

LA
CONCEPTION
D'AMBIANCES LUMINEUSES
À TRAVERS
LA PARAMÉTRISATION
ET
L'OPTIMISATION
D'UN MOUCHARABIEH

MAMOUN LAHLOU

Mémoire de Master

Mamoun LAHLOU

2025

LA CONCEPTION D'AMBIANCES LUMINEUSES À TRAVERS LA
PARAMÉTRISATION ET L'OPTIMISATION D'UN MOUCHARABIEH



École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-La Villette

Savoirs des Activités de Projet Instrumentées

François Guéna, Joaquim Silvestre, Anne Tüscher Dokic

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes enseignants encadrants François Guéna, Joaquim Silvestre, Anne Tüscher Dokic qui ont pris le temps, en dehors des séances de séminaires à l'école, de m'aider à m'orienter sur ma recherche alors que j'étais en année d'études à l'étranger.

Je tiens à remercier Joaquim Silvestre, Anne Tüscher Dokic, Etienne Laget, Emilie Landais-Federici, Charlotte Faugère, Thibault Decaluwe et Olivia Hacquet qui ont lu et relu mon mémoire et m'ont guidé dans sa rédaction afin qu'il gagne en précision et en clarté.

Je tiens à remercier Samuel Bárcenas Suarez, enseignant de conception paramétrique au Tecnológico de Monterrey, à Guadalajara, au Mexique pour son aide et ses cours très intéressants qui m'ont motivé à orienter mon mémoire sur le domaine du paramétrique.

RÉSUMÉ

Ce mémoire a pour objectif de montrer et d'expliquer une méthode de mise en œuvre d'**ambiances lumineuses prédéfinies** à travers la **paramétrisation** et l'**optimisation** d'un **moucharabieh** en passant par des **simulations** et **calculs d'éclairements**. Cette étude s'appuie sur la thèse de doctorat de **Vincent Tourre**, écrite en 2007, intitulée « Simulation inverse de l'éclairage naturel pour le projet architectural ». Les outils informatiques utilisés (**Rhinocéros**, **Grasshopper**, **Honeybee** et **Galapagos**) sont différents mais la méthode employée s'en inspire beaucoup.

ABSTRACT

This thesis aims to demonstrate and explain a method for implementing predefined lighting ambiances through the **parameterization** and optimization of a **moucharabieh**, using **simulations** and **illuminance calculations**. This study is based on **Vincent Tourre's** doctoral thesis, written in 2007, titled 'Inverse Simulation of Natural Lighting for Architectural Design.' The software tools used (**Rhinoceros**, **Grasshopper**, **Honeybee**, and **Galapagos**) are different, but the methodology is heavily inspired by it.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	12
INTRODUCTION	16
1. L'ambiance lumineuse	16
2. La conception paramétrique.....	17
3. Les moucharabiehs	17
4. Problématique	18
5. Plan	18
ÉTAT DE L'ART	22
1. Les moucharabiehs	22
a) Origine	22
b) Les moucharabiehs dans l'architecture contemporaine	23
c) La paramétrisation de moucharabiehs	25
2. La lumière naturelle	26
a) Qu'est-ce que la lumière naturelle ?	26
b) La lumière naturelle et la notion d'ambiance lumineuse.....	27
c) Les unités de mesure	30
3. Les travaux de Vincent Tourre	31
a) Le concept de simulation inverse de l'éclairage naturel	31
b) La CAO et les outils numériques utilisés	35
c) L'application du concept au musée du Louvre d'Abu Dhabi.....	36
4. Les logiciels de paramétrisation	39
a) Grasshopper.....	39
b) Dynamo.....	40
5. Les logiciels de simulation	41
a) Ladybug, Honeybee	41
b) Autodesk Forma.....	41
6. Les logiciels d'optimisation.....	42
a) Galapagos	42
b) Octopus.....	44
MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE	48
1. Explication de la méthode.....	48
a) Ma méthode	48
b) La comparaison de ma méthode avec celle de Vincent Tourre.....	50
2. La conception paramétrique du moucharabieh	52
a) Choix de l'objet d'étude	52
b) Les paramètres appliqués	53
3. Simulation et hypothèses	59
a) La pièce et l'orientation du moucharabieh	59
b) Les conditions météorologiques de l'expérience	60
c) Les outils d'analyse proposés par Honeybee	61

4. Optimisation	66
a) Séparation des paramètres	66
b) Expérimentation préliminaire	67
EXPÉRIENCES	72
1. Expérience 1 : À la recherche d'un moucharabieh adéquat.....	72
a) Objectif et protocole de l'expérience :.....	72
b) Résultats de l'expérience et analyse	75
2. Expérience 2 : Comparaison des paramètres	79
a) Objectif et protocole de l'expérience.....	79
b) Résultats de l'expérience et analyse	82
CONCLUSION.....	88
ANNEXE.....	93
Guide de paramétrisation, de simulations et d'optimisations du moucharabieh en briques.....	93
BIBLIOGRAPHIE	108

AVANT-PROPOS

Le sujet et le thème de ce mémoire ont été choisis pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la thématique de la lumière en architecture m'intéresse particulièrement parce que je suis sensible à la relation qu'elle entretient avec la spatialité et la structure. Yves Rouby qui était mon enseignant de projet en deuxième année évoquait souvent Louis Kahn et l'importance qu'il donnait à l'interaction entre la structure et la lumière dans la conception de ses espaces.

Les moucharabiehs quant à eux, m'ont toujours fasciné par leurs beaux motifs géométriques, leur matérialité et leur usage lié à la lumière. De plus, ils sont très présents dans l'architecture traditionnelle arabo-musulmane et notamment au Maroc, le pays où je suis né et où j'ai développé mon premier regard sur l'architecture.

Le séminaire « Savoir des Activités de Projets Instrumentés » que j'ai suivi en amont de l'écriture de ce mémoire a commencé lors de mon année d'études au Mexique, à Guadalajara. Là-bas, j'ai pu observer la réinterprétation du moucharabieh dans l'architecture contemporaine par l'intermédiaire de l'un de mes enseignants de projet mexicains Alvaro Gonzalez qui nous montrait de nombreuses références. Je ne sais pas si je peux appeler ce qu'il nous montrait des « moucharabiehs » au regard de la retranscription et de la distanciation de l'architecture arabo-musulmane dont ils étaient l'objet. En effet, les motifs géométriques et les matériaux étaient différents.

Lors de mon deuxième semestre d'études au Mexique, j'ai eu l'opportunité de suivre un enseignement assez complet de BIM où j'ai pu avoir accès à des cours de conception paramétrique sur Dynamo¹ avec le professeur Samuel Bárcenas Suarez. C'était très stimulant pour moi de les suivre car j'appréciais le fait d'associer la conception architecturale à la programmation sur ordinateur car je ne l'avais jamais fait auparavant.

J'ai donc relevé le défi d'apprendre à utiliser les outils de la conception paramétrique et de réaliser mon étude autour d'une problématique qui la lierait à la lumière et aux moucharabiehs.

¹ Logiciel de conception paramétrique intégré à Revit dont je parle dans la partie 03 **État de l'art**.

INTRODUCTION

1. L'ambiance lumineuse

Louis Kahn laissait souvent entendre dans ses propos qu'une pièce n'est pas une pièce sans lumière naturelle.

La conception architecturale dépasse l'exercice technique de création d'espaces fonctionnels. L'architecte a une importante responsabilité envers ceux qui habiteront ces lieux. À une époque où la qualité de vie et le bien-être des individus sont au centre des préoccupations, les architectes se doivent d'embrasser pleinement leur rôle en tant que créateurs d'environnements agréables pour l'Homme. L'un des aspects essentiels de cette mission est la maîtrise de la lumière naturelle, élément fondamental capable de transformer un espace en une expérience sensorielle riche et harmonieuse.

La lumière naturelle, est bien plus qu'un simple moyen d'illuminer un espace. Elle définit l'ambiance, influence l'humeur des occupants, et peut même affecter leur santé et leur productivité. Les jeux d'ombre et de lumière, les variations d'intensité lumineuse au fil de la journée, et l'interaction de la lumière avec les matériaux et les formes architecturales, sont autant de composantes qui déterminent la qualité spatiale d'une pièce. Les architectes, en tant que responsables de la conception de ces environnements, doivent intégrer ces considérations lumineuses dès les premières phases de la conception de leur projet

Dans cet objectif de création de lieux attentifs à la lumière et respectant le bien-être de l'Homme, la conception assistée par ordinateur y apporte beaucoup d'avantages. Elle permet une meilleure précision du dessin, des intentions et l'innovation constante. La conception paramétrique en est un parfait exemple.

2. La conception paramétrique

La conception paramétrique est une approche qui utilise des algorithmes et des paramètres pour générer et manipuler des formes architecturales complexes. En s'appuyant sur des logiciels de modélisation, cette méthode permet aux architectes de créer des structures innovantes, adaptables et optimisées de manière dynamique en réponse à divers critères et contraintes.

Les principes de base de la conception paramétrique reposent sur l'utilisation de paramètres et de variables. Les paramètres, qui incluent des dimensions géométriques, des angles, des courbes et des matériaux, peuvent être ajustés pour modifier les caractéristiques d'un modèle architectural. Les modifications apportées à un paramètre affectent automatiquement d'autres aspects du modèle, créant ainsi une interconnexion dynamique entre les éléments de la conception. Les algorithmes et les scripts jouent un rôle crucial dans ce processus. La programmation de ces algorithmes permet de définir des règles et des relations entre les paramètres, automatisant des processus de conception complexes et minimisant les erreurs.

Les avantages de la conception paramétrique sont nombreux. En premier lieu, cette méthode offre une grande flexibilité et adaptabilité. Les modèles paramétriques peuvent être ajustés rapidement en modifiant les paramètres, permettant d'explorer de nombreuses solutions conceptuelles en peu de temps. Sur le plan de l'innovation et de la créativité, la conception paramétrique permet de créer des formes géométriques complexes et innovantes qui seraient difficiles, voire impossibles, à dessiner manuellement. Les architectes peuvent ainsi explorer de nouvelles esthétiques et expérimenter avec des designs non conventionnels grâce à la flexibilité offerte par les algorithmes paramétriques.

3. Les moucharabiehs

Les moucharabiehs, éléments emblématiques de l'architecture arabo-musulmanes retranscrits dans l'architecture contemporaine, représentent une application intéressante de la conception paramétrique, offrant bien plus que des

motifs esthétiques complexes. Ils illustrent comment cette approche moderne peut optimiser l'ambiance lumineuse d'un espace architectural tout en répondant à des exigences fonctionnelles et environnementales précises.

Historiquement, les moucharabiehs étaient utilisés pour contrôler la lumière et la ventilation tout en offrant de l'intimité. Aujourd'hui, la conception paramétrique permet de réinventer ces éléments patrimoniaux. Grâce à des algorithmes et des paramètres, les architectes peuvent créer des moucharabiehs optimisés pour moduler la lumière naturelle de manière très spécifique, en fonction des besoins exacts de chaque espace intérieur.

La conception paramétrique des moucharabiehs commence par la définition de variables clés telles que la taille, la forme et la distribution des ouvertures. Ces paramètres peuvent être ajustés pour influencer directement la qualité et la quantité de lumière pénétrant dans un espace. Cette capacité à manipuler précisément la lumière permet de répondre aux besoins spécifiques des occupants tout au long de la journée, en adaptant les conditions lumineuses pour améliorer le confort visuel et le bien-être général.

4. Problématique

L'objectif de mon étude consiste à créer des ambiances lumineuses prédéfinies dans une pièce par le biais de la conception paramétrique d'un moucharabieh, de simulations de lumière et de l'optimisation. La problématique qui constitue le cœur de ce mémoire et qui articulera son organisation est la suivante : Comment atteindre au mieux une ambiance lumineuse souhaitée dans une pièce à travers la paramétrisation d'un moucharabieh ?

5. Plan

Ce mémoire se structure en quatre étapes distinctes, guidant le lecteur à travers une exploration approfondie de la conception d'ambiances lumineuses à travers la paramétrisation d'un moucharabieh. Tout d'abord, un état de l'art permettra de

contextualiser la recherche, en dressant un panorama des connaissances actuelles et en positionnant le sujet au sein des travaux existants. Notamment, les travaux de Vincent Tourre sur la simulation inverse de l'éclairage naturel seront examinés avec attention, offrant un point d'ancrage théorique. Ensuite, la méthodologie de recherche sera explicitée en détail, justifiant les choix méthodologiques, la mise en œuvre de l'objet d'étude, ainsi que les hypothèses formulées pour son exploitation. La troisième étape sera consacrée aux expériences menées, en détaillant le protocole expérimental et analysant les résultats obtenus. Enfin, l'analyse de ces résultats me permettra de dégager une conclusion et d'ouvrir des perspectives en lien avec la problématique.

ÉTAT DE L'ART

1. Les moucharabiehs

a) Origine

Dans son livre *Natural Energy and Vernacular Achitecture*, l'architecte égyptien Hassan Fathy évoque l'origine du moucharabieh. Le mot « moucharabieh » vient du mot arabe « mashrabiya » qui est une dérivée du terme « sharaba » qui signifie « boire ». À l'origine, il désignait une niche dans les maisons du monde arabe où l'on plaçait des pots d'eau pour les garder frais. Ces espaces étaient généralement situés près des fenêtres, où l'air qui circulait autour des récipients contribuait à rafraîchir l'eau. Avec le temps, le mot a évolué pour désigner les treillis² en bois qui couvraient ces ouvertures. Le moucharabieh a ainsi acquis son sens architectural, représentant un écran en bois sculpté, permettant de contrôler la lumière, la ventilation et la température tout en préservant l'intimité des occupants à l'intérieur des maisons (figure 03.1)³. C'est donc cette association à la gestion de l'air et de l'eau qui a donné au terme « mashrabiya » son usage commun, désignant aujourd'hui les écrans ajourés que l'on trouve dans l'architecture des pays arabes et notamment en Égypte, en Arabie Saoudite, en Syrie, ainsi que dans certaines régions d'Espagne et d'Asie du Sud.

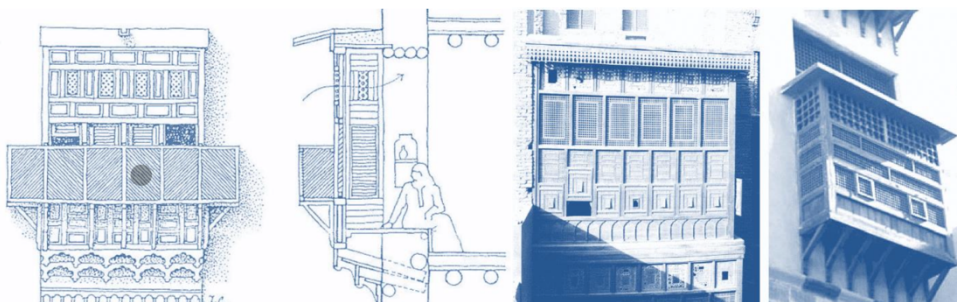


Figure 03.1 A gauche : Détails de Moucharabieh traditionnel en élévation et en coupe.
A droite : Moucharabiehs traditionnels, Caire Égypte.

² Un treillis est un assemblage de barres formant une triangulation

³ Source: Ragette, Friedreck (2003) *Traditional Domestic Architecture of the Arab World*, Axel Menges, Stuttgart, Germany.

b) Les moucharabiehs dans l'architecture contemporaine

Une étude⁴ menée par des architectes de l'École Nationale d'Architecture de Rabat au Maroc évoque la retranscription du moucharabieh dans l'architecture contemporaine grâce aux nouvelles technologies et aux outils numériques, devenant un dispositif à la fois esthétique et fonctionnel. Cette transformation est notamment facilitée par les avancées en fabrication numérique comme l'utilisation de la découpe laser et la transition des matériaux traditionnels, comme le bois, vers des matériaux contemporains tels que le béton renforcé de fibres de verre et l'acier. Ces matériaux permettent aujourd'hui de créer des façades aux motifs semblables au moucharabieh, tout en répondant aux normes modernes de durabilité et de performances structurelles. Cette même étude mentionne le projet Masdar City à Abu Dhabi, où des moucharabiehs en béton renforcé de fibres de verre couvrent les façades des bâtiments, offrant un effet semblable à l'ombrage traditionnel tout en intégrant des techniques modernes de refroidissement passif.

⁴ Source : Jaouhari, Khalid El, Larbi Amhamdi, Larbi Bouayad, Inna Yaya Aissatou Hamadou, et Meryam Harati. « De la fenêtre traditionnelle à la façade intelligente : Transcription du Moucharabieh en architecture contemporaine. » *African and Mediterranean Journal of Architecture and Urbanism*, 14 février 2019, 67-79. <https://doi.org/10.48399/IMIST.PRSM/amjau-v0i115430>.

Le moucharabieh est utilisé aujourd’hui non seulement pour son aspect culturel, mais aussi comme un dispositif capable de répondre aux défis environnementaux. Par exemple, des projets comme les Tours Al Bahar de Zaha Hadid à Abu Dhabi (figure 03.2)⁵ ou l’Institut du Monde Arabe de Jean Nouvel à Paris (figure 03.3)⁶ montrent comment cet élément architectural a été utilisé pour optimiser l’efficacité énergétique des bâtiments en fonction de la lumière naturelle et du climat. Ces projets intègrent des façades dynamiques et réactives qui peuvent s’adapter aux conditions extérieures.

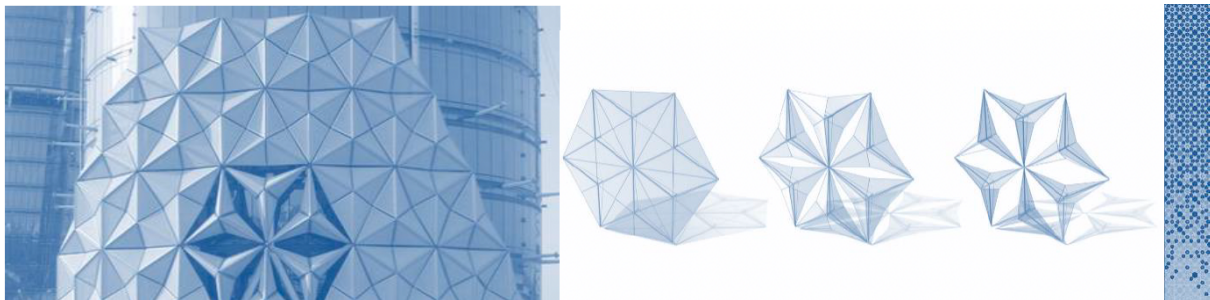


Figure 03.2 Détails de système de façade intelligente inspiré du Moucharabieh, Projet Al Bahr Towers, Aedas, 2012

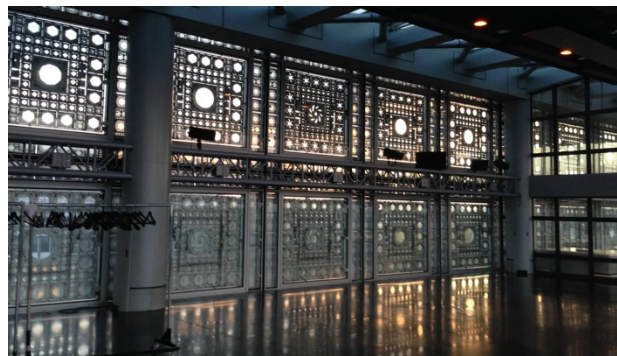


Figure 03.3 Photo de l’Institut du Monde Arabe prise par Loïc Durand

⁵ Source image de gauche: Karen Cilento, 2012, Article: Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas. Plateforme-web: archdaily. Lien : <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>, visité le : Janvier 2019.
Source image de droite: Ali Rahim, Hina Jamelle, 2007, Beyond the Structural Skin Zaha Hadid Architects: Marsa Dubai Residential

⁶ Source : “Les Moucharabiehs de l’Institut Du Monde Arabe Rénovés Depuis Courthézon - France Bleu,” September 29, 2017. <https://www.francebleu.fr/infos/culture-loisirs/les-moucharabiehs-de-l-institut-du-monde-arabe-renoves-depuis-courthezon-1506592631>

c) La paramétrisation de moucharabiehs

L'une des manières d'appliquer la paramétrisation aux moucharabiehs, même si cela n'est pas l'objectif de mon mémoire, est d'en faire des façades intelligentes, capables de s'adapter à l'environnement comme dans les exemples que je viens de citer. En utilisant des logiciels de paramétrisation, les concepteurs peuvent modéliser des scénarios d'ouverture et de fermeture des moucharabiehs ou d'ajustement de la densité du maillage ou de la taille des ouvertures en fonction des critères comme la direction et l'intensité de la lumière du soleil, le besoin de ventilation et de réduction de la température et les préférences esthétiques et culturelles du projet. Cela permet une double lecture : une intégration visuelle et une performance technique optimale, grâce à des algorithmes qui ajustent la géométrie en fonction des besoins du bâtiments.

La paramétrisation peut aussi permettre d'ajuster le maillage, la densité et la taille des ouvertures afin de créer une ambiance lumineuse particulière dans un espace, souhaitée par le concepteur. C'est dans ce sens que je vais donc aborder la thématique de la lumière naturelle et de l'ambiance lumineuse dans la partie qui suit.

2. La lumière naturelle

a) Qu'est-ce que la lumière naturelle ?

La lumière naturelle est une onde électromagnétique qui provient du soleil. Elle contient des rayons lumineux visible allant du violet au rouge (figure 03.4)⁷ mais aussi des rayons ultraviolets et infrarouges qui sont invisibles à l'œil humain mais influencent la chaleur.

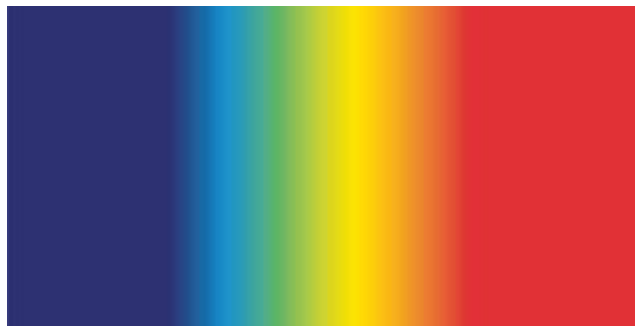


Figure 03.4 Gamme visible de la lumière naturelle

La répartition de la lumière naturelle dépend de l'angle d'incidence et de la position du soleil. Les caractéristiques de la lumière varient avec la latitude, les saisons, l'heure de la journée, et les conditions météorologiques. La lumière directe du soleil produit des ombres nettes et des contrastes élevés, tandis que la lumière diffuse, issue du ciel et des nuages, crée des ombres douces et une répartition homogène de l'éclairage.

⁷ Source : Light ZOOM Lumière - Portail de la Lumière et de l'Éclairage. « Spectre visible, colorimétrie et vision », 27 janvier 2020. <https://www.lightzoomlumiere.fr/definition/spectre-visible-lumiere-colorimetrie-vision/>.

b) La lumière naturelle et la notion d'ambiance lumineuse

La lumière naturelle est un élément fondamental en architecture, non seulement parce qu'elle révèle l'espace mais aussi pour son impact sur la santé, l'efficacité énergétique et l'ambiance. Elle est utilisée pour mettre en valeur les volumes, les textures et les matériaux. Elle change au fil de la journée et des saisons, créant des variations subtiles et apportant une dimension vivante à l'architecture. Les architectes jouent souvent avec la lumière pour créer des ambiances variées, en manipulant les ouvertures, les fenêtres, les brise-soleils et les dispositifs comme les moucharabiehs pour filtrer ou cadrer la lumière.

De nombreux architectes ont mis la lumière naturelle au cœur de leur démarche architecturale. Louis Kahn par exemple est célèbre pour avoir intégré la lumière comme un élément structurel de ses œuvres. Il considérait la lumière comme un « matériel immatériel ». Dans ses bâtiments emblématiques tels que le Salk Institute en Californie et le Kimbell Art Museum au Texas (figure 03.5)⁸, il utilise la lumière naturelle pour modeler l'espace, en mettant en valeur les textures et les matériaux. Les plafonds voûtés du Kimbell Art Museum sont un exemple de son approche, utilisant des ouvertures pour diffuser une lumière douce et uniforme sur les murs et les œuvres.

