

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Structure : Efficacité énergétique dans les bâtiments de constructions

Par : BENGUERFI Oussama & SIDI KADA Fatima aya

Sujet

**ETUDE DE L'IMPACT DES MOUCHARABIEHS SUR L'EFFICACITE
ENERGETIQUE DES BATIMENTS**

Soutenu le ..06/2025 devant le jury composé de :

Pr MEGNOUNIF Abdellatif	Pr	Université de Tlemcen	Président
Mr BABA AHMED Ismail	MAA	Université de Tlemcen	Examineur
Dr RETERI Khadidja	MCB	Université de Tlemcen	Encadrante
Dr HENAOUI Mustapha	Dr	Université de Tlemcen	Encadrant

Année universitaire : 2024 /2025

Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes chers parents .aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

A la lumière de ma vie, **Maman** chérie je te remercie pour tout tes sacrifices, ton amour, ton soutien et tes prières, **Maman** qui a fait la personne que je suis aujourd'hui je serais toujours reconnaissante, **je t'aime Maman.**

A mon père, pour sons soutien et encouragement tout au long de mon cureuse je n'arrive pas à exprimer mon amour et mon respect que j'ai toujours eu pour toi, **je t'aime Papa.**

A ma grande sœur et ma deuxième mère **INES**, qui m'a toujours soutenue merci pour être toujours là pour moi.

A mon Frère **ISMAIL**

Mon allié, mon ami, mon soutien discret mais sincère. Merci pour ta bonne humeur, tes mots simples mais justes, et ta manière unique de me motiver, même sans le dire. Ton soutien m'a été d'une grande force.

Sidi Kadafatima Aya

Dédicaces

Je dédie ce travail, fruit d'efforts constants et de persévérance, à toutes les personnes qui ont compté et m'ont soutenu tout au long de ce parcours.

À **ma famille**, source de stabilité, de motivation et de réconfort spécialement **ma mère**, pour son amour inconditionnel, ses prières silencieuses et son soutien sans faille. Elle a toujours cru en moi, même dans les moments les plus difficiles.

À **mes chers amis**, pour leur présence, leur écoute, leur encouragement et les instants de partage qui ont rendu ce chemin plus léger.

Et enfin, à **mon club scientifique CEC**, qui m'a offert un environnement d'apprentissage stimulant, une belle camaraderie et des opportunités précieuses pour me dépasser.
Merci à vous tous, du fond du cœur.

Benquerfi Oussama

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

*Nos remerciements les plus sincères vont à **Madame RETERI Khadidja** et **Monsieur HENAOUI Mustapha**, nos encadrant, pour leur accompagnement constant, leur disponibilité, ainsi que la qualité de leurs conseils. Leur encadrement attentif et leurs orientations pertinentes ont été d'un grand soutien tout au long de ce travail.*

*Nous remercions également les membres du jury, **Professeur MEGNOUNIF Abdellatif** et **Monsieur BABA AHMED Ismail** d'avoir bien voulu examiner ce mémoire.*

*Nos remerciements vont également à **Dr RETERI AHMED** et **Dr BENDERMEL Othman**, pour leur aide précieuse, leurs orientations techniques et leurs conseils tout au long de notre projet. Leur soutien nous a permis d'enrichir notre travail et de surmonter de nombreuses difficultés.*

À tous, nous exprimons notre profonde gratitude et notre plus grand respect.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude de l'impact du moucharabieh sur l'efficacité énergétique des bâtiments. Élément architectural traditionnel des pays arabes, le moucharabieh offre des avantages thermiques, visuels et esthétiques, tout en assurant une ventilation naturelle et une protection solaire efficace.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer le rôle du moucharabieh en tant que dispositif passif contribuant à l'amélioration du confort thermique intérieur et à la réduction des besoins en climatisation. Pour cela, une modélisation numérique a été réalisée à l'aide des logiciels Gambit et Fluent, en simulant une chambre équipée d'une façade intégrant un moucharabieh.

Les résultats obtenus montrent que l'intégration d'un moucharabieh permet une diminution notable des apports solaires directs et favorise le renouvellement d'air, ce qui se traduit par une amélioration du confort thermique et une réduction de la consommation énergétique. Cette étude met en lumière l'intérêt d'une réinterprétation moderne des dispositifs architecturaux traditionnels dans le contexte du développement durable.

ABSTRACT

This thesis focuses on the study of the impact of mashrabiya on the energy efficiency of buildings. A traditional architectural element in Arab countries, mashrabiya offers thermal, visual, and aesthetic benefits, while also providing natural ventilation and effective solar protection.

The main objective of this work is to evaluate the role of mashrabiya as a passive device contributing to improving indoor thermal comfort and reducing air conditioning needs. To this end, numerical modeling was performed using Gambit and Fluent software, simulating a room equipped with a facade incorporating a mashrabiya.

The results show that the integration of a mashrabiya significantly reduces direct solar gain and promotes air renewal, resulting in improved thermal comfort and reduced energy consumption. This study highlights the value of a modern reinterpretation of traditional architectural features in the context of sustainable development.

