de notre étude, la modification du mur ne se fera que dans la zone de l'audience ; dans cette étape, nous travaillerons donc uniquement sur le rectangle jaune.

Pour modéliser cette déformation, le rectangle de l'audience est divisé en quatre lignes différentes parmi lesquelles nous sélectionnons celle correspondant au mur à déformer. Nous procédons ensuite à la division de ce mur via l'élément « Divide »<sup>47</sup> lié au paramètre variable « Nombre de couple de panneaux »<sup>48</sup>. Ce paramètre, comme les variables précédentes, est mis en place avec un « Slider » permettant de choisir une valeur au sein d'un intervalle donné. La ligne représentant le mur se retrouve alors divisée en segments (*Figure 28*). Par ailleurs, comme il a été précisé en amont, nous souhaitons que le mur se déforme à la manière d'un pliage origamique. Nous allons donc faire en sorte que chacun des segments créés se plie en deux de façon à ce que l'arrête du pliage se trouve à l'intérieur de la salle. Afin de modéliser ce pliage, nous déplaçons le milieu de chaque segment perpendiculairement vers l'intérieur de la salle d'une distance appelée « Décalage »<sup>49</sup> (*Figure 29*). Nous pouvons alors tracer deux nouvelles lignes joignant ce point avec les deux extrémités du segment. Ces deux lignes représentent alors les couples de panneaux définitifs composant le mur déformé.

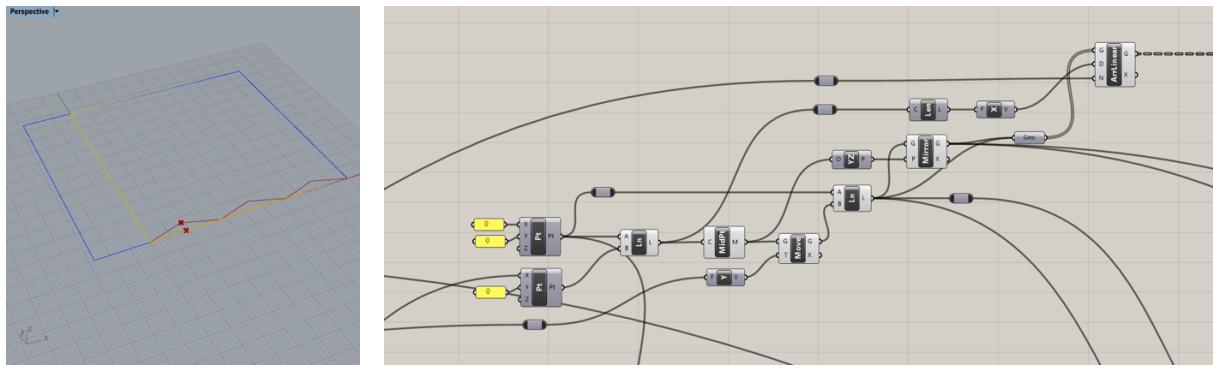


*Figure 28 : Extrait de l'algorithme du modèle virtuel 2D correspondant à la division du mur étudié en différents panneaux*

<sup>47</sup> Dénomination visible sur la *Figure 28*.

<sup>48</sup> Idem note précédente.

<sup>49</sup> Dénomination visible sur la *Figure 29*.



*Figure 29 : Extrait de l'algorithme du modèle virtuel 2D correspondant à la déformation du mur étudié, soit au déplacement des panneaux composant ce mur*

Dans un troisième temps, afin de réaliser le tracé des différentes trajectoires de l'onde sonore réfléchie, nous allons devoir positionner la source émettrice de son dans notre modèle. Ainsi, nous choisirons arbitrairement de la positionner sur le mur du fond de la scène, en son milieu et à hauteur d'homme. Cette position restera fixe durant toute la durée des différentes expériences et modélisations.

Concrètement, afin de positionner le point correspondant à la source émettrice de son, nous décalons le point d'origine du rectangle de la salle, d'une distance équivalente à la moitié de sa largeur pour le placer au milieu du mur situé au fond de la scène (*Figure 30*). A partir de ce point, nous pouvons tracer le parcours de l'onde sonore directe pour ensuite déterminer le cheminement de l'onde sonore réfléchie. Nous traiterons d'une part, le cas des deux premiers panneaux puis nous appliquerons le même processus de modélisation à l'ensemble des panneaux de la salle. De fait, d'après les principes de l'acoustique présentés dans l'état de l'art, le son direct part de la source émettrice de son pour rejoindre les points correspondant aux extrémités de chaque panneau. Dans notre modèle, ces tracés relatifs au son direct sont représentés en rouge (*Figure 31*). Pour ensuite modéliser la trajectoire de l'onde sonore réfléchie, nous construisons tout d'abord les lignes reliant les symétriques du point de la source émettrice son par rapport aux deux premiers panneaux, avec les extrémités de ces panneaux ; puis nous prolongeons ces lignes jusqu'au tracé du rectangle bleu correspondant au périmètre de la salle. Ces tracés sont représentés en blanc dans notre modèle (*Figure 31*). Enfin, il ne nous reste plus qu'à appliquer le même procédé à l'ensemble des panneaux du mur afin de représenter la totalité des rayons de son réfléchi à travers la salle (*Figure 32*).

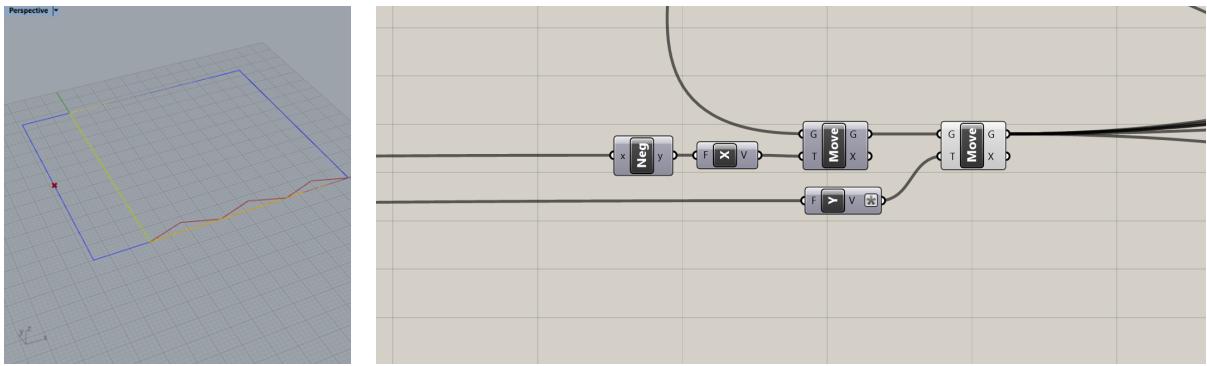


Figure 30 : Extrait de l'algorithme du modèle virtuel 2D correspondant au positionnement de la source émettrice de son

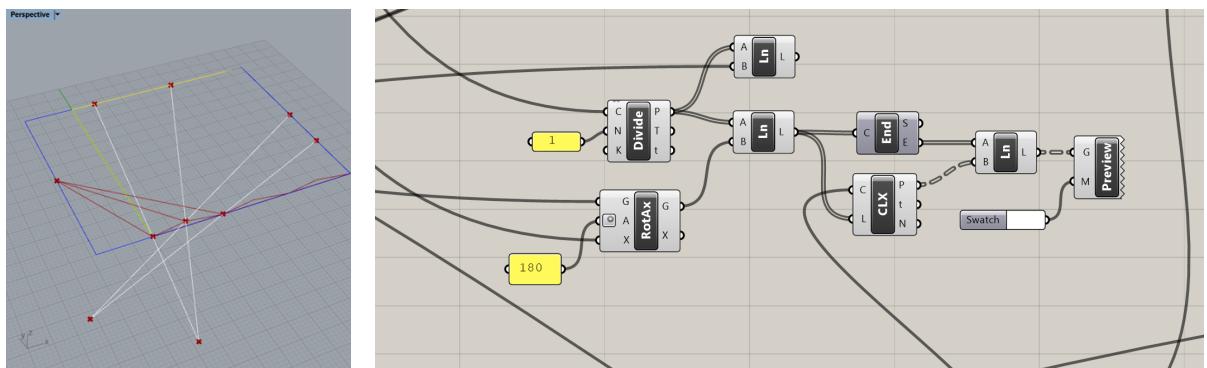


Figure 31 : Extrait de l'algorithme du modèle virtuel 2D correspondant au tracé de la trajectoire du son direct (en rouge) et du son réfléchi (en blanc) des deux premiers panneaux

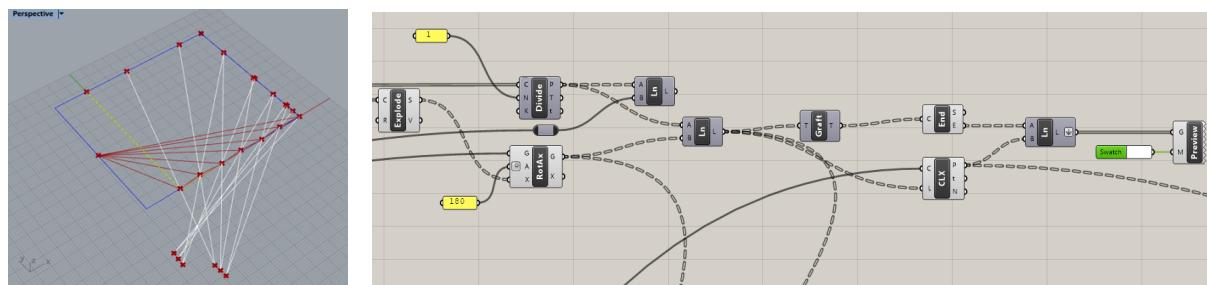


Figure 32 : Extrait de l'algorithme du modèle virtuel 2D correspondant au tracé de la trajectoire du son direct (en rouge) et du son réfléchi (en blanc) de l'ensemble des panneaux

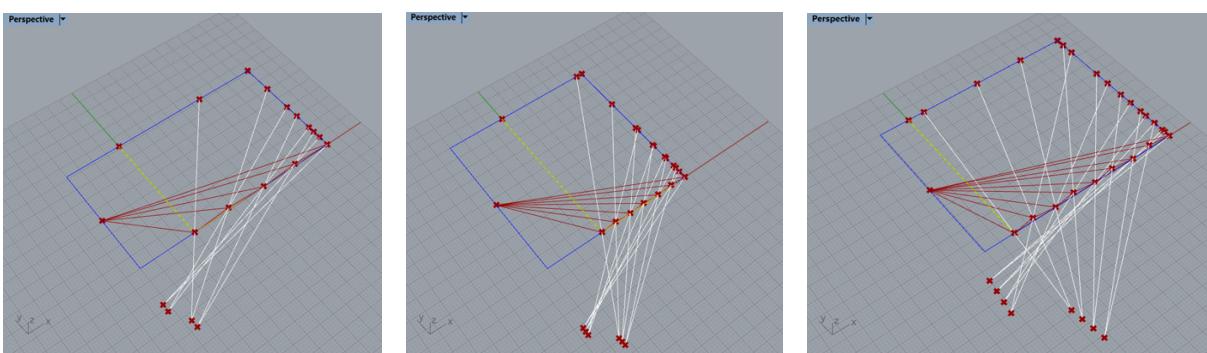


Figure 33 : Exemples de configurations permises par le modèle 2D

## ii. Le modèle paramétrique virtuel 3D

L'algorithme du modèle 2D décrit dans la partie précédente possède un certain nombre de tracés qui ne nous seront d'aucune utilité dans la réalisation de l'analyse effectuée à l'aide du plug-in Pachyderm, pour clôturer notre expérimentation. Ainsi, tout en gardant une organisation interne similaire au modèle 2D, nous allons créer un modèle 3D distinct et simplifié. Dans ce modèle, nous appliquerons la déformation murale de chaque côté de la salle en considérant que la forme optimale du mur obtenue au cours de la phase optimisation est, par symétrie, la même pour le mur opposé. Ce modèle 3D sera donc constitué d'un volume réalisé en trois étapes : la création des murs déformables de l'espace audience, la fermeture de cet espace, et la création de l'espace scène<sup>50</sup>.

Dans un premier temps, il s'agit de recréer au sein de ce modèle 3D le même type de murs que ceux du modèle 2D. L'enjeu est donc de reproduire un système composé de panneaux de dimensions identiques inclinés les uns par rapport aux autres et qui, mis bout à bout, reproduisent une déformation semblable à celle d'un pliage origamique.

Pour ce faire, nous commençons par modéliser un panneau en construisant un rectangle plan (*Figure 34, n°1*). Nous l'inclinons ensuite en décalant l'une de ses extrémités d'une distance de décalage identique à celle utilisée dans le modèle 2D ayant servi pour la phase d'optimisation (*Figure 34, n°2*). Une fois que le panneau est incliné, nous créons alors un deuxième panneau, symétrique au premier, en utilisant comme axe de symétrie l'un des côtés de plus grande dimension du premier panneau (*Figure 34, n°3*). En dupliquant cet ensemble en série sur une même ligne, nous pouvons reconstituer l'un des murs latéraux de la salle (*Figure 34, n°4*). Ayant modélisé cet assemblage de surfaces de façon horizontale, il est à présent nécessaire de lui appliquer une rotation de 90 degrés afin de le redresser à la verticale (*Figure 34, n°5*). Nous créons le second mur en appliquant une symétrie verticale puis un décalage équivalent à la largeur de la salle qui sera également identique à celle choisie dans le modèle 2D pour réaliser la phase d'optimisation (*Figure 34, n°6*). Enfin, pour la réalisation de ce modèle, nous conserverons le caractère variable des paramètres : nombre de couple de panneaux et distance de décalage, afin que ceux-ci puissent être renseignés avant le lancement de l'analyse en fonction des solutions optimales retenues par Galápagos.

<sup>50</sup> Comme dans le cas du modèle précédent, les paragraphes suivants encadrés correspondent aux détails pratiques de la conception du modèle 3D.

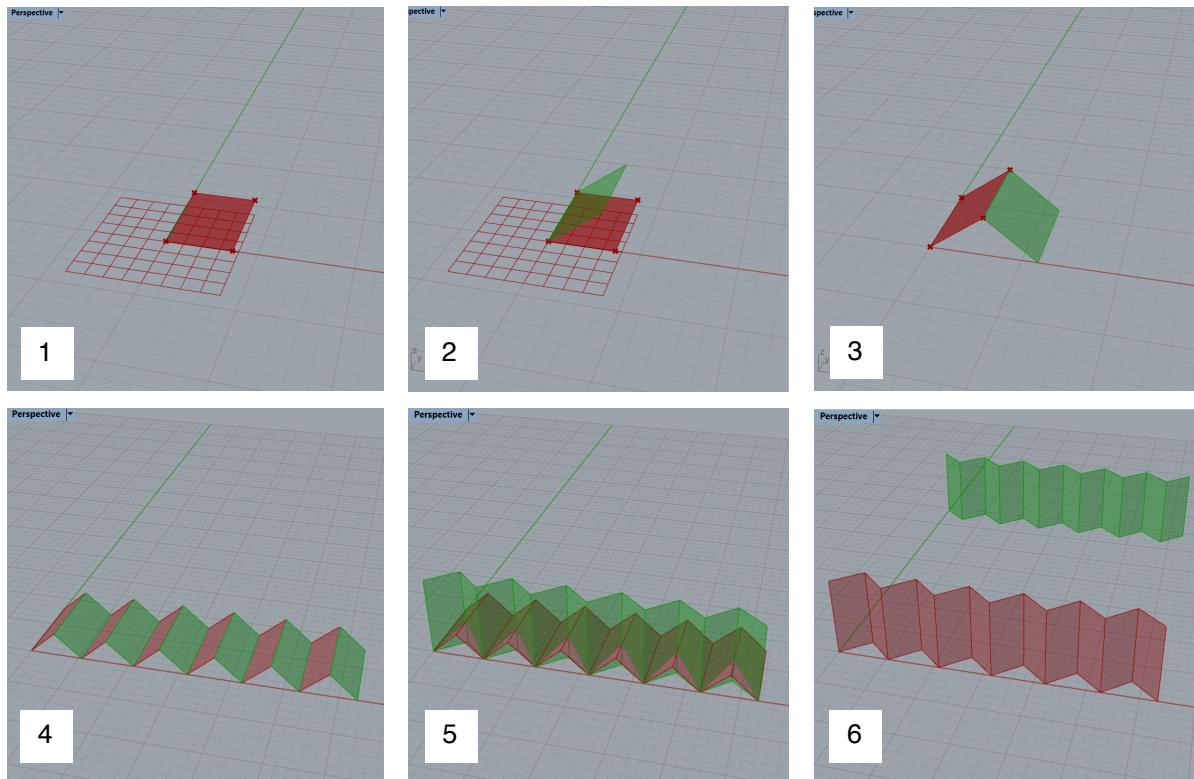


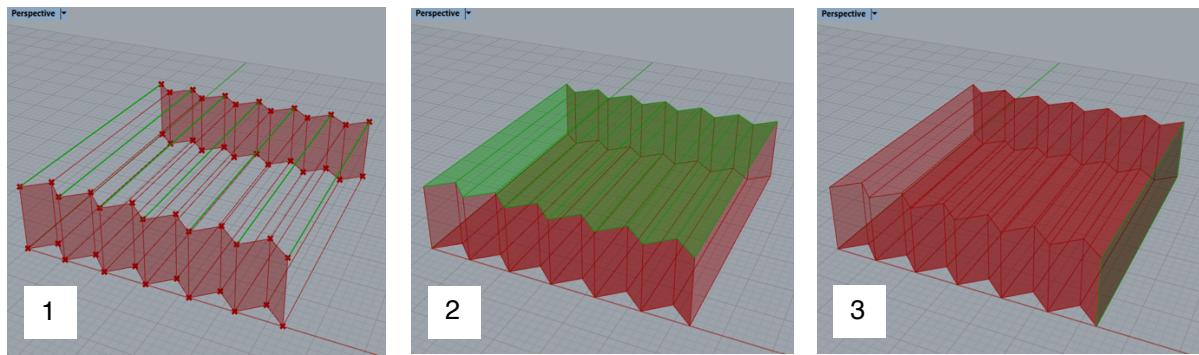
Figure 34 : Étapes de modélisation des murs latéraux du modèle 3D

Dans un second temps, nous allons fermer l'espace audience, c'est-à-dire créer le plafond, le sol et le mur du fond de cette zone. Lors de cette étape, il est primordial de s'assurer qu'il n'existe pas d'interstices entre les surfaces. En effet, l'analyse que nous allons effectuer avec l'outil PachyDerm Particle Animation<sup>51</sup> ne se fait qu'à partir d'un volume strictement fermé. S'il existe un espace entre deux surfaces, nous risquons de fausser l'analyse puisqu'une partie de l'onde sonore (dans notre cas une partie du nuage de particules créé), peut alors sortir du volume.

Pour se faire, nous divisons les surfaces des deux murs en points. Ainsi, chaque point du premier mur est relié via une ligne au point du deuxième mur correspondant à son symétrique (Figure 35, n°1). Cela permet de créer un ensemble de lignes reliant les deux murs latéraux. Grasshopper nous donne alors la possibilité de modéliser deux surfaces qui recouvrent l'ensemble de ces lignes et qui peuvent donc constituer le sol et le plafond de la salle (Figure 35, n°2). Afin de fermer définitivement l'espace audience du modèle, il nous reste à présent à concevoir le mur du fond de cet espace. Pour cela, nous créons un rectangle ayant la même origine que le premier panneau conçu. Ce rectangle apparaît donc à l'« avant » de

<sup>51</sup> L'utilisation de PachyDerm Particule Animation sera explicitée dans la partie 3.d.iii de ce mémoire

l'espace d'audience, c'est-à-dire à l'endroit où se trouve la séparation entre l'espace audience et l'espace scène. Nous lui appliquons ensuite un déplacement d'une valeur équivalente à la profondeur de la salle qui sera, dans ce modèle 3D équivalente à celle du modèle 2D utilisé pour la phase d'optimisation (*Figure 35, n°3*).



*Figure 35 : Étapes de la fermeture de l'espace audience du modèle 3D*

Enfin, la troisième et dernière étape de cette modélisation consiste à ajouter l'espace « scène » au modèle. De même que dans l'étape précédente, nous porterons une attention particulière au fait de vérifier que le volume créé constitue bien un espace strictement fermé.