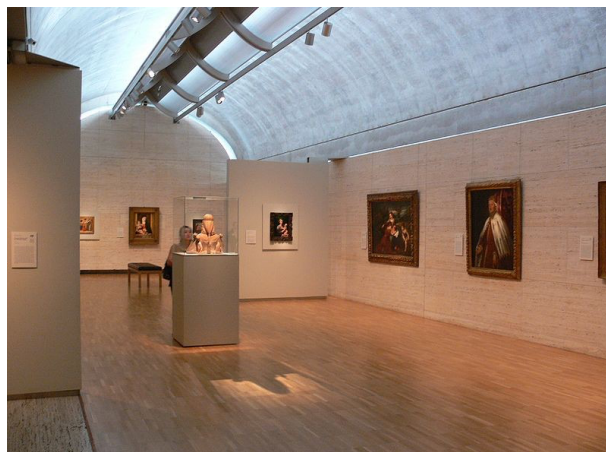


Figure 03.5 Kimbell Art Museum, photo prise par Andreas Praefcke

⁸ Source : ArchDaily. « Gallery of AD Classics: Kimbell Art Museum / Louis Kahn - 14 ». Consulté le 1 novembre 2024.
<https://www.archdaily.com/123761/ad-classics-kimbell-art-museum-louis-kahn/5038089928ba0d599b000a3c-ad-classics-kimbell-art-museum-louis-kahn-photo>.

Des artistes aussi, tels que James Turrell, pionnier du mouvement Light and Space des années 60, a consacré sa carrière à l'exploration de la lumière comme matériau artistique. Dans ses œuvres emblématiques tels que les « Skyspaces » (figure 03.6)⁹, il utilise la lumière naturelle pour créer des espaces immersifs qui modifient la perception du spectateur. Ces installations comportent une ouverture dans le toit, permettant d'observer les variations subtiles du ciel et de la lumière au fil du temps. Turrell joue aussi avec les frontières entre l'intérieur et l'extérieur, l'ombre et la clarté et efface les repères spatiaux habituels.

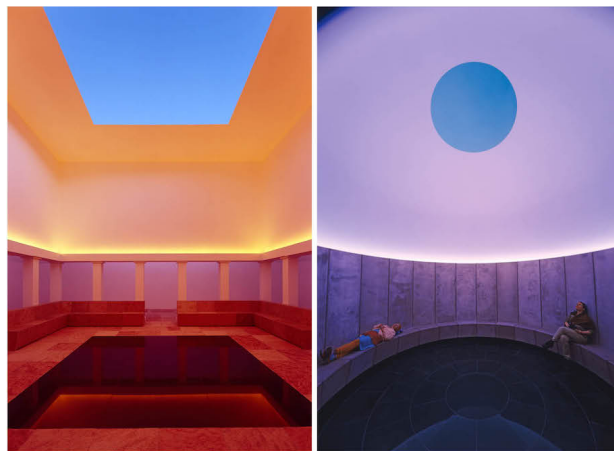


Figure 03.6 « Skyspaces » de James Turrell à Salta, en Argentine et à Södertälje en Suède

Des architectes et des artistes comme Kahn et Turrell tenaient à créer des ambiances lumineuses dans leurs espaces.

Vincent Turre, doctorant de l'université de Nantes, ayant réalisé sa thèse sur la « Simulation inverse de l'éclairage naturel pour le projet architectural » a abordé précisément dans son travail la définition de l'ambiance lumineuse. Cette dernière est pour lui une des composantes des ambiances architecturales, comme l'ambiance sonore ou olfactive. Elle est le résultat de notre perception de l'éclairage et de l'espace construit. Son rôle dépend du sens qu'elle donne à l'espace et la description de ses qualités dépend de l'aspect, fonctionnel ou esthétique, que l'on souhaite évaluer. Par exemple, l'ambiance lumineuse souhaitée dans une salle de lecture d'une bibliothèque

⁹ Source : Paris, Amelie. « Les Skyspaces ». Amelie, Maison d'art. Consulté le 1 janvier 2025. <https://www.ameliemaisondart.com/fr/blog/13-la-balade-d-amelie/1114-Les-Skyspaces.html>.

n'est pas la même que celle voulue dans une salle de musée où les œuvres doivent être mises en valeur ou celle adaptée au séjour d'un logement.

Ses qualités fonctionnelles sont mesurées par l'intensité et la direction de la lumière reçue à l'aide d'instruments de mesure alors que ses qualités esthétiques sont évaluées de manière subjective par rapport à l'impression ressentie à travers la perception d'une ambiance lumineuse. Cependant, la perception humaine est difficilement descriptible par un appareil de mesure. Un outil qualitatif comme « l'effet », permet de décrire l'espace perçu à travers la caractérisation de la lumière. Cet outil utilise l'expérience directe du lieu afin de montrer les sensations provoquées, les observations suscitées et la compréhension des intentions des concepteurs.

L'ambiance lumineuse est donc le résultat, perçu par l'Homme, de l'interaction entre la lumière brute extérieure et les matériaux à l'intérieur d'un bâtiment. Cette interaction n'est possible que par l'intermédiaire des ouvertures qui laisse entrer la lumière brute et la transforme en lumière incidente et réfléchi (figure 03.7)¹⁰.

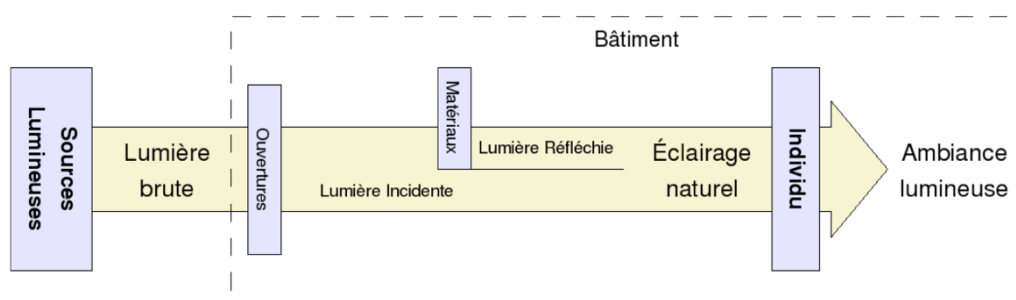


Figure 03.7 Schéma expliquant la perception d'une ambiance lumineuse

¹⁰ Source : Vincent Tourre. Simulation inverse de l'éclairage naturel pour le projet architectural. Interface homme-machine [cs.HC]. Université de Nantes, 2007. Français. NNT : .tel-00383341 (page 61)

c) Les unités de mesure

La qualité fonctionnelle de l'ambiance lumineuse est mesurable selon plusieurs aspects de la lumière naturelle qui influencent la perception des espaces intérieurs. Tout d'abord, l'intensité lumineuse ou l'éclairement qui se mesure en lux par le biais d'un luxmètre, indique la quantité de lumière arrivant sur une surface donnée. Par exemple, dans les bureaux, des niveaux de 300 à 500 lux sont recommandés, tandis que dans les hôpitaux, les niveaux peuvent dépasser les 1000 lux. L'éclairement varie en fonction de plusieurs données comme la position des fenêtres ou autres sources lumineuses, de l'heure de la journée et de la saison. D'autres instruments qui déterminent le ratio entre les zones les plus éclairées et les moins éclairées permettent de savoir si la répartition de la lumière est homogène ou pas.

La luminance mesure la quantité de lumière émise, transmise ou réfléchiée par une surface, exprimée en candélas par mètre carré (cd/m^2). Un luminancemètre est utilisé pour évaluer les surfaces qui pourraient provoquer des éblouissements gênants. Cette mesure aide à identifier les surfaces trop réfléchissantes et à ajuster les matériaux ou les sources lumineuses.

3. Les travaux de Vincent Tourre

Dans cette partie, je vais présenter les principes de la thèse de Doctorat de Vincent Tourre intitulé « Simulation inverse de l'éclairage naturel pour le projet architectural » qui m'a aidé à élaborer ma propre méthode dont on parlera dans la partie 04 « Méthodologie de la recherche ».

a) Le concept de simulation inverse de l'éclairage naturel

Le concept de simulation inverse de l'éclairage naturel dans le cadre de la thèse de Vincent Tourre se base sur l'idée de concevoir des bâtiments en partant de l'ambiance lumineuse souhaitée, puis en déterminant les caractéristiques des ouvertures et surfaces architecturales nécessaires pour atteindre cette ambiance (figure 03.8)¹¹.

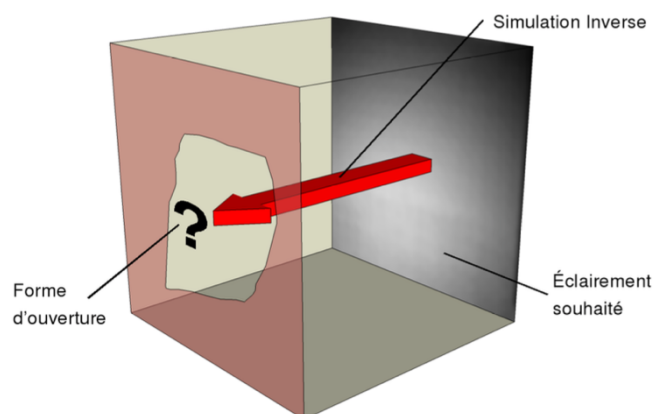


Figure 03.8 Schéma explicatif du concept

L'objectif de la méthode de Vincent Tourre est de fournir une aide numérique à la conception architecturale pour définir les ouvertures du bâtiment en fonction des intentions d'ambiance lumineuse exprimées par l'architecte. Plutôt que de modéliser l'éclairage de manière directe (c'est-à-dire en définissant les ouvertures puis en simulant l'éclairage résultant), l'approche consiste à définir un éclairage cible et à

¹¹ Source : ibid page 5

inverser le processus pour déduire les caractéristiques géométriques et optiques des ouvertures nécessaires.

Le processus de la méthode est le suivant :

Intention d'ambiance lumineuse : L'architecte commence par exprimer son intention en termes d'ambiance lumineuse souhaitée par l'intermédiaire d'un croquis (figure 03.9)¹². Cette intention est représentée à l'aide de descripteurs graphiques et de rendus photométriques¹³ (figure 03.10)¹⁴, facilitant une visualisation numérique de l'ambiance cible. Ces descripteurs traduisent des aspects comme l'intensité lumineuse, les zones d'ombre, les reflets...

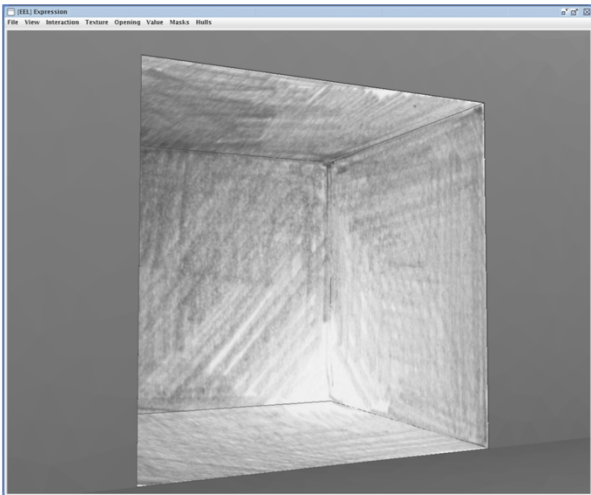


Figure 03.9 Dessin par l'architecte

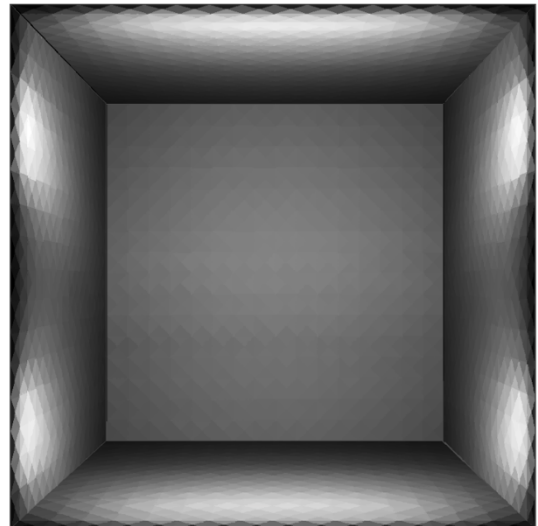


Figure 03.10 Rendu photométrique résultant

Définition des paramètres physiques : À partir de ces descripteurs, des paramètres physiques de l'éclairage sont identifiés, tels que l'émittance des sources de lumière naturelle (ciel et réflexion urbaine), l'orientation des ouvertures et les propriétés de réflexion et transmission des matériaux.

¹² Source : ibid page 134

¹³ Une représentation photométrique désigne une méthode de visualisation et de quantification des caractéristiques de la lumière dans un espace donné, en tenant compte des propriétés photométriques telles que l'intensité lumineuse, l'éclairement, la luminance et les directions des rayons lumineux.

¹⁴ Source : ibid page 135

Simulation inverse : Le modèle de simulation inverse développé par Tourre prend ces paramètres comme données d'entrée pour calculer les propriétés géométriques des ouvertures du bâtiment. Le modèle pose le problème de simulation inverse comme une recherche de sources lumineuses : il calcule les ouvertures qui produisent l'éclairage souhaité en comparant les résultats simulés avec l'ambiance cible.

Il met en place un modèle sténopé (figure 03.11)¹⁵. En fait, la pièce à concevoir est assimilée à une chambre noire, les ouvertures jouant le rôle de l'optique et l'environnement extérieur étant l'objet photographié. Ce concept permet de considérer l'éclairage intérieur comme une image inversée de l'extérieur, obtenue au travers des ouvertures. Le modèle sténopé prend en compte chaque élément d'ouverture en les subdivisant en petites unités. La lumière passant par chaque élément est simulée pour évaluer son apport total à l'éclairage intérieur. Ces éléments sont triangulés et traités individuellement pour calculer l'impact lumineux sur les surfaces internes. Chaque ouverture est considérée comme une source lumineuse anisotrope, c'est-à-dire que chaque élément d'ouverture peut influencer l'éclairage intérieur différemment selon son orientation et sa position.

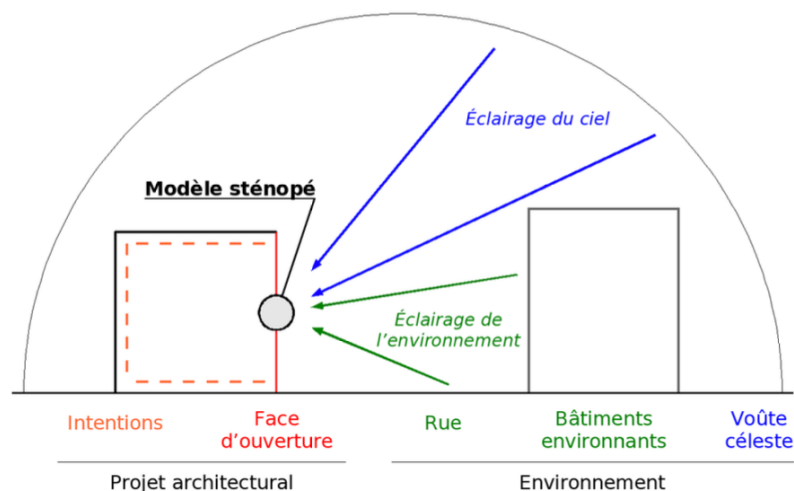


Figure 03.11 Schéma explicatif du modèle sténopé

¹⁵ Source : ibid page 142

Comparaison des images : L'algorithme réalise une comparaison d'images entre l'éclairage généré par les ouvertures proposées et l'éclairage souhaité par l'architecte. Cette comparaison permet de valider ou d'ajuster les dimensions et propriétés des ouvertures afin d'obtenir une cohérence avec les intentions initiales.

Validation des tests de reconstruction : Le modèle est ensuite validé par des tests de reconstruction de l'éclairage naturel dans des situations réelles. Ces tests montrent que le modèle peut être intégré dans le processus de conception en fournissant des recommandations sur la position, la taille et les propriétés des ouvertures à partir de l'analyse des intentions lumineuses.

Le modèle propose ainsi une méthode numérique d'aide à la conception par l'intention d'ambiance, qui s'apparente à une approche paramétrique. En se concentrant sur l'incidence de la lumière directe et celle de l'environnement urbain, il vise à aider l'architecte à traduire ses intentions en configurations concrètes, adaptées au contexte environnemental et aux contraintes climatiques.

Cette démarche inverse présente plusieurs avantages car elle permet de commencer par l'ambiance lumineuse désirée, ce qui est souvent le premier critère pour l'architecte lorsqu'il cherche à générer une expérience sensorielle particulière. Elle réduit la distance entre la conception numérique et la perception réelle de l'éclairage, en rendant plus tangible l'effet des ouvertures sur l'ambiance intérieure.

b) La CAO¹⁶ et les outils numériques utilisés

La simulation inverse de l'éclairage naturel développée par Vincent Tourre, dans sa thèse, repose sur la création de modèles 3D des espaces architecturaux dans des logiciels de CAO comme AutoCAD et SketchUp. Ces logiciels permettent de générer les surfaces, volumes et ouvertures, tout en intégrant des matériaux avec des propriétés photométriques précises. Ils fournissent un cadre de travail numérique pour représenter l'espace conçu et ajuster les configurations d'ouvertures.

Une interface de conception a été développée pour exprimer les intentions d'ambiance lumineuse à travers des descripteurs graphiques et des rendus photométriques. L'interface offre des outils interactifs pour ajuster visuellement les paramètres de l'éclairage (comme la direction de la lumière, l'intensité, le contraste, etc.). Cela aide les concepteurs à mieux exprimer leurs intentions lumineuses tout en observant en temps réel les impacts des modifications sur l'ambiance.

Des outils comme le logiciel Solene sont intégrés pour effectuer les calculs de distribution de la lumière. Ces outils permettent de simuler précisément les interactions de la lumière naturelle avec les ouvertures et les surfaces internes, et de générer des cartes d'éclairement.

L'approche de Tourre utilise une méthodologie de comparaison d'images entre l'éclairage réel (calculé via la simulation) et l'éclairage souhaité (basé sur les intentions d'ambiance). Cela se fait à travers l'analyse d'images produites par des simulations, pour ajuster les propriétés des ouvertures jusqu'à ce que les écarts entre les deux images soient minimisés.

La conception paramétrique est au cœur de la méthode, permettant de manipuler les géométries des ouvertures et les propriétés des matériaux de manière dynamique. Les logiciels de CAO offrent des outils de paramétrisation pour créer des ouvertures dont la taille, la forme et la position peuvent être ajustées en fonction des résultats des simulations.

¹⁶ CAO : Conception Assistée par Ordinateur

Les résultats sont visualisés à l'aide de rendus photométriques réalistes qui illustrent l'apparence de l'éclairage dans l'espace. Cela aide les architectes à valider les solutions par une représentation réaliste de l'ambiance lumineuse.

c) L'application du concept au musée du Louvre d'Abu Dhabi

En 2017, Vincent Tourre et Francis Miguet participent à la conception du « dôme moucharabieh » du musée du Louvre d'Abu Dhabi. Ils ont publié un article dans l'International Journal of Architectural Computing où ils expliquent leur démarche. Elle repose sur l'application du modèle de simulation inverse de l'éclairage naturel pour répondre aux intentions lumineuses exprimées par les architectes de l'Atelier Jean Nouvel. Le projet du Louvre Abu Dhabi inclut une grande coupole protectrice (figure 03.12)¹⁷ qui doit gérer l'apport de lumière naturelle pour créer des variations lumineuses inspirées par l'idée d'une "pluie de lumière" (figure 03.13)¹⁸. Les objectifs de conception incluaient la création d'un confort thermique et visuel tout en matérialisant une ambiance spécifique.



Figure 03.12 Photographie du musée et de sa coupole

¹⁷ Source : Ateliers Jean Nouvel. « Louvre Abou Dabi ». Consulté le 1 janvier 2025.
<https://www.jeannouvel.com/projets/louvre-abou-dhabi-3/>.

¹⁸ ibid



Figure 03.13 Photographie de l'ambiance lumineuse générée par la coupole

Tourre a appliqué son modèle paramétrique basé sur la lumière, en utilisant la technique de simulation inverse. Ce modèle calcule les propriétés des ouvertures de la coupole en tenant compte de la distribution complexe de la lumière naturelle (soleil, ciel, et réflexions environnantes) (figure 03.14)¹⁹.

Une série de simulations a été réalisée pour évaluer le potentiel d'éclairage et les zones d'ombre créées par la coupole. Ces études ont aidé à définir les valeurs de l'éclairement et les objectifs de la carte d'intentions lumineuses. Une carte d'intentions lumineuses a été établie en collaboration avec les architectes, ingénieurs et chercheurs. Cette carte définit les niveaux d'éclairement souhaités pour différentes zones, comme les galeries, la place centrale, et les espaces aquatiques. La coupole de 25 000 m² a été subdivisée en 1 028 triangles, chacun étant traité comme une source lumineuse virtuelle. Le modèle sténopé a été utilisé pour simuler l'impact de chaque triangle sur l'éclairage global et pour ajuster le taux de perforation des éléments de la coupole. Les résultats de la simulation ont été comparés avec les intentions lumineuses. Le taux de perforation de chaque élément de la coupole a été ajusté pour assurer une répartition de la lumière conforme aux attentes, allant de 0,1 % à 8 % selon

¹⁹ Source : Tourre V, Miguet F. Lighting Intention Materialization with a Light-Based Parametric Design Model. International Journal of Architectural Computing. 2010;8(4):507-524. doi:10.1260/1478-0771.8.4.507

les zones. Une simulation directe de la lumière naturelle a été réalisée pour vérifier l'efficacité de la configuration de la coupole. Cette étape a permis de valider les perforations et d'assurer que les niveaux d'éclairement respectaient les intentions architecturales.

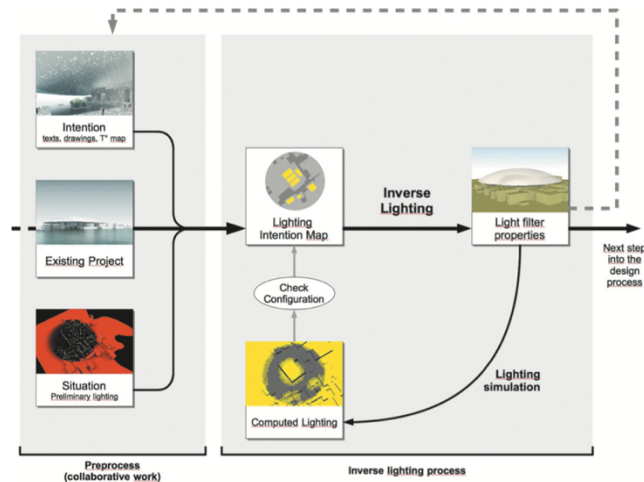


Figure 03.14 Schéma de mise en œuvre de l'ambiance lumineuse dans le projet du Louvre d'Abu Dhabi

Afin de mettre en place ma méthode de simulation inverse de l'éclairage naturel, je dispose de certains outils informatiques que je vais présenter dans les sous-parties qui suivent. Chacun de ces outils m'offre la possibilité de choisir entre deux logiciels. Je présenterai tous les logiciels et expliquerai dans la partie 4 Méthodologie de la recherche lequel j'ai choisi et pourquoi.

4. Les logiciels de paramétrisation

a) Grasshopper

Grasshopper est un plug-in²⁰ de modélisation paramétrique intégré à Rhinoceros 3D²¹. Il permet de créer des formes complexes, architecturales ou issues d'autres domaines, de manière visuelle, sans nécessiter d'écrire des lignes de codes traditionnelles. Son interface fonctionne par un système de "nœuds" et de "liens", ce qui en fait un outil puissant pour le design paramétrique. Les "nœuds" définissent des paramètres et des opérations géométriques. Chacun correspond à une action, comme créer une courbe, appliquer une transformation, ou exécuter un programme. Les nœuds sont connectés entre eux pour créer des flux de données. Par exemple, plusieurs « nœuds » peuvent générer une série de points, et un autre nœud connecté à celui-ci peut transformer ces points en lignes (figure 03.15 et 03.16).

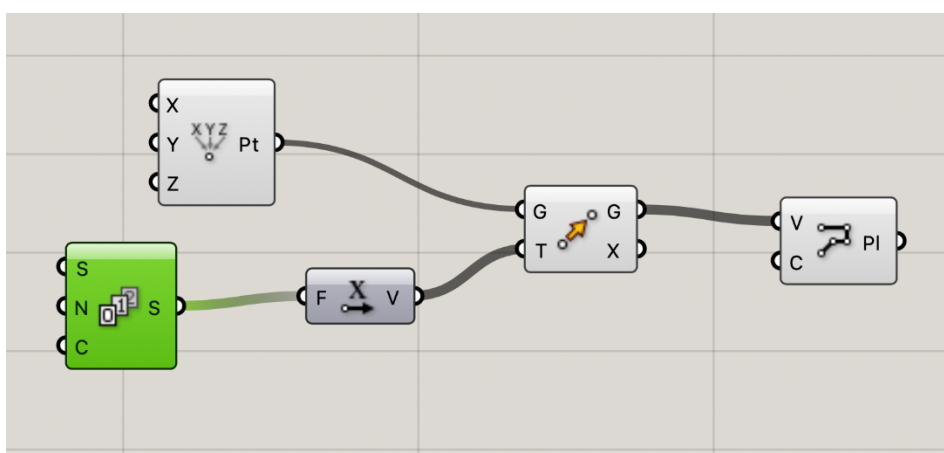


Figure 03.15 Interface de Grasshopper montrant des « nœuds » (cadres grisés) connectés par des « liens » (fils) permettant de générer une série de points et de les connecter par une ligne (Source : auteur)



Figure 03.16 Interface de Rhino montrant ce qui a été généré par le code ci-dessus (Source : auteur)

²⁰ Un plug-in est un module qui s'intègre à un programme principal pour lui ajouter des fonctionnalités supplémentaires.

²¹ Rhinoceros 3D, souvent appelé Rhino, est un logiciel de modélisation 3D polyvalent qui permet de créer, éditer, analyser, et traduire des formes complexes avec une grande précision.

Les données circulent à travers ces connexions pour construire des géométries complexes. Par exemple, Grasshopper permet de paramétrer des éléments architecturaux en définissant des variables contrôlables comme la taille d'une ouverture, l'épaisseur des matériaux, ou l'orientation des motifs pour un moucharabieh. Ces paramètres peuvent être modifiés et les changements apportés à la géométrie sont visibles en temps réel, ce qui facilite l'exploration de différentes options de conception. Bien que Grasshopper ne nécessite pas de lignes de codes traditionnelles comme mentionné plus haut, il permet l'intégration de scripts personnalisés en utilisant des langages comme Python ou C#. Cela donne encore plus de flexibilité aux concepteurs pour créer des formes plus complexes nécessitant des nœuds qui n'existent pas sur Grasshopper.

b) Dynamo

Dynamo est un plug-in de modélisation paramétrique intégré à Autodesk Revit²². Il permet globalement les mêmes choses que Grasshopper en utilisant une interface similaire où les utilisateurs créent des scripts en connectant des "nœuds" par des « liens ». En plus de la conception paramétrique, Dynamo peut être utilisé dans la conception architecturale pour automatiser des tâches répétitives dans Revit, comme la création de familles d'objets, l'analyse de données géométriques, ou la gestion de l'information du modèle BIM. Dynamo est donc plus utilisé par des concepteurs attachés au BIM et à Revit.

²² Revit est un logiciel de conception 3D permettant de travailler avec la méthodologie BIM.

5. Les logiciels de simulation

a) Ladybug, Honeybee

Ladybug est un plug-in à installer sur Grasshopper, utilisés pour l'analyse environnementale, les calculs d'énergie d'un bâtiment et la simulation de l'éclairage naturel avec Honeybee qui est une sorte de « sous plug-in » installé automatiquement avec Ladybug. Ladybug est utilisé par les architectes et les ingénieurs pour concevoir des projets performants et durables dans le cadre de l'analyse de cycle de vie d'un bâtiment notamment. Ladybug permet d'importer des données météorologiques et de les utiliser pour des analyses climatiques détaillées spécifiques à un lieu. Cela inclut la visualisation de la radiation solaire, les diagrammes solaires, les roses des vents, et d'autres graphiques qui aident à comprendre les conditions environnementales locales. Ladybug et Honeybee sont faciles à intégrer dans les flux de travail de Grasshopper, ce qui permet de coupler les résultats environnementaux avec des modèles paramétriques pour affiner des choix de conception.

Honeybee étend les capacités de Ladybug en ajoutant des fonctionnalités pour des simulations énergétiques avancées et des analyses d'éclairage naturel. Il se connecte à des moteurs de simulation comme EnergyPlus (pour la simulation thermique) et Radiance (pour la simulation d'éclairage). Avec Honeybee, il est possible d'évaluer les performances énergétiques d'un bâtiment en simulant la consommation d'énergie, le confort thermique, et l'impact des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation. Honeybee est particulièrement utile pour réaliser des études de lumières naturelle.

b) Autodesk Forma

Autodesk propose quant à eux depuis mai 2023 une nouvelle plateforme en ligne de conception et de simulation alimentée par l'intelligence artificielle appelée Autodesk Forma.

6. Les logiciels d'optimisation

a) Galapagos

Galapagos est un plug-in intégré à Grasshopper. C'est un algorithme génétique d'optimisation que l'on peut lier à un modèle paramétrique.

Les algorithmes génétiques appartiennent à la famille des algorithmes évolutionnistes. Leur but est d'obtenir une solution approchée à un problème d'optimisation, lorsqu'il n'existe pas de méthode exacte (ou que la solution est inconnue) pour le résoudre en un temps raisonnable. Les algorithmes génétiques utilisent la notion de sélection naturelle et l'appliquent à une population de solutions potentielles au problème donné. La solution est approchée par « bonds » successifs, comme dans une procédure de séparation et évaluation (branch & bound), à ceci près que ce sont des formules qui sont recherchées et non plus directement des valeurs.

Source : Wikipédia

En fait, il se présente sous la forme d'un « nœud » sur Grasshopper avec deux entrées (figure 03.17).

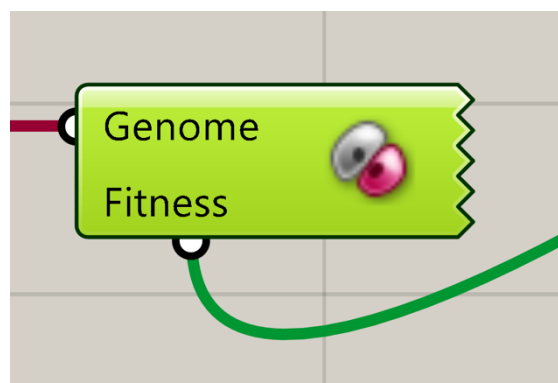


Figure 03.17 « Nœud » Galapagos avec ses deux entrées « Genome » et « Fitness » (Source : auteur)

- « Genome » : ce sont les « gènes » du modèle paramétrique, ses paramètres qui peuvent varier.
- « Fitness » : il s'agit de la fonction objectif qui peut être soit minimisée et tendre vers 0, soit maximisée et atteindre la plus haute valeur possible en faisant varier les paramètres du modèle (rôle de Galapagos).

Outre ces deux entrées principales, Galapagos repose sur plusieurs paramètres qui influencent son fonctionnement. Ces paramètres sont liés au processus évolutif de l'algorithme génétique, basé sur la sélection, la mutation, et l'évolution des solutions au fil des générations successives :

- Le nombre d'individus (N) que contient la population initiale. Cette dernière est la première génération fabriquée par l'algorithme. Elle contient N configurations aléatoires (individus) du modèle paramétrique qui sont classées de la meilleure à la moins bonne en fonction de la fonction objectif.
- Le taux de maintien : ce paramètre définit le nombre des meilleurs individus qui sont conservés d'une population à la suivante, garantissant que les meilleures solutions ne sont pas perdues.
- Le taux de consanguinité : ce paramètre contrôle la diversité génétique des populations successives, en évitant que les solutions deviennent trop similaires, ce qui pourrait limiter la capacité de l'algorithme à explorer de nouvelles configurations. Par exemple avec un taux de consanguinité de 0%, les populations qui se succèdent n'ont aucun lien génétique et seront très différentes les unes des autres. Alors qu'avec un taux de consanguinité de 100% les populations qui se succèdent seront toujours les mêmes et l'algorithme ne servirait à rien.
- Le nombre d'individus (n) que contient les populations successives. Ce sont les populations fabriquées par l'algorithme qui succèdent à la population initiale. Elles contiennent n configurations aléatoires du modèle paramétrique et elles sont régies par le taux de maintien et le taux de consanguinité.

Pour résumer, Galapagos simule un processus évolutif pour optimiser une fonction objective, en générant des générations successives de solutions où chaque individu est évalué et classé. Les mutations et croisements permettent d'améliorer progressivement les performances des solutions trouvées.

b) Octopus

Octopus est un plug-in de Grasshopper, qui n'y est pas intégré de manière native, conçu pour répondre aux besoins d'optimisation multi-objectifs, là où Galapagos se limite à une seule fonction objectif. Cette capacité à gérer plusieurs objectifs simultanément rend Octopus particulièrement adapté aux projets complexes, où il est nécessaire de prendre en compte différents critères parfois contradictoires.

L'un des principaux avantages d'Octopus réside dans ses outils avancés de visualisation. Il permet de représenter les résultats sous forme de diagrammes de Pareto²³, en deux ou trois dimensions. Ces diagrammes offrent une vue d'ensemble des compromis entre différents objectifs, facilitant la prise de décision sur le choix d'une solution plutôt qu'une autre. Galapagos, en revanche, n'inclut pas de telles fonctionnalités de visualisation, car il est conçu pour des optimisations plus simples et ciblées.

²³ Le diagramme de Pareto est un graphique représentant l'importance de différentes causes d'un phénomène. Ce diagramme permet de mettre en évidence les causes les plus importantes sur le nombre total d'effet et ainsi de prendre des mesures ciblées pour améliorer une situation. (Source : Wikipédia)

MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

1. Explication de la méthode

a) Ma méthode

La méthodologie adoptée dans le cadre de mon étude s'inspire des travaux de Vincent Tourre sur la simulation inverse de l'éclairage naturel, en utilisant des outils numériques actuels comme Grasshopper et ses plug-ins de simulation de lumière et d'optimisation Honeybee et Galapagos. L'objectif est de concevoir et d'optimiser un moucharabieh afin de générer une ambiance lumineuse précise et prédéfinie dans une pièce.

La première étape de la recherche consiste à modéliser et paramétrer un moucharabieh sur Grasshopper.

J'ai choisi d'utiliser Grasshopper plutôt que Dynamo car j'ai pu avoir accès aux cours de François Guéna sur Grasshopper et ce dernier dispose de plug-ins, tels que Honeybee, largement reconnu pour sa précision dans les simulations de lumière. Dynamo aurait été plus efficace dans un environnement BIM grâce à son intégration à Revit. Quant aux simulations de lumière, j'aurais pu utiliser Autodesk Forma, mais c'est un logiciel récent qui ne dispose pas de ressources suffisantes me permettant d'apprendre à l'utiliser.

Dans ce moucharabieh, il est possible de régler la taille, la densité et l'orientation des ouvertures, permettant de tester différentes configurations. Une fois le moucharabieh paramétré, je lui fabrique une pièce permettant de tester l'ambiance lumineuse qu'il peut générer selon sa configuration. Ces tests seront effectués avec Honeybee qui réalise des simulations lumineuses et qui peut me fournir des diagrammes d'éclairement de chacune des faces intérieures de la pièce. Les intentions d'ambiance lumineuse seront par la suite retranscrites dans ces diagrammes qui nous permettront de créer la fonction objectif « Fitness » que je vais relier à Galapagos avec les paramètres du moucharabieh « Genome » (figure 04.1).

J'ai choisi d'utiliser Galapagos plutôt qu'Octopus, car l'objectif principal est de reproduire une ambiance lumineuse précise dans une pièce, en se concentrant sur une optimisation unique sans compromis. Galapagos, avec sa simplicité et son efficacité pour des objectifs spécifiques, répond mieux à cette exigence que la complexité multidimensionnelle d'Octopus.

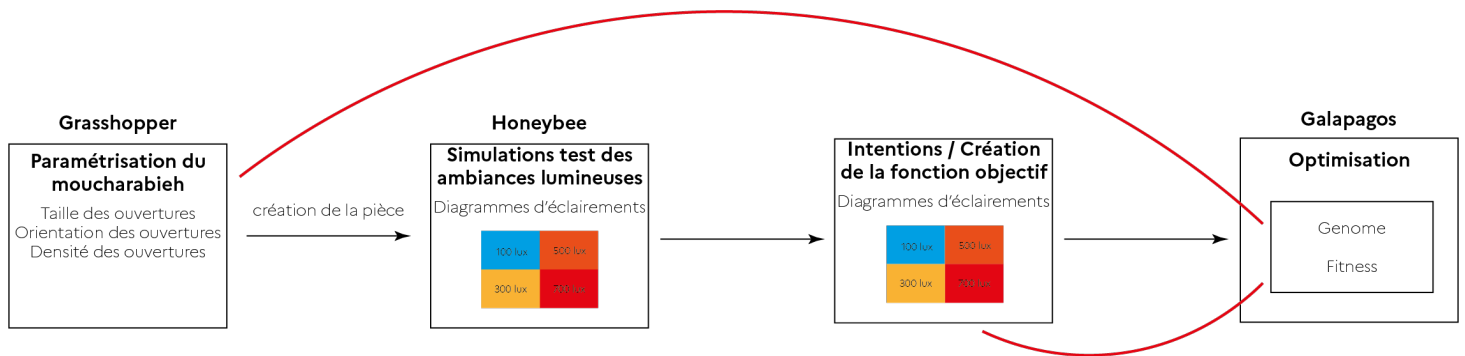


Figure 04.1 Schéma expliquant le déroulé de ma méthode (Source : auteur)

b) La comparaison de ma méthode avec celle de Vincent Tourre

Critères	Méthode de Vincent Tourre	Ma méthode
Objectif principal	Optimiser les ouvertures (positionnement, taille et orientation des fenêtres) pour atteindre des intentions lumineuses spécifiques dans des projets architecturaux.	Optimiser les paramètres d'un moucharabieh (taille, densité et orientation des ouvertures) pour créer une ambiance lumineuse prédéfinie.
Modèle géométrique	Utilisation de modèles sténopé et d'un maillage en triangles pour les surfaces de lumière.	Modélisation paramétrique d'un moucharabieh, avec paramétrisation de la taille des ouvertures, de leur densité et de leur orientation.
Logiciels et plugins utilisés	Solene pour les simulations d'éclairage, EEL (prototype développé pour le modèle) pour le calcul des ouvertures.	Grasshopper pour la modélisation paramétrique, avec Honeybee pour la simulation de lumière, et Galapagos pour l'optimisation.
Définition des intentions lumineuses	Carte d'intentions lumineuses avec des descripteurs d'éclairement et de confort.	Diagrammes d'éclairements des faces intérieures de la pièce
Optimisation et ajustements	Utilisation de la simulation inverse pour ajuster le taux de perforation des éléments de la surface filtrante, en fonction des conditions d'éclairage et des intentions lumineuses.	Utilisation de Galapagos pour ajuster automatiquement les paramètres d'écartement et d'orientation des briques, jusqu'à obtenir l'éclairage souhaité.

Visualisation et validation	Comparaison entre l'éclairage simulé et les intentions, avec simulations directes supplémentaires pour vérifier la conformité des solutions.	Vérification de la correspondance entre l'éclairage obtenu via les simulations de Honeybee et les objectifs lumineux prédéfinis.
-----------------------------	--	--

2. La conception paramétrique du moucharabieh

a) Choix de l'objet d'étude

Il existe différentes sortes de moucharabiehs et je devais donner une forme à celui que j'allais paramétrer. Mon échange au Mexique m'a orienté vers les moucharabiehs en briques qui sont énormément utilisés dans l'architecture contemporaine mexicaine (figures 04.2 et 04.3)²⁴.



Figure 04.2 Espaces commerciaux à Ordaz, Mexique photographiés par Luis Gordo

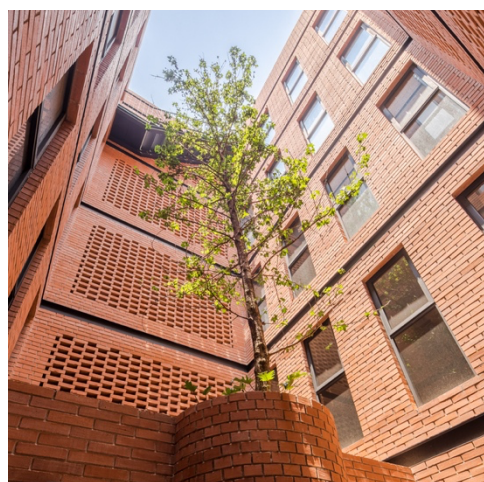


Figure 04.3 Edificio Emiliano Zapata à Mexico City photographié par Diana Arnau

En effet, la brique, en tant que matériau traditionnel et intemporel, confère au moucharabieh une esthétique qui peut être adaptée aux architectures modernes tout en évoquant une dimension culturelle et historique. Cette authenticité donne à la structure un caractère distinctif, en réinterprétant les motifs traditionnels avec des éléments géométriques contemporains. En plus de ses avantages esthétiques, la brique est durable et résistante aux conditions climatiques, ce qui en fait un matériau adapté pour les éléments de façade exposés au soleil.

De plus, la brique est un matériau modulaire, ce qui signifie que chaque unité peut être positionnée et orientée de diverses manières. Dans le cadre d'un moucharabieh, cette modularité permet de créer une structure complexe avec des

²⁴ Source : ArchDaily. « 21 Examples of Brise Soleils in Mexico and Its Diverse Applications », 2 juillet 2018. <https://www.archdaily.com/897428/21-examples-of-brise-soleils-in-mexico-and-its-diverse-applications>.

variations d'écartement et de rotation pour chaque brique, offrant un contrôle précis sur la lumière qui passe à travers.

b) Les paramètres appliqués

Dans cette partie, j'expliquerai chacun des paramètres que j'ai mis en œuvre sans détailler la manière avec laquelle j'ai pu programmer et paramétrer mon moucharabieh en briques sur Grasshopper. Le guide de paramétrisation du moucharabieh se trouve en annexe.

Tout d'abord, j'ai choisi de partir d'une brique aux dimensions de 40 cm de longueur, 10 cm de hauteur, et 5 cm d'épaisseur (figure 04.4). Ces dimensions ont été choisies de manière arbitraire, mais elles offrent une base solide et proportionnée pour construire un moucharabieh modulaire et ajustable.

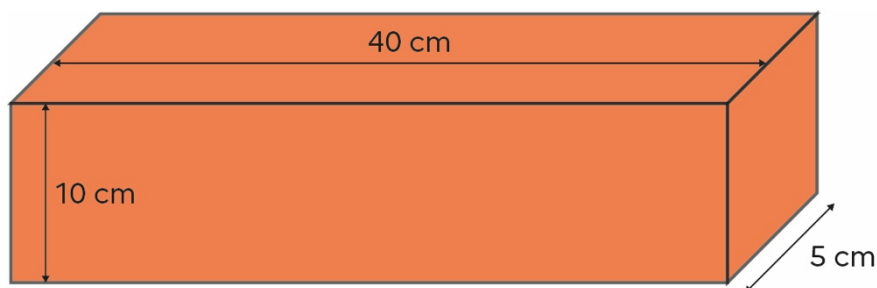


Figure 04.4 Dimensions de la brique utilisée (Source : auteur)

Ensuite, j'ai créé une ligne horizontale de briques côte à côte (figure 04.5). Le nombre de briques contenues dans cette ligne correspond à la longueur du mur. Il s'agit du premier paramètre créé : un nombre entier compris entre 1 et 20.



Figure 04.5 Ligne de 8 briques côte à côte (Source : auteur)

Un moucharabieh est un mur ajouré composé d'orifices. Je propose que ces derniers soient créés par l'espacement des briques entre elles. J'ai donc mis en place un paramètre permettant de générer un écartement constant entre chaque brique (figure 04.6). Il s'agit du deuxième paramètre créé. C'est une distance entière comprise entre 0 et 30 cm.

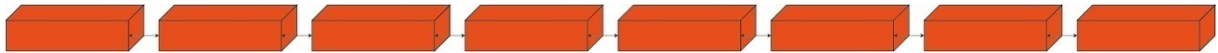


Figure 04.6 8 briques espacées d'une distance donnée (Source : auteur)

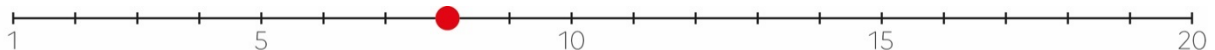
De plus, j'ai créé un programme pyhton qui permet de baisser l'écartement d'une distance donnée de gauche à droite (figure 04.7). Il s'agit du troisième paramètre créé. C'est une distance entière comprise entre 0 et 10 cm.



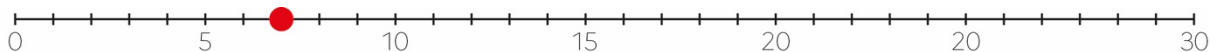
Figure 04.7 8 briques avec un écartement d'origine de 30 cm et un écartement décroissant de 5 cm à chaque fois (Source : auteur)

Jusqu'à présent, j'ai créé 3 paramètres :

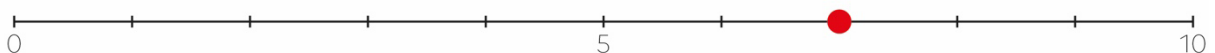
Longueur de la ligne en nombre de briques



Valeur de l'écartement constant entre les briques en cm



Valeur de l'écartement décroissant en cm



Ces paramètres s'appliquent non seulement à ce linéaire de briques mais aussi à l'entièreté du moucharabieh car, dans sa conception, le moucharabieh n'est que la duplication verticale de cette ligne. En effet, afin de construire le moucharabieh, je duplique la ligne de briques d'origine une fois vers le haut avec un décalage égale à la moitié de la somme de la taille d'une brique et de l'écartement appliqué. (Voir figure 04.8).

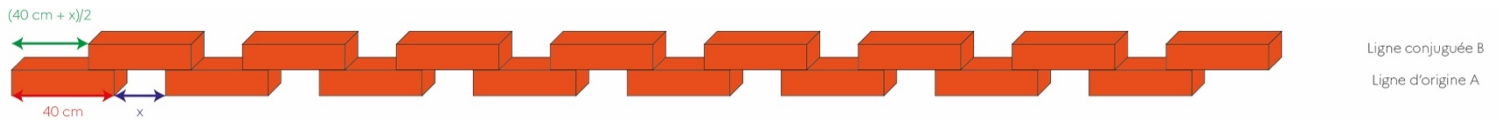


Figure 04.8 Association de la ligne d'origine A et de sa ligne conjuguée B (Source : auteur)

Après avoir créé la ligne d'origine A et sa ligne conjuguée B, elles sont dupliquées de manière groupée verticalement plusieurs fois afin de construire le moucharabieh (figure 04.9). Le nombre de groupes²⁵ contenus dans le moucharabieh correspond à sa hauteur. Il s'agit du quatrième paramètre créé. C'est un nombre entier compris entre 1 et 20.