Pour créer le fond de l'espace scène, il est possible de réutiliser le rectangle constituant le fond de l'espace audience puisque les dimensions à respecter sont les mêmes. Il s'agit alors simplement de le dupliquer et de lui appliquer un décalage négatif équivalent à la profondeur de la salle<sup>52</sup> (*Figure 36, n°1*). Le premier mur latéral de l'espace scène, lui, peut être modélisé par un rectangle classique positionné au niveau des deux extrémités du premier panneau créé, avec pour hauteur la hauteur du panneau, et pour largeur la valeur de la profondeur de la scène (valeur qui sera équivalente à celle du modèle 2D utilisé dans la phase d'optimisation) (*Figure 36, n°2*). Le deuxième mur latéral de la scène, de la même manière que pour les murs latéraux de l'espace audience, peut être modélisé à l'aide d'un déplacement du premier mur latéral d'une valeur égale à la largeur de la salle<sup>53</sup> étudiée. Enfin, le sol et le plafond de cet espace peuvent être représentés à l'aide de rectangles reliant les murs latéraux et le mur du fond (*Figure 36, n°3*).

<sup>52</sup> Valeur identique à celle du modèle 2D que nous avons utilisé pour l'étape précédente.

<sup>53</sup> Valeur identique à celle du modèle 2D que nous avons utilisé pour la première étape.

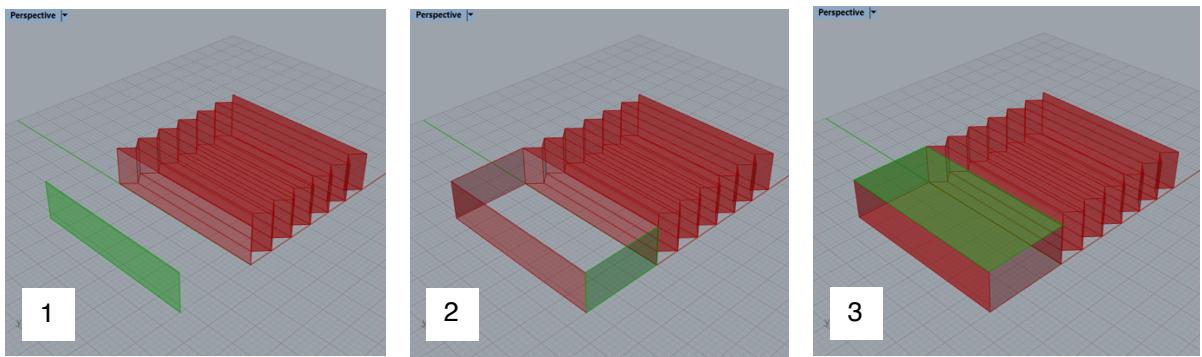


Figure 36 : Étapes de modélisation de l'espace scène du modèle 3D

Par ailleurs, d'un point de vue pratique, lorsque l'on réalise un modèle de cette manière, nous pouvons avoir certains éléments dans la fenêtre de modélisation de Grasshopper qui nous ont servis pour modéliser le modèle mais qui ne font pas partie de la forme finale. Dans ce cas, Grasshopper nous permet de masquer ces éléments afin qu'ils n'apparaissent pas dans la fenêtre de modélisation de Rhino. Avec l'outil « Preview »<sup>54</sup>, nous pouvons donc les faire disparaître du modèle 3D sans les supprimer de l'algorithme dans lequel ils prendront une teinte gris foncé et non gris clair.

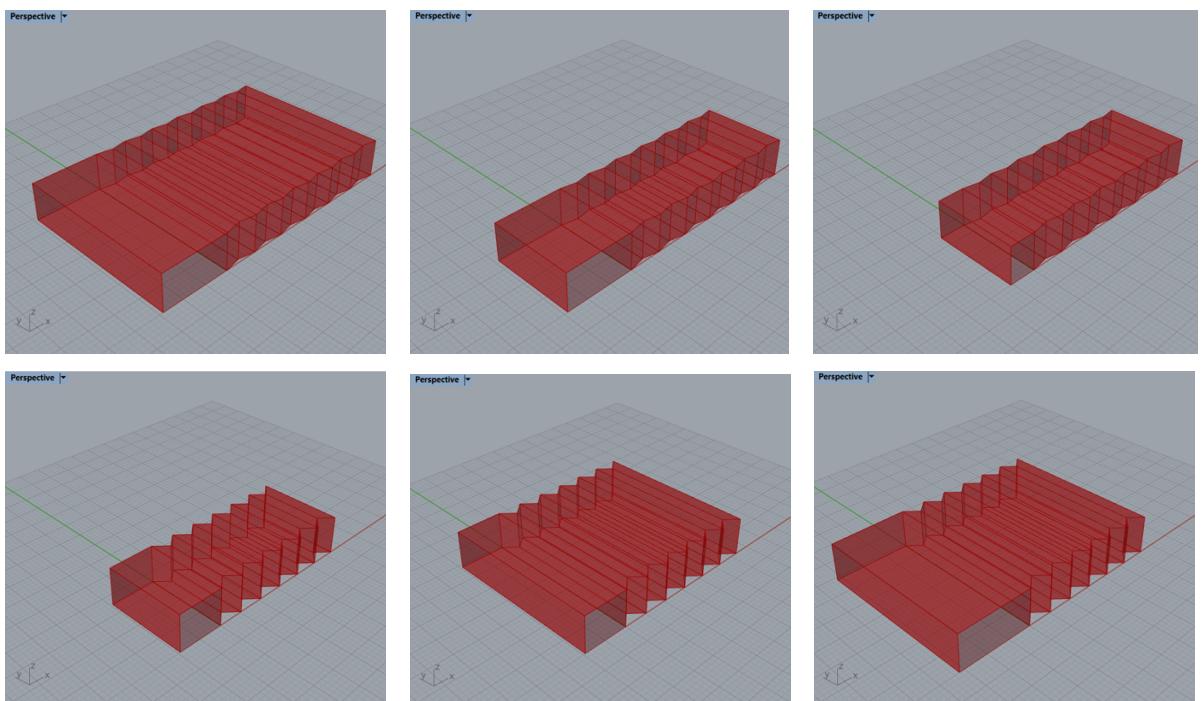


Figure 37 : Exemples des volumétries permises par le modèle 3D

<sup>54</sup> Preview : outil de Grasshopper disponible en effectuant un clic droit sur l'élément à masquer ou apercevoir.

#### d. Optimisation du résultat

##### i. Mise en place des paramètres d'optimisation

Après avoir conçu les différents terrains d'étude, nous allons mettre en place les paramètres nécessaires au lancement de la phase d'optimisation. Comme nous l'avons expliqué dans la partie 3.a.iii de ce mémoire, nous réaliserons cette optimisation à l'aide du plug-in Galápagos. Ce module d'extension sera intégré à l'algorithme du modèle 2D comme un composant classique comportant deux entrées : « le Génome » et la « fonction Fitness »<sup>55</sup>. Dans cette partie du mémoire, nous préciserons donc comment Galápagos s'insère dans l'algorithme en détaillant les paramètres d'optimisation que nous associerons au « Génome » et à la « fonction Fitness ». (*Figure 38*)

Le « Génome » correspond, comme nous l'avons vu précédemment, à l'ensemble des paramètres à faire varier lors de notre recherche de modèle optimal. Tel que nous l'avons établi dans l'élaboration du protocole expérimental, il est donc constitué du nombre de couple de panneaux verticaux qui découpent le mur de la salle, et de la distance de décalage séparant le sommet d'un couple de panneau de la position initiale du mur. Notons que pour chacun de ces paramètres, l'architecte devra impérativement renseigner un intervalle précis dans l'algorithme. Dans le cadre de ce travail de recherche, nous proposerons un intervalle de 1 à 10 pour le nombre de couple de panneaux et nous ferons en sorte que la distance de décalage soit comprise entre 0 et 2 mètres.

Par ailleurs, nous noterons que les valeurs initiales sélectionnées pour le Génome au commencement de la phase d'optimisation n'auront aucune influence sur le résultat final obtenu puisque celles-ci seront modifiées par Galápagos. En effet, afin de déterminer une forme optimale de mur, ce plug-in testera l'ensemble des valeurs comprises dans les intervalles définis ci-dessus. Ce sont donc ces intervalles de valeurs définis par l'architecte, qui influenceront le résultat de l'optimisation et permettront à Galápagos de tester un panel plus ou moins large de valeurs. Enfin, il est important de garder à l'esprit que nous cherchons, à travers cette phase d'optimisation, à déterminer les couples (nombre de couple de panneaux ; distance de décalage) pour lesquels le modèle est optimal. Le résultat que nous retiendrons de notre expérience ne sera donc pas uniquement une forme de mur mais bien le Génome (nombre de couple de panneaux ; distance de décalage) correspondant.

---

<sup>55</sup> Voir *Figure 20* page 45 qui illustre l'insertion du composant Galápagos dans un exemple d'algorithme.

La fonction « Fitness », elle, est à relier au critère d'optimisation. Ce critère est l'élément clé de cet algorithme. Cette fonction s'inspire du raisonnement de l'architecte lorsqu'il évalue une succession de propositions de formes en estimant que la forme d'un nouvel essai est plus ou moins optimale que la forme de l'essai précédent. Pour déterminer cette fonction Fitness, il faut donc choisir le paramètre d'optimisation adéquat. Dans ce but, nous pouvons réfléchir à la question suivante : qu'est-ce qui permet de dire que le système est optimal ?

Afin de pouvoir qualifier un modèle de solution optimale, ce que nous voulons avant tout c'est que la réflexion du son soit dirigée vers l'audience, vers les spectateurs. À travers cet objectif, nous souhaitons finalement que la surface totale de son réfléchi recouvre complètement la surface de l'audience afin de chaque spectateur reçoive, non seulement, les ondes sonores directes qui émanent de la source émettrice de son située sur la scène, mais également les ondes sonores réfléchies qui émanent des panneaux positionnés sur les murs latéraux. La fonction Fitness de l'optimisation du modèle sera donc reliée à ces deux surfaces : la surface totale de son réfléchi et la surface de l'audience. Différents processus d'optimisation s'offrent alors à nous. Nous pouvons chercher à maximiser l'intersection de ces deux surfaces ou bien chercher à minimiser leur différence ce qui mènera dans tous les cas au même résultat. Considérant que la deuxième de ces options est la plus simple à mettre en place dans cet algorithme, nous appliquerons un composant ayant pour valeur « surface de l'audience – surface de son réfléchi » à la fonction Fitness de l'élément Galápagos. Enfin il nous restera à renseigner le fait que nous souhaitons minimiser cette valeur en choisissant « minimize » dans l'interface de travail du plug-in<sup>56</sup>.

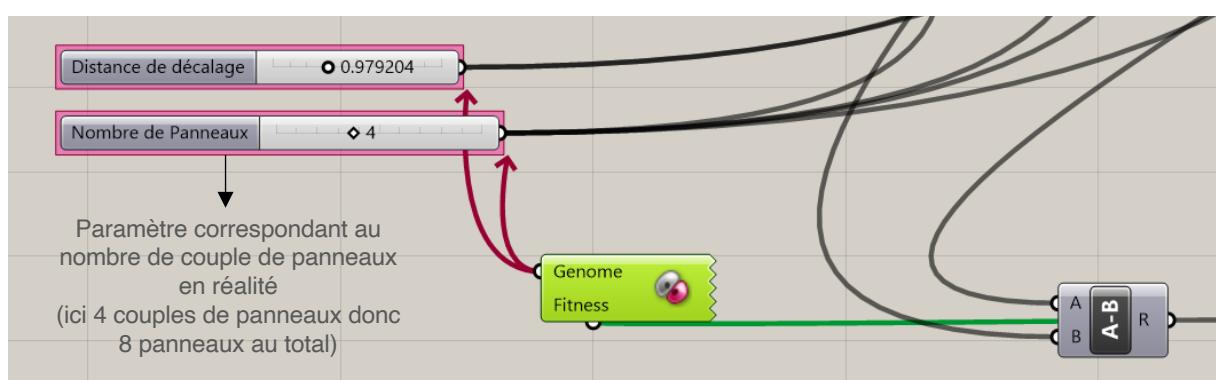


Figure 38 : Schéma représentatif du composant Galápagos lié aux paramètres correspondant au « Génome » et à la « fonction Fitness »

<sup>56</sup> Interface de travail visible sur la Figure 21 page 46. Sur cette illustration, c'est la fonctionnalité « maximize » qui est sélectionnée. Dans la pratique, il suffit simplement de cliquer une fois sur le - pour obtenir la fonctionnalité « minimize » et une fois sur le + pour retrouver « maximize ».

## ii. Détermination d'une ou plusieurs solutions optimales

Après avoir mis en place les différents paramètres d'optimisation, nous pouvons lancer cette phase expérimentale qui, rappelons-le, sera réalisée par le plug-in Galápagos sur le modèle 2D. Dans un premier temps, nous effectuerons une expérience « témoin » pour vérifier que l'algorithme fonctionne correctement. Cette expérience sera réalisée trois fois afin de vérifier l'obtention de résultats similaires sur les différents essais. Ainsi, si les résultats obtenus sont bien identiques, on considérera que l'expérience est valide et qu'elle peut être reproduite.

Une fois que nous nous serons assurés du bon fonctionnement de l'algorithme du modèle, nous chercherons à optimiser quatre types de salles différents avec des dimensions relativement éloignées afin d'observer une éventuelle divergence dans les résultats optimaux proposés par Galápagos. Notons qu'il sera important, pour chaque expérience, de vérifier que l'algorithme ne détecte pas d'erreur lors de l'optimisation. Sur Grasshopper, il sera assez simple de déceler une erreur puisque au moins un des composants de l'algorithme se colorera de rouge ou d'orange si son calcul n'est pas possible au faussé.

D'un point de vue pratique, afin de pouvoir lire et comprendre les graphiques présentés dans la suite de cette partie, il est primordial d'avoir pris connaissance du fonctionnement de l'interface de travail Galápagos.<sup>57</sup>

Avant d'effectuer le lancement de l'expérience témoin, nous devons rentrer certaines données initiales dans Galápagos. Ainsi, dans l'onglet « Option », nous précisons que nous allons chercher à minimiser la fonction Fitness, que nous choisissons d'appliquer une durée limitée à cette phase d'optimisation qui sera d'une minute et que nous renseignons pour chaque génération créée par Galápagos un nombre d'individus souhaité de 50. Ainsi, à chaque nouvelle génération, 50 couples (nombre de couple de panneaux ; distance de décalage) seront testés et donc 50 propositions de déformations de mur seront évaluées. (Figure 39)

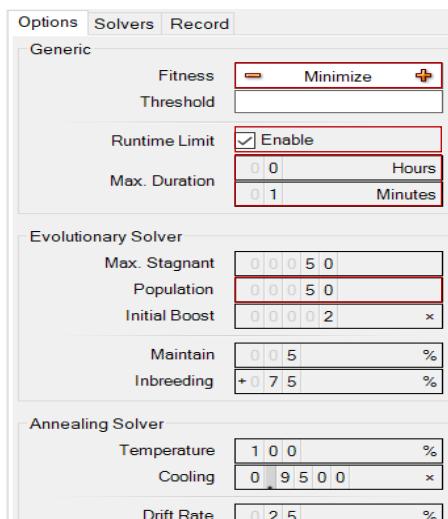


Figure 39 : Données initiales de la phase d'optimisation

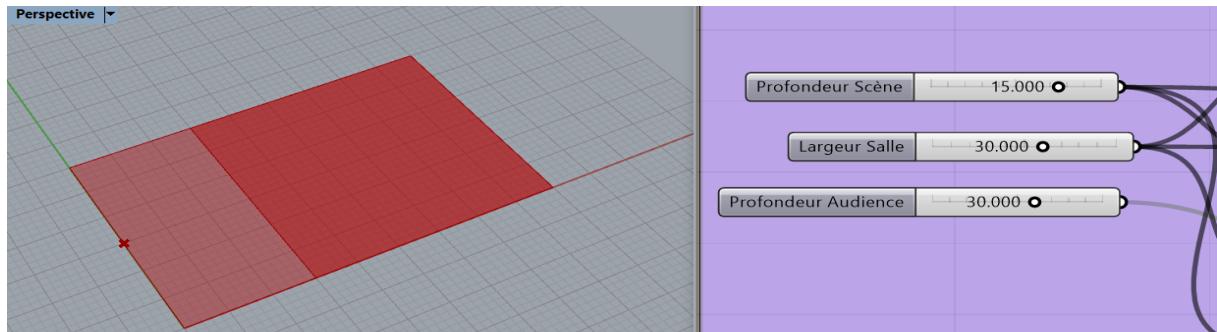
<sup>57</sup> L'ensemble de l'interface de Galápagos utilisé au cours de cette phase d'optimisation est décrit pages 45, 46, 47 dans la partie 3.d.iii de ce mémoire.

Remarquons que le choix d'imposer une durée relativement courte s'explique par le fait que l'outil informatique avec lequel nous travaillons au cours de cette recherche est destiné à être utilisé pour faciliter les choix de conception d'un architecte ; la phase d'optimisation doit donc être rapide afin de lui faire économiser du temps.

### Expérience témoin

Pour cette expérience dite « témoin », nous choisissons une salle aux caractéristiques relativement moyennes par rapport aux intervalles de valeurs présents dans l'algorithme du modèle. En effet, nous ne cherchons pas ici à étudier un cas particulier de salle mais bien à étudier à des dimensions relativement courantes de salle. Les caractéristiques de ce modèle « témoin » seront donc les suivantes (*Figure 40*) :

- Largeur : 30m,
- Profondeur de la salle entière : 30m,
- Profondeur de la scène : 15m.



*Figure 40 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant aux dimensions de la salle de l'expérience témoin*

En cherchant une solution optimale lors des trois essais de cette expérience témoin, le plug-in Galápagos nous renvoie à une multitude de possibilités. En effet, les paramètres de lancement de l'optimisation ont été choisis tels qu'à chaque nouvelle génération le plug-in créer 50 couples de solutions (nombre de couple de panneaux ; distance de décalage). Or dans cette expérience, parmi ces 50 couples, tous correspondent à une valeur de la fonction Fitness négative (*Figures 41, 42, 43*). Notons que cette configuration de valeur est techniquement impossible puisque par construction, la surface totale de son réfléchi sur la surface de l'audience ne peut pas excéder la surface de l'audience elle-même. Ces résultats remettent grandement en question la définition de la fonction Fitness. De fait, cette dernière n'est visiblement pas correcte et sera donc amenée à être reconsidérée et redéfinie.

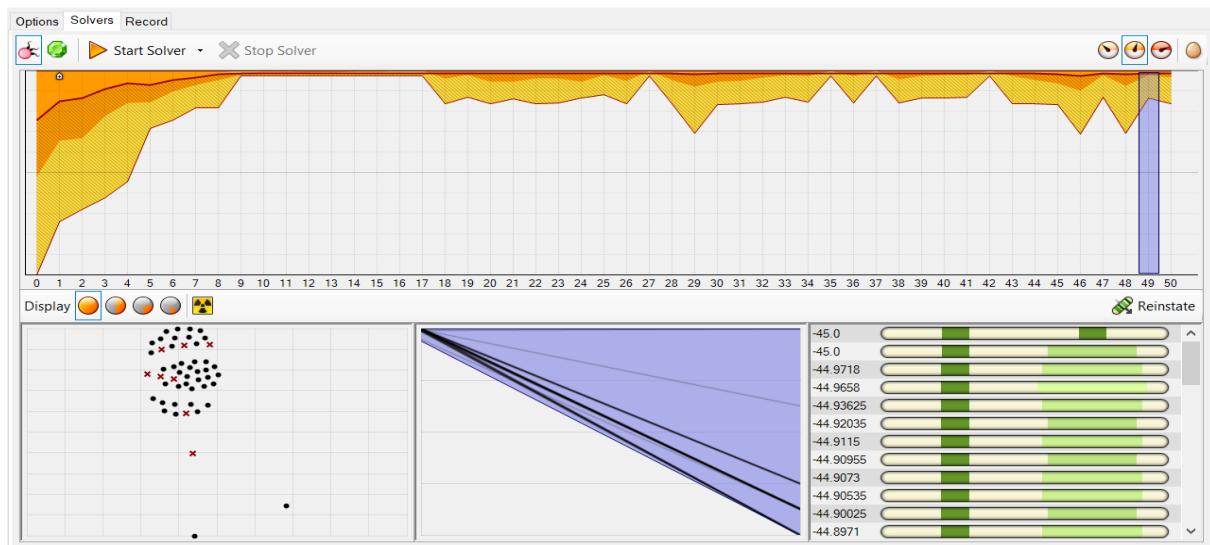


Figure 41 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience témoin, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos (Essai 1)

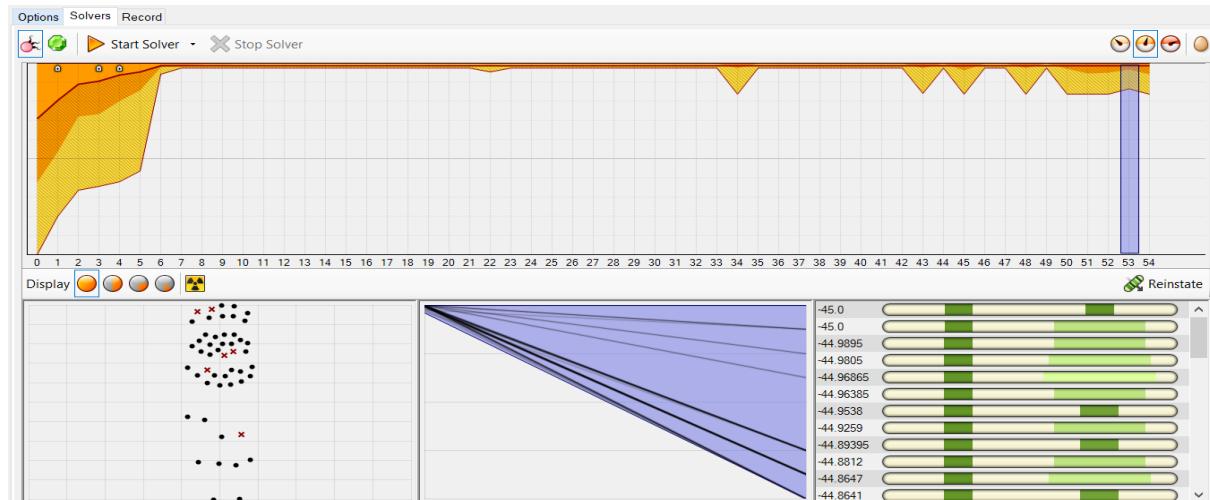


Figure 42 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience témoin, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos (Essai 2)

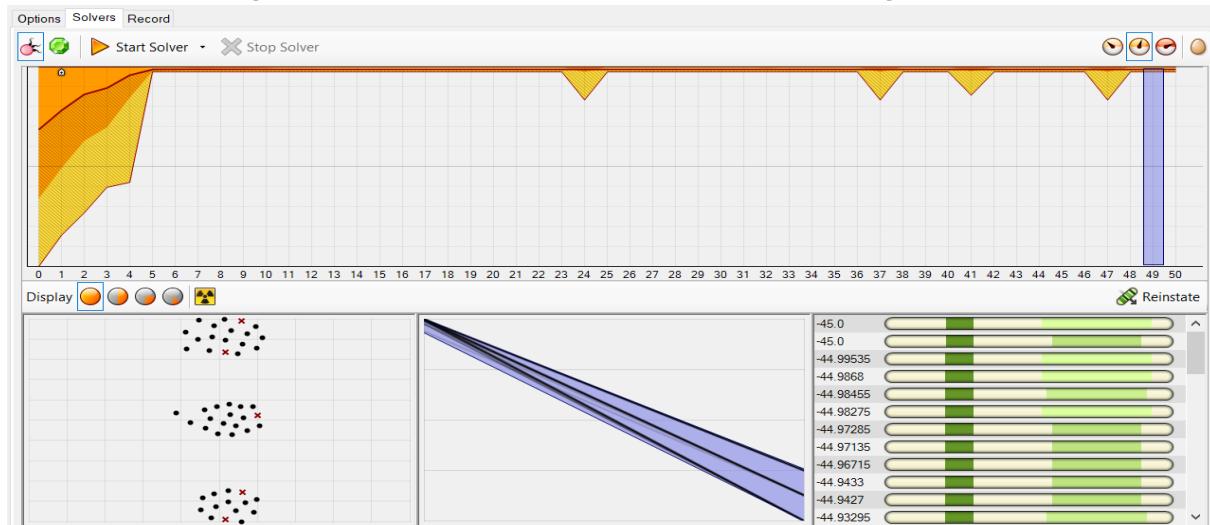
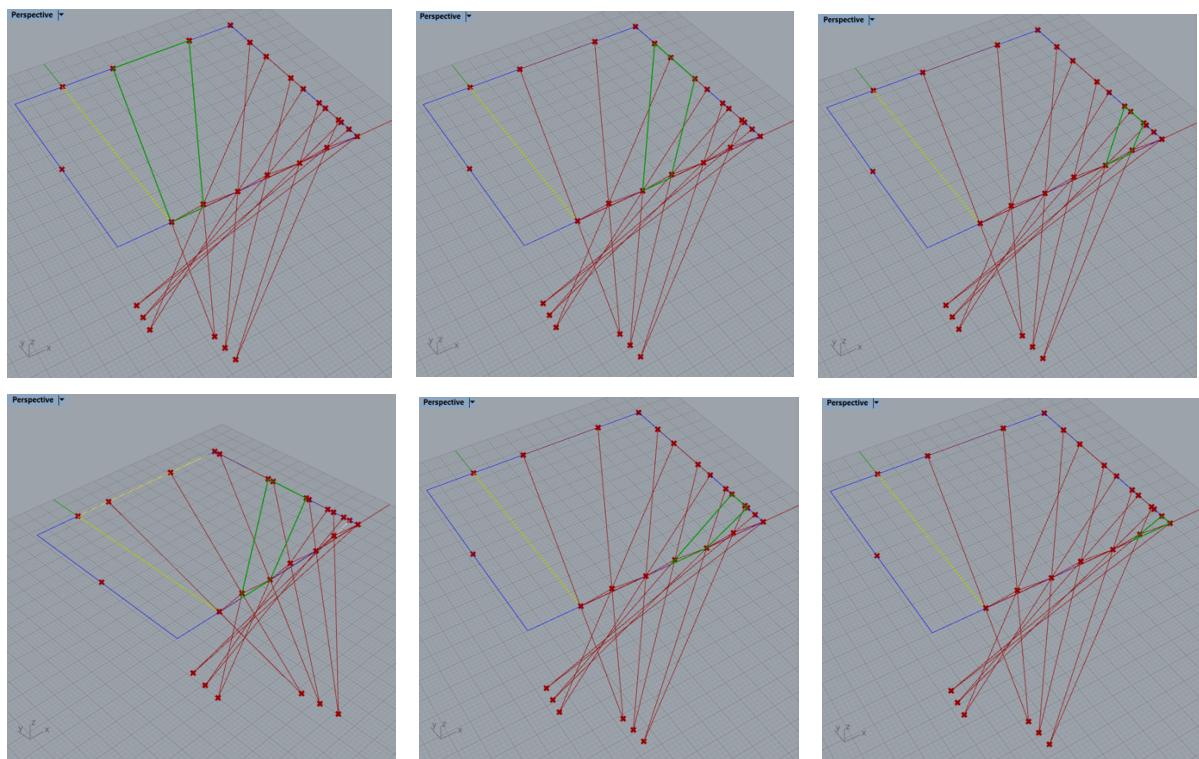


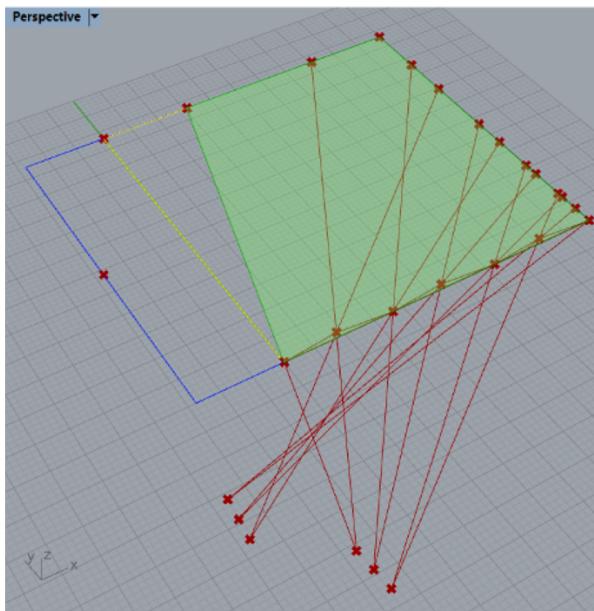
Figure 43 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience témoin, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos (Essai 3)

Ainsi, d'après les différents essais précédents, nous constatons que les résultats de l'expérience témoin ne sont pas concluants et qu'ils ne permettent pas de valider l'algorithme utilisé. A partir de ce constat, il nous faut donc repenser la fonction d'optimisation. En examinant le modèle de plus près, nous remarquons que la surface totale de son réfléchi calculée est surdimensionnée. De fait, cette surface doit être définie comme la réunion de l'ensemble des surfaces de son réfléchi correspondant à chacun des panneaux (*Figure 44*). Or, dans le modèle actuel, il existe entre ces différentes surfaces, des zones qui sont comptabilisées dans la surface totale mais où aucune onde sonore réfléchie n'est présente (*Figure 45*).

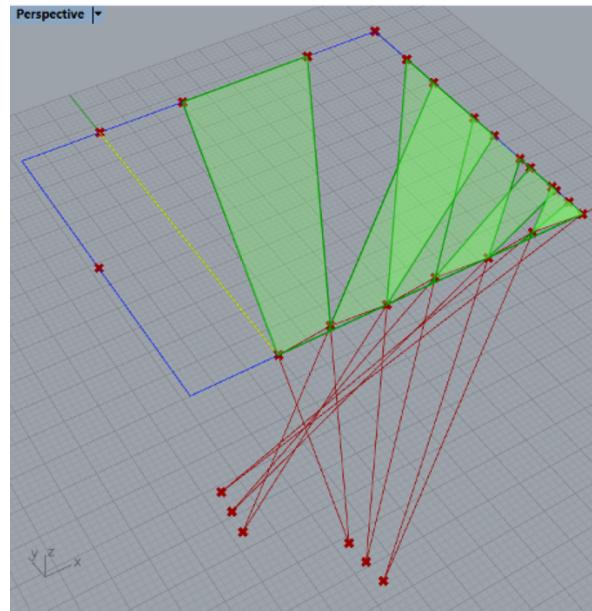


*Figure 44 : Surfaces de son réfléchi correspondant à chacun des panneaux dans le nouveau modèle et qui, réunies, permettent de calculer une surface totale de son réfléchi correcte et réaliste*

Afin d'améliorer la définition de la fonction d'optimisation, il est donc nécessaire de remédier à cette erreur et de redessiner la surface totale de son réfléchi en supprimant ces zones. Pour ce faire, nous allons créer un nouvel algorithme conçu selon le même principe que le premier avec la création de la salle, celle de la déformation du mur et celle de l'ensemble des tracés de l'onde sonore réfléchie, mais qui, lui, comptabilisera la surface totale de son réfléchi de façon correcte et réaliste (*Figure 46*).



*Figure 45 : Surface totale de son réfléchi comptabilisée dans l'ancien modèle, représentée en vert*



*Figure 46 : Surface totale de son réfléchi comptabilisée dans le nouveau modèle, représentée en vert*

En cherchant à calculer cette nouvelle surface totale de son réfléchi, non pas comme une surface globale dessinée sur un plan mais bien comme réunion de différentes surfaces, nous devons prendre certaines précautions. En effet, lors de ce calcul, il existe un risque lorsque les surfaces de son réfléchi par deux panneaux différents se superposent, de comptabiliser une même surface deux fois et donc de surestimer encore une fois la surface totale de son réfléchi. On veillera donc à ne pas faire uniquement la somme des surfaces de son réfléchi pour chaque panneau mais bien la réunion en ne comptabilisant l'intersection de ces surfaces qu'une seule fois.

Par ailleurs, dans ce nouvel algorithme, nous proposerons, non pas de minimiser la différence entre la surface d'audience et la surface totale de son réfléchi, mais de maximiser l'intersection de ces deux surfaces<sup>58</sup>. Cette option de calcul qui vise à maximiser la fonction Fitness nous conduira, en définitive, aux mêmes solutions optimales mais elle nous permettra, contrairement à l'option précédente, de chiffrer précisément l'aire de la surface couverte par la réflexion du son. A partir de ce modèle corrigé, nous allons donc réaliser une nouvelle expérience témoin, basée sur trois essais, qui nous permettront de valider ou pas les modifications apportées.

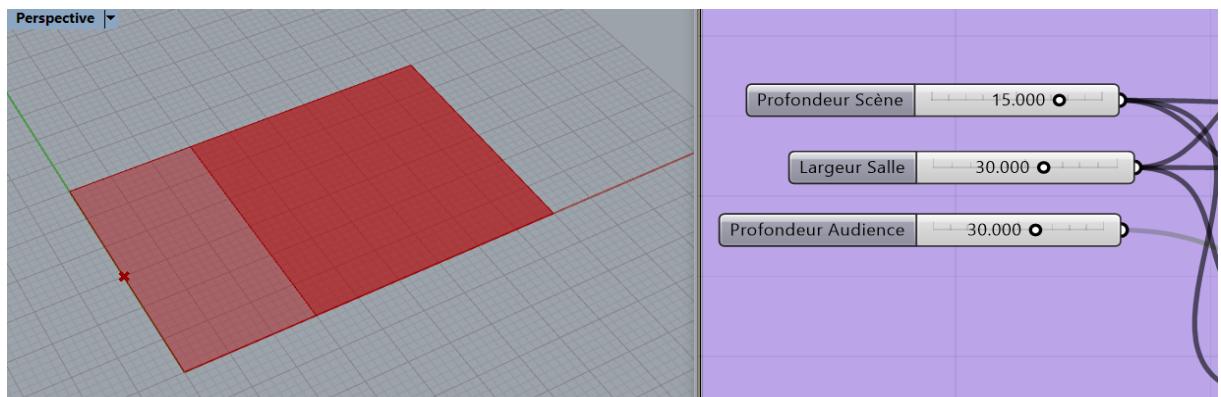
---

<sup>58</sup> Nous choisirons ainsi la première des deux options de calcul de la fonction Fitness énoncées page 62.

### Expérience témoin avec modèle modifié :

Cette nouvelle expérience « témoin » est réalisée avec des caractéristiques attribuées à la salle, qui sont identiques à celles de l'expérience précédente (*Figure 47*), soit :

- Largeur : 30m,
- Profondeur de l'audience : 30m,
- Profondeur de la scène : 15m.



*Figure 47 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant aux dimensions de la salle de l'expérience témoin avec modèle modifié*

Au cours des divers essais de cette expérience, nous observons des résultats très différents et beaucoup plus prometteurs pour la suite de notre travail de recherche que ceux de l'expérience précédente. En effet, d'après les résultats graphiques visibles sur l'interface de travail de Galápagos dans l'onglet « Solver », nous remarquons que la fonction Fitness d'optimisation oscille à présent entre plusieurs valeurs (*Figure 48*). Comme nous l'avons expliqué précédemment<sup>59</sup>, parmi ces résultats, nous cherchons à relever celui qui correspond à la fonction Fitness la plus élevée. Sur le graphique teinté d'orange, différents maxima sont visibles au niveau de 19 générations au total (les générations 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 15, 19, 20, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 48, 49 et 54<sup>60</sup>) et correspondent à une fonction Fitness de 900m<sup>2</sup><sup>61</sup>. Par précaution, il est indispensable de vérifier que ces cas optimaux ne correspondent pas à des erreurs de calcul dans l'algorithme. Or ici, l'algorithme détecte une erreur au niveau de l'élément « Boundary Surface » qui calcule la surface de son réfléchi. Nous ne pouvons donc pas considérer ces maxima comme des résultats optimaux.

<sup>59</sup> Expliqué dans le dernier paragraphe de la page 67 dans lequel nous précisons que nous cherchons à présent à maximiser la fonction Fitness.

<sup>60</sup> Nombres figurant sur l'axe des abscisses du graphique situé en haut de la Figure 48.

<sup>61</sup> Nous nous exprimons ici en m<sup>2</sup> puisque le paramètre correspondant à la fonction Fitness est une surface. C'est la surface d'intersection entre la surface totale de son réfléchi et la surface de l'audience.

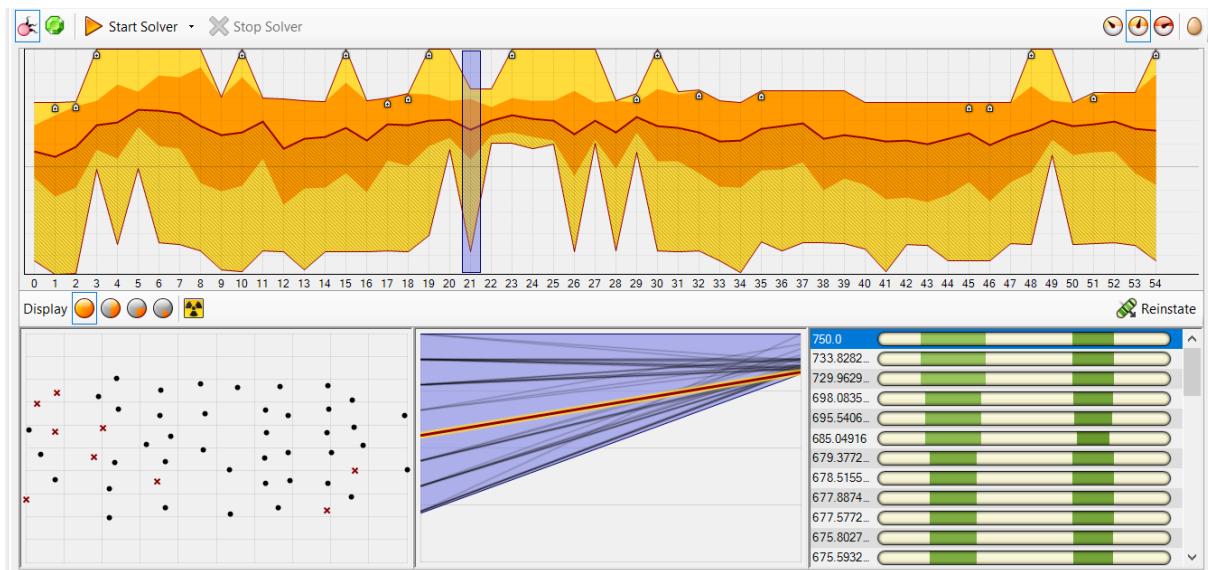


Figure 48 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience témoin avec modèle modifié, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos

Suite à la détection de cas erronés pour l'ensemble des valeurs maximales des fonctions Fitness équivalentes à 900m<sup>2</sup>, nous allons nous intéresser aux cas inférieurs qui, eux, ne présentent pas d'erreur. Ainsi sur le graphique de la Figure 48, parmi les différents cas restants nous retiendrons comme cas optimal le plus élevé, celui qui correspond à la génération 21<sup>62</sup> et à une fonction Fitness de 750m<sup>2</sup><sup>63</sup>. Par ailleurs, il sera intéressant, au-delà de relever le cas le plus optimal, de répertorier les six valeurs considérées comme les plus optimales par Galápagos afin d'observer une potentielle récurrence dans le nombre de couple de panneaux et la distance de décalage. C'est l'outil « Reinstate »<sup>64</sup>, qui nous permettra de retrouver les couples de paramètres correspondant à chacun de ces cas (Tableau 1).

Surface totale de son réfléchi	Nombre de couple de panneaux	Distance de décalage
750,0 m <sup>2</sup>	6	2,500 m
748,0 m <sup>2</sup>	6	2,501 m
747,0 m <sup>2</sup>	6	2,502 m
745,0 m <sup>2</sup>	6	2,504 m
742,0 m <sup>2</sup>	6	2,506 m
738,0 m <sup>2</sup>	6	2,510 m

Tableau 1 : Résultats numériques de l'optimisation relative à l'expérience témoin avec modèle modifié comportant les 6 solutions considérées comme les plus optimales (Essai 1)

<sup>62</sup> Repérable avec le curseur violet placé sur le numéro 21 au niveau du graphique orangé de la Figure 48.

<sup>63</sup> Repérable en tête de file dans la liste des valeurs situées en bas à droite de la Figure 48.