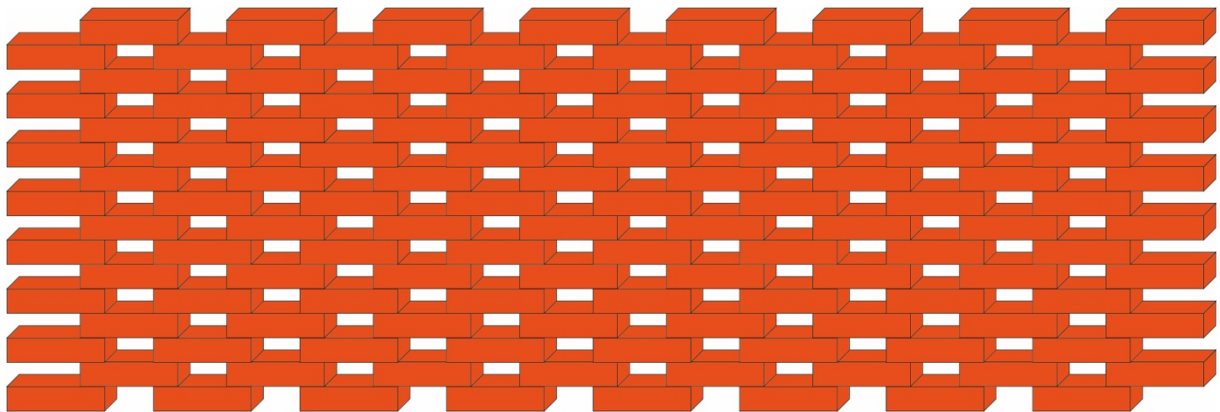


Figure 04.9 Exemple de moucharabieh d'une longueur de 8 briques et d'une hauteur de 8 groupes AB avec un écartement constant de 20 cm entre chaque brique (Source : auteur)

Afin d'agir sur la hauteur des orifices, j'ai mis en œuvre deux autres paramètres permettant de dupliquer au sein du groupe d'une part la ligne d'origine A et d'autre part la ligne conjuguée B. Le nombre de lignes d'origine A et lignes conjuguées B

²⁵ Association de lignes d'origine A et conjuguées B qui se répètent sur la hauteur du moucharabieh

contenues dans un groupe est déterminée par ces paramètres (figure 04.10). Ce sont des nombres entiers compris entre 1 et 5.

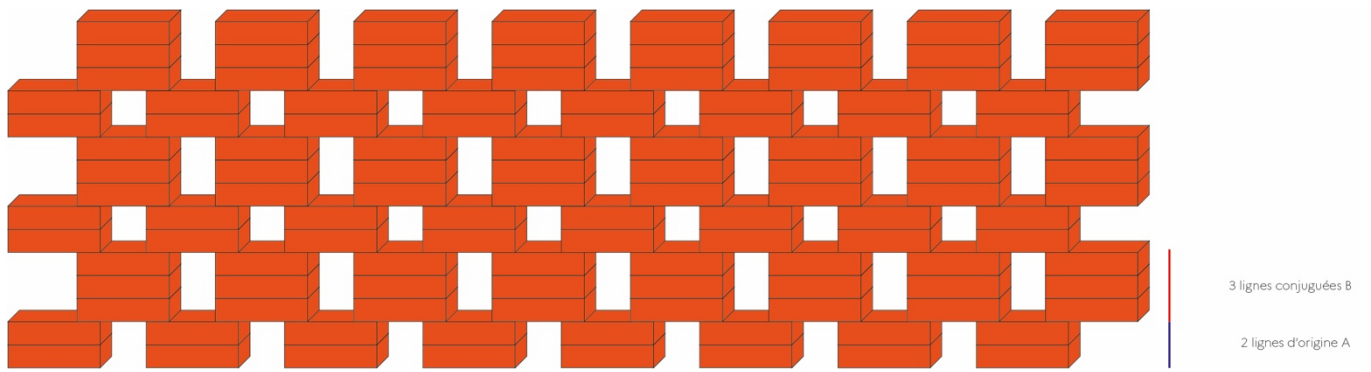


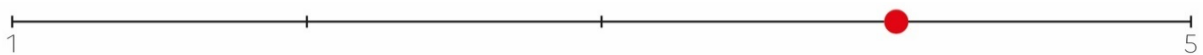
Figure 04.10 Exemple de moucharabieh d'une longueur de 8 briques et d'une hauteur de 3 groupes AABBB avec un écartement constant de 20 cm entre chaque brique (Source : auteur)

J'ai donc ajouté 3 paramètres supplémentaires :

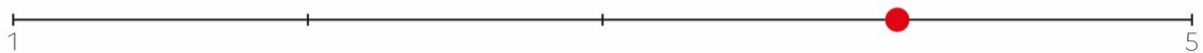
Hauteur du mur en nombre de couples



Nombre de lignes A contenues dans chaque groupe



Nombre de lignes B contenues dans chaque groupe



Tous les paramètres mis en œuvre jusqu'à présent permettent d'élargir ou d'augmenter la hauteur des orifices. J'ai donc ajouté un paramètre qui modifie leur orientation. Il peut seulement agir sur les briques des lignes conjuguées B et ne fonctionne que lorsque l'espacement entre les briques est nul et que le nombre de lignes d'origine A dans chaque groupe est égal à 1 (figure 04.11). C'est le septième paramètre créé. C'est un angle en degrés entier compris entre 0 et 180.

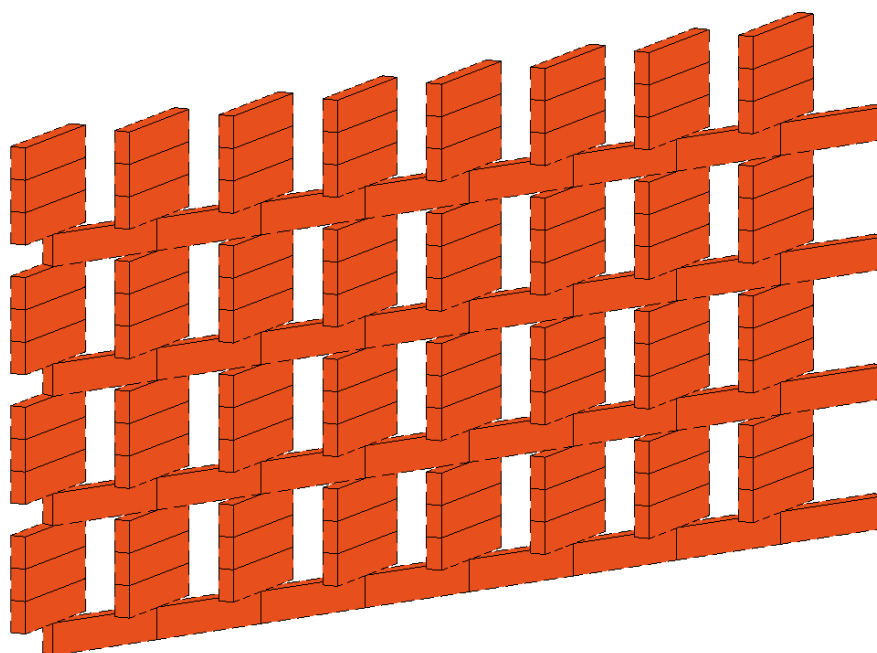


Figure 04.11 Exemple de moucharabieh d'une longueur de 8 briques et d'une hauteur de 4 groupes AB BB avec les briques des lignes B orientées à 30° (Source : auteur)

Un huitième et dernier paramètre permet de d'augmenter d'un angle constant l'orientation des briques des lignes B de colonne en colonne de gauche à droite (figure 04.12).

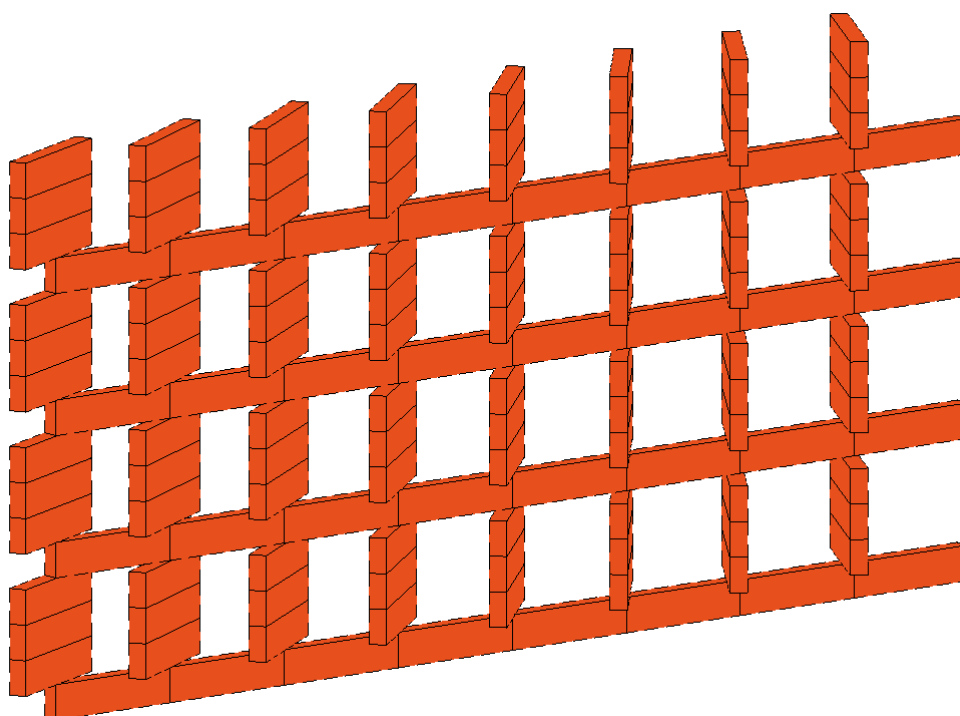


Figure 04.12 Exemple de moucharabieh d'une longueur de 8 briques et d'une hauteur de 4 groupes AB BB avec un angle d'orientation d'origine de 30° et un angle croissant de 5° (Source : auteur)

8 paramètres ont été mis en œuvre afin de créer une multitude de configurations possibles pour ce moucharabieh. Cependant, pour le bon déroulé de l'expérience et des soucis de rigueur que j'expliquerai à la page suivante, la longueur de la ligne d'origine et la hauteur du mur seront, dans la suite de l'étude, des variables dépendantes des paramètres de l'écartement constant entre les briques et de l'écartement décroissant d'une part et des paramètres du nombre de lignes A et B contenues dans chaque groupe d'autre part.

Ce ne sont donc plus 8 mais 6 paramètres qui sont mis en œuvre pour ce moucharabieh. Ces derniers permettront un grand nombre de combinaisons possibles. Ce grand nombre de possibilités me permettra peut-être de générer une ambiance lumineuse que j'aurai défini au préalable. Je ferai un retour sur les paramètres et la manière dont je les ai mis en place dans la partie 05 : Expériences.

3. Simulation et hypothèses

a) La pièce et l'orientation du moucharabieh

A ce stade, l'objet d'étude n'est pas encore totalement prêt. Il faut à présent définir les dimensions de la pièce dans laquelle les simulations lumineuses seront réalisées et la position du moucharabieh dans cette pièce. C'est une pièce de 4m de large, 3m de profondeur et 3m de haut. Seule la profondeur est exactement égale à 3m puisqu'elle ne dépend pas de la taille du moucharabieh. Quant à la hauteur et la largeur de la pièce, elles sont déterminées par la taille du moucharabieh car elles correspondent exactement à ses dimensions et donc aux paramètres de longueur de la ligne d'origine et de la hauteur du mur. J'ai donc fait en sorte dans mon programme que la longueur de la ligne d'origine soit comprise entre 3,5 et 4,5 m et que la hauteur du mur soit comprise entre 2,5 et 3,5m (voir le guide de paramétrisation du moucharabieh en annexe). Pour y arriver, la longueur de la ligne d'origine est déterminée par la valeur de l'écartement constant entre les briques et la valeur de l'écartement décroissant tandis que la hauteur du mur est déterminée par la valeur du nombre de lignes A et B contenues dans chaque groupe. Ce ne seront donc plus des paramètres que je pourrai faire varier directement puisqu'ils seront dépendants d'autres paramètres.

Le moucharabieh occupe la face sud (figure 04.13) de la pièce dans le but de bénéficier de la lumière directe du soleil et de maximiser les apports lumineux.

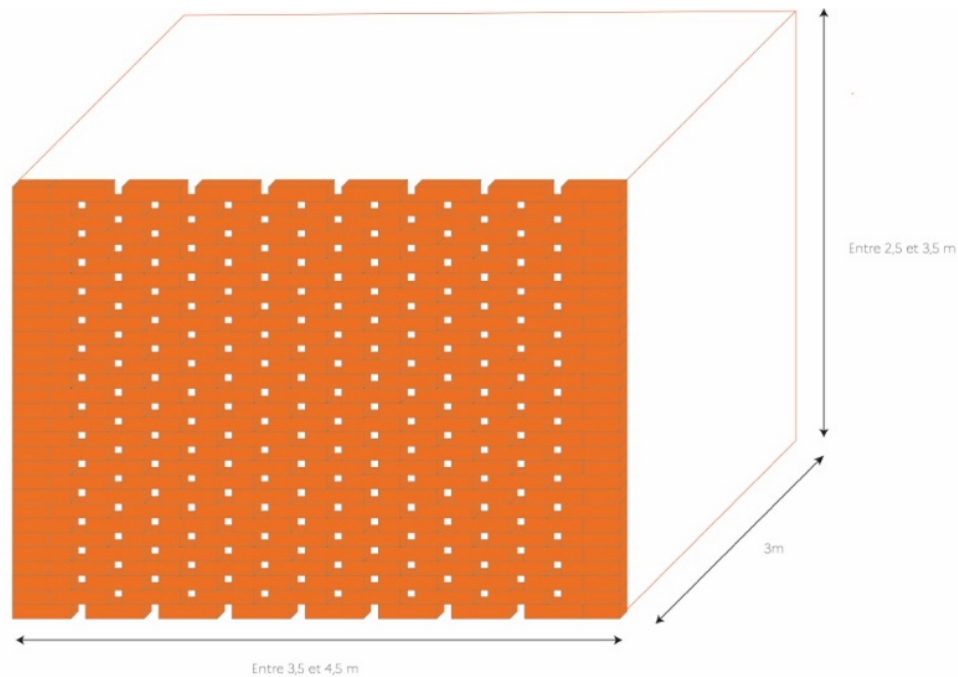


Figure 04.13 Schéma montrant les dimensions de la pièce et la position du moucharabieh sur sa face Sud (Source : auteur)

b) Les conditions météorologiques de l'expérience

Les conditions météorologiques de l'expérience sont déterminées par le lieu et la date. Je fais l'hypothèse, dans le cadre de mon étude, pour la simplifier, que la date et l'heure de l'expérience sont fixes et qu'il n'y a aucun bâtiment ou obstacle aux alentours de ma pièce qui gênerait son interaction avec les rayons du soleil. Il faut donc imaginer que l'expérience se déroule le 20 avril dans un petit musée (qui fait la taille d'une pièce) dans une plaine déserte de Guadalajara, au Mexique et que ce musée n'est ouvert que 1h par jour entre 15h à 16h car je considère que l'ambiance lumineuse ne change pas énormément d'une heure à l'autre. Je fixe donc l'heure à 15h (figure 04.14).

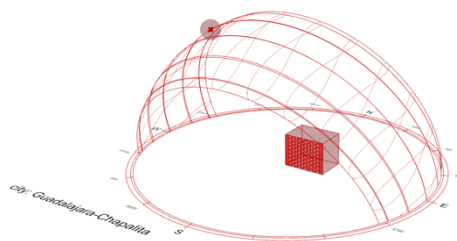
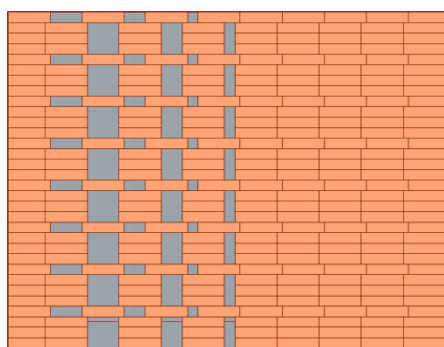


Figure 04.14 Localisation de la pièce (Source : auteur)

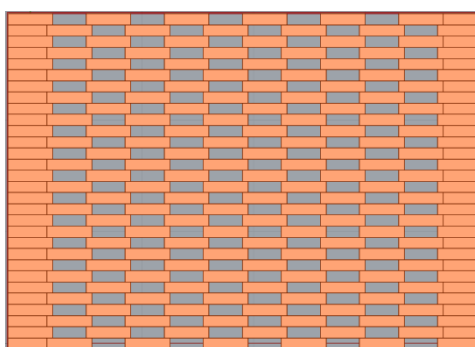
c) Les outils d'analyse proposés par Honeybee

Afin de lancer les analyses de lumière sur Honeybee, je dois configurer la pièce où se dérouleront les simulations et les ouvertures qui laisseront passer la lumière dans cette pièce. Ces dernières sont générées par le vide créé par les briques lorsqu'elles s'écartent ou quand elles tournent sur elles-mêmes. En fait, les briques sont considérées comme un ombrage dans la grande ouverture de la face sud de la pièce.

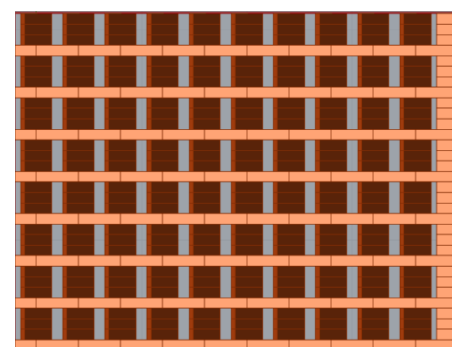
Honeybee nous permet plusieurs sortes d'analyses de lumière que je vais présenter ici en réalisant des simulations sur différentes configurations de moucharabiehs (figure 04.15) :



Moucharabieh 1 AAAB avec un écartement d'origine de 30 cm et un écartement décroissant de 10 cm dans une pièce de 3 m de profondeur, 3,2 de hauteur et 4,17 m de largeur



Moucharabieh 2 AB avec un écartement d'origine de 30 cm dans une pièce de 3 m de profondeur, 3 m de hauteur et 4,27 m de largeur



Moucharabieh 3 ABAB avec les briques des lignes B orientées à 50° dans une pièce de 3m de profondeur, 3m de hauteur et 4,22 m de largeur

Figure 04.15 3 configurations différentes de moucharabiehs (Source : auteur)

Les diagrammes d'éclairéments :

Ils permettent de visualiser l'éclairément et sa répartition sur chacune des faces intérieures de la pièce. Il se présente sous la forme d'un rectangle aux mêmes dimensions que la face correspondante que je peux subdiviser en autant de zones que je le souhaite afin d'évaluer l'éclairément sur différents endroits de la face (figure 04.16 et 04.17).

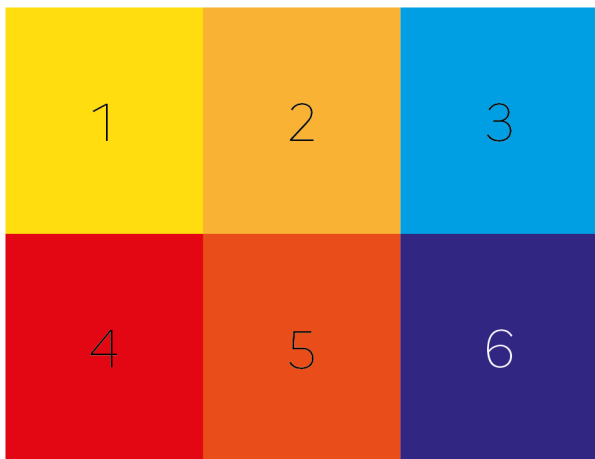


Figure 04.16 Diagramme d'éclairément du sol subdivisée en 6 zones. L'intensité lumineuse sera mesurée dans chacune zones (Source : auteur)

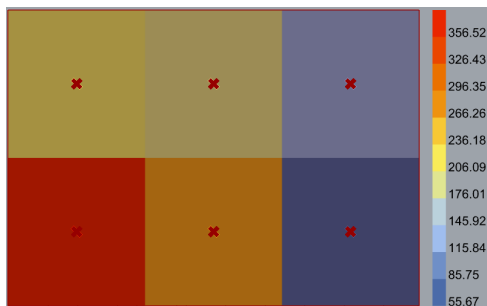


Diagramme d'éclairément du sol de la pièce équipée du **moucharabieh 1**

Zone	Éclairément
1	188 lux
2	178 lux
3	108 lux
4	357 lux
5	252 lux
6	56 lux

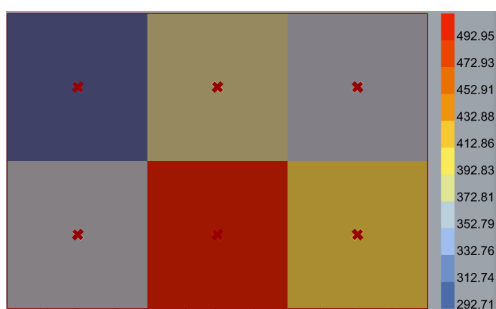


Diagramme d'éclairément du sol de la pièce équipée du **moucharabieh 2**

Zone	Éclairément
1	282 lux
2	407 lux
3	328 lux
4	354 lux
5	465 lux
6	402 lux

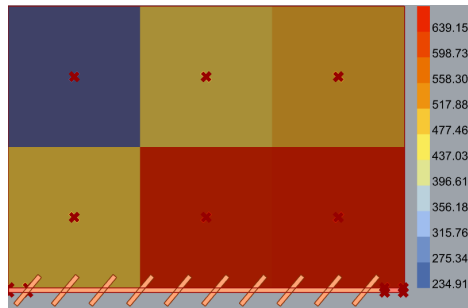


Diagramme d'éclairement du sol de la pièce équipée du **moucharabieh 3**

Zone	Éclairement
1	235 lux
2	435 lux
3	479 lux
4	458 lux
5	632 lux
6	639 lux

Figure 04.17 Diagrammes d'éclairages du sol des 3 moucharabiehs avec les correspondants indiquant les valeurs d'éclairement dans chaque zone (Source : auteur)

L'éclairement varie bien d'un moucharabieh à l'autre et ses différentes valeurs selon la zone de mesure sont cohérentes avec chacune des configurations. Par exemple, pour le moucharabieh 1, dont les ouvertures se trouvent seulement sur la gauche du mur, je note bien la baisse de l'éclairement sur les zones de droite par rapport aux zones de gauche de la pièce. Aussi, le moucharabieh 3 dont les briques sont orientées à 50° à droite permet un éclairage plus élevé des zones de droite de la pièce. Cela, montre que le modèle que j'ai mis en place fonctionne bien.

Les mesures d'éclairement réalisées dans les exemples ci-dessus ont été faites uniquement sur la face correspondant au sol de la pièce. Pour une analyse plus complète de l'éclairement et de l'ambiance lumineuse de la pièce, j'aurais pu réaliser les diagrammes des niveaux d'éclairement des autres faces intérieures de la pièce en plus du sol comme le plafond et les murs Ouest, Nord et Est. Or, dans mon étude, je me focaliserai seulement sur les mesures faites au sol qui nécessitent à elles seules un effort de calcul considérable de la part de mon ordinateur (Macbook Pro IntelCore i7, 2,6 GHz, 16 Go RAM, 512 Go SSD). En effet, pour un diagramme d'éclairement de 6 zones, mon ordinateur a besoin d'une trentaine de secondes pour réaliser les calculs. Si j'ajoutais à cela les diagrammes des 4 autres faces, j'aurais besoin de 2min30 de mesure par configuration. Nous verrons dans la partie qui suit que ce n'est pas tenable pour l'optimisation qui doit réaliser des mesures sur un grand nombre de configurations.