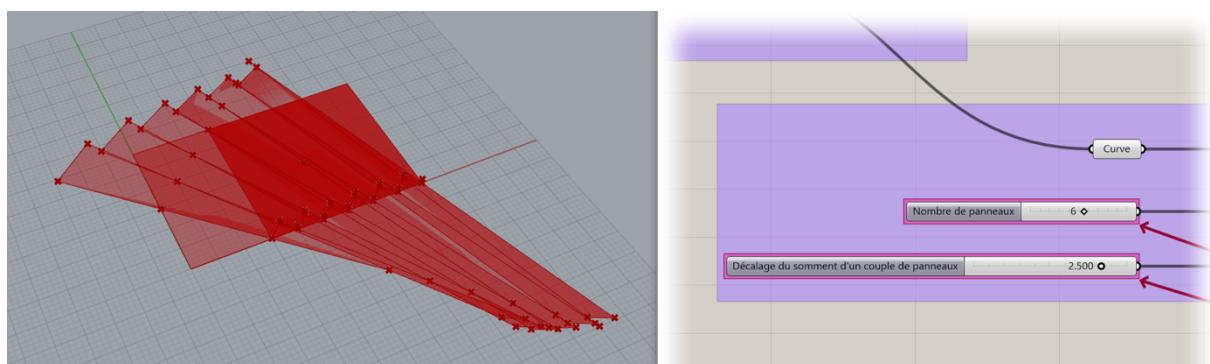
<sup>64</sup> Permet également de retrouver les modélisations 2D correspondant à chaque cas de valeurs (Voir Figure 49).

Comme nous l'avons précisé précédemment, afin de valider l'algorithme, nous effectuons deux essais supplémentaires. Lors de ces essais, nous obtenons exactement les mêmes 6 valeurs optimales (*Tableau 2*).

Surface totale de son réfléchi	Nombre de couple de panneaux	Distance de décalage
750,0 m <sup>2</sup>	6	2,500 m
750,0 m <sup>2</sup>	5	3,000 m
748,0 m <sup>2</sup>	6	2,501 m
747,0 m <sup>2</sup>	6	2,502 m
746,0 m <sup>2</sup>	6	2,503 m
745,0 m <sup>2</sup>	6	2,504 m

*Tableau 2 : Résultats numériques de l'optimisation relative à l'expérience témoin avec modèle modifié comportant les 6 solutions considérées comme les plus optimales (Essais 2 et 3)*

Ces valeurs sont quasiment identiques à celle du premier essai excepté un des cas pour lequel la fonction Fitness vaut 750,0m<sup>2</sup> et où l'on retrouve une configuration de 5 couples de panneaux et 3,000m de distance de décalage. Après vérification, nous constatons que ce cas, même s'il n'est pas apparu dans le premier essai, n'est pas une erreur. Théoriquement, nous pourrions donc le comptabiliser et le retenir comme la solution la plus optimale des 6. Néanmoins, puisque c'est un cas isolé et qu'il n'apparaît pas dans tous les essais, nous préférerons retenir comme cas le plus optimal celui pour lequel la fonction Fitness vaut 750,0m<sup>2</sup>, correspondant à 6 couples de panneaux et 2,500m de décalage (*Figure 49*).



*Figure 49 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant à la solution optimale obtenue pour l'expérience témoin avec modèle modifié*

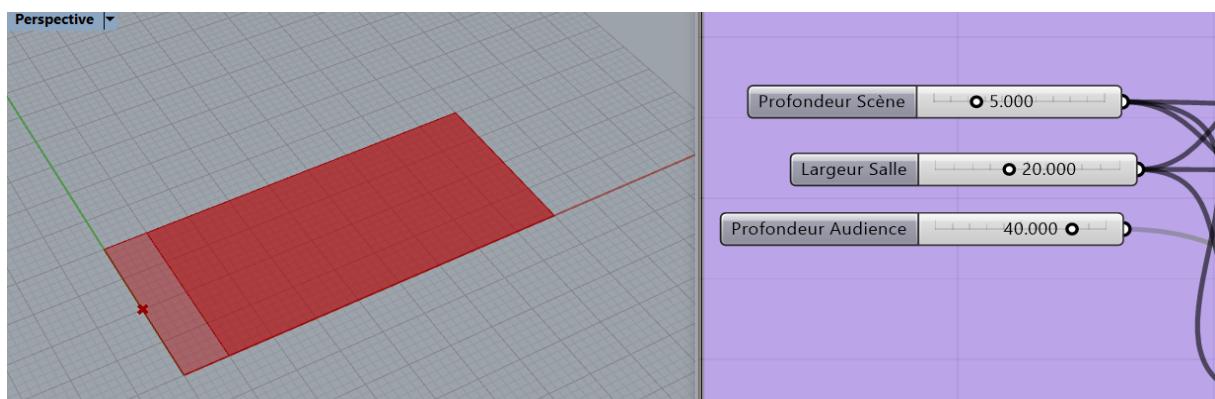
Enfin, il est également intéressant de remarquer que, de façon générale, l'ensemble des six valeurs optimales s'accorde sur le nombre de couple de panneaux et plus ou moins sur l'angle d'inclinaison. De fait, les valeurs de surface d'audience couverte par la surface de son réfléchi sont relativement proches et elles correspondent toutes à un modèle composé de 6 couples de panneaux avec une distance de décalage proche de 2,500m (*Tableau 2*).

Suite à la réalisation de cette expérience témoin réalisée à partir du modèle corrigé, nous pouvons considérer que les résultats de l'optimisation sont suffisamment concluants lors des trois essais différents pour permettre de valider l'algorithme. A partir de cet algorithme modifié, nous allons donc réaliser quatre expériences distinctes pour définir les formes de murs optimales de quatre types de salle dont les dimensions sont suffisamment éloignées les unes des autres pour obtenir potentiellement des résultats divergents.

### **Expérience 1 :**

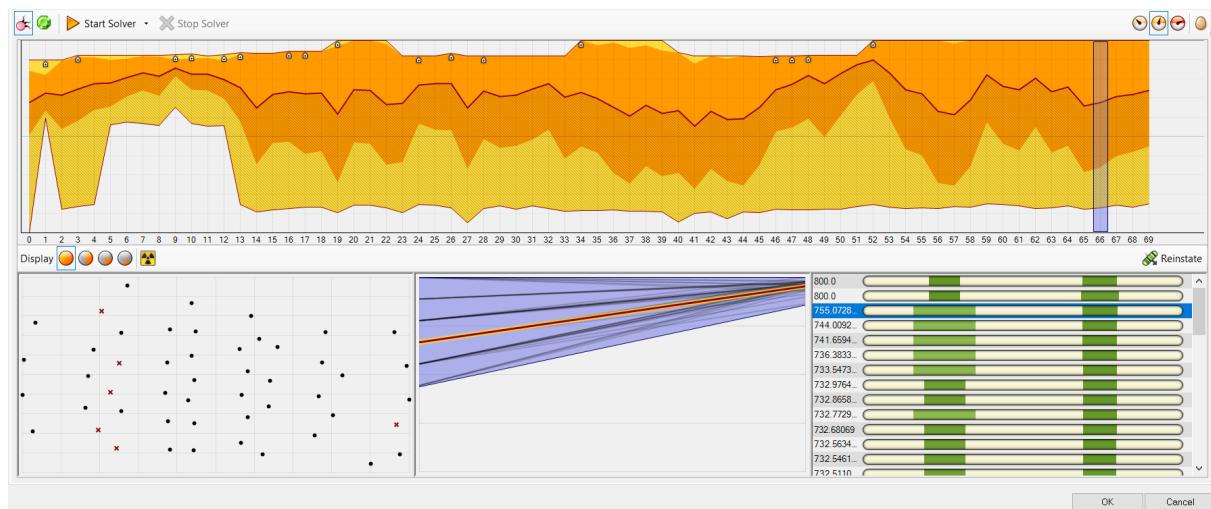
Dans le premier cas, nous étudions une salle possédant une très grande profondeur et une faible largeur donnant lieu à un modèle très étroqué comme on peut le voir sur la *Figure 50*. Dans ce cas, on précisera que la profondeur de la scène sera relativement faible par rapport à la profondeur globale de la salle. Les caractéristiques initiales de la salle seront donc les suivantes (*Figure 50*) :

- Largeur : 20m,
- Profondeur de l'audience : 40m,
- Profondeur de la scène : 5m.



*Figure 50 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant aux dimensions de la salle de l'expérience 1*

Comme dans le cas de l'expérience témoin, nous pouvons répertorier au total 27 générations possédant un ou plusieurs couples de solutions (nombre de couple de panneaux, distance de décalage) anormaux (*Figure 51*). Ainsi, pour ces différents cas, l'algorithme détecte une erreur au niveau du calcul de différents éléments : « Region Union » et « Boundary Surface ». Ces couples de solutions permettent d'obtenir une fonction Fitness de  $800\text{m}^2$  et donc théoriquement un modèle optimal, mais comme précédemment, ils correspondent à des erreurs et nous ne les prendrons pas en compte.



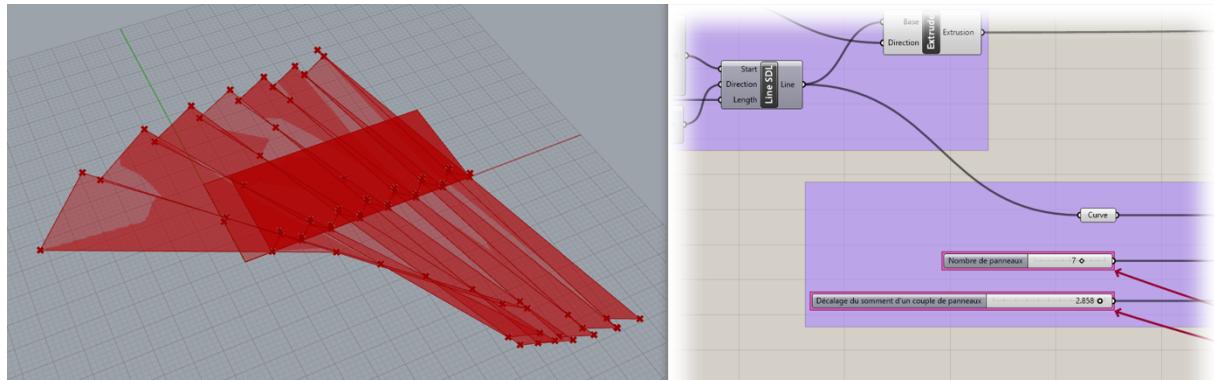
*Figure 51 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience 1, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos*

Nous nous concentrerons alors sur les autres maxima de ce graphique (*Figure 51*) qui, eux, ne présentent aucune erreur au niveau de l'algorithme et nous donnent les valeurs de solution optimales suivantes (*Tableau 3*). Nous pourrons d'ailleurs remarquer que ces six valeurs optimales s'accordent sur le nombre de couple de panneaux 7 et plus ou moins sur la distance de décalage à 2,85-2,86m.

Surface totale de son réfléchi	Nombre de couple de panneaux	Distance de décalage
755,0 $\text{m}^2$	7	2,858 m
754,5 $\text{m}^2$	7	2,859 m
754,0 $\text{m}^2$	7	2,859 m
752,0 $\text{m}^2$	7	2,864 m
750,0 $\text{m}^2$	7	2,867 m
745,5 $\text{m}^2$	7	2,868 m

*Tableau 3 : Résultats numériques de l'optimisation relative à l'expérience 1 comportant les 6 solutions considérées comme les plus optimales*

Parmi ces six résultats, nous retiendrons celui pour laquelle la fonction Fitness est la plus haute, soit  $755,0\text{m}^2$  avec 7 couples de panneaux et 2,858m de décalage (*Figure 52*).

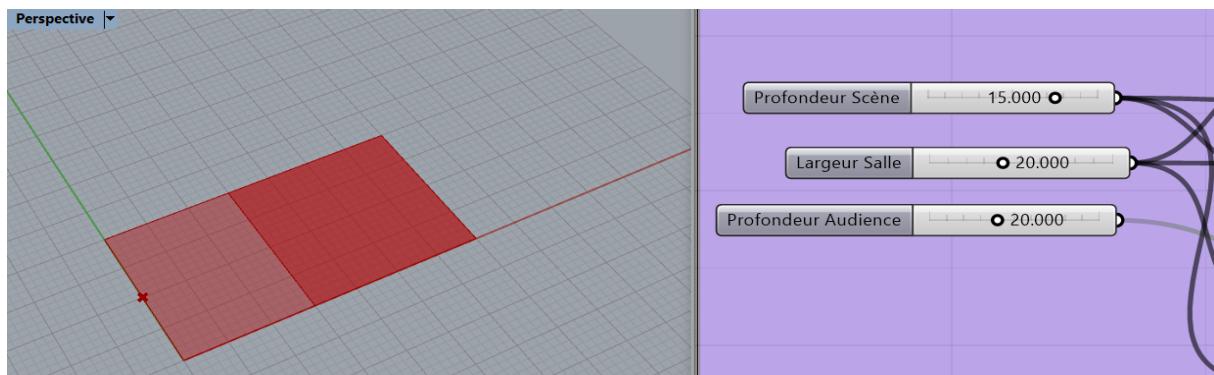


*Figure 52 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant à la solution optimale obtenue pour l'expérience 1*

### Expérience 2 :

Dans le second cas, nous prendrons la même largeur de salle que la salle précédente, mais nous prêterons une attention toute particulière à choisir une profondeur de salle plus faible et une profondeur de scène plus élevée. Par ailleurs, nous considérerons qu'une salle de concert, dans la réalité, possède rarement une scène occupant en profondeur plus de la moitié de la salle. Nous veillerons donc à ce que la profondeur de la scène dans ce modèle soit bien inférieure à la moitié de la profondeur totale. Celle salle aura les caractéristiques suivantes (*Figure 53*) :

- Largeur : 20m
- Profondeur de l'audience : 20m
- Profondeur de la scène : 15m



*Figure 53 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant aux dimensions de la salle de l'expérience 2*

Dans le cas présent, nous répertorions 22 générations (*Figure 54*) possédant un ou plusieurs couples de solutions (nombre de couple de panneaux, distance de décalage) pour lesquels l'algorithme détecte une erreur au niveau du calcul de l'élément « Slip Brep ». Ces couples de solutions permettent d'obtenir une fonction Fitness de  $400\text{m}^2$  qui, comme nous l'avons décidé dans les expériences précédentes, ne sera pas pris en compte puisqu'elle est erronée.

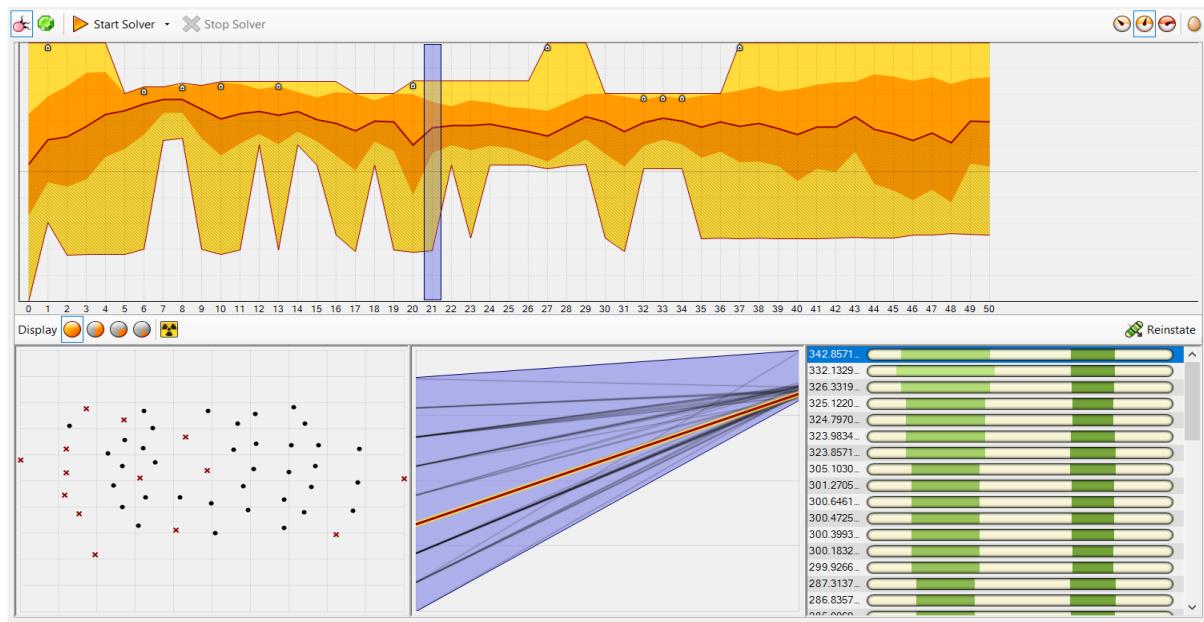


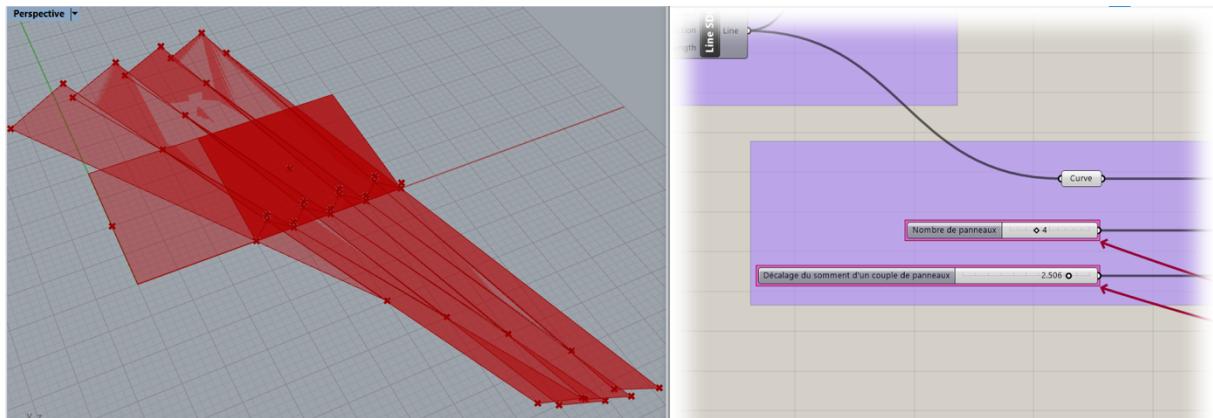
Figure 54 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience 2, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos

En observant les autres maxima de ce graphique (*Figure 54*), nous obtenons les valeurs de solutions optimales suivantes (*Tableau 4*). Nous pourrons d'ailleurs remarquer que ces six valeurs optimales s'accordent sur le nombre de couple de panneaux 4 et plus ou moins sur la distance de décalage à 2,5m.

Surface totale de son réfléchi	Nombre de couple de panneaux	Distance de décalage
343,0 $\text{m}^2$	4	2,500 m
342,5 $\text{m}^2$	4	2,501 m
342,0 $\text{m}^2$	4	2,502 m
341,5 $\text{m}^2$	4	2,503 m
341,0 $\text{m}^2$	4	2,506 m
340,0 $\text{m}^2$	4	2,507 m

Tableau 4 : Résultats numériques de l'optimisation relative à l'expérience 2 comportant les 6 solutions considérées comme les plus optimales

Parmi l'ensemble de ces résultats, nous retiendrons  $343,0\text{m}^2$  avec 4 couples de panneaux et 2,500m de décalage qui correspond à l'image ci-dessous (*Figure 55*).

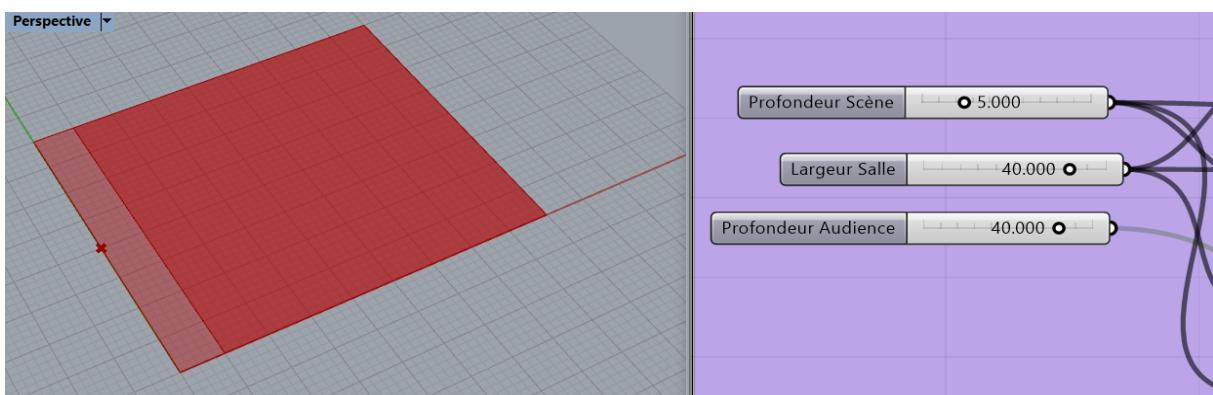


*Figure 55 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant à la solution optimale obtenue pour l'expérience 2*

### Expérience 3 :

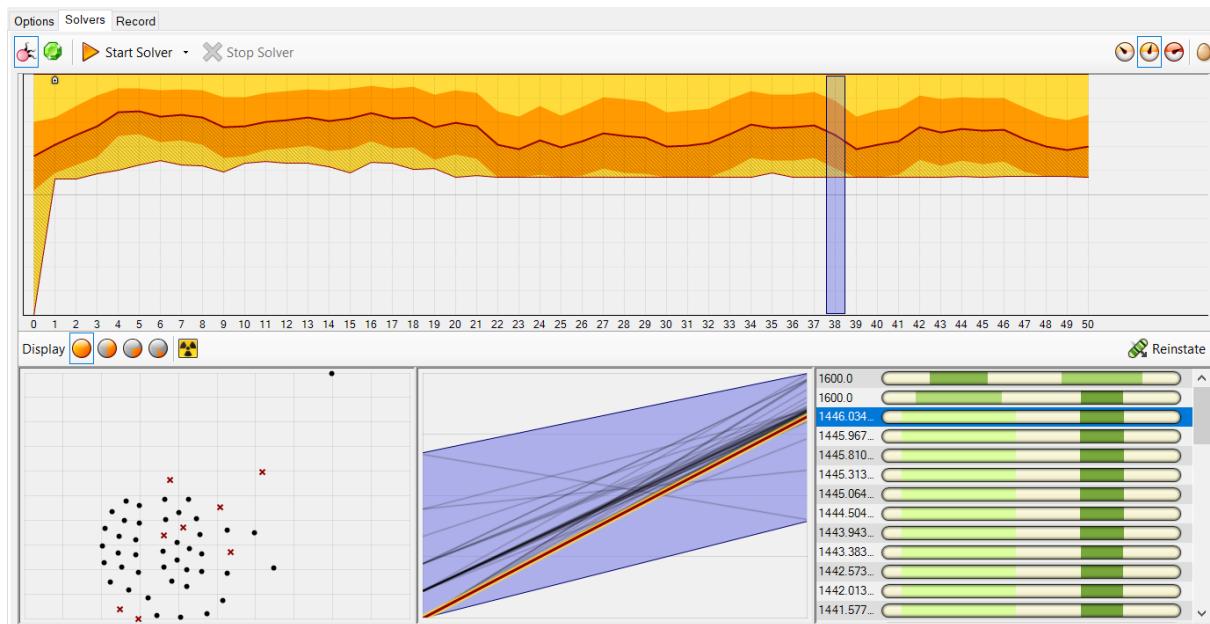
Dans le troisième cas, nous changerons complètement les dimensions de la salle pour créer un modèle très différent dans le sens où nous allons augmenter grandement la largeur et la profondeur totale de la salle. Dans ce modèle nous prendrons, comme dans le cas de l'expérience 1, une profondeur de scène relativement faible en comparaison avec la profondeur totale de la salle. Les caractéristiques de la salle seront les suivantes (*Figure 56*).

- Largeur : 40m
- Profondeur de l'audience : 40m
- Profondeur de la scène : 5m



*Figure 56 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant aux dimensions de la salle de l'expérience 3*

Au cours de cette troisième expérience, il se passe quelque chose d'assez étrange et remarquable. Systématiquement, pour chacune des générations, on a un cas maximum correspondant à une erreur (*Figure 57*). En effet, tous les maxima sont de  $1600\text{m}^2$  et présentent, dans l'algorithme, une erreur de calcul pour l'élément « Boundary Surface ».



*Figure 57 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience 3, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos*

Il va alors falloir, pour chacune des générations, regarder la deuxième ou troisième valeur optimale dans la liste de valeurs présentes sur la *Figure 57* en bas à droite. Nous trouvons ainsi les valeurs suivantes (*Tableau 5*). Nous remarquerons également que ces valeurs optimales s'accordent sur le nombre de couple de panneaux 1 et plus ou moins sur la distance de décalage à 2,46m.

Surface totale de son réfléchi	Nombre de couple de panneaux	Distance de décalage
1447,0 $\text{m}^2$	1	2,461 m
1446,5 $\text{m}^2$	1	2,460 m
1446,0 $\text{m}^2$	1	2,459 m
1445,5 $\text{m}^2$	1	2,458 m
1445,0 $\text{m}^2$	1	2,457 m
1444,0 $\text{m}^2$	1	2,456 m

*Tableau 5 : Résultats numériques de l'optimisation relative à l'expérience 3 comportant les 6 solutions considérées comme les plus optimales*

Parmi les résultats précédents, nous pourrons retenir  $1447,0\text{m}^2$  avec 1 couple de panneau et 2,461m de décalage (Figure 58).

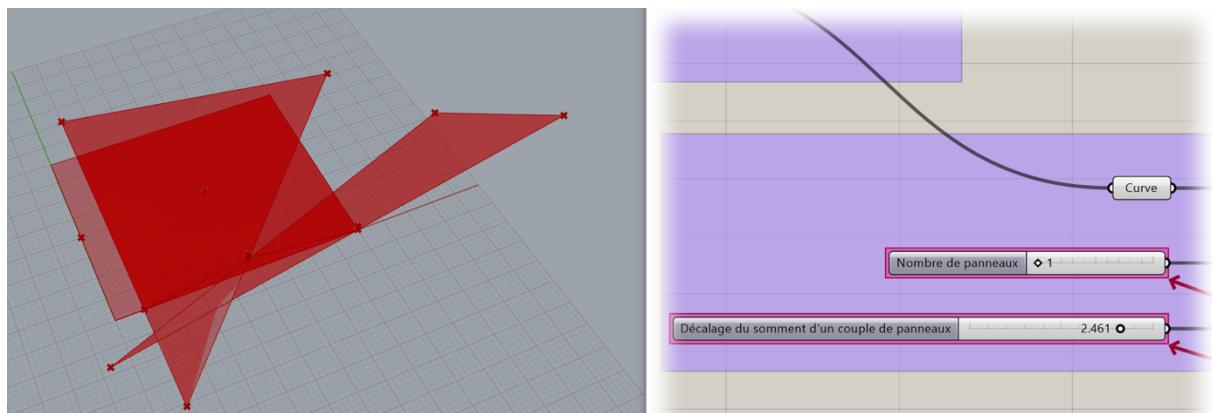


Figure 58 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant à la solution optimale obtenue pour l'expérience 3

#### Expérience 4 :

Enfin, dans ce quatrième cas, nous envisagerons de garder la même largeur de salle que l'expérience précédente mais de réduire sa profondeur. De même que pour le cas de l'expérience 2, nous choisirons une profondeur de scène relativement grande sans que celle-ci n'excède la moitié de la profondeur totale de la salle. Nous considérerons donc, pour cette salle, les caractéristiques suivantes (Figure 59).

- Largeur : 40m.
- Profondeur de l'audience : 30m.
- Profondeur de la scène : 15m.

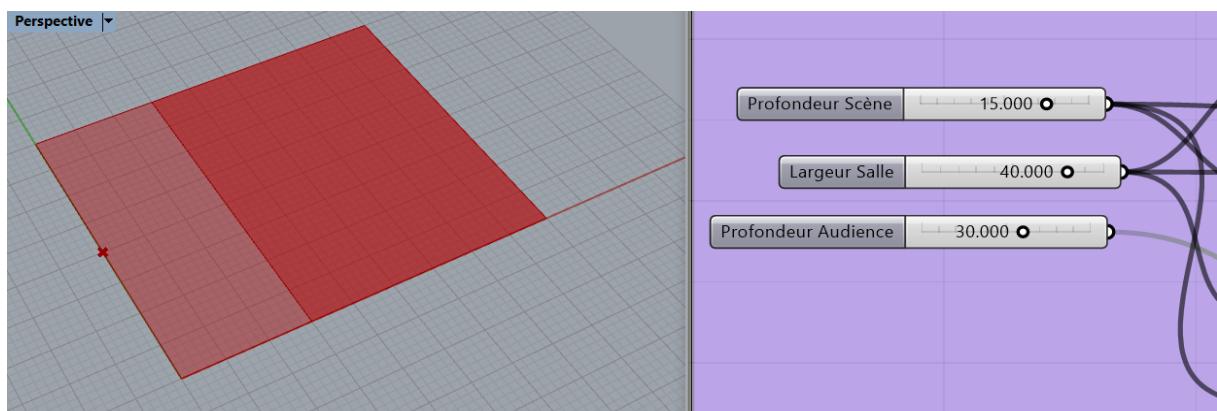


Figure 59 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant aux dimensions de la salle de l'expérience 4

Dans ce dernier cas, nous pouvons répertorier au total 31 générations possédant un ou plusieurs couples de solutions (nombre de couple de panneaux, distance de décalage) anormaux pour lesquels l'algorithme détecte une erreur au niveau du calcul de l'élément « Boundary Surface ». Ces couples de solutions permettent d'obtenir une fonction Fitness de 1200m<sup>2</sup> qui, étant erronée, ne sera pas prise en compte.

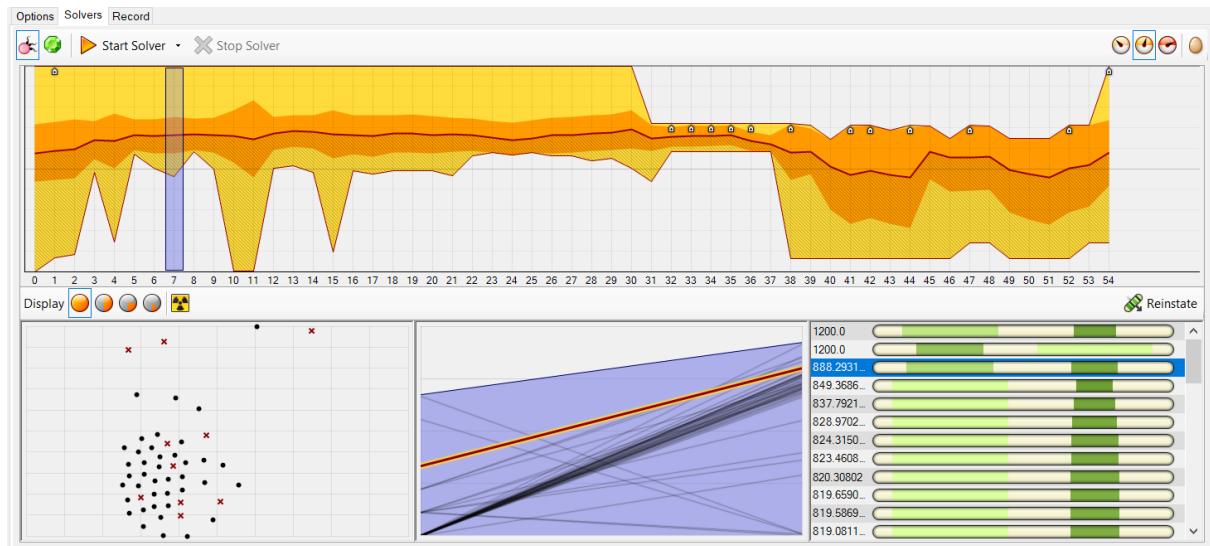


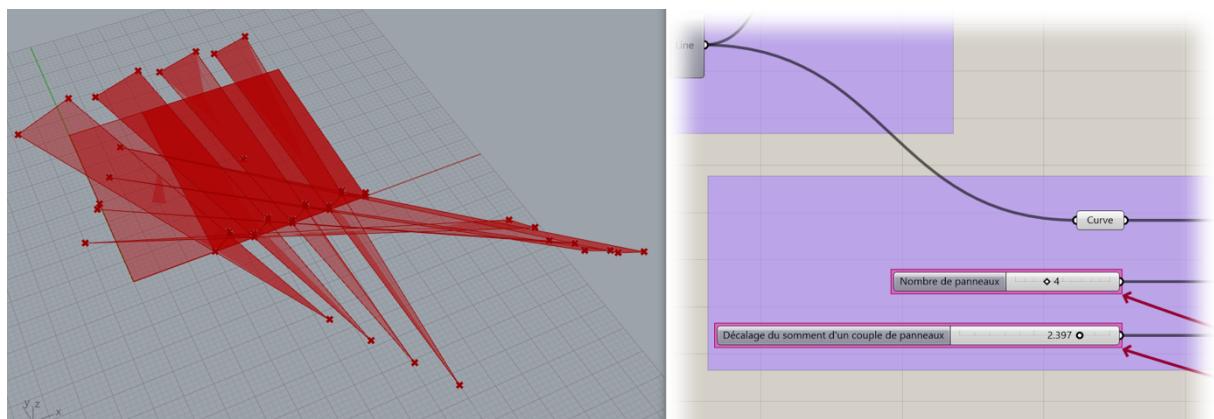
Figure 60 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience 4, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos

Nous nous intéressons donc aux cas maximaux de la fonction Fitness en excluant les cas d'erreur, ce qui nous permet d'obtenir les solutions optimales suivantes (*Voir Tableau 6*). Nous pourrons également remarquer que dans le cas présent, hormis la valeur la plus haute, l'ensemble des valeurs optimales s'accordent sur le nombre de couple de panneaux 1 et plus ou moins sur la distance de décalage de 3m.

Surface totale de son réfléchi	Nombre de couple de panneaux	Distance de décalage
888,0 m <sup>2</sup>	4	2,397 m
866,5 m <sup>2</sup>	1	3,000 m
866,0 m <sup>2</sup>	1	2,999 m
865,5 m <sup>2</sup>	1	2,998 m
865,0 m <sup>2</sup>	1	2,997 m
964,5 m <sup>2</sup>	1	2,996 m

Tableau 6 : Résultats numériques de l'optimisation relative à l'expérience 4 comportant les 6 solutions considérées comme les plus optimales

Finalement, lors de cette expérience, il se passe quelque chose d'assez différent des expériences précédentes. Alors que toutes les autres expériences nous ont donné des résultats similaires concernant les 6 solutions les plus optimales, ici la solution considérée comme la plus optimale diffère complètement des 5 autres. Néanmoins, puisqu'elle ne présente aucune erreur, nous retiendrons la première de ces solutions comme solution optimale possédant une fonction Fitness de 888,0m<sup>2</sup> conçue avec 4 couples de panneaux et 2,397m de décalage (*Figure 61*).



*Figure 61 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant à la solution optimale obtenue pour l'expérience 4*

A travers ces quatre expériences différentes, nous constatons que l'outil paramétrique permet effectivement de déterminer une ou plusieurs solutions optimales pour différents types de salles. Il est intéressant de noter que les solutions optimales pour une même salle sont globalement très proches les unes des autres et que finalement il est possible d'en tirer un nombre de panneaux et un décalage de ces panneaux optimaux. Ainsi, le modèle paramétrique créé à l'aide des logiciels et plug-ins Rhinoceros 3D, Grasshopper et Galápagos peut, en fonction des dimensions de salle que lui fournis l'architecte, déterminer de façon très précise la déformation de mur permettant de réfléchir au mieux le son émanant de la scène à travers toute l'audience. (Voir bilan des solution optimales page 83, *Figure 62, 63, 64, 65, 66*)

Enfin, il est pertinent de noter que le nombre de solutions supposées optimales présentant une erreur, reste néanmoins important quelle que soit l'expérience. Aussi, il pourrait être envisagé, lors d'un travail de recherche futur, de réfléchir à la manière dont ce problème pourrait être résolu afin que l'architecte utilisant ce modèle paramétrique n'ait pas à vérifier systématiquement le caractère erroné ou non d'une solution.

(Voir Annexe 2 : Bilan des solutions optimales obtenues lors de l'expérimentation)

### iii. Analyse acoustique des différentes modélisations

Après avoir déterminé quelques déformations murales optimales pour différents types de salles, nous allons amorcer un exemple d'analyse acoustique réalisée à l'aide du plug-in Pachyderm, et plus particulièrement de l'outil PachyDerm Particule Animation. Cette analyse qualitative nous permettra de mettre en évidence, en partie, l'impact de telles déformations à travers l'observation de la propagation d'un nuage de particules au sein du modèle 3D. Les dimensions de salle choisies pour cette simulation seront celles de l'expérience témoin. Par ailleurs, il sera tout à fait possible pour un architecte d'effectuer des analyses similaires sur d'autres modélisations de salles possédant des dimensions différentes.

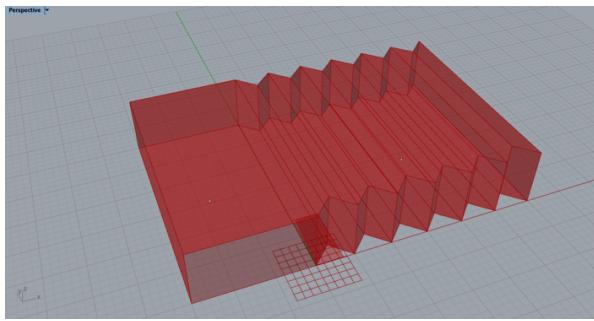
Avant le lancement de l'analyse, il est primordial de préparer le modèle 3D afin qu'il soit exploitable par le plug-in. Cette préparation se fera en trois étapes. Dans un premier temps, comme nous l'avons précisé dans la description de Pachyderm<sup>65</sup>, il s'agit de vérifier que le volume du modèle 3D est complètement fermé. En effet, si ce n'est pas le cas, nous risquons de perdre une partie du son via les interstices présents entre les surfaces composant la géométrie globale. Dans un second temps, il est indispensable de vérifier que le modèle est bien représenté dans la bonne unité de grandeur, soit le mètre, sans quoi les calculs réalisés seront incorrects. Enfin, dans un troisième temps nous devons « fixer » le volume dans la fenêtre de modélisation de Rhino afin de pouvoir permettre à l'outil PachyDerm Particule Animation de le détecter lors de son analyse.

D'un point de vue pratique<sup>66</sup>, nous allons alors « baker »<sup>67</sup> l'ensemble des surfaces constituant le volume dans l'algorithme afin que celles-ci puissent être fixées dans la modélisation 3D. En effet, si on ne « bake » pas ces surfaces, il est impossible de les sélectionner et l'ensemble du modèle est alors inutilisable (*Figure 62*). Il est également important de bien vérifier que la géométrie créée est un assemblage plusieurs surfaces (*Figure 63*) et qu'elle n'est pas constituée d'un seul tenant auquel cas il faudra appliquer le composant « explode » à la géométrie totale.

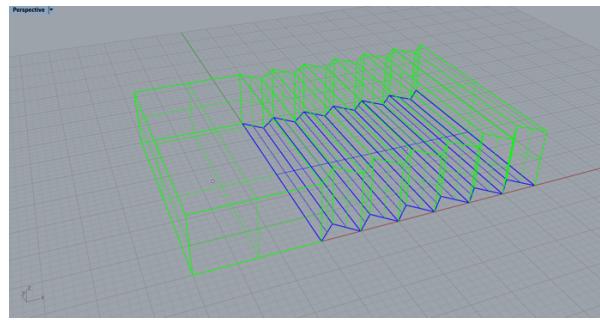
<sup>65</sup> Description réalisée dans la partie 3.a.iv.

<sup>66</sup> Les paragraphes encadrés correspondent aux détails pratiques de la préparation du volume 3D pour assurer son analyse par le plug-in Pachyderm et de l'insertion de la source émettrice de son au sein de ce modèle 3D.

<sup>67</sup> Le terme « baker » est anglais, il peut être associé au terme « cuire » ou « durcir » en français. « baker » une géométrie variable conçue à partir d'un algorithme revient finalement au fait de la figer la transformant ainsi en géométrie fixe. L'option « baker » est disponible en effectuant un clic droit dans l'algorithme sur l'élément à figer.



*Figure 62 : Modèle non « baker » et donc variable, créé à partir de l'algorithme Grasshopper*



*Figure 63 : Modèle « baker » et donc fixe, décomposé en surfaces*

Une fois que ces différents points sont vérifiés, nous pouvons ouvrir l'interface de travail de Pachyderm qui nous permettra de positionner la source émettrice son dans le modèle 3D.