Les images d'ambiance en nuances de gris :

Honeybee permet aussi d'obtenir des images d'ambiance lumineuse à l'intérieur de la pièce. Ces images sont générées en nuances de gris et peuvent être prises selon différents points de vue. Les exemples suivants ont un point de vue depuis le plafond de la pièce permettant de se focaliser sur l'ambiance lumineuse au sol (figure 04.18).

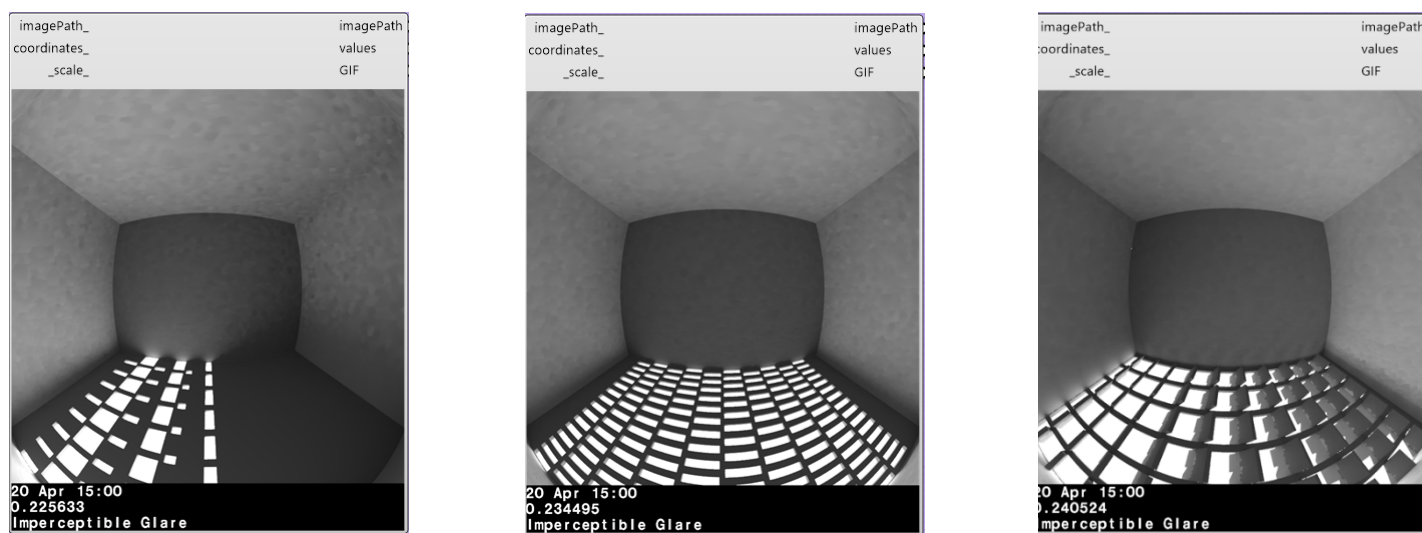


Figure 04.18 Images en nuances de gris des ambiances lumineuses générées dans la pièce par chacun des 3 moucharabiehs
(Source : auteur)

Initialement, j'envisageais d'exploiter les données ci-dessus de Honeybee en établissant une correspondance entre les valeurs de gris des images générées et les valeurs d'éclairement correspondantes. Pour ce faire, j'ai développé un programme Python visant à créer une palette de gris cohérente, associée à différentes valeurs d'éclairement. Cette palette aurait permis au concepteur de "dessiner" l'ambiance lumineuse souhaitée pour la pièce.

Cependant, des incohérences dans l'association entre les valeurs de gris et les intensités lumineuses ont rendu la constitution de cette palette complexe. Face à cette difficulté, j'ai reconsidéré mon approche. Il est apparu plus judicieux de laisser le concepteur définir directement les valeurs d'éclairement souhaitées pour chaque zone du diagramme.

En effet, mon objectif initial de simplifier la tâche du concepteur, en lui proposant une traduction automatique de nuances de gris en valeurs d'éclairement, s'est révélé plus ambitieux que prévu. La complexité du processus et les incohérences rencontrées ont motivé cette réorientation.

4. Optimisation

Fort des résultats encourageants obtenus par la validation du modèle lors des simulations d'éclairage, il est temps d'aborder le cœur de cette étude : l'optimisation de la configuration du moucharabieh. Contrairement à la phase précédente, où une configuration de moucharabieh prédéfinie servait à générer un diagramme d'éclairements, l'objectif est désormais inversé. Il s'agit de partir d'un diagramme d'éclairement cible et, grâce à l'optimisation, de déterminer la configuration du moucharabieh permettant d'atteindre cette distribution lumineuse.

Pour mener à bien cette exploration, j'ai bénéficié de l'expertise d'Etienne Laget, un camarade du séminaire dont le mémoire porte sur les méthodes d'optimisation en conception paramétrique. Ses connaissances m'ont permis de comprendre le fonctionnement de Galapagos, le plug-in d'optimisation que j'ai choisi d'utiliser, et de définir les paramètres les plus adaptés à mon étude.

a) Séparation des paramètres

Compte tenu d'une contrainte technique rencontrée, j'ai dû segmenter les six paramètres du modèle en deux groupes de paramètres distincts, testés séparément. Le premier groupe comprend trois paramètres, tandis que le second en compte quatre, dont un paramètre issu du premier groupe.

1 ^{er} groupe de paramètres	2 ^{ème} groupe de paramètres
Nombre de lignes B contenues dans chaque groupe (1 à 5)	Valeur de l'écartement constant entre les briques (0 à 30 cm)
Angle de rotation d'origine des briques des lignes B (0 à 180°)	Valeur de l'écartement décroissant (0 à 10 cm)
Angle de rotation croissant de colonne en colonne (0 à 180°)	Nombre de lignes A contenues dans chaque groupe (1 à 5)
	Nombre de lignes B contenues dans chaque groupe (1 à 5)

b) Expérimentation préliminaire

Afin de valider la démarche et d'ajuster les paramètres de Galapagos, j'ai réalisé une première expérience simplifiée. L'objectif est de trouver la configuration d'un moucharabieh, doté des paramètres du groupe 1, permettant d'obtenir un éclairage uniforme de 200 lux sur une seule zone au sol.

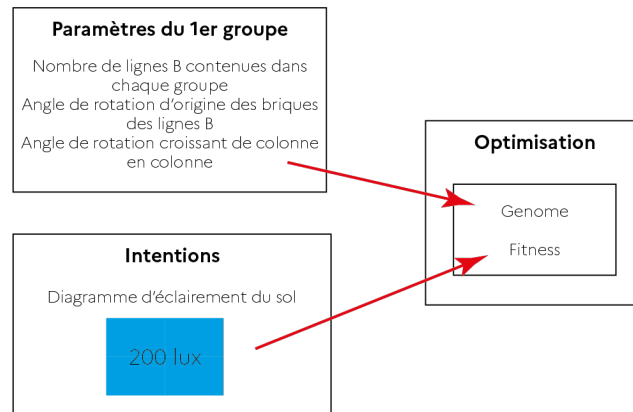


Figure 04.19 Schéma de l'optimisation de l'expérience simplifiée (Source : auteur)

Pour initialiser l'optimisation, j'ai généré une population de 10 solutions, chacune correspondant à une combinaison aléatoire des paramètres du premier groupe. Bien qu'une population plus importante soit généralement recommandée pour explorer l'espace de solution de manière plus exhaustive, j'ai dû limiter ce nombre en raison des contraintes de calcul de mon ordinateur. Chaque évaluation de solution, pour un diagramme d'éclairage à une seule zone, nécessite environ 20 secondes. Les générations suivantes ont été limitées à 5 solutions.

J'ai configuré Galapagos pour conserver 20% des solutions les plus performantes à chaque génération, les autres étant générées par mutation des "gènes" (paramètres) des solutions sélectionnées, avec un taux de conservation des gènes de 75% (figure 04.20). La fonction objectif vise à atteindre un éclairage de 200 lux, les solutions les plus performantes étant celles qui s'en rapprochent le plus.

Ce processus itératif de sélection, croisement et mutation a permis à Galapagos de converger vers une solution satisfaisante en environ 15 minutes, atteignant un éclairage de 197 lux.

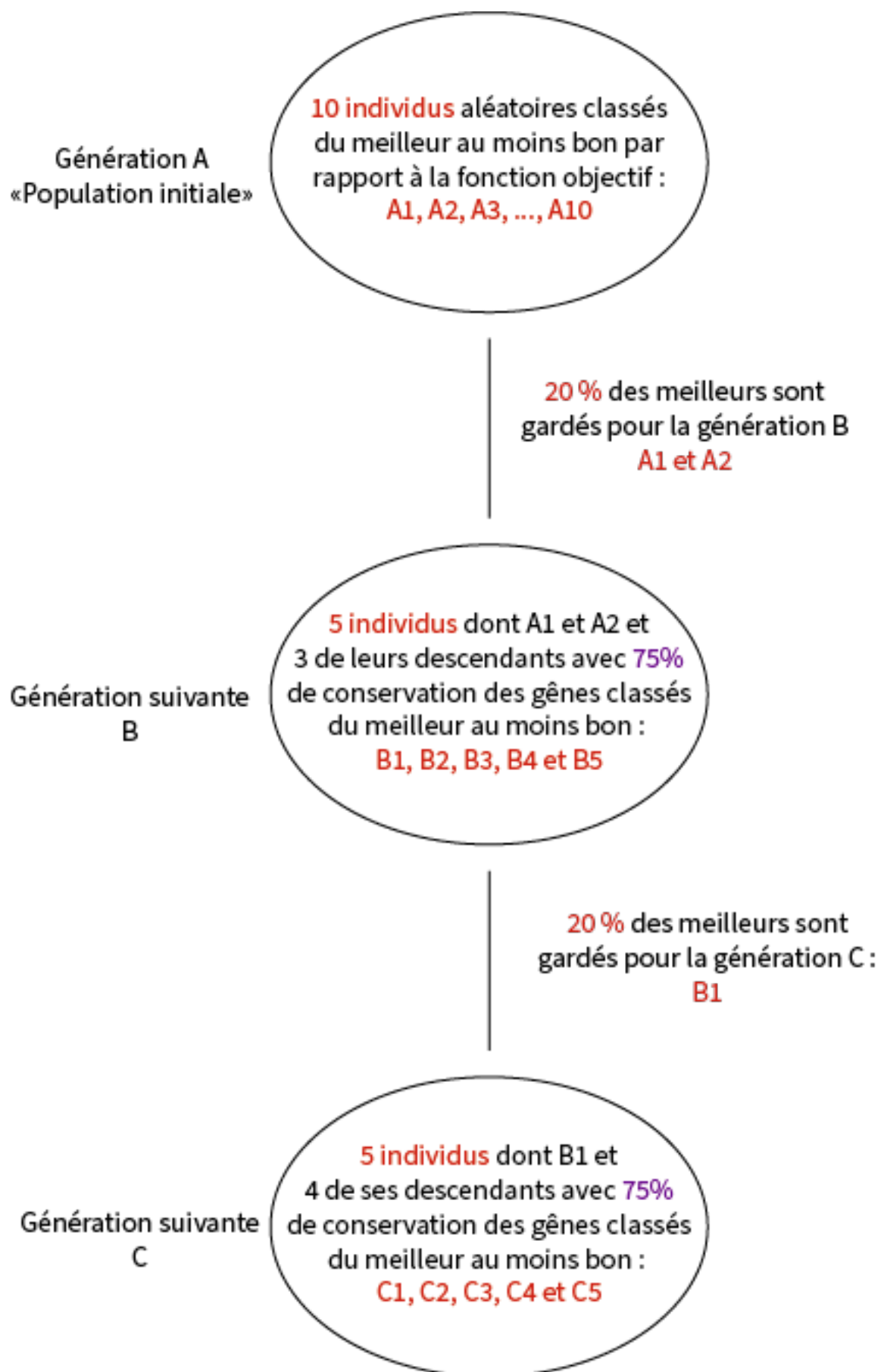


Figure 04.20 Schéma explicatif de l'optimisation réalisée avec Galapagos sur l'expérience simplifiée (Source : auteur)

Suite à cette première expérience, j'ai affiné les paramètres de Galapagos (taille de la population initiale, taille des populations successives, taux de maintien et taux de consanguinité) pour optimiser son efficacité. La prochaine étape consistera à réaliser des expériences plus ambitieuses, avec des diagrammes d'éclaircissements plus complexes.

EXPÉRIENCES

Les 2 expériences je j'ai réalisées sont effectuées dans les conditions que j'ai énoncées plus tôt :

- Une pièce de 3 m de profondeur, 4m de large et 3m de haut
- Le moucharabieh occupe la face sud de la pièce
- Lieu : Guadalajara, Mexique
- Date et heure : le 20 avril à 15h

1. Expérience 1 : À la recherche d'un moucharabieh adéquat

a) Objectif et protocole de l'expérience :

L'objectif de cette expérience est de reproduire une ambiance lumineuse précise à l'aide de l'optimisation avec Galapagos. En d'autres termes, il faut trouver une configuration de moucharabieh permettant de reproduire une ambiance lumineuse prédéfinie.

Étape 1 : Définition de l'ambiance que je souhaite reproduire (ambiance cible)

Afin de définir l'ambiance que je souhaite reproduire, je configure un moucharabieh avec les paramètres du groupe 1 (nombre de lignes B contenues dans chaque groupe, angle de rotation d'origine des briques des lignes B, angle de rotation croissant de colonne en colonne) que je choisis de manière totalement arbitraire. Je sou mets la pièce dotée du moucharabieh que j'ai paramétré à Honeybee afin de calculer le diagramme d'éclairements du sol associée. Ceci me permet de m'assurer que l'ambiance lumineuse que je chercherai à générer avec Galapagos est bien reproductible par le moucharabieh. Le diagramme d'éclairements du sol calculée par Honeybee est constituée de 4 zones. Ces 4 zones permettent de mieux préciser l'ambiance lumineuse par rapport à un diagramme d'éclairement constitué d'une zone uniquement mais reste moins précise qu'un diagramme composé de plus de zones.

Cependant, un diagramme de 4 zones est adapté à la puissance de mon ordinateur pour qu'il puisse réaliser ses calculs d'optimisation dans un temps raisonnable. Je dispose de l'ambiance cible (figure 05.1).

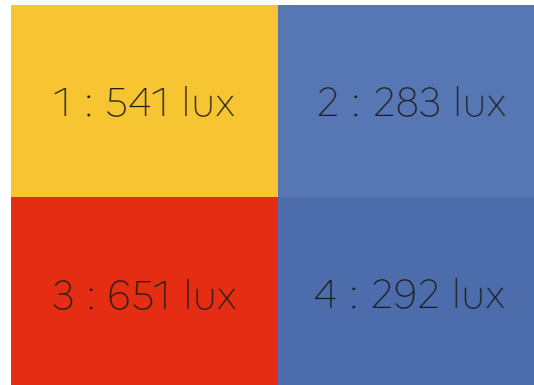


Figure 05.1 Ambiance cible (Source : auteur)

Étape 2 : optimisation avec Galapagos

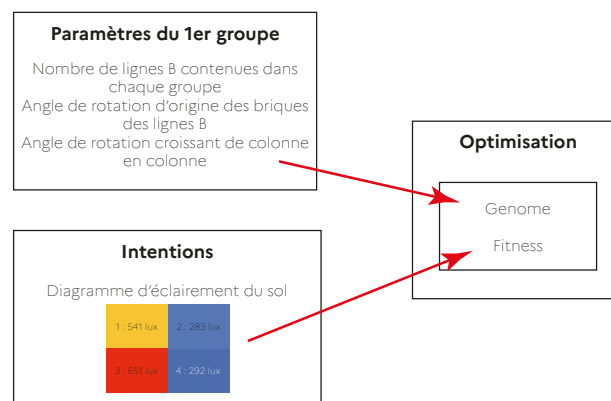


Figure 05.2 Schéma de l'optimisation de l'expérience 1 (Source : auteur)

Je fournis à Galapagos les données d'éclairage de l'ambiance cible (figure 05.2) et paramètre ses données d'entrée. L'optimisation entreprise ici présente une complexité accrue par rapport à l'exemple précédent : elle est multicritère. En effet, Galapagos doit désormais atteindre simultanément les objectifs d'éclairage pour chaque zone du diagramme, impliquant un défi de "satisfaction" globale.

Pour maximiser les chances de succès de Galapagos, j'ai ajusté ses paramètres d'entrée. La population initiale a été fixée à 60 individus, afin d'explorer un large éventail de solutions dès le départ. Les populations suivantes sont composées de 20 individus,

avec un taux de maintenance de 20% pour conserver les meilleures solutions d'une génération à l'autre. Les nouveaux individus générés présentent un taux de parenté de 75% avec les solutions conservées, favorisant ainsi l'exploration autour des solutions prometteuses (figure 05.2).

L'expérience a été lancée pour une durée d'une nuit entière, afin de maximiser le nombre de générations et d'augmenter la probabilité de converger vers la solution cible.

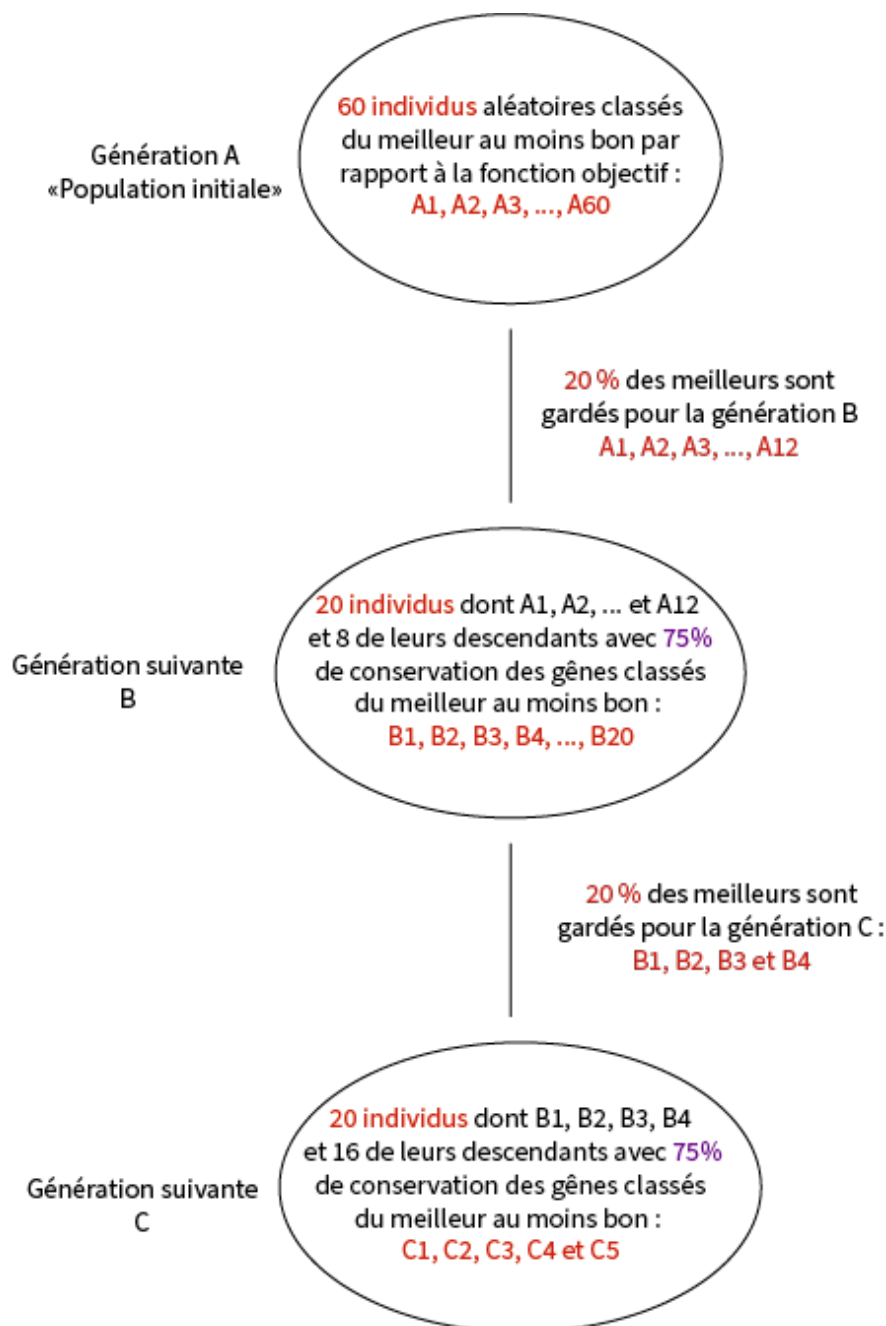
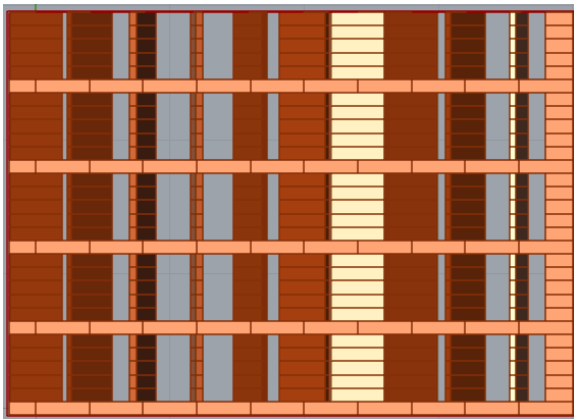


Figure 05.3 Schéma explicatif de l'optimisation réalisée avec Galapagos sur l'expérience simplifiée (Source : auteur)

b) Résultats de l'expérience et analyse

Au bout de 70 générations, la meilleure solution trouvée par Galapagos (figure 05.4) est un moucharabieh avec une ambiance lumineuse associée ayant 254 lux de différence totale avec l'ambiance cible (figure 05.5).



Paramètres	Valeur
Nombre de lignes B contenues dans chaque groupe (1 à 5)	5
Angle de rotation d'origine des briques des lignes B (0 à 180°)	14
Angle de rotation croissant de colonne en colonne (0 à 180°)	27

Figure 05.4 Meilleure solution trouvée par Galapagos (Source : auteur)

Zone	Objectif d'éclairement	Éclairement généré par la meilleure solution trouvée par Galapagos	Écart entre les deux solution
1	541	312	229 lux
2	283	273	10 lux
3	651	638	13 lux
4	292	290	2 lux

Figure 05.5 Tableau comparant l'objectif d'éclairement avec l'éclairement généré par le meilleur moucharabieh trouvé par Galapagos (Source : auteur)

Le résultat obtenu peut être analysé de différentes manières. D'une part, je pourrais considérer qu'il n'est pas satisfaisant, car le moucharabieh obtenu ne permet pas de reproduire l'ambiance lumineuse cible avec une précision suffisante, laissant un écart de 254 lux par rapport à la cible. D'autre part, je pourrais aussi juger ce résultat acceptable, car cet écart est principalement concentré dans la zone 1, qui présente un écart de 229 lux, tandis que les trois autres zones sont très proches de l'éclairement cible. Par conséquent, je pourrais dire que le résultat est satisfaisant à 75 %, car trois zones sur quatre répondent de manière satisfaisante au critère fixé.

Plusieurs raisons pourraient expliquer cet « échec relatif ». Tout d'abord, les paramètres d'entrées de Galapagos (nombre d'individus dans la population initiale, nombre d'individus dans les populations successives, pourcentage de maintien et pourcentage de consanguinité) auraient pu être différents. Par exemple, il est possible qu'il aurait fallu augmenter le nombre d'individus dans la population initiale afin d'augmenter la probabilité de trouver une solution plus proche de la fonction objectif en élargissant l'espace d'exploration dès le départ. Les populations intermédiaires auraient également pu être plus importantes pour maintenir une diversité génétique plus élevée et éviter une convergence prématurée vers des solutions sous-optimales. Cependant, cette augmentation est limitée par les capacités matérielles de mon ordinateur, qui ne permet pas de gérer de très grandes populations à moins de faire durer l'expérience durant plusieurs jours. Un taux de consanguinité plus faible aurait permis davantage de mutations, augmentant ainsi les chances de générer des solutions différentes et potentiellement meilleures. Dans cette expérience, j'ai été surpris de constater que l'algorithme s'était arrêté prématurément pendant la nuit, en raison d'une trop forte consanguinité des solutions, empêchant toute convergence vers la fonction objectif.

Une autre explication possible de cet écart réside dans la nature même du problème : il s'agit d'une optimisation multi-critères, tandis que Galapagos est initialement conçu pour optimiser un seul critère à la fois. Mais il est possible d'utiliser

Galapagos pour traiter un problème multi-critères, cela nécessite de transformer le problème en un problème mono-objectif. C'est ce que j'ai entrepris lors de cette expérience afin de pouvoir utiliser Galapagos. Pour adapter Galapagos à un problème multi-objectifs, il faut combiner les différents objectifs en une seule fonction objectif. Je m'explique. Dans la partie 3 Méthodologie de la recherche, j'ai réalisé une petite expérience d'optimisation mono-objectif où Galapagos devait trouver un moucharabieh permettant un éclairage moyen du sol de 200 lux. Afin d'y parvenir, puisque Galapagos ne permet que deux choses, soit maximiser, soit minimiser la fonction objectif, cette dernière devait donc être égale à :

$$F = | E_{\text{cible}}^{26} - E_{\text{mesuré}}^{27} | = | 200 - E_{\text{mesuré}} |.$$

J'ai demandé à Galapagos de la minimiser et donc de la faire tendre vers 0 lux, ce qui permet de faire tendre l'éclairage mesuré vers 200 lux. Ici, c'est plus complexe car l'optimisation est multi-objectif et donc :

$$F = |F_1| + |F_2| + |F_3| + |F_4| \text{ où :}$$

$$F_1 = E_{\text{cible1}} - E_{\text{mesuré1}} = 541 - E_{\text{mesuré1}}$$

$$F_2 = E_{\text{cible2}} - E_{\text{mesuré2}} = 283 - E_{\text{mesuré2}}$$

$$F_3 = E_{\text{cible3}} - E_{\text{mesuré3}} = 651 - E_{\text{mesuré3}}$$

$$F_4 = E_{\text{cible4}} - E_{\text{mesuré4}} = 292 - E_{\text{mesuré4}}$$

J'ai demandé à Galapagos de minimiser F et donc de la faire tendre vers 0 lux, et donc de faire tendre F_1, F_2, F_3 et F_4 chacun vers 0 lux et donc $E_{\text{mesuré1}}$ vers 541 lux, $E_{\text{mesuré2}}$ vers 283 lux, $E_{\text{mesuré3}}$ vers 651 lux et $E_{\text{mesuré4}}$ vers 292 lux.

Transformer un problème multi-critères en un problème mono-critère sur Galapagos complique davantage la tâche de l'algorithme. Contrairement à Octopus, qui est

²⁶ Eclairage cible

²⁷ Eclairage mesuré

conçu pour équilibrer différents objectifs en trouvant des compromis grâce à sa conception multi-objectifs, Galapagos, dans sa configuration intrinsèquement mono-critère, n'a pas cette capacité. Ici, le programme fera tout son possible pour satisfaire tous les critères en les intégrant dans une fonction unique, sans possibilité de compromis. En d'autres termes, je ne lui laisse pas le choix : il doit traiter tous les objectifs comme un seul, et cela demande davantage de ressources pour converger efficacement.

En effet, pour lui donner les moyens d'y parvenir, il est nécessaire d'augmenter le nombre d'individus dans les populations initiales et successives. Cela permet d'élargir l'espace de recherche et de maximiser les chances de trouver une solution qui satisfait tous les critères intégrés dans la fonction objective. Cette approche est particulièrement adaptée à mon objectif, qui exige une précision extrême et ne tolère pas de compromis : je souhaite reproduire une ambiance lumineuse prédéfinie avec une marge d'erreur de seulement quelques lux. En choisissant Galapagos, je privilégie donc une recherche ciblée et précise, où chaque solution proposée doit viser une conformité totale à l'objectif défini.

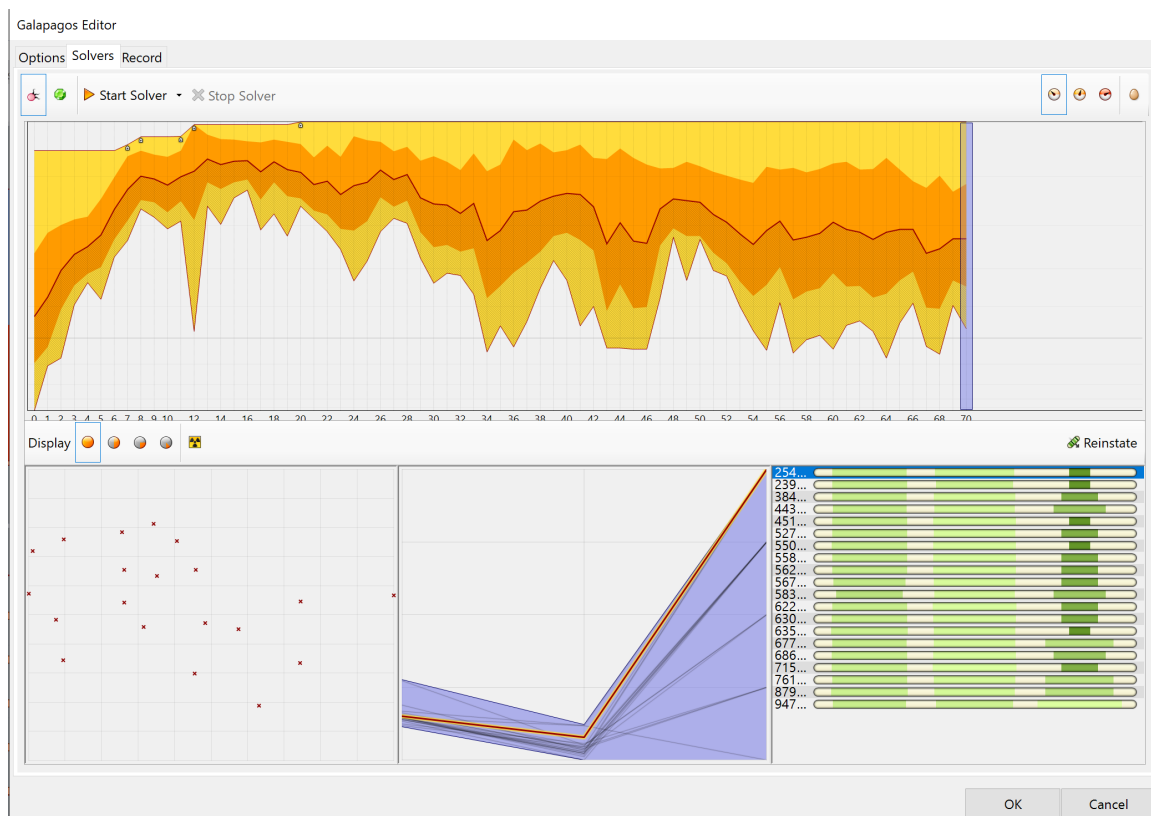


Figure 05.6 Fenêtre de résultats de Galapagos (Source : auteur)

2. Expérience 2 : Comparaison des paramètres

a) Objectif et protocole de l'expérience

Dans cette expérience, je tire parti du fait que je n'ai pas réussi à faire fonctionner tous mes paramètres simultanément, ce qui m'a conduit à les diviser en deux groupes. Cette séparation me permet de comparer les résultats d'optimisation et de montrer que la nature des paramètres choisis pour mon moucharabieh influence le processus d'optimisation et donc la capacité à reproduire fidèlement une ambiance lumineuse prédéfinie.

Lors de l'expérience précédente, pour définir l'ambiance lumineuse cible, j'ai d'abord configuré mon moucharabieh de manière arbitraire en utilisant les paramètres du groupe 1. Ensuite, j'ai réalisé des simulations d'éclairement avec Honeybee, ce qui m'a permis d'obtenir un diagramme d'éclairement. Cette démarche m'a permis de vérifier l'existence d'une configuration de moucharabieh permettant de générer ce diagramme d'éclairement avant de tenter de la retrouver à l'aide de Galapagos pendant l'optimisation. Dans la présente expérience, je vais directement définir un diagramme d'éclairement cible, sans vérifier au préalable qu'il existe une configuration de moucharabieh capable de le générer. Je tenterai ensuite une optimisation, même sans garantie qu'elle puisse aboutir à un résultat satisfaisant contrairement à l'expérience précédente.

Cette approche illustre l'objectif central de mon mémoire : permettre à un architecte de définir n'importe quel diagramme d'éclairement cible, à condition qu'il soit cohérent²⁸, et de rendre possible la recherche d'un moucharabieh optimisé pour le reproduire.

²⁸ Un diagramme d'éclairement cohérent est un diagramme de présentant pas de valeurs absurdes comme deux zones côtes à côtes avec 1000 lux sur l'une et 0 lux sur l'autre par exemple.

Étape 1 : définition du diagramme d'éclairement cible

Voici le diagramme d'éclairement que je souhaite reproduire en trouvant la configuration de moucharabieh associé, ou qui s'en approche le plus possible, grâce à l'optimisation.

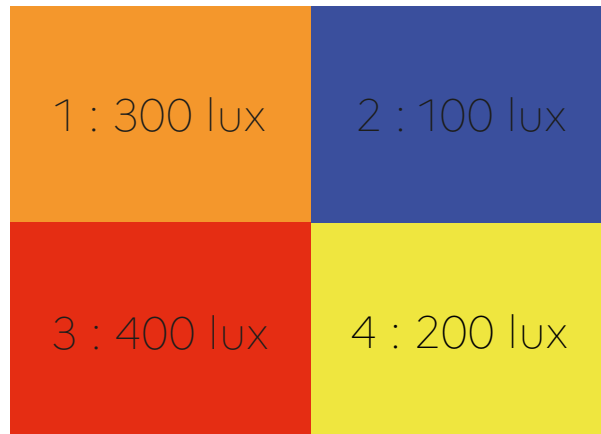


Figure 05.7 Diagramme d'éclairement cible (Source : auteur)

Ce diagramme d'éclairement est cohérent et normalement compatible avec mes deux groupes de paramètres. En effet, il montre l'ambition d'avoir un éclairage plus important à gauche (400 et 300 lux) qu'à droite (200 et 100 lux). Le groupe de paramètres 1 qui permet aux briques de tourner sur elles-mêmes permet normalement de répondre positivement à cette ambition de même que le groupe de paramètres 2 qui permet un espacement décroissant entre les briques de gauche à droite.

Étape 2 : optimisation avec Galapagos

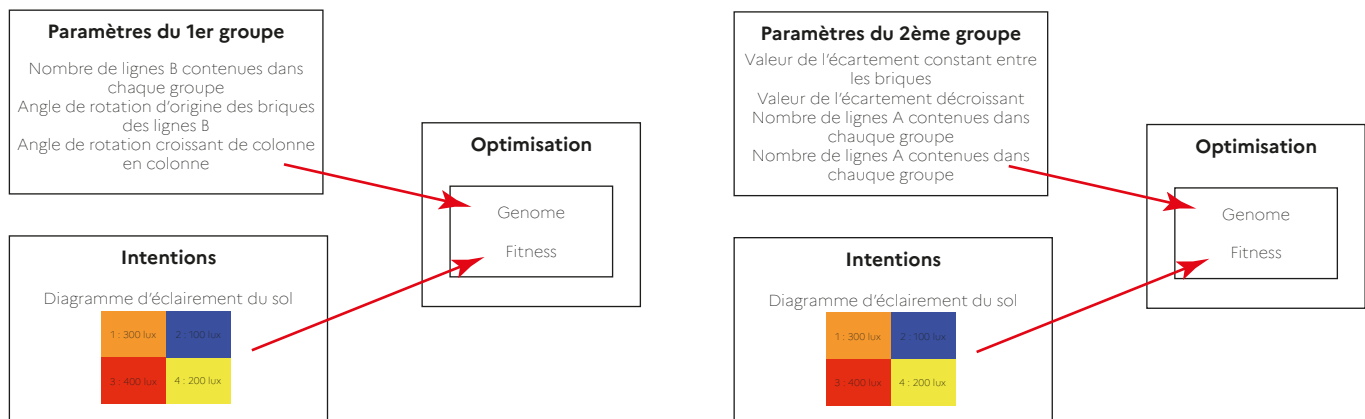


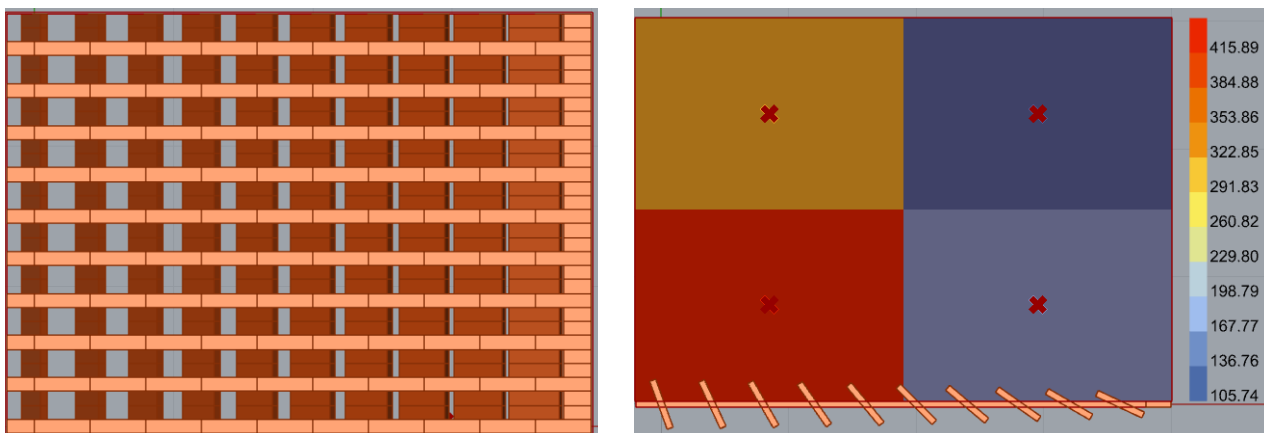
Figure 05.8 Schémas de l'optimisation de l'expérience 2 (Source : auteur)

Je commence par définir les données d'entrées de Galapagos :

- Population initiale : 60 individus
- Populations successives : 20 individus
- Pourcentage de maintien : 10%
- Pourcentage de consanguinité : 75%

Je réalise l'expérience sur 7 générations afin qu'elle ne dure pas trop longtemps et les résultats obtenus à la fin me permettront de faire des conjectures sur quel groupe de paramètres est le plus efficace pour se rapprocher le plus possible de ce diagramme d'éclairement.

b) Résultats de l'expérience et analyse



Zone	Objectif d'éclairage	Meilleure solution trouvée par Galapagos	Différence
1	300	300	0 lux
2	100	106	6 lux
3	400	416	16 lux
4	200	149	51 lux

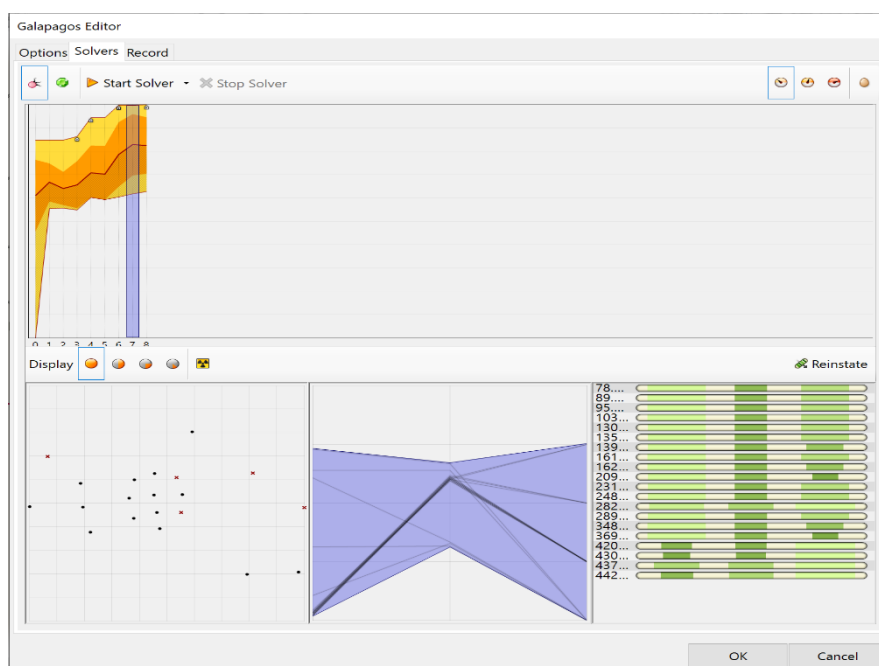
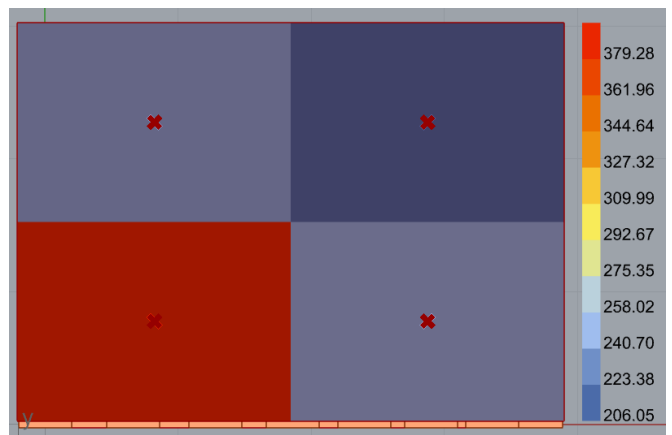
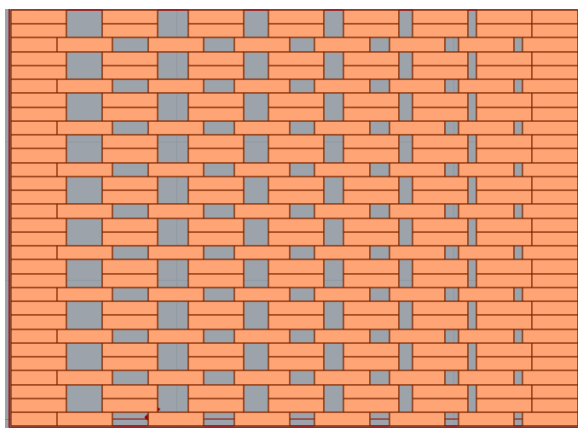


Figure 05.9 Résultats de l'expérience avec un moucharabieh avec les paramètres du groupe 1 (Source : auteur)



Zone	Objectif d'éclairage	Meilleure solution trouvée par Galapagos	Différence
1	300	233	67 lux
2	100	206	106 lux
3	400	379	21 lux
4	200	237	37 lux

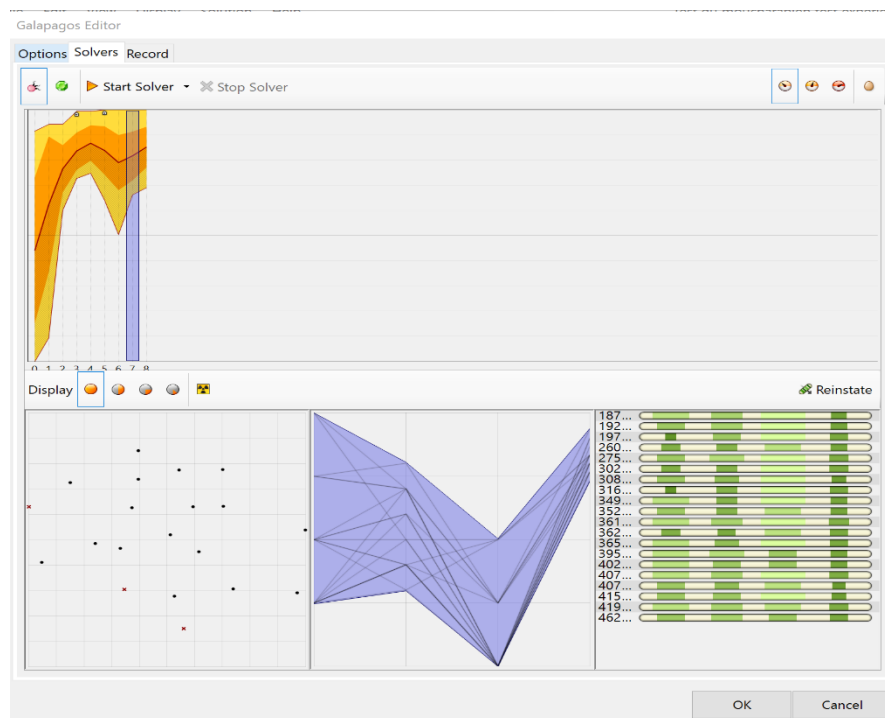


Figure 05.10 Résultats de l'expérience avec un moucharabieh avec les paramètres du groupe 2 (Source : auteur)

La différence d'éclairement totale entre l'objectif et la meilleure solution trouvée par Galapagos au bout de 7 générations est de 73 lux pour le moucharabieh doté des paramètres du groupe 1 (figure 05.9) tandis qu'elle est de 231 lux pour le moucharabieh doté des paramètres du groupe 2 (figure 05.10). L'expérience aurait pu durer plus longtemps et Galapagos aurait certainement trouver de meilleures solutions pour les deux moucharabiehs mais je peux tirer une conjecture de ce résultat qui est que le moucharabieh doté des paramètres du groupe 1 possèdent des paramètres lui permettant de converger plus vite et le plus proche possible de la fonction objectif et à vrai dire, je ne suis pas surpris de ce résultat. En effet, les paramètres du groupe 1 permettant la rotation des briques donnent, au moucharabieh, une plus grande flexibilité dans la production d'ambiances lumineuses que les paramètres du groupes 2 qui permettent seulement leur espacement et leur empilement. Cette expérience, contrairement à la précédente, teste l'efficacité des paramètres et de leur nature montrant que ces derniers peuvent avoir un impact important sur le résultat de l'optimisation. Elle montre l'importance du choix des paramètres dès le début du processus, en les adaptant non seulement à l'objectif, mais également aux contraintes du système. Cela pose également la question de savoir si certains types de paramètres pourraient être priorisés ou combinés pour obtenir des résultats encore meilleurs, tout en maintenant une certaine diversité dans les ambiances lumineuses réalisables. Ainsi, cette expérience montre que la conception paramétrique ne repose pas uniquement sur la puissance de l'algorithme, mais également sur l'intelligence du concepteur dans le choix et la structuration des paramètres qui guideront l'optimisation. Le moucharabieh que j'ai conçu est adapté à la mise en œuvre de certaines ambiances lumineuses et pas d'autres car il est limité par les paramètres que je lui ai transmis.

CONCLUSION

Ce mémoire s'est donné pour objectif d'explorer et de démontrer comment la paramétrisation et l'optimisation d'un moucharabieh peuvent être utilisées pour concevoir des ambiances lumineuses précises et adaptées à des intentions architecturales spécifiques. Cette recherche s'inscrit dans la continuité des travaux de Vincent Turre, en adoptant une méthodologie s'appuyant sur des outils numériques récents et à ma disposition.

Dans une première étape, j'ai entrepris une revue de l'état de l'art, en mettant en lumière l'origine historique des moucharabiehs et leur évolution dans l'architecture contemporaine, ainsi que les principes fondamentaux de la lumière naturelle en architecture. L'étude des travaux de Vincent Turre sur la simulation inverse de l'éclairage naturel a constitué une base théorique solide, tandis que l'analyse des outils de conception paramétrique, de simulation et d'optimisation a permis de choisir les logiciels les plus adaptés à mon approche : Grasshopper, Honeybee et Galapagos.