Nous placerons la source émettrice de son au sein du volume en utilisant l'outil « Insert\_source ». Afin de respecter l'étude d'optimisation en plan effectuée précédemment<sup>68</sup>, nous placerons cette source au milieu du mur considéré comme le mur de fond de la scène. Nous choisirons de la placer à hauteur d'homme pour qu'elle puisse à la fois correspondre à l'émission d'un son provenant d'un instrument mais également à l'émission d'un son provenant d'une personne. Pachyderm nous offre également la possibilité de modifier certaines caractéristiques précises de la source émettrice. Cependant, au cours de cette analyse, nous conserverons les caractéristiques suggérées par le plug-in.

Après avoir préparé le modèle, nous pouvons ouvrir l'outil Pachyderm Particule Animation<sup>69</sup> qui nous permettra de visualiser la trajectoire des particules sonores à l'intérieur du volume fermé de la salle. Pour lancer l'expérience, il nous faut au préalable sélectionner quelques paramètres initiaux propres à la simulation. Ainsi nous choisissons une visualisation de type « Smart Particule Wave » permettant la création d'une vague de nuage de points depuis la source émettrice de son qui se réfléchira à la manière d'une onde sonore sur les surfaces de l'enveloppe du modèle. Nous choisirons également :

- Un nombre de particules lancé de 10 000,
- Un temps de simulation de 300ms,
- Une température de l'air dans la salle à 20 °C.

Suite au renseignement de ces différents paramètres, nous pouvons lancer la simulation.

<sup>68</sup> Étude d'optimisation en plan est effectuée dans la partie 3.d.iii.

<sup>69</sup> L'utilisation de PachyDerm Particule Animation est explicitée dans la partie 3.a.iv de ce mémoire.

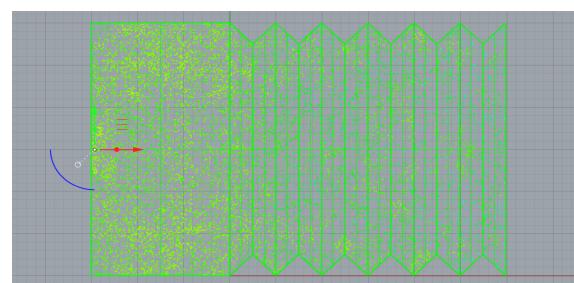
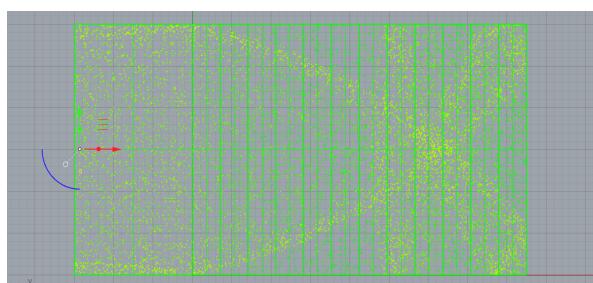
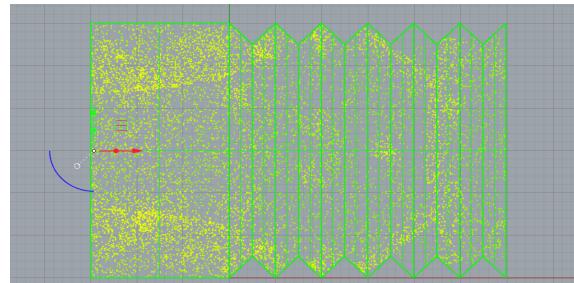
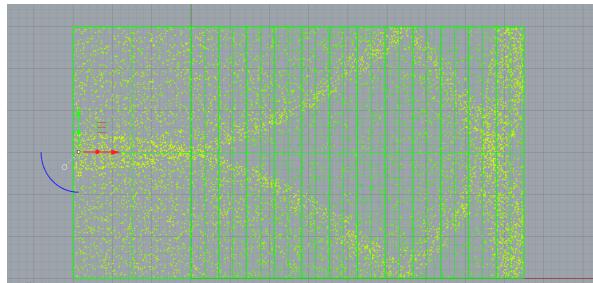
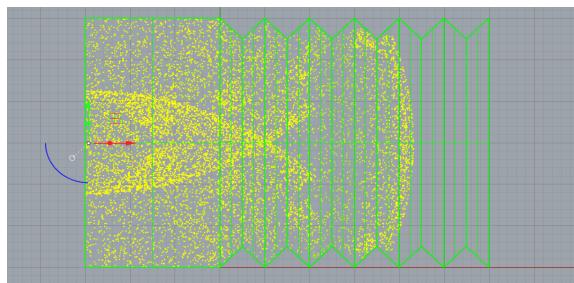
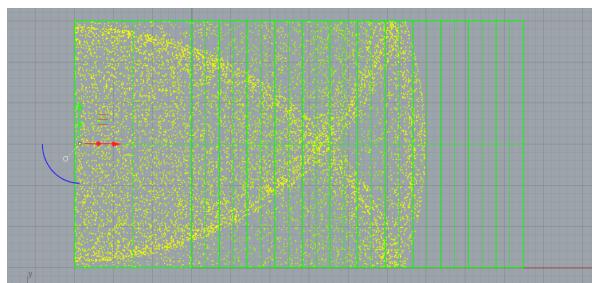
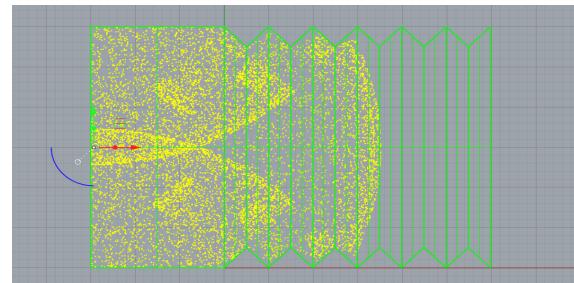
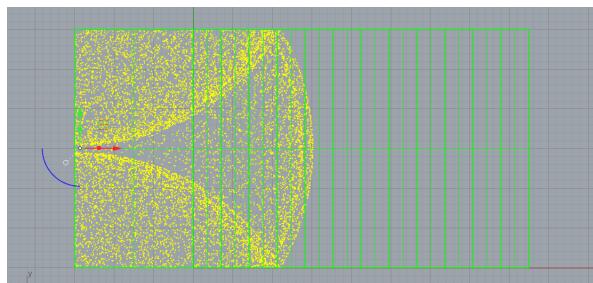
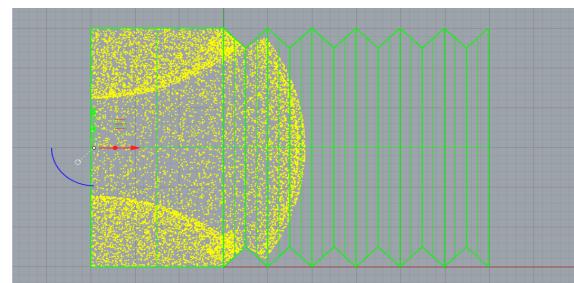
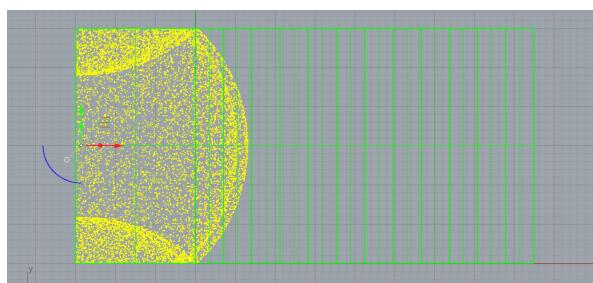
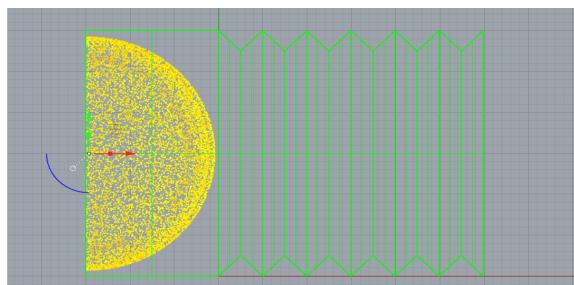
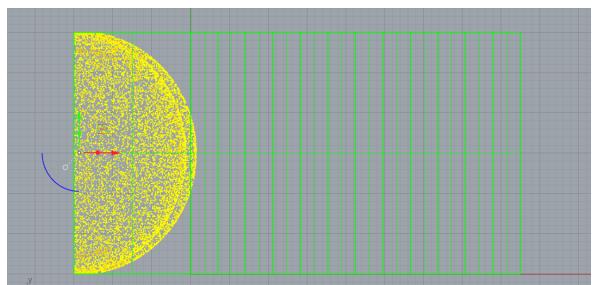


Figure 64 : Simulation effectuée avec PachyDerm Particule Animation sur modèle non déformé

Figure 65 : Simulation effectuée avec PachyDerm Particule Animation sur modèle déformé

Les résultats obtenus lors de cette simulation sont présentés dans les images ci-dessus (*Figures 64 et 65*). Sur ces images, la propagation des ondes a été photographiée au même instant pour les deux simulations faites à partir de deux modèles de salle possédant les mêmes dimensions globales (celle du modèle de l'expérience témoin), mais une disposition des panneaux différente. Ces images permettent de se rendre compte clairement de la différence de propagation qu'il peut exister entre une salle possédant des murs latéraux plans et une salle possédant des murs latéraux équipés de panneaux permettant la création d'une déformation.

Sur les images de gauche (*Figure 64*), nous pouvons observer l'évolution de l'onde sonore sans panneaux. Nous remarquons que celle-ci se propage uniquement dans un sens pendant quasiment toute la durée de la simulation. En effet, elle part de l'espace scène et se dirige vers le fond de la salle en se réfléchissant sur les murs latéraux. Cette régularité dans son mouvement provoque, à l'endroit où nous pouvons apercevoir comme des lignes jaunes sur les images, une accumulation de particules. Or, nous considérons que le nuage de particules émis lors de cette simulation représente une onde sonore. L'accumulation de particules pourrait donc être associée, en réalité, à une accumulation de son au sein de la salle.

Sur les images de droite (*Figure 65*), nous constatons que la présence de panneaux influe sur la trajectoire de l'onde sonore. Ces panneaux permettent finalement de rediriger une partie de l'onde vers la scène et de fait, lorsque l'onde avance, vers l'avant de l'audience puis vers la totalité de l'audience de façon générale. Le son est alors réfléchi de manière à obtenir une meilleure répartition sur la totalité de la surface correspondant à l'audience. En effet, nous pouvons remarquer, notamment sur les deux dernières images de la *Figure 65*, que les lignes correspondant à des accumulations de particules, sont beaucoup moins lisibles et donc beaucoup moins présentes. De fait, au-delà d'une optimisation du phénomène de réflexion, on constate également que la présence d'une déformation murale améliore la diffusion de l'onde sonore dans l'espace. Ainsi, la répartition du son est plus homogène et de fait, plus agréable pour le spectateur.

Finalement, cette analyse qualitative nous permet d'appuyer le fait qu'aujourd'hui, l'outil paramétrique permet, non seulement de proposer une déformation de mur optimale, mais également de l'analyser acoustiquement parlant afin d'en mesurer les effets.





## **4. PERSPECTIVES**

---

## **4. Perspectives**

A travers cette partie du mémoire, nous pourrons tout d'abord relever les limites du modèle virtuel sur lequel nous avons basé notre phase d'expérimentation et proposer des améliorations possibles. Il s'agira par la suite d'établir une critique constructive de l'expérience menée en évoquant non seulement les apports de celle-ci, mais également les problèmes et difficultés rencontrés lors de sa mise en place.

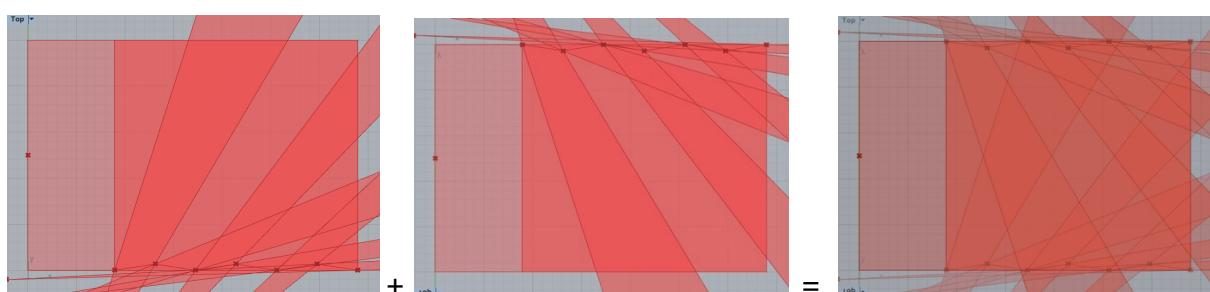
### a. Limites du modèle et possibilités d'amélioration

L'une des premières remarques que nous pouvons faire quant aux limites du modèle virtuel créé est sa forme. En effet, la forme de salle générée par ce modèle est de type rectangulaire. De fait, son volume parallélépipédique ne correspond pas à tous les types d'espaces intérieurs. Certes, de par son caractère paramétrique le modèle peut s'adapter à un nombre infini de salles de dimensions diamétralement opposées, mais il ne permet pas, tel qu'il est conçu, l'étude d'un espace intérieur curviligne, circulaire ou elliptique par exemple. La créativité et la liberté de conception de ce modèle sont donc relativement limitées. Cependant, il pourrait être envisageable, au cours d'une recherche complémentaire, de créer un algorithme du même type, avec un type de déformation similaire, mais adaptée à une forme elliptique. En effet, l'ellipse, tout comme le rectangle se construit géométriquement selon deux axes principaux ce qui lui permet d'être déformée de la même manière via deux paramètres qui pourraient être, par exemple : la longueur du grand axe et la longueur du petit axe. La différence entre un tel algorithme et l'algorithme que nous avons créé précédemment dans ce mémoire se trouverait finalement au niveau des paramètres initiaux qui caractérisent la forme de la pièce et non au niveau des variables qui permettent d'optimiser le modèle.

La seconde limite de ce modèle qui pourrait être relevée est la forme des couples de panneaux constituant les murs déformés puisque celle-ci est finalement assez restreinte en termes de possibilités de conception. En effet, ces couples de panneaux ont été construits en série ; c'est -à-dire qu'ils sont tous la copie d'un couple de panneaux bien précis. Ils sont donc liés les uns aux autres et identiques entre eux. Cela implique que si l'architecte fait varier les dimensions ou la position du couple de panneaux à l'origine de cette série, l'ensemble des panneaux variera de la même manière. De fait, tout en permettant une infinité de configurations et de déformations des murs latéraux de la salle modélisée, cette construction en série empêche l'utilisateur de faire évoluer les panneaux indépendamment les uns des

autres. Dans un travail de recherche futur, il serait alors judicieux de songer à définir différemment l'ensemble de ses panneaux afin de pouvoir proposer une déformation de l'enveloppe de la salle adaptée sur-mesure à la réflexion du son. De fait, dans un modèle où chaque panneau serait défini de façon à être amovible indépendamment des autres, les possibilités de déformations pourraient devenir beaucoup plus intéressantes, plus riches, et plus précises. Cela permettrait de concevoir, potentiellement, une salle avec une meilleure optimisation soit une meilleure qualité acoustique.

Enfin, il convient également de pointer du doigt le fait que l'étude de la déformation des murs latéraux de la salle n'a été menée que sur l'un des côtés. Cela provient à l'origine d'une volonté de simplification du modèle puisque, en effet, en considérant l'aspect symétrique de la forme de la salle étudiée, nous pouvons penser que les solutions décrivant une forme optimale d'un des murs latéraux seront identiques pour le mur opposé. Ce raisonnement est recevable, cependant il présente certaines limites. Dans la démarche que nous adoptons lors de la phase expérimentale de ce travail, nous cherchons à recouvrir la surface d'audience par la surface totale de son réfléchi de façon à ce que tous les spectateurs reçoivent à la fois du son direct et du son réfléchi. Or, lorsque nous traitons uniquement la déformation du mur sur l'un des côtés de la salle, nous ne prenons pas en compte le fait que, certaines zones de la salle ne recevant pas de son réfléchi avec la déformation de ce mur, en recevraient si on considérait la déformation du mur opposé. De fait, il serait plus pertinent de bien considérer la déformation des deux murs latéraux dans le processus d'optimisation puisque nous obtiendrions une surface d'audience couverte par la surface de son réfléchi plus importante et donc plus réaliste que ce que nous obtenons actuellement. (*Figure 66*)



*Figure 66 : Allure potentielle de la surface totale de son réfléchi produite par la déformation des deux murs latéraux d'une salle, en considérant que la répartition du son est symétrique* <sup>70</sup>

---

<sup>70</sup> Si la forme de la salle est symétrique et que la source émettrice de son est centrée comme dans les cas que nous avons étudié jusqu'à présent, alors la répartition du son dans la salle est symétrique.

### b. Critique de l'expérimentation

Au-delà du modèle en lui-même, la phase d'expérimentation possède elle aussi des limites et des points d'amélioration.

Dans un premier temps, il semble important de relever le fait que la recherche menée jusqu'à présent, ayant pour but de proposer une optimisation acoustique de l'espace intérieur d'une salle de concert, a été effectuée sur un modèle 2D. Or une modélisation plane ne décrit pas entièrement un espace. En effet, l'analyse acoustique de ce travail de recherche a été effectuée sur un modèle 3D en considérant que la déformation géométrique décrite en plan était la même sur toute la hauteur du mur. Cependant, le mur que nous décrivons en plan dans le modèle 2D pourrait également être composé différemment sur l'ensemble de sa hauteur, auquel cas, travailler l'optimisation du modèle uniquement en plan ne serait pas suffisante. Ce travail en plan limite donc les possibilités de déformation du mur dans le sens où il enlève un degré de liberté à cette déformation qui se construit géométriquement selon deux axes, l'axe X et l'axe Y, en omettant l'axe Z. Dans le cadre d'une recherche future, il pourrait alors être intéressant de travailler une déformation verticale (selon l'axe Z donc) en développant soit un autre modèle paramétrique représentatif de la coupe de la salle à étudier, soit un modèle permettant directement une étude en volume. Cette dernière possibilité entraînerait la redéfinition de la fonction d'optimisation qui ne serait alors plus liée à une surface calculée représentant l'intersection entre la surface d'audience et la surface totale de son réfléchi, mais bien à un volume calculé équivalent, représentant alors l'intersection entre le volume de l'audience et le volume total de son réfléchi.

Dans un second temps, en procédant aux différentes déformations de mur sur le modèle 2D, nous avons pu constater que les surfaces de son réfléchi sont parfois amenées à se superposer (*Figure 67*). Or ces zones de superpositions se transcrivent, en réalité, par des endroits où les spectateurs reçoivent deux fois plus de son que les personnes assises hors de ces zones. Cet événement vient donc, en partie, entraver le caractère homogène de la propagation du son dans la salle. Lorsque nous avons rencontré ce genre de cas au cours la phase d'expérimentation, nous avons fait le choix de considérer uniquement la réunion des deux surfaces superposées, ne comptabilisant ainsi qu'une seule fois la surface couverte. Il serait judicieux de pousser notre recherche plus loin en proposant une amélioration du modèle qui permettrait, lors de la phase d'optimisation, de limiter la création de ces superpositions. Il s'agirait alors de retravailler la fonction d'optimisation afin non plus, uniquement de maximiser

l'intersection entre la surface d'audience et la surface de son réfléchi, mais également de minimiser les différentes superpositions de surfaces de son réfléchi qui apparaissent. Plusieurs interrogations se poseront alors sur la mise en œuvre d'une telle optimisation. Comment est-ce applicable ? Est-il possible d'opérer une optimisation à l'aide de Galápagos en utilisant deux critères d'optimisation ? Doit-on utiliser deux fonctions d'optimisation simultanées ? Ou bien doit-on lancer deux phases d'optimisation avec des fonction Fitness différentes et recroiser les résultats ensuite ?

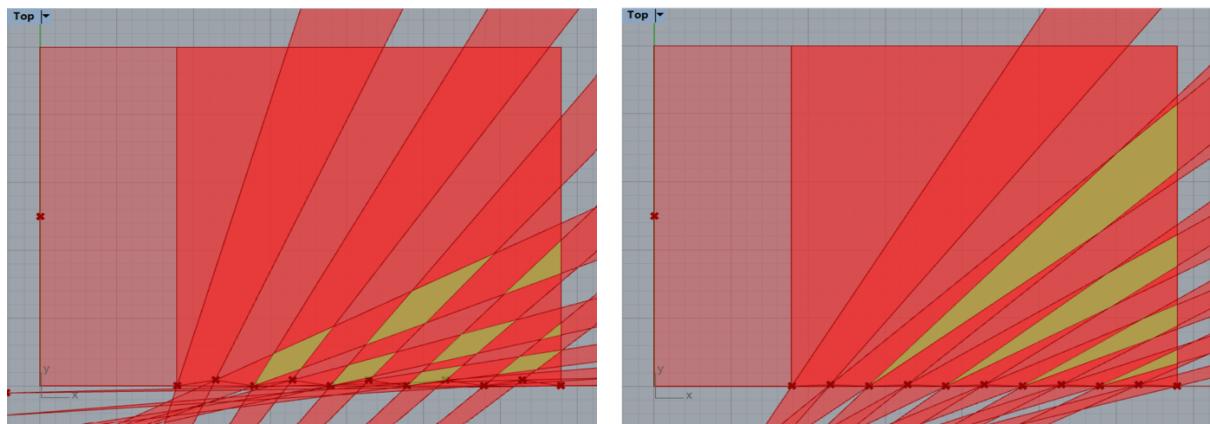


Figure 67 : Mise en évidence de la superposition des surfaces de son réfléchi correspondant à différents panneaux

Dans un troisième temps, lors de la phase d'expérimentation, nous avons effectué une analyse afin d'évaluer l'impact de la déformation du mur effectuée sur la propagation du son à l'intérieur de la salle étudiée. Pour se faire, nous avons utilisé Pachyderm, un module d'extension de Grasshopper et plus particulièrement l'outil PachyDerm Particule Animation permettant de visualiser la propagation d'une onde sonore à l'intérieur de la salle à travers la création d'un nuage de points. Cependant, l'analyse acoustique proposée par cet outil reste très qualitative dans le sens où les résultats de l'analyse sont donnés sous forme d'image et non de valeurs numériques. Il serait donc intéressant de poursuivre ce travail de recherche en proposant une analyse quantitative effectuée avec l'ensemble des outils mis à disposition par le module Pachyderm : PachyDerm Auralisation, Custom Maps, Hybrid Models, Mapping Method, TimeDomain Models. Cette analyse acoustique quantitative du modèle n'a pas été effectuée ici puisqu'elle n'aurait pas été complètement juste. En effet, ce type d'analyse nécessite de prendre en considération le choix des matériaux attribués aux différentes surfaces composant l'enveloppe de la salle. Or, dans le cadre de ce mémoire, nous avons centré notre travail de recherche uniquement autour d'une étude sur la réflexion du son. De fait, le phénomène d'absorption du son, lié en grande partie au choix des matériaux, n'a pas été abordé. Ce phénomène d'absorption a pourtant une grande influence sur la perception du son.

à l'intérieur d'un espace et notamment sur l'intensité du son réfléchi. Le fait de ne pas avoir traité la problématique du choix des matériaux nous limite donc dans les expériences d'analyse. Ainsi, il s'agirait, dans la mesure du possible, d'effectuer cette analyse quantitative lors d'une potentielle poursuite de ce travail de recherche.

Dans un quatrième et dernier temps, il convient de critiquer à présent le nombre d'erreurs rencontrées et répertoriées à chaque expérience d'optimisation. En effet, au cours de chacune de ces expériences, nous avons pu constater que, parmi les solutions optimales proposées par Galápagos, la solution la plus élevée de toutes correspondait constamment à une valeur erronée. Ces erreurs, qui peuvent être détectées dans l'algorithme de Grasshopper par l'apparition de composants colorés d'orange ou de rouge (*Figure 68*) correspondent au fait que, pour ces composants en question, les données d'entrées sont mauvaises et ne permettent pas de réaliser leur calcul. D'après les résultats retenus précédemment, nous pouvons donc regrouper un ensemble de surfaces qui ont présenté un problème de calcul (*Tableau 7*).

Expérience	Surface calculée	Élément rencontrant un problème de calcul
Témoin	900 m <sup>2</sup>	Boundary Surface
1	800 m <sup>2</sup>	Boundary Surface
2	400 m <sup>2</sup>	Slip Brep
3	1600 m <sup>2</sup>	Boundary Surface
4	1200 m <sup>2</sup>	Boundary Surface

Tableau 7 : Énumération des erreurs de calcul rencontrées lors des différentes expériences

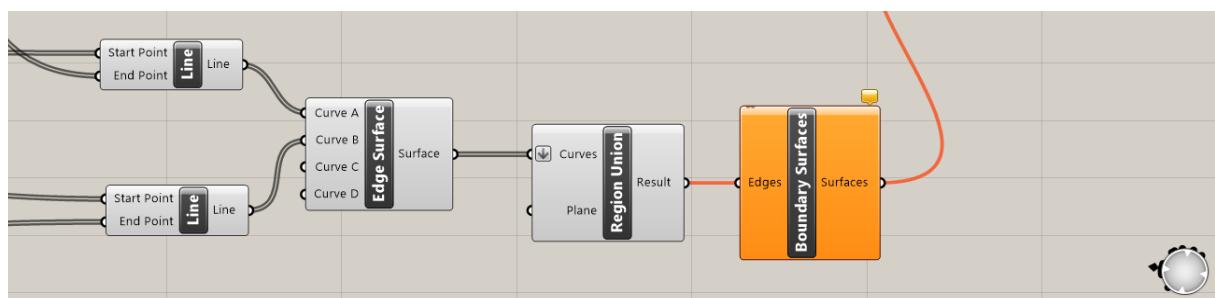


Figure 68 : Exemple d'algorithme présentant une erreur de calcul<sup>71</sup>

<sup>71</sup> Dans le cas présent par exemple, la donnée sortante « Result » de « Region Union » ne correspond pas au type de donnée attendu en entrée de « Edges » au niveau du composant « Boundary Surface » et ne rend donc pas possible le calcul de ce dernier. Lorsqu'une erreur comme celle-ci se présente, toute la suite de l'algorithme est impactée.

Ainsi, il semblerait pertinent, dans le but de compléter ce travail de recherche, de se pencher plus précisément sur le modèle 2D afin de comprendre concrètement à quelles géométries de mur et quelles configurations du modèle correspondent ces erreurs. Certes, elles ne privent pas l'architecte procédant à l'expérience d'optimisation d'obtenir les solutions optimales recherchées, mais elles le ralentissent dans le sens où, sachant que de telles erreurs peuvent se produire de façon récurrente, il doit constamment vérifier le caractère erroné ou non de la solution. De fait, ces solutions erronées ne devraient pas apparaître parmi les propositions de solutions optimales retenues par Galápagos puisqu'elles ne peuvent pas être réutilisées par la suite par l'architecte.



## **5. CONCLUSION**

---

## 5. Conclusion

En partant d'une difficulté de conception architecturale relative à l'acoustique et en particulier à la réflexion du son, ce travail de recherche met en évidence le fait que l'outil paramétrique puisse apporter des solutions en termes de conception et surtout une aide précieuse pour l'architecte dans sa prise de décision. Ce mémoire propose ainsi une réponse à la problématique soulevée : « Comment l'outil paramétrique peut-il aider un architecte à déterminer la forme adéquate d'une salle dans le but d'optimiser la réflexion du son à l'intérieur de l'espace ? ».

En se basant non seulement sur les principes et les théories de l'acoustique mais également sur des modèles d'architectures existants, ce travail montre qu'il est possible, aujourd'hui, d'envisager la création d'un modèle virtuel permettant de modéliser une infinité de salles et de retracer, dans chacune d'elles, le cheminement du son géométriquement. La réalisation d'un tel modèle est rendue possible grâce aux différents outils paramétriques dont nous disposons aujourd'hui. Ce travail de recherche propose la mise en relation de différents outils paramétriques tels que : Rhino, logiciel de modélisation 3D, Grasshopper, éditeur d'algorithme, Galápagos, module informatique d'optimisation, et Pachyderm, module informatique d'analyse acoustique. En effet, l'association de ces quatre logiciels et extensions de logiciel a permis de mener à bien une expérimentation conduisant à la détermination d'une forme optimale du modèle virtuel d'origine dans un temps relativement restreint. En tant qu'architecte, il est donc possible, à l'heure actuelle, d'utiliser l'outil paramétrique afin de déterminer la forme intérieure d'une salle permettant d'avoir une réflexion acoustique optimale en termes de trajectoire.

Cette recherche met également en lumière certaines limites dans le modèle conçu ainsi que dans l'utilisation de l'outil paramétrique et propose des perspectives d'améliorations. De fait, dans le cadre du développement du modèle, il s'agirait d'inclure notamment, une flexibilité non seulement sur la forme globale de la salle en lui offrant la possibilité d'être plus curviligne, mais également une flexibilité au niveau de la déformation du mur qui pourrait être moins régulière et plus riche si elle était composée de panneaux indépendants les uns des autres. Par ailleurs, il serait possible d'affiner à la fois l'optimisation du modèle en ajoutant certains critères, mais aussi la phase d'analyse en incluant le phénomène d'absorption qui impacte celui de la réflexion. Enfin, certaines erreurs liées à l'utilisation de l'outil paramétrique et au calcul de certains éléments mériteraient d'être résolues.

De façon plus large, dans le cadre d'un travail de recherche complémentaire, un autre type d'application liée à l'outil expérimental manipulé au cours de ce mémoire pourrait être envisagé. De fait, la déformation permise par le modèle expérimental afin d'optimiser la réflexion du son, et donc la qualité de l'ambiance sonore intérieure à l'espace, pourrait être envisagée non pas lors du processus de conception d'un projet mais lors du processus d'utilisation et d'exploitation du projet. En effet, depuis quelques années, grâce à l'arrivée du paramétrique, on peut voir l'apparition de façades déformables appelées plus communément façades adaptatives. Nous pourrions donc envisager la création d'un algorithme similaire à celui présenté dans ce mémoire permettant d'étudier et de déterminer les positions optimales d'un revêtement intérieur mural amovible qui pourrait se déformer et faire évoluer l'ambiance sonore d'une salle de spectacle en temps réel.



## **6. BIBLIOGRAPHIE**

---

## **6. Bibliographie**

### **Ressources en lignes :**

« A Computational Method for Integrating Parametric Origami Design and Acoustic Engineering », by Takenaka, Tsukasa and Okabe, Aya (2013). Extract from : Stouffs, Rudi and Sariyildiz, Sevil (eds.), Computation and Performance – Proceedings of the 31st eCAADe Conference – Volume 2, Faculty of Architecture, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 18-20 September 2013, pp. 289-295.

Disponible sur : <http://papers.cumincad.org>

« Acoustic Consequences of Performative Structures Modelling Dependencies between Spatial Formation and Acoustic Behaviour », by Reinhardt, Dagmar ; Martens, William ; Miranda, Luis (2012). Extract from : Achten, Henri; Pavlicek, Jiri; Hulin, Jaroslav; Matejovska, Dana (eds.), Digital Physicality - Proceedings of the 30th eCAADe Conference - Volume 1 / ISBN 978-9-4912070-2-0, Czech Technical University in Prague, Faculty of Architecture (Czech Republic) 12-14 September 2012, pp. 577-586.

Disponible sur : <http://papers.cumincad.org>

« Acoustically Efficient Origami Based Partitions for Open Plan Spaces - Developing a Design Tool », by Sophia Vyzoviti and Nicolas Remy (2014). Extract from : Thompson, Emine Mine (ed.), Fusion - Proceedings of the 32nd eCAADe Conference - Volume 1, Department of Architecture and Built Environment, Faculty of Engineering and Environment, Newcastle upon Tyne, England, UK, 10-12 September 2014, pp. 487-494.

Disponible sur : <http://papers.cumincad.org>

« Bio-Origami : Form Finding and Evaluation of Origami Structures, de Baerlecken, Daniel, Swart, Matthew, Gentry, Russell, Wonoto, Nixon ». Extract from : Achten, Henri; Pavlicek, Jiri; Hulin, Jaroslav; Matejovska, Dana (eds.), Digital Physicality - Proceedings of the 30th eCAADe Conference - Volume 1 / ISBN 978-9-4912070-2-0, Czech Technical University in Prague, Faculty of Architecture (Czech Republic) 12-14 September 2012, pp. 497-504.

Disponible sur : <http://papers.cumincad.org>

« Conception acoustique d'une salle – intérêt du prototypage et principe de conception de maquette » de Caroline DE SA et Hélène HORSIN MOLINARO, École Normale Supérieure de paris-Saclay, Édité le 24/03/2017, Publié le 27/03/2017, 17p. (

Disponible sur : <https://eduscol.education.fr>

« Design Informatics » by N.Biloria, K. Oosterhuis and C.Aalbers (2005). Extract from : Smart Architecture: Integration of Digital and Building Technologies [Proceedings of the 2005 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design In Architecture / ISBN 0-9772832-0-8] Savannah (Georgia) 13-16 October 2005, pp. 226-235.

Disponible sur : <http://papers.cumincad.org>

« Designing With Data: Moving Beyond The Design Space Catalog » by Brown, Nathan; Mueller, Caitlin (2017). Extract from : ACADIA 2017: DISCIPLINES & DISRUPTION [Proceedings of the 37th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-0-692-96506-1] Cambridge, MA 2-4 November, 2017, pp. 154-163.

Disponible sur : <http://papers.cumincad.org>

« Evolution of an Instrumental Architecture » by Isak Worre Foged, Anke Pasold and Mads Brath Jensen. 2014. Extract from : Thompson, Emine Mine (ed.), Fusion - Proceedings of the 32nd eCAADe Conference - Volume 2, Department of Architecture and Built Environment, Faculty of Engineering and Environment, Newcastle upon Tyne, England, UK, 10-12 September 2014, pp. 365-372.

Disponible sur : <http://papers.cumincad.org>

« From digital design to physical model - Origami techniques applied to dynamic paneling shapes for acoustic performance control », by Lo Turco, Massimiliano, Zich, Ursula, Astolfi, Arianna, Shtrepi, Louena and Botto, Poaola, Matteo (2017). Extract from : Fioravanti, A, Cursi, S, Elahmar, S, Gargaro, S, Loffreda, G, Novembri, G, Trento, A (eds.), ShoCK! - Sharing Computational Knowledge! - Proceedings of the 35th eCAADe Conference - Volume 2, Sapienza University of Rome, Rome, Italy, 20-22 September 2017, pp. 77-86.

Disponible sur : <http://papers.cumincad.org>

« Integrating Sound Scattering Measurements in the Design of Complex Architectural Surfaces: Informing a parametric design strategy with acoustic measurements from rapid prototype scale models », by Peters, Brady; Olesen, Tobias S (2010). Extract from : FUTURE CITIES [28th eCAADe Conference Proceedings / ISBN 978-0-9541183-9-6] ETH Zurich (Switzerland) 15-18 September 2010, pp.481-49.

Disponible sur : <http://papers.cumincad.org>

« Parametric Acoustic Surfaces » by Peters, Brady (2009). Extract from : ACADIA 09: reform( ) - Building a Better Tomorrow [Proceedings of the 29th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-0-9842705-0-7] Chicago (Illinois) 22-25 October, 2009), pp. 174-181. (

Disponible sur : <http://papers.cumincad.org>

« Parametric Propagation of Acoustical Absorbers », by Banda Pablo (2010). Extract from : ACADIA 10: LIFE information, On Responsive Information and Variations in Architecture [Proceedings of the 30th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-1-4507-3471-4] New York 21-24 October, 2010), pp. 313-319.

Disponible sur : <http://papers.cumincad.org>

« Responsive Acoustic Surfaces: Computing Sonic Effects », by Peters, Brady; Tamke, Martin; Nielsen, Stig Anton; Andersen, Søren Vestbjerg; Haase, Mathias (2011). Extract from : RESPECTING FRAGILE PLACES [29th eCAADe Conference Proceedings / ISBN 978-9-4912070-1-3], University of Ljubljana, Faculty of Architecture (Slovenia) 21-24 September 2011, pp.819-828.

Disponible sur : <http://papers.cumincad.org>

« The Application of Object-Oriented Computing In The Development of Design Systems for Auditoria » by Mahalingam, Ganapathy (1995), University of Florida.

Disponible sur : <http://papers.cumincad.org>

« The Effect of Complex Wall Forms on the Room Acoustics - An experimental case study » by Agirbas, Asli, (2019). Extract from : de Sousa, JP, Xavier, JP and Castro Henriques, G (eds.), Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution - Proceedings of the 37th eCAADe and 23rd SIGraDi Conference - Volume 2, University of Porto, Porto, Portugal, 11-13 September 2019, pp. 97-102.

Disponible sur : <http://papers.cumincad.org>

« The Effect of Performance Feedback and Optimization on the Conceptual Design Process » Brown, Nathan, and Caitlin T. Mueller (2016). In Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures Symposium. Tokyo: IASS.

Disponible sur <https://www.researchgate.net>

### **Ouvrages :**

« Algorithmic Architecture », Terzidis, K. (2006), Architectural Press, Oxford.

« Parametric environment : the handbook of Grasshopper : nodes and exercises », Molina Siles, Pedro Javier (2016), Universitat Politècnica de València.

« Acustica Arquitectonica y Urbanistica » by Llinares Galiana, Jaime ; Sancho Vendrell, J.; Llopis Reyna, Ana; Odilo (2011), Universitat Politècnica de València,

### **Sites internet :**

« Le bruit et ses effets sur la santé » :

<https://www.futura-sciences.com> (Consulté en mars 2020)

Site du logiciel Rhinocéros 3D

<https://www.rhino3d.com> (Consulté en novembre 2019)

Site de mise à disposition des modules d'extension relative au logiciel Rhinocéros 3D

<https://www.food4rhino.com/> (Consulté en avril 2020)

Tutoriel : utilisation de Grasshopper

« Grasshopper Tutorial (Rotate Axis) » :

<https://www.youtube.com/watch?v=eno0ByZuWLQ> (Consulté en mai 2020)

Tutoriel : prise en main et utilisation de Galapagos

« Grasshopper Galapagos Tutorial » :

<https://www.youtube.com/watch?v=TGVwz4c6ieY> (Consulté en septembre 2020)

« Grasshopper Galapagos Tutorial » :

<https://www.youtube.com/watch?v=g3CPe1bPhEw&t=1549s> (Consulté en septembre 2020)

« Optimization with Grasshopper » :

[https://www.youtube.com/watch?v=llsJTFVtB\\_Y&t=1537s](https://www.youtube.com/watch?v=llsJTFVtB_Y&t=1537s) (Consulté en septembre 2020)

Tutoriel : prise en main et utilisation de Pachyderm

« Architectural Acoutsic – Podcast11 – Simulation 1 – Install » :

<https://vimeo.com/245069560> (Consulté en octobre 2020)

« Architectural Acoutsic – Podcast12 – Simulation 2 – Basics Setup » :

<https://vimeo.com/247018860> (Consulté en octobre 2020)

« Architectural Acoutsic – Podcast13 – Simulation 3 – Sources and Receiver » :

<https://vimeo.com/245241077> (Consulté en octobre 2020)

« Architectural Acoutsic – Podcast17 – Simulation 7 – Particles » :

<https://vimeo.com/245241697> (Consulté en octobre 2020)





## **7. GLOSSAIRE**

---

## 7. Glossaire

**DAO : Dessin Assisté par Ordinateur** : permet de réaliser des dessins techniques avec un logiciel. Il utilise la plupart du temps le mode vectoriel et constitue un outil de représentation essentiellement. Aujourd’hui, les logiciels de DAO sont de moins en moins utilisés au profit des logiciels de CAO.

**CAO : Conception Assistée par Ordinateur** : regroupe l’ensemble des logiciels de dessin et les techniques de modélisation géométrique qui permettent de concevoir, de tester virtuellement et de réaliser des projets. Les logiciels de CAO ne sont pas uniquement utilisés comme des outils de représentation mais participent véritablement à la conception d’un projet.

**2D : Modélisation numérique en deux dimensions** : le fait de concevoir, dessiner ou modifier une géométrie qui peut être représentée sur un plan de repère (X, Y). À l’origine, cette façon de dessiner imite vectoriellement le dessin manuel sur papier en permettant une plus grande précision et une facilité dans la modification du projet.

**3D : Modélisation numérique en trois dimensions** : le fait de Concevoir, dessiner ou modifier une géométrie qui peut être représentée dans un espace de repère (X,Y,Z). La modélisation 3D amène la possibilité de dessiner et manipuler un objet en volume.

**BET : Bureau d’Étude Technique** : entreprise, société ou service chargé des études, des calculs et de la réalisation des plans, dans un ou plusieurs corps d’état ou domaines techniques.

**Diffraction** : phénomène de déviation des ondes (acoustiques) lorsqu’elles passent au voisinage d’un obstacle ou au passage d’une ouverture de petite dimension.