Ensuite, j'ai développé une méthodologie spécifique pour modéliser un moucharabieh en briques, en définissant des paramètres clés tels que la taille, l'écartement, l'orientation et la densité des ouvertures. Ce travail a nécessité une programmation précise dans Grasshopper, tout en exploitant les fonctionnalités avancées de Honeybee pour simuler la lumière naturelle et évaluer son impact sur les espaces intérieurs. J'ai conçu une pièce expérimentale intégrant ce moucharabieh, afin de réaliser des simulations dans un contexte réaliste basé sur des conditions météorologiques précises à Guadalajara au Mexique.

Les simulations effectuées ont permis de valider la capacité du modèle à générer des ambiances lumineuses variées et cohérentes avec les intentions prédéfinies. Par ailleurs, j'ai exploité les diagrammes d'éclairement générés par Honeybee pour définir des objectifs mesurables dans le processus d'optimisation. Grâce à Galapagos, j'ai pu inverser le processus en partant d'un diagramme cible pour ajuster automatiquement les paramètres du moucharabieh dans l'objectif d'atteindre une ambiance lumineuse prédéfinie.

Cette dernière étape, qui constituait le cœur et l'objectif principal de cette étude, s'est révélée complexe mais riche en enseignements. Les deux expériences réalisées m'ont permis de tirer des conclusions significatives sur l'efficacité de l'optimisation et sur le rôle crucial des paramètres du moucharabieh. L'optimisation à l'aide de Galapagos ne constitue pas un processus automatique : pour obtenir des résultats satisfaisants, il est essentiel d'ajuster et d'adapter soigneusement les paramètres d'entrée au problème spécifique d'optimisation. Chaque problème possède ses particularités, et celui abordé dans cette étude s'est avéré particulièrement chronophage. En effet, chaque individu généré par Galapagos nécessitait des calculs d'éclairage complexes réalisés par Honeybee, dont la durée dépend fortement de la puissance de l'ordinateur utilisé. Une optimisation efficace repose sur la capacité à explorer un grand nombre de configurations possibles, ce qui implique de travailler avec des populations initiales et successives suffisamment importantes. Or, cette exigence s'est avérée difficile à satisfaire dans le cadre de cette étude. Par ailleurs, des paramètres tels que les pourcentages de maintien et de consanguinité ont dû être ajustés à plusieurs reprises, nécessitant de nombreux essais pour parvenir à des résultats cohérents. L'optimisation aurait donc mérité une part encore plus importante du temps consacré à cette recherche afin de produire des résultats plus aboutis.

Cependant, cette étape clé n'aurait pas pu être menée sans la mise en place préalable de l'objet d'étude : le moucharabieh en briques. Sa conception n'a pas été une tâche aisée, en raison de mon absence initiale de compétences spécifiques sur Grasshopper. Ce projet m'a donc demandé un temps considérable pour apprendre et maîtriser les outils nécessaires à sa réalisation. Pourtant, cette étape s'est révélée essentielle, notamment dans le cadre de la deuxième expérience, où elle a démontré l'importance de la qualité des paramètres du modèle paramétrique. Ces paramètres, véritables "gènes" du modèle, influencent directement la réussite de l'optimisation. Si la nature même des paramètres est défectueuse, toute tentative d'optimisation est vouée à l'échec.

En conclusion, le moucharabieh conçu dans cette étude offre déjà un large éventail de configurations possibles. Toutefois, des expériences supplémentaires d'optimisation

seraient nécessaires pour approfondir cette recherche et repousser ses limites. J'espère qu'un étudiant, dans les années à venir, pourra reprendre les bases posées ici pour pousser cette étude encore plus loin. En testant d'autres logiciels d'optimisation ou en introduisant des variables supplémentaires pour des simulations plus réalistes, il serait possible d'ouvrir de nouvelles perspectives et d'explorer des solutions encore plus performantes.

ANNEXE

Guide de paramétrisation, de simulations et d'optimisations du moucharabieh en briques

Mon objet d'étude est un moucharabieh en briques. J'ai choisi ce matériau car la brique est un module constant pouvant occuper l'espace de différentes manières selon sa position dans un **repère orthonormé tridimensionnel** (figure 07.1) et selon son angle de rotation autour de différents axes me permettront d'obtenir diverses formes de moucharabiehs.

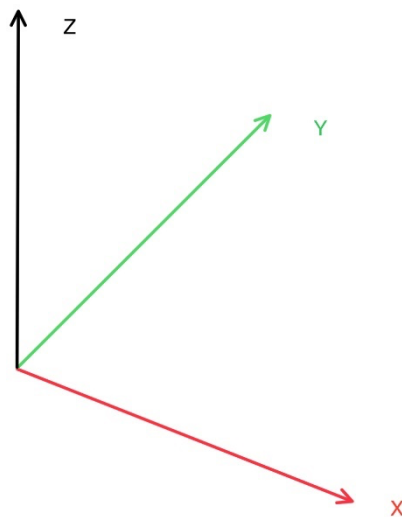


Figure 07.1 Repère orthonormé tridimensionnel (Source : auteur)

La brique, par sa géométrie simple, offre un panel de possibilités d'appareillages. Les dimensions d'une brique standard sont 22,5 cm de longueur, 10,5 cm d'épaisseur et 6 cm de hauteur. Je prends d'abord le temps de poser le vocabulaire (figure 07.2).

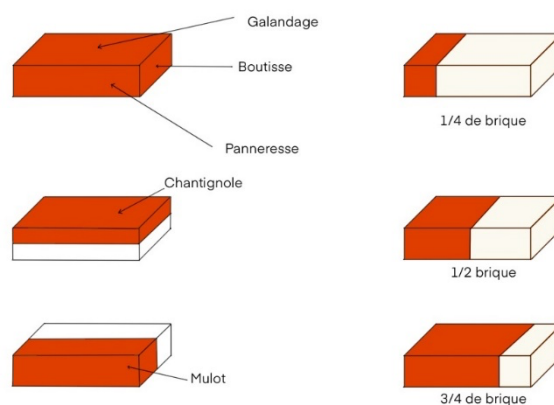


Figure 07.2 Vocabulaire de la brique (Source : auteur)

Je décide de réaliser mon moucharabieh à partir d'un appareillage à demi-briques (figure 07.3)²⁹.

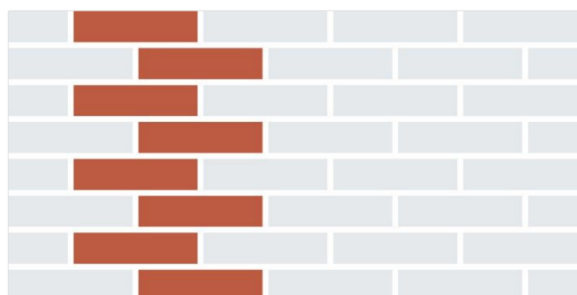


Figure 07.3 Appareillage à demi-briques (Source : auteur)

Etape 1 : Création de la brique

J'ai commencé par créer ma brique sur Grasshopper avec les dimensions arbitraires suivantes : 40 cm de longueur, 10 cm de hauteur et 5 cm d'épaisseur (figure 07.3 et 07.4).

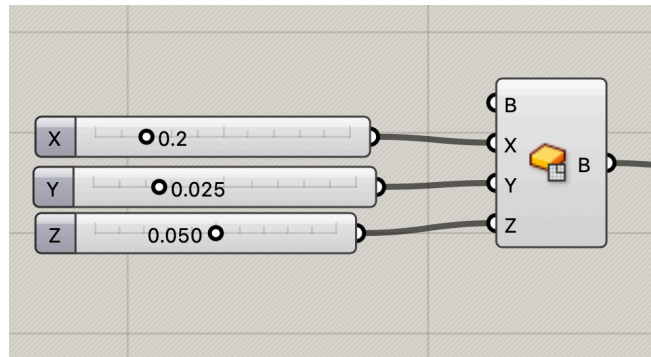


Figure 07.4 Extrait de Grasshopper (Source : auteur)

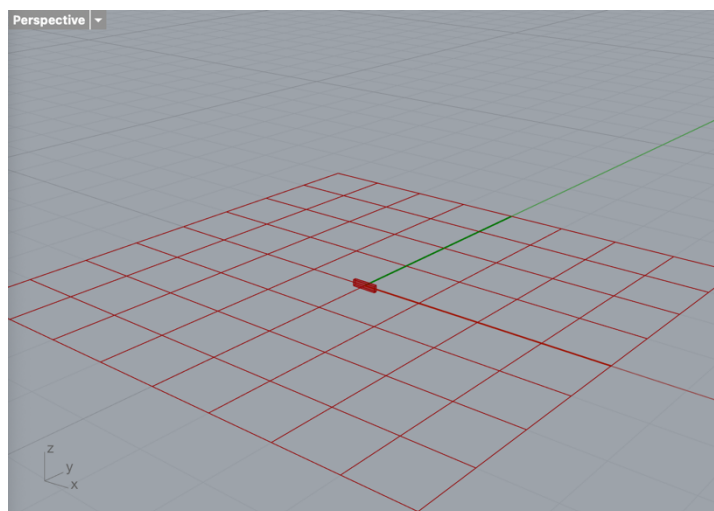


Figure 07.5 Visualisation de la brique sur Rhino 8 (Source : auteur)

J'ai donc appelé la fonction « center box » qui me permet de placer un parallélépipède dont le **centre de gravité** se situe au point de coordonnées (0, 0, 0). Les boîtes d'entrée « X » pour la longueur, « Y » pour l'épaisseur et « Z » pour la hauteur

²⁹ Source : Belgium. « Appareillages de maçonnerie ». Consulté le 13 octobre 2024. <https://www.wienerberger.be/fr/facade/inspiration-et-conseils/mise-en-oeuvre.html>.

sont des curseurs (« number slider ») qui expriment la distance en mètres³⁰ entre le centre de gravité et le centre de la face opposée de ma brique selon les directions x, y et z du repère orthonormé tridimensionnel. La brique est créée et je décide de réaliser un appareillage à demi-briques

Etape 2 : Création d'un linéaire de briques

Afin de mettre en place cet appareillage sur Grasshopper, je réalise une première ligne de briques en utilisant la fonction « move » à laquelle j'attache la géométrie que je souhaite dupliquer (ma brique) et la direction dans laquelle je veux la dupliquer et la **translater**. Afin de créer un linéaire de briques, je lie à la direction de translation et de duplication un programme python qui donne en sortie une liste de distances précises distanciant les briques une à une de la brique d'origine dans la direction de x.

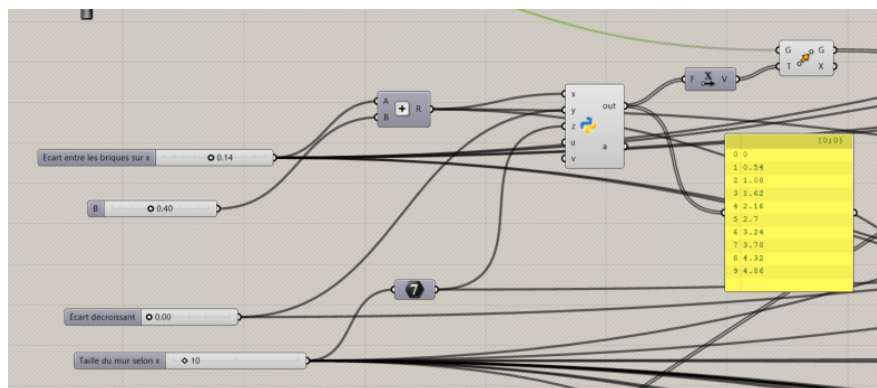


Figure 07.6 Code Grasshopper (Source : auteur)

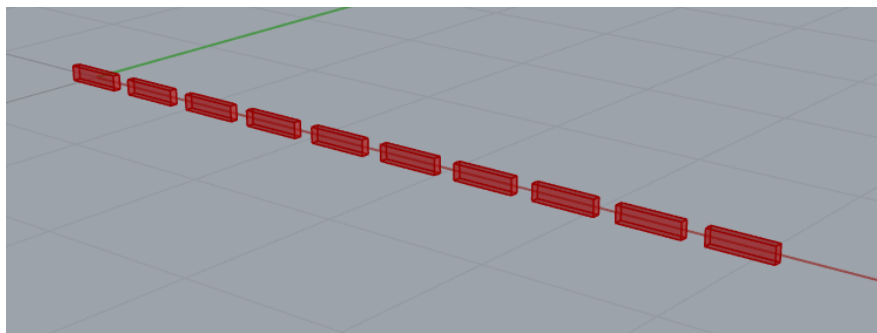


Figure 07.7 10 briques distancées de 0.54 m les unes des autres. Cette distance est exprimée de centre de gravité à centre de gravité. (Source : auteur)

³⁰ L'unité de longueur que j'utilise sur Grasshopper est le mètre et non pas le centimètre

```

1 '''Grasshopper Script'''
2 e=round(x-y,3)
3 L=[0,x,round(x+e,3)]
4 for i in range (2,z):
5     if round(L[i]-L[i-1]-y,3)>0.40:
6         e=round(e-y,3)
7         L.append(round(L[i]+e,3))
8     else:
9         L.append(round(L[i]+0.40,3))
10 for i in range(0,z):
11     print(L[i])

```

Figure 07.8 Code Python (Source : auteur)

Au programme Python, je lie les variables « x » qui correspond à la somme de 0.4 m qui est la distance minimale entre les centres de gravité de deux briques pour qu'elles soient côte à côte et un écart compris entre 0 et 0.3 m qui correspond à la largeur souhaitée de l'orifice entre deux briques. Je limite cette largeur à 0.3 m pour que la brique située au-dessus garde 5 cm d'appui de part et d'autre. La variable « x » est comprise entre 0.4 et 0.7 m. La variable « y » correspond à un écart décroissant qui va permettre de rendre les orifices de plus en plus petits de gauche à droite tandis que la variable « z » est le nombre de briques sur une ligne. Ce programme que j'ai écrit permet d'avoir « z » briques distancées les unes des autres d'une valeur de « x » m constante si y est égale à 0 ou d'une valeur de « x » m décroissante de gauche à droite en y enlevant « y » m à chaque orifice. Le programme python empêche que la distance entre deux briques soit inférieure à 0.4 m sinon elles se chevaucheraient.

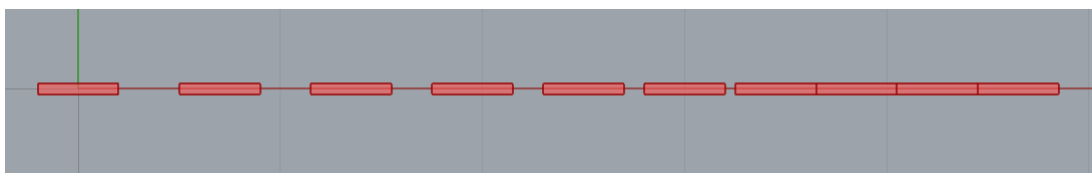


Figure 07.9 : 10 briques distancées de 0.7 m au départ, la distance diminue de 0.05 m à chaque orifice de droite à gauche (Source : auteur)



Figure 07.10 : 10 briques distancées de 0.7 m au départ, la distance diminue de 0.1 m à chaque orifice de droite à gauche (Source : auteur)

Mon linéaire de briques est créé. A présent, chaque paramètre qui exercera une influence sur cette ligne, exercera une influence sur le moucharabieh dans sa globalité car ce dernier se construira par un jeu de duplication et de translation de cette même ligne. Jusqu'à présent, j'ai créé trois paramètres qui sont l'écart d'origine entre les briques qui est un curseur compris entre 0 et 30 cm, l'écart dégressif qui est aussi un curseur compris entre 0 et 10 cm et le nombre de briques que contient ma ligne qui est aussi un curseur de nombres entiers supérieurs ou égaux à 1.

Etape 3 : Création de l'appareillage

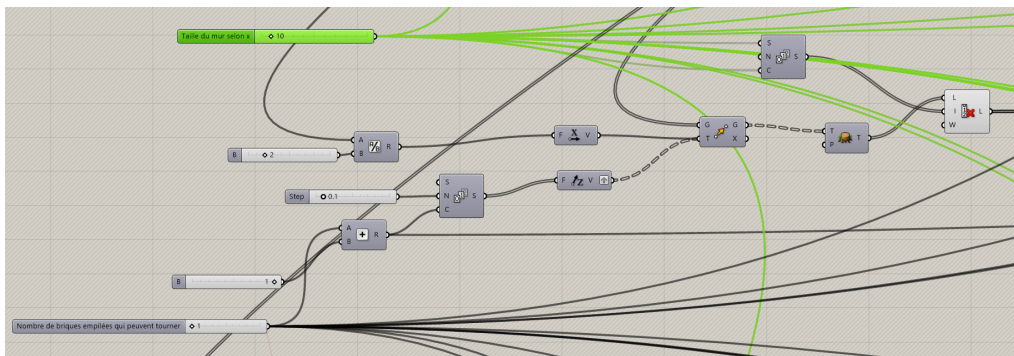


Figure 07:11 Code Grasshopper (Source : auteur)

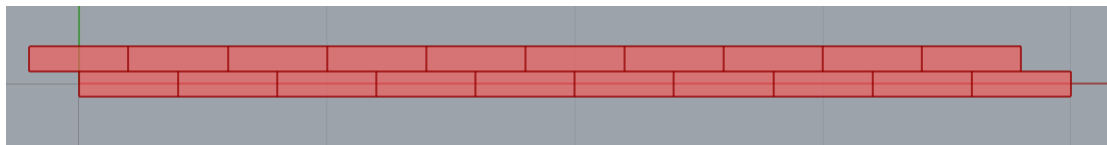


Figure 07:12 Appareillage à demi-briques (Source : auteur)

Je fais encore appel à la fonction move à laquelle je lie la ligne de briques que j'ai créée et les directions dans lesquelles je veux la dupliquer et la traduire qui sont celles de x et z simultanément. Dans la direction de x, je la translate de la moitié de la distance d'origine entre les briques compris entre 0.4 et 0.7 m. Et dans la direction de z, je la translate de 0.1 m qui correspond à la hauteur d'une brique. L'appareillage est créé.

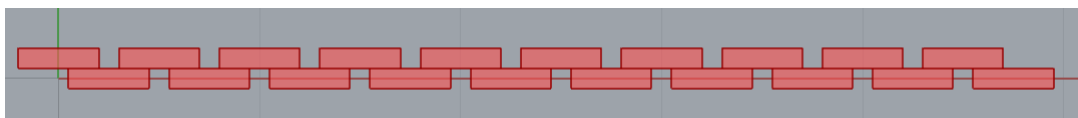


Figure 07:13 Appareillage à demi-briques avec orifices de 10 cm (Source : auteur)

Afin d'obtenir mon mur je peux dupliquer et translater ces deux lignes plusieurs fois sur z en faisant appel à la fonction move et nous avons là un aperçu de mon moucharabieh.

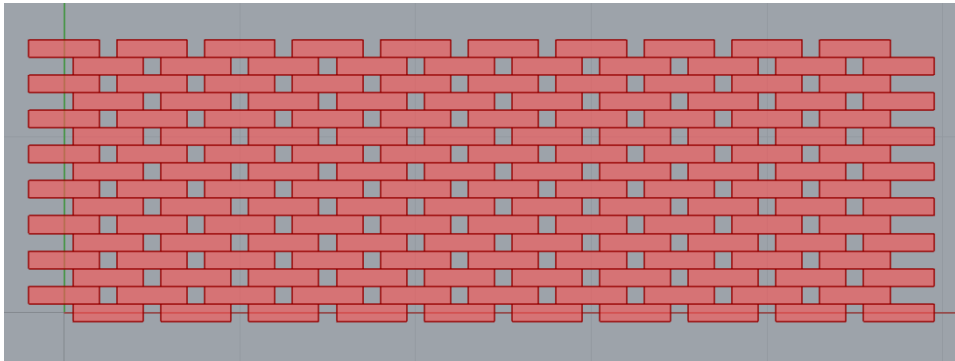


Figure 0714 Moucharabieh avec orifices de 10 cm de large (Source : auteur)

Cependant, dans ce cas, nous pouvons seulement agir sur la largeur des orifices en faisant varier notre curseur entre 0 et 30 cm sans pouvoir agir sur leur hauteur.

Etape 4 : Agir sur la hauteur des ouvertures

La solution que j'ai trouvée afin d'influencer la hauteur des orifices est de modifier la structure du mur. Je m'explique. Jusqu'à présent, j'ai construit un mur ABABAB, donc quand les briques s'écartaient, elles laissaient de la place à des ouvertures qui pouvait seulement s'élargir. Or, si je crée un paramètre me permettant de modifier la structure du mur et qu'il soit du type AABAABAAB ou AABBAABBAABB ou encore AABBBAAABBBAAABB, cela augmenterait la hauteur des orifices et me permettrait d'avoir 2 tailles d'orifices selon la structure du mur. En effet, un mur du

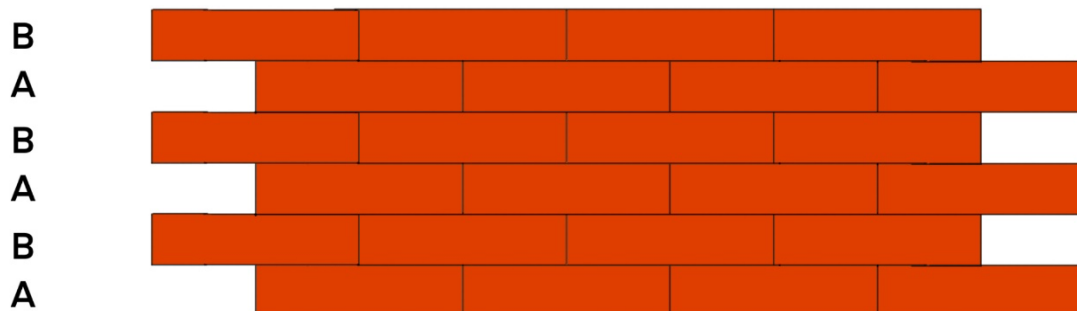


Figure 0715 Schéma de la structure du mur (Source : auteur)

type ABBABBABB aurait, une ligne sur deux, des ouvertures de 10 cm et de 20 cm de hauteur.

Afin de mettre en place ceci, je duplique et translate la ligne A d'origine, en utilisant la fonction « move », selon z vers le bas et je duplique et translate la ligne B d'origine en faisant appel au même principe mais cette fois-ci vers le haut.

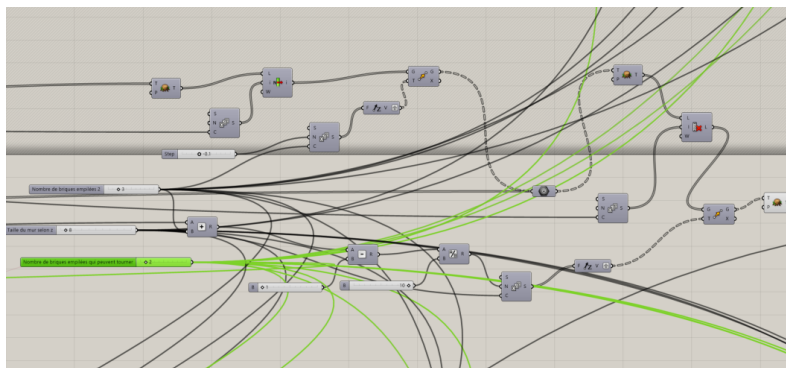


Figure 0716 Code Grasshopper (Source : auteur)

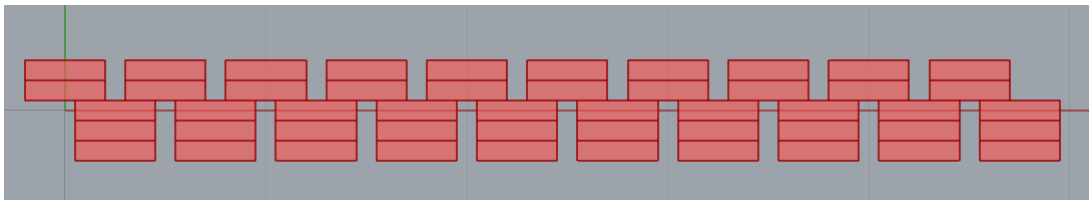


Figure 0717 Moucharabieh AAABB (Source : auteur)

Enfin, afin de construire mon mur, je duplique et translate la couche obtenue selon z en utilisant la fonction move et en mettant en place des translations égales à l'épaisseur de ma couche. Ce que j'appelle couche est le module qui se répète dans la structure de mon mur. Par exemple, un mur AAABBAAABBAAABB (voir la figure ci-dessus) correspond à une superposition de couches AAABB. Je me retrouve avec 3 paramètres en plus qui correspondent au nombre de couches superposées, au nombre de A et au nombre de B contenus dans un module.

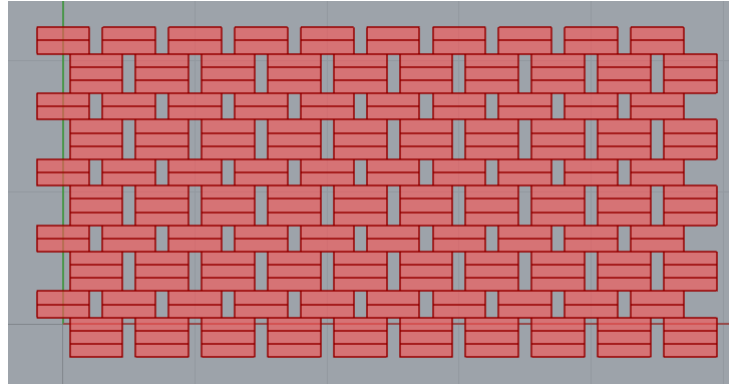


Figure 07.18 Moucharabieh AAAB (Source : auteur)

Etape 5 : Réadaptation du programme

Comme je l'ai expliqué dans le corps dans mon mémoire, finalement, la hauteur et la largeur du moucharabieh ne peuvent plus être considérées comme des paramètres car la largeur doit être comprise entre 3,5 et 4,5 mètres tandis que la hauteur doit être comprise entre 2,5 et 3,5 mètres. J'ai donc écrit les scripts suivants sur python permettant au moucharabieh de respecter cela.

```

1 a=1
2 b=a*0.4+((0.4+x)/2)+((a-1)*x)
3 if y != 0:
4     c=int(round((x/y),3))
5     if c<a:
6         for i in range (0,c):
7             b=b-i*y
8         d=b-x*(a-c-1)
9     else :
10        for i in range (0,a-1):
11            b=b-i*y
12        d=b
13    else :
14        d=b
15    while d < 4:
16        a += 1 #
17        b = a * 0.4 + ((0.4 + x) / 2) + ((a - 1) * x)
18
19    if y != 0:
20        c = int(round((x / y), 3))
21        if c < a:
22            for i in range(0, c):
23                b = b - i * y
24            d = b - x * (a - c - 1)
25        else:
26            for i in range(0, a - 1):
27                b = b - i * y
28            d = b
29        else:
30            d = b
31    print(a)

```

Figure 0719 Code pyhton (Source : auteur)

```

1 a=1
2 b=a*((x*0.1)+(y*0.1))
3 while b < 3:
4     a += 1
5     b=a*((x*0.1)+(y*0.1))
6     d=round(b,2)
7 print(a)

```

Figure 0720 Code python (Source : auteur)

Etape 6 : Agir sur la rotation des briques des lignes B

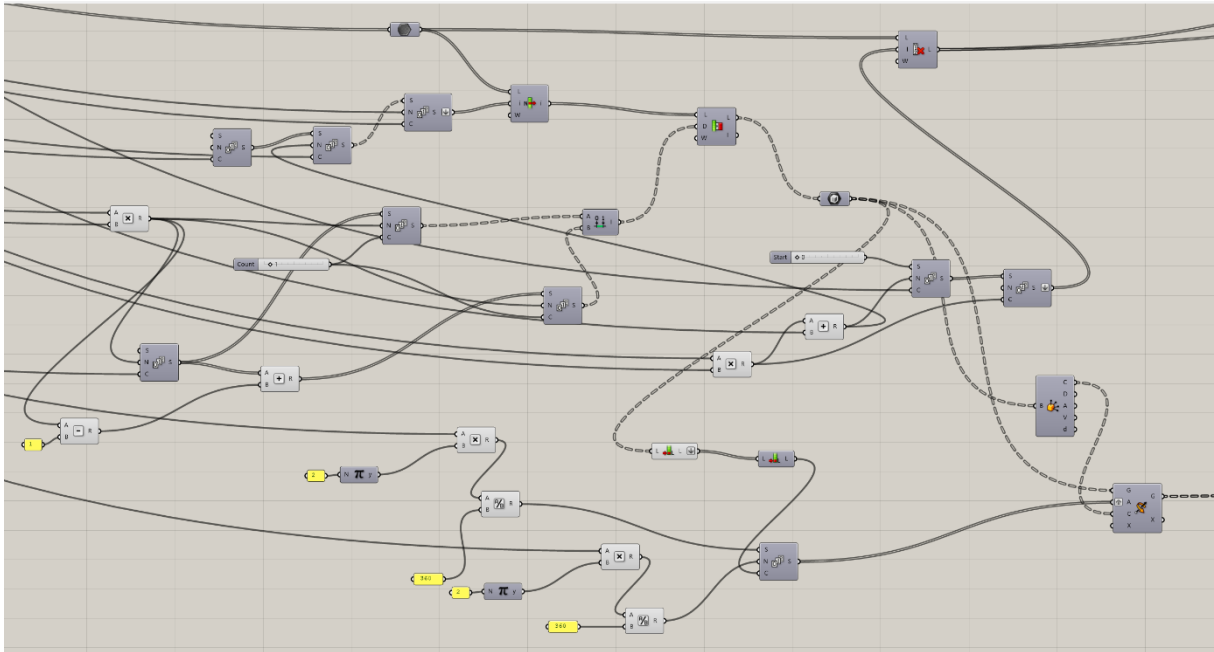


Figure 07.21 Code Grasshopper (Source : auteur)

Etape 7 : Remplissage des orifices aux extrémités du mur.

L'appareillage à demi-briques laissent des ouvertures aux extrémités du mur. Ces ouvertures doivent être comblées afin de ne pas y laisser passer la lumière.

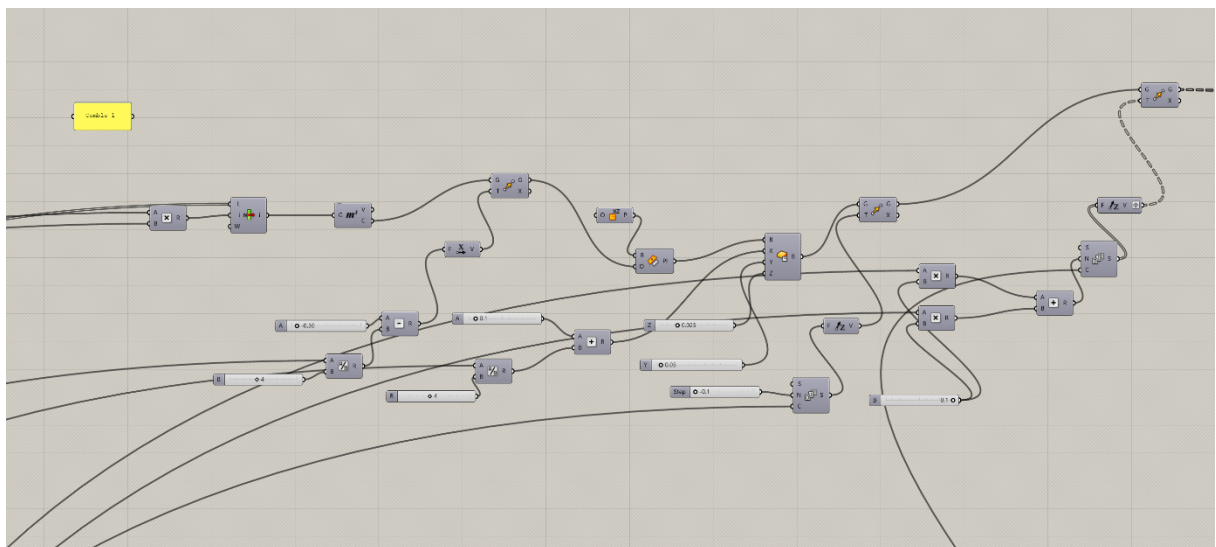


Figure 07.22 Code Grasshopper (Source : auteur)

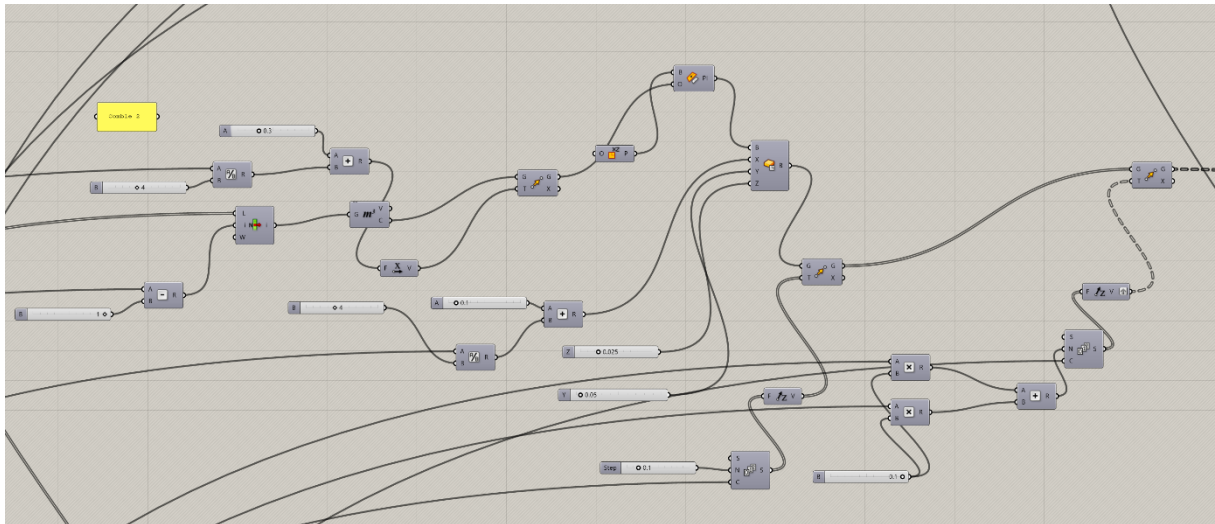


Figure 07.23 Code Grasshopper (Source : auteur)

Etape 8 : Création de la pièce et des ouvertures Honeybee

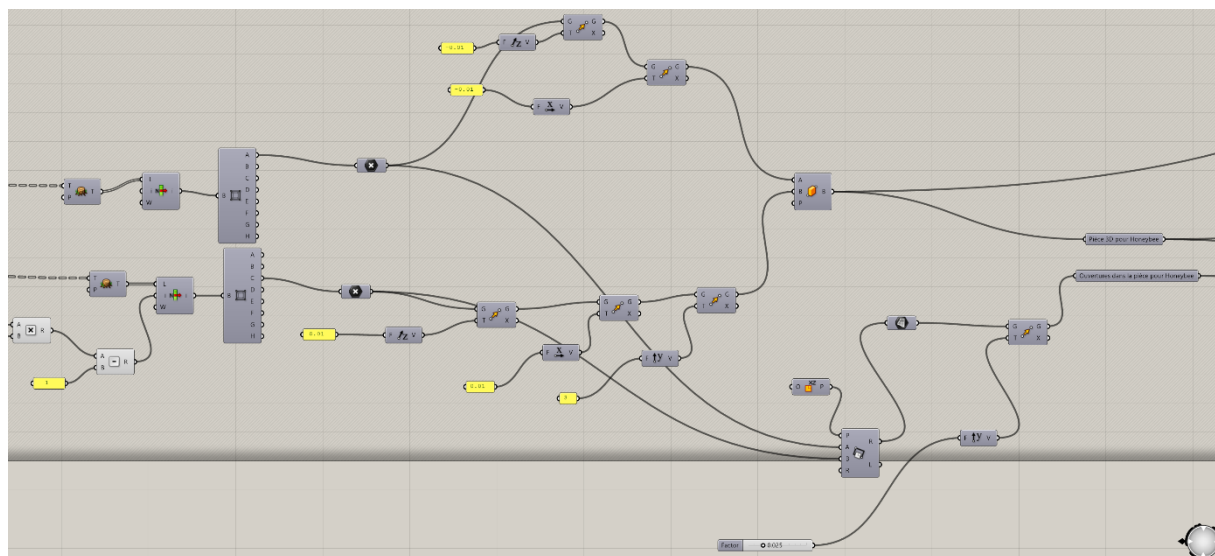


Figure 07.24 Code Grasshopper (Source : auteur)

Etape 9 : Création du diagramme d'éclaircements

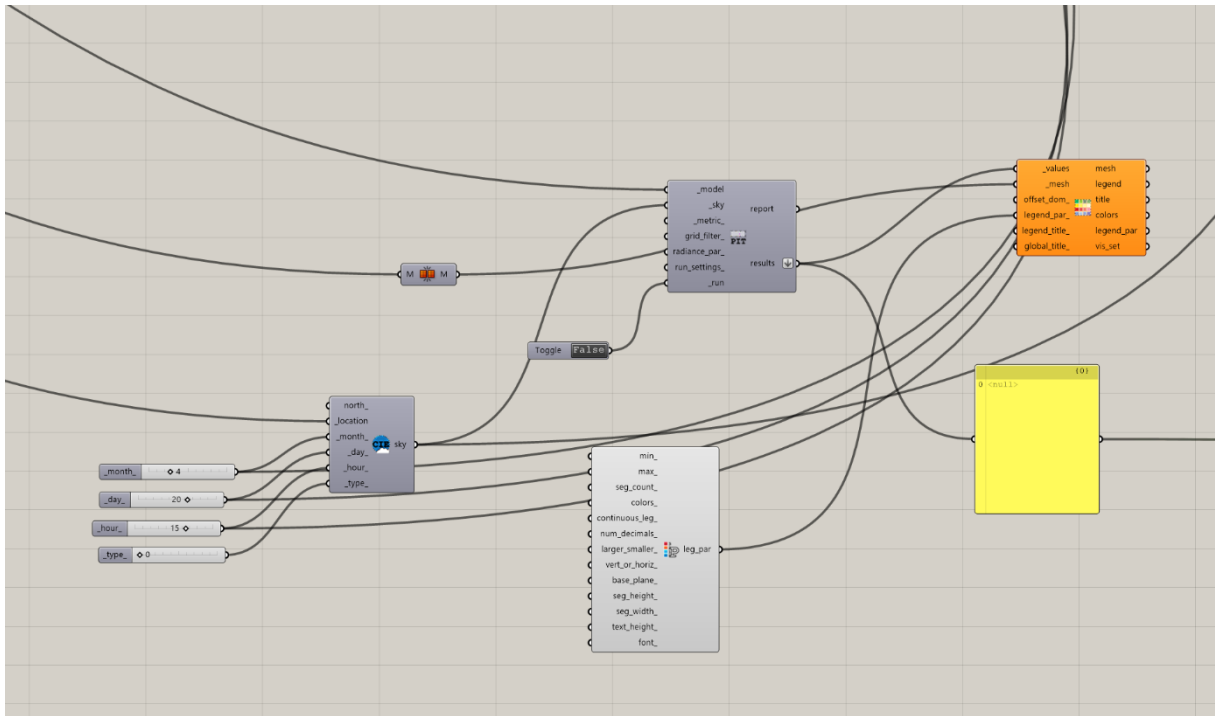


Figure 07.25 Code Grasshopper (Source : auteur)

Etape 10 : Optimisation multi-critères avec Galapagos

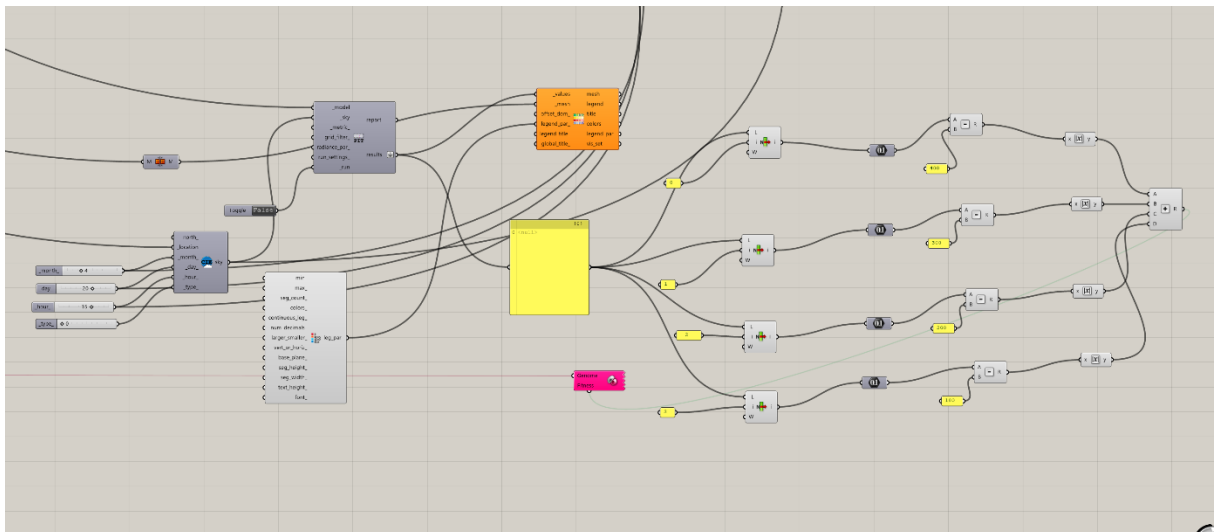


Figure 07.26 Code Grasshopper (Source : auteur)

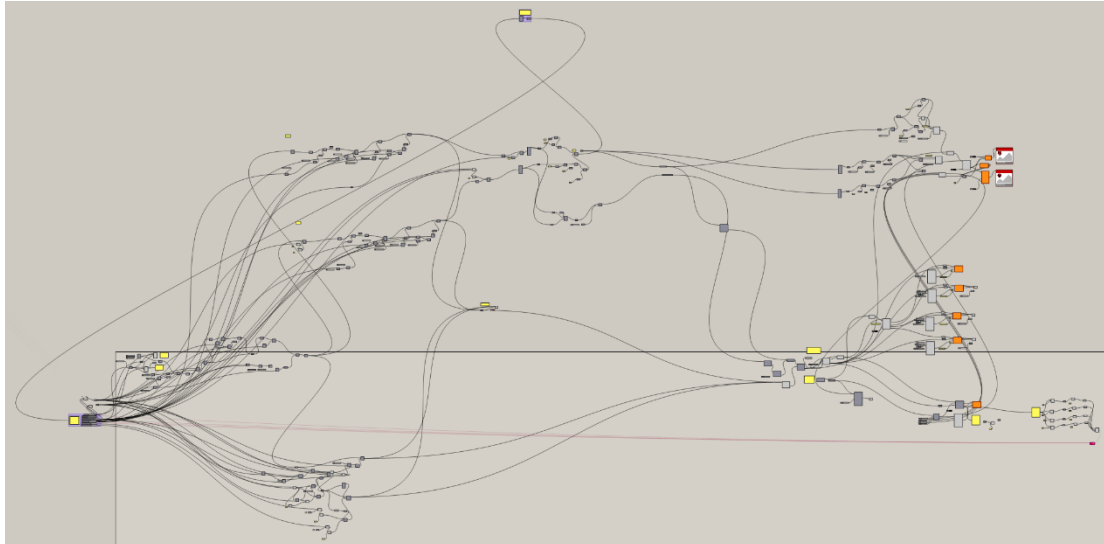


Figure 07.27 Code Grasshopper (Source : auteur)

BIBLIOGRAPHIE

Fathy, Hassan, Walter Shearer, Abd al-rahmān Sultān, et United Nations. University. *Natural Energy and Vernacular Architecture: Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates*. Chicago ; London : Published for United Nations University by University of Chicago Press, 1986. <http://archive.org/details/naturalenergyver00fath>.

Ragette, Friedreck (2003) *Traditional Domestic Architecture of the Arab World*, Axel Menges, Stuttgart, Germany (Figure 03.1)

Source: Karen Cilentio, 2012, Article: Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas. Plateforme-web: archdaily. Lien : <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>, visité le : Janvier 2019.

Source: Ali Rahim, Hina Jamelle, 2007, *Beyond the Structural Skin Zaha Hadid Architects: Marsa Dubai Residential* (Figure 03.2)

"Les Moucharabiehs de l'Institut Du Monde Arabe Rénovés Depuis Courthézon - France Bleu," September 29, 2017. <https://www.francebleu.fr/infos/culture-loisirs/les-moucharabiehs-de-l-institut-du-monde-arabe-renoves-depuis-courthezon-1506592631> (Figure 03.3)

Light ZOOM Lumière - Portail de la Lumière et de l'Éclairage. « Spectre visible, colorimétrie et vision », 27 janvier 2020. <https://www.lightzoomlumiere.fr/definition/spectre-visible-lumiere-colorimetrie-vision/>. (Figure 03.4)

Jaouhari, Khalid El, Larbi Amhamdi, Larbi Bouayad, Inna Yaya Aissatou Hamadou, et Meryam Harati. « De la fenêtre traditionnelle à la façade intelligente : Transcription du Moucharabieh en architecture contemporaine. » *African and Mediterranean Journal of Architecture and Urbanism*, 14 février 2019, 67-79. <https://doi.org/10.48399/IMIST.PRSM/amjau-v0i1.15430>.

ArchDaily. « Gallery of AD Classics: Kimbell Art Museum / Louis Kahn - 14 ». Consulté le 1 novembre 2024. <https://www.archdaily.com/123761/ad-classics-kimbell-art-museum-louis-kahn/5038089928ba0d599b000a3c-ad-classics-kimbell-art-museum-louis-kahn-photo>. (Figure 03.5)

Paris, Amelie. « Les Skyspaces ». Amelie, Maison d'art. Consulté le 1 janvier 2025. <https://www.ameliemaisondart.com/fr/blog/13-la-balade-d-amelie/1114-Les-Skyspaces.html>. (Figure 03.6)

Vincent Tourre. *Simulation inverse de l'éclairage naturel pour le projet architectural*. Interface homme-machine [cs.HC]. Université de Nantes, 2007. Français. NNT : .tel-00383341

Ateliers Jean Nouvel. « Louvre Abou Dabi ». Consulté le 1 janvier 2025. <https://www.jeannouvel.com/projets/louvre-abou-dhabi-3/>. (Figure 03.12 et 03.13)

Tourre V, Miguet F. Lighting Intention Materialization with a Light-Based Parametric Design Model. International Journal of Architectural Computing. 2010;8(4):507-524. doi:10.1260/1478-0771.8.4.507

« Algorithme génétique ». In *Wikipédia*, 15 juillet 2024.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Algorithme_g%C3%A9n%C3%A9tique&oldid=216832783.

« Diagramme de Pareto ». In *Wikipédia*, 9 septembre 2024.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Pareto&oldid=218489546.

Source des figures 04.2 et 04.3 : ArchDaily. « 21 Examples of Brise Soleils in Mexico and Its Diverse Applications », 2 juillet 2018. <https://www.archdaily.com/897428/21-examples-of-brise-soleils-in-mexico-and-its-diverse-applications>.
(Figure 04.2 et 04.3)

Belgium. « Appareillages de maçonnerie ». Consulté le 13 octobre 2024.
<https://www.wienerberger.be/fr/facade/inspiration-et-conseils/mise-en-oeuvre.html>.