**Diffusion** : phénomène par lequel un rayonnement (sonore) se propage dans diverses directions.

**Absorption** : atténuation de la puissance de l’onde sonore par la structure qui lui fait obstacle.

**Conception morphogénétique** : idée d'une conception au cours de laquelle d'une forme se construit d'elle-même. C'est une conception relative à la morphogénèse et donc au développement des formes, des structures d'une espèce vivante. Ce processus de conception se base sur ce que l'on appelle l'autopoïèse, l'auto-organisation et l'émergence.

**L'autopoïèse** : capacité d'un système à se produire lui-même en permanence et en interaction avec son environnement ce qui lui permet de maintenir son organisation interne malgré un changement de composant.

**Réverbération** : tel que nous l'employons dans ce mémoire, ce terme correspond à la persistance d'un son dans un espace clos ou mi-clos après interruption de la source sonore. Cette persistance de son est due à l'ensemble des réflexions tardives de l'onde sonore qui a été émise sur les parois de l'espace dans lequel elle s'est propagée.

**Plug-in** : outil composé d'un ensemble de fichier informatiques et qui permet d'installer des nouvelles fonctionnalités en marge d'un logiciel auquel il est rattaché. On parlera parfois de module d'extension ou de plugiciel pour le désigner.

### **NURBS : NON-Uniform Rational B-Splines :**

Une courbe NURBS est une courbe définie par quatre données :

- **Le degré** qui correspond à un nombre entier positif souvent compris entre les nombres 1, 2, 3, 5. Une NURBS de degrés 1 correspond à une polyligne par exemple, celle de degré 2 à un cercle, et celle de degré 3 ou 5 à des courbes de forme libre.
- **Les points de contrôle** qui sont une liste d'au moins ( $\text{degré}+1$ ) points. Ils permettent notamment, par leur déplacement, une modification de la forme d'une courbe NURBS. Il est également possible d'appliquer en chacun des points de contrôle d'une telle courbe un poids. Si tous les points de la courbe ont le même poids, alors elle est caractérisée de non-rationnelle, au contraire, si les poids différents, elle sera appelée rationnelle.
- **Les nœuds** qui sont une liste de ( $\text{degré}+N-1$ ) nombres où  $N$  est le nombre de points de contrôle. Les dessinateurs ajoutent parfois ou enlèvent des nœuds et déplacent ensuite les points de contrôle pour rendre les courbes plus ou moins lisses et pour ajouter ou supprimer des points de rebroussement.
- **Une règle d'évaluation** qui est une formule mathématique qui prend un nombre et y assigne un point. Cette règle dépend des trois types de données précédentes.

**Génome** : en biologie, le « génome » est l'ensemble des chromosomes et gènes d'une espèce ou d'un individu. L'utilisation de ce terme par Galápagos n'est donc pas anodine. En effet, dans le cadre de ce travail de recherche, le génome constituera l'ensemble des paramètres à faire varier lors de la phase d'optimisation. Ces paramètres définiront donc chaque modèle testé lors de cette optimisation et pourront être assimilés au patrimoine génétique de ces différents modèles.

**Fonction Fitness** : « Fitness » en anglais peut être relier à celui d'aptitude. En effet, la Fonction Fitness utilisé dans Galápagos correspond au paramètre que l'on va suivre lors de l'optimisation et qui va nous permettre d'affiner notre sélection afin de déterminer quel modèle est le plus optimal soit le plus apte à répondre à nos critères.

**ESQ** : sigle qui signifie « Esquisse ». La phase ESQ est donc la phase esquisse du processus de conception d'un projet d'architecture.





## **8. TABLE DES FIGURES**

## **8. Table des figures**

(Figures 1 à 3) Extrait de : « Conception acoustique d'une salle – intérêt du prototypage et principe de conception de maquette » de Caroline DE SA et Hélène HORSIN MOLINARO.	
Figure 1 : Schéma représentatif de la superposition de l'onde sonore directe et des ondes sonores réfléchies.....	26
Figure 2 : Échogramme de la réponse impulsionnelle d'une salle .....	26
Figure 3 : Propagation d'une onde sonore dans un auditorium.....	27
Figure 4 : Construction de rayons réfléchis .....	27
(Figures 5 à 10) Disponible sur : <a href="https://www.archdaily.com">https://www.archdaily.com</a>	
Figure 5 : Courtesy of Dolugan Meissl Associated Architects, Muhlgraben, .....	29
Figure 6 : Presbyterian Church of Arcari & Iovino Archietcts, Pohang-Si, .....	29
Figure 8 : The Gallery for the Festival Arerra, Kadarik Tüür Arhitektid, Viljandi, .....	29
Figure 7 : The Joyful Church of The Beck Group, New jersey,.....	29
Figure 9 : Amphitorium in the Banc Sabadell Heaquarters project of Bach Architects, Barcelona, Spain (2012) .....	29
Figure 10 : Plan of The Gallery for the Festival Arerra, Kadarik Tüür Arhitektid, Viljandi, Estonia (2013).....	31
(Figures 11 et 12) Élaboration : Julie VINCENT.	
Figure 11: Exemple de construction géométrique réalisée pour étudier l'impact d'un changement de forme du mur sur la trajectoire de son réfléchi.....	32
Figure 12 : Exemple de modèle paramétrique.....	34
(Figure 13) Disponible sur : <a href="https://www.archdaily.com">https://www.archdaily.com</a> et <a href="https://www.e-architect.com">https://www.e-architect.com</a>	
Figure 13 : Kolding Campus University of Henning Larsen Architects, Southern Denmark (2014).....	36
(Figure 14) Disponible sur : <a href="https://www.archiscene.net">https://www.archiscene.net</a> et <a href="https://igs-mag.com">https://igs-mag.com</a>	
Figure 14 : Al Bahar Tower of Adeas Architects, Abu d'Abi (2012) .....	36
(Figure 15) Disponible sur : <a href="https://www.archdaily.com">https://www.archdaily.com</a>	
Figure 15 : Pavillon, Yeosu-Si of SOMA Lima, South Korea (2012).....	36
(Figure 16) Extrait de : “From digital design to physical model - Origami techniques applied to dynamic paneling shapes for acoustic performance control” by Lo Turco, Massimiliano, Zich, Ursula, Astolfi, Arianna, Shtrepi, Louena and Botto, Poaola, Matteo.	
Figure 16 : Représentation du motif retenu et des maquettes créées à partir de celui-ci ....	38
(Figures 17 à 68) Élaboration : Julie VINCENT.	
Figure 17 : Fenêtre de travail de Rhinocéros lors de la création d'un volume parallélépipédique .....	44

Figure 18 : Combinaison des fenêtres de travail de Rhino et Grasshopper .....	45
Figure 19 : Détail d'un algorithme générateur d'un volume parallélépipédique .....	46
Figure 20 : Détail d'un algorithme générateur d'un volume parallélépipédique avec introduction Galápagos en tant qu'élément dans l'algorithme.....	47
Figure 21 : Fenêtre de travail de Galápagos, onglet « Option » permettant de régler les caractéristiques de l'optimisation avant son lancement.....	48
Figure 22 : Fenêtre de travail de Galápagos, onglet « Solver » permettant de suivre les résultats de l'optimisation .....	49
Figure 23 : Image en plan d'un nuage de particules se propageant dans un volume parallélépipédique.....	50
Figure 24 : Mise en évidence des paramètres d'optimisation sur le modèle virtuel en 2D ....	53
Figure 25 : Algorithme complet correspondant au modèle virtuel en 2D .....	54
Figure 26 : Extrait de l'algorithme du modèle virtuel 2D correspondant au tracé de l'espace audience .....	55
Figure 27 : Extrait de l'algorithme du modèle virtuel 2D correspondant au tracé du périmètre de la salle entière.....	55
Figure 28 : Extrait de l'algorithme du modèle virtuel 2D correspondant à la division du mur étudié en différents panneaux .....	56
Figure 29 : Extrait de l'algorithme du modèle virtuel 2D correspondant à la déformation du mur étudié, soit au déplacement des panneaux composant ce mur.....	57
Figure 30 : Extrait de l'algorithme du modèle virtuel 2D correspondant au positionnement de la source émettrice de son.....	58
Figure 31 : Extrait de l'algorithme du modèle virtuel 2D correspondant au tracé de la trajectoire du son direct (en rouge) et du son réfléchi (en blanc) des deux premiers panneaux .....	58
Figure 32 : Extrait de l'algorithme du modèle virtuel 2D correspondant au tracé de la trajectoire du son direct (en rouge) et du son réfléchi (en blanc) de l'ensemble des panneaux .....	58
Figure 33 : Exemples de configurations permises par le modèle 2D .....	58
Figure 34 : Étapes de modélisation des murs latéraux du modèle 3D .....	60
Figure 35 : Étapes de la fermeture de l'espace audience du modèle 3D .....	61
Figure 36 : Étapes de modélisation de l'espace scène du modèle 3D .....	62
Figure 37 : Exemples des volumétries permises par le modèle 3D.....	62
Figure 38 : Schéma représentatif du composant Galápagos lié aux paramètres correspondant au « Génome » et à la « fonction Fitness » .....	64
Figure 39 : Données initiales de la phase d'optimisation.....	65

Figure 40 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant aux dimensions de la salle de l'expérience témoin .....	66
Figure 41 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience témoin, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos (Essai 1).....	67
Figure 42 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience témoin, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos (Essai 2).....	67
Figure 43 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience témoin, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos (Essai 3).....	67
Figure 44 : Surfaces de son réfléchi correspondant à chacun des panneaux dans le nouveau modèle et qui, réunies, permettent de calculer une surface totale de son réfléchi correcte et réaliste .....	68
Figure 45 : Surface totale de son réfléchi comptabilisée dans l'ancien modèle, représentée en vert.....	69
Figure 46 : Surface totale de son réfléchi comptabilisée dans le nouveau modèle, représentée en vert.....	69
Figure 47 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant aux dimensions de la salle de l'expérience témoin avec modèle modifié .....	70
Figure 48 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience témoin avec modèle modifié, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos.....	71
Figure 49 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant à la solution optimale obtenue pour l'expérience témoin avec modèle modifié.....	72
Figure 50 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant aux dimensions de la salle de l'expérience 1 .....	73
Figure 51 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience1, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos .....	74
Figure 52 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant à la solution optimale obtenue pour l'expérience 1.....	75
Figure 53 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant aux dimensions de la salle de l'expérience 2 .....	75
Figure 54 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience 2, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos .....	76
Figure 55 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant à la solution optimale obtenue pour l'expérience 2.....	77
Figure 56 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant aux dimensions de la salle de l'expérience 3 .....	77

Figure 57 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience 3, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos .....	78
Figure 58 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant à la solution optimale obtenue pour l'expérience 3.....	79
Figure 59 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant aux dimensions de la salle de l'expérience 4 .....	79
Figure 60 : Résultats graphiques de l'optimisation relative à l'expérience 4, obtenus avec l'onglet « Solver » de l'interface de travail de Galápagos .....	80
Figure 61 : Modélisation et extrait d'algorithme correspondant à la solution optimale obtenue pour l'expérience 4.....	81
Figure 62 : Modèle non « baker » et donc variable, créé à partir de l'algorithme Grasshopper .....	83
Figure 63 : Modèle « baker » et donc fixe, décomposé en surfaces .....	83
Figure 64 : Simulation effectuée avec PachyDerm Particule Animation sur modèle non déformé .....	84
Figure 65 : Simulation effectuée avec PachyDerm Particule Animation sur modèle déformé	84
Figure 66 : Allure potentielle de la surface totale de son réfléchi produite par la déformation des deux murs latéraux d'une salle, en considérant que la répartition du son est symétrique .....	90
Figure 67 : Mise en évidence de la superposition des surfaces de son réfléchi correspondant à différents panneaux .....	92
Figure 68 : Exemple d'algorithmes présentant une erreur de calcul .....	93



## **9. TABLE DES TABLEAUX**

---

## **9. Table des tableaux**

(Tableau 1 à 7) Élaboration : Julie VINCENT.

Tableau 1 : Résultats numériques de l'optimisation relative à l'expérience témoin avec modèle modifié comportant les 6 solutions considérées comme les plus optimales (Essai 1) .....	71
Tableau 2 : Résultats numériques de l'optimisation relative à l'expérience témoin avec modèle modifié comportant les 6 solutions considérées comme les plus optimales.....	72
Tableau 3 : Résultats numériques de l'optimisation relative à l'expérience 1 comportant les 6 solutions considérées comme les plus optimales .....	74
Tableau 4 : Résultats numériques de l'optimisation relative à l'expérience 2 comportant les 6 solutions considérées comme les plus optimales .....	76
Tableau 5 : Résultats numériques de l'optimisation relative à l'expérience 3 comportant les 6 solutions considérées comme les plus optimales .....	78
Tableau 6 : Résultats numériques de l'optimisation relative à l'expérience 4 comportant les 6 solutions considérées comme les plus optimales .....	80
Tableau 7 : Énumération des erreurs de calcul rencontrées lors des différentes expériences .....	93



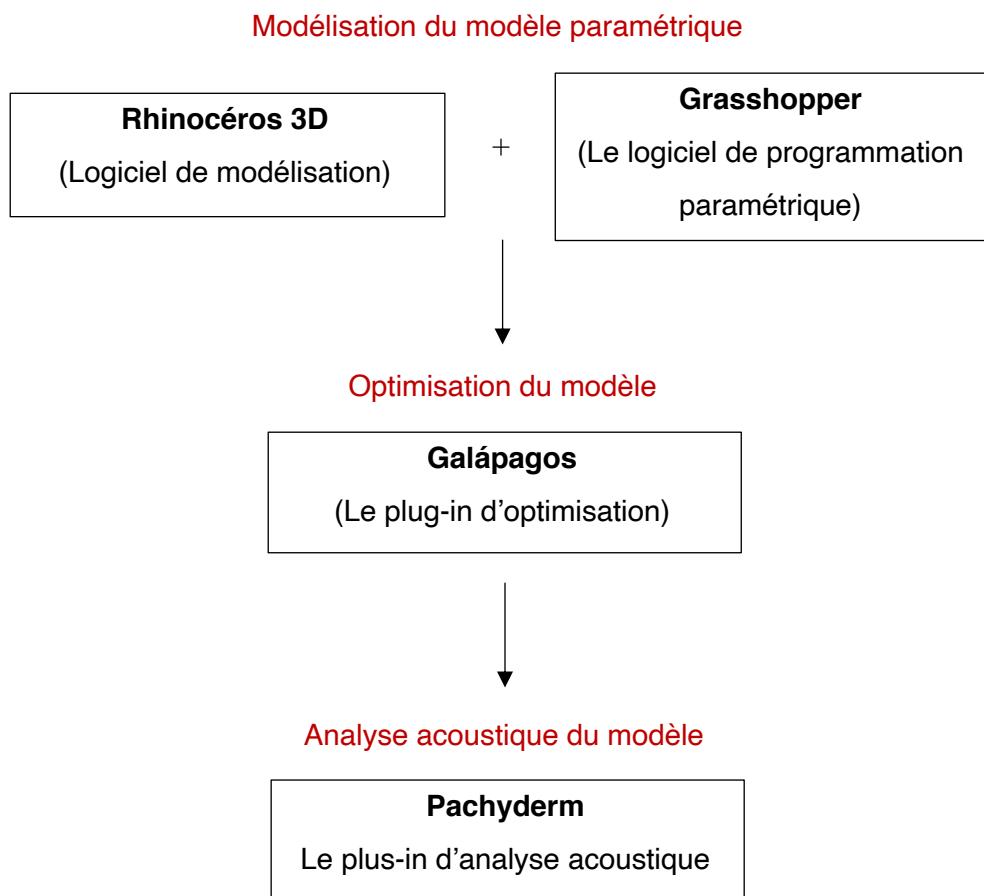


## **10. ANNEXES**

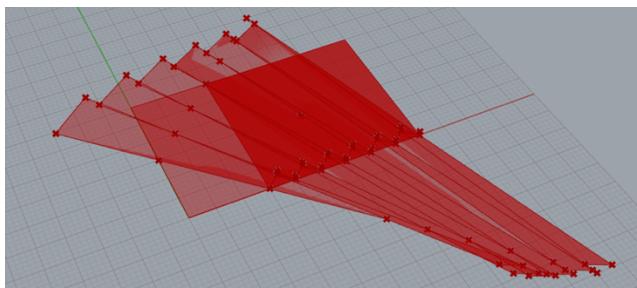
---

## 10. Annexes

### Annexe 1 : Schéma synthétique du protocole d'expérimentation



## Annexe 2 : Bilan des solutions optimales obtenues lors de l'expérimentation



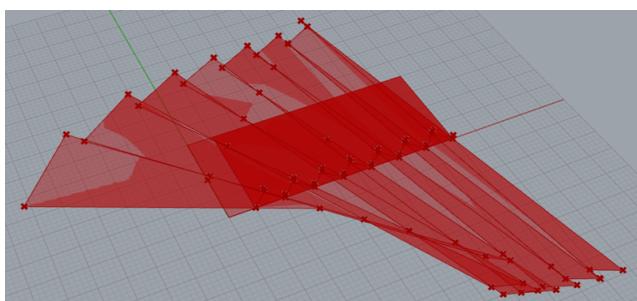
Solution optimale retenue pour l'expérience témoin

Dimensions de la salle :

- Largeur : 30 m
- Profondeur audience : 30 m
- Profondeur scène : 15 m

Paramètres optimaux retenus :

- 6 couples de panneaux
- 2,500 m de décalage



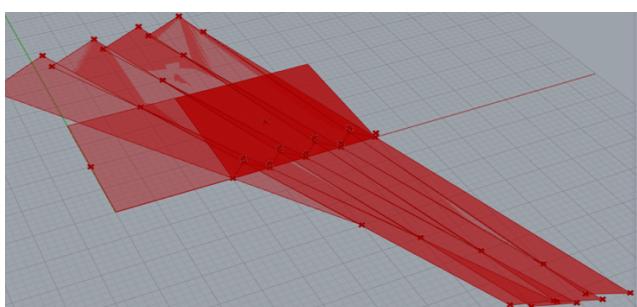
Solution optimale retenue pour l'expérience 1

Dimensions de la salle :

- Largeur : 20 m
- Profondeur audience : 40 m
- Profondeur scène : 5 m

Paramètres optimaux retenus :

- 7 couples de panneaux
- 2,858 m de décalage



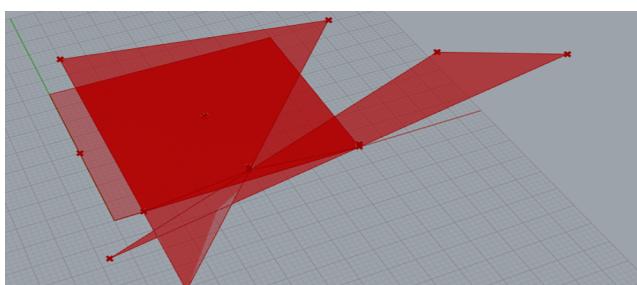
Solution optimale retenue pour l'expérience 2

Dimensions de la salle :

- Largeur : 20 m
- Profondeur audience : 20 m
- Profondeur scène : 15 m

Paramètres optimaux retenus :

- 4 couples de panneaux
- 2,500 m de décalage



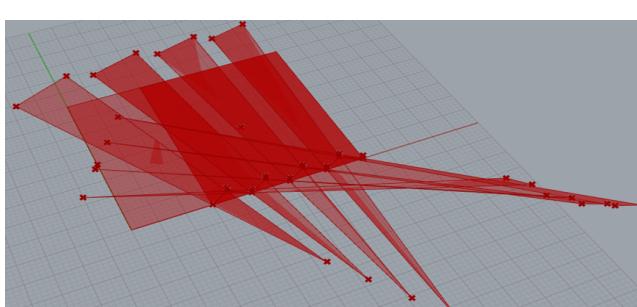
Solution optimale retenue pour l'expérience 3

Dimensions de la salle :

- Largeur : 40 m
- Profondeur audience : 40 m
- Profondeur scène : 5 m

Paramètres optimaux retenus :

- 1 couple de panneaux
- 2,461 de décalage



Solution optimale retenue pour l'expérience 4

Dimensions de la salle :

- Largeur : 40 m
- Profondeur audience : 30 m
- Profondeur scène : 15 m

Paramètres optimaux retenus :

- 4 couples de panneaux
- 2,397m de décalage



Julie VINCENT  
Mémoire de Master, janvier 2021