ملخص

تركز هذه الرسالة على دراسة تأثير المشربيات على كفاءة الطاقة في المباني. تعتبر المشربيات عنصرًا معماريًا تقليديًا في الدول العربية، حيث توفر فوائد حرارية وبصرية وجمالية، مع ضمان التهوية الطبيعية والحماية الفعالة من أشعة الشمس. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تقييم دور المشربية كجهاز سلبي يساهم في تحسين الراحة الحرارية الداخلية وتقليل احتياجات تكييف الهواء. وللقيام بذلك، تم تنفيذ نموذج رقمي باستخدام برنامج Gambit وFluent، يحاكي غرفة مجهزة بواجهة تتضمن مشربيات.

وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن دمج المشربيات يسمح بخفض كبير في المدخلات الشمسية المباشرة ويعزز تجديد الهواء، مما يؤدي إلى تحسين الراحة الحرارية وتقليل استهلاك الطاقة. تسلط هذه الدراسة الضوء على أهمية إعادة التفسير الحديث للأجهزة المعمارية التقليدية في سياق التنمية المستدامة.

Mots clés : moucharabieh, efficacité énergétique , écologique, exoénergétiques, élément architectural , bioclimatique.

Listes des figures et tableaux

CHAPITRE 01 :

Figure 1.1. *Pot en argile contenant de l'eau stocké derrière le moucharabieh [52]*

Figure 1.2. Composants de Moucharabieh [21]

Figure 1.3. Exemple de Moucharabieh en plan extérieur (à gauche) et en plan intérieur (à droite) [8]

Figure 1.4. exemples sur moucharabieh carré

Figure 1.5. les moucharabiehs forment étoile

Figure 1.6. exemples de moucharabieh forme cercle

Figure 1.7. formes florales

Figure 1.8. fonction du moucharabieh

Figure 1.9. Schéma d'un Moucharabieh montrant ses caractéristiques et ses principales fonctions. [26]

Figure 1.10. moucharabieh en bois

Figure 1.11. moucharabieh en métal

Figure 1.12. moucharabiehs en plâtre

Figure 1.13. moucharabieh en pierre

Figure 1.14. moucharabiehs ajourés [28]

Figure 1.15. moucharabiehs massifs [29]

Figure 1.16. Moucharabiehs Moderne [32]

Figure 1.17. Images du SVM (a) ouvert; (b) fermé [35]

Figure 1.18. image sur la filtration de la lumière [37]

Figure 1.19. mer-lumière-jean-nouvel [38]

CHAPITRE 02 :

Figure 2.1. Système de refroidissement de l'air intérieur créé en plaçant des pots d'eau poreux dans le moucharabieh [27]

Figure 2.2. Absorption de l'humidité par les moucharabiehs en bois [48]

Figure 2.3. Coupe dans le mur et moucharabieh [49]

Figure 2.4. Préservation de l'intimité [48]

Figure 2.5. le spectre visible et le spectre électromagnétique [49]

Figure 2.6. Le confort thermique vu par les habitants en fonction de l'orientation [50]

Figure 2.7. position différent de moucharabieh (A :ouvert ; B :fermé)[50]

CHAPITRE 03 :

Figure 2. 1. Principe de calcul numérique [46]

Schéma II. 2Premier cas étudié

Schéma II. Troisième cas étudié

CHAPITRE 04 :

Figure 4.1. Création de la géométrie

Figure 4.2. Maillage de la chambre

Figure 4.3. Maillage des ouvertures (moucharabieh)

Figure 4.4. Adaptation des mesh

Figure 4.5. Mesh volume

Figure 4.6. Condition aux limites des parois

Figure 4.7. Conditions aux limites d'entrée et de sortie.

Figure 4.8. Conditions aux limites de volume intérieur

Figure 4.9. Exportation de fichier «.mch

Figure 4.10. Choix de fichier d'exportation

Figure 4.11. Le lancement de fluent

Figure 4.12 : Importation de la géométrie

Figure 4.13. Choix de modèle énergie

Figure 4.14. Les paramètres du fluide

Figure 4.15. Les paramètres du solide

Figure 4.16. Déclaration de la gravité

Figure 4.17. Condition aux limites des parois adiabatiques

Figure 4.18. Condition aux limites toit et mur avant

Figure 4.19. Condition aux limites des ouvertures

Figure 4.20. Condition aux limites de la porte

Figure 4.21. Initialisation

CHAPITRE 05 :

Figure 5.1. Distribution de la vitesse pour $v = 0.25$ m/s et rayonnement = 500 w/m².

Figure 5.2. Distribution de la vitesse pour $v = 0.5$ m/s.

Figure 5. 3. Distribution de la vitesse pour $v = 1$ m/s.

Figure 5.4. Température pour la vitesse $v = 1$ m/s.

Figure 5.5. Température pour $v = 0.5$ m/s.

Figure 5.6. La température pour $v = 0.25$ m/s.

Figure 5.7. Graphique de la vitesse pour $v = 1$ m/s.

Listes des figures et tableaux

Figure 5.8. Graphique de la vitesse pour $v = 0.5$ m/s.

Figure 5.9. Graphique de la vitesse pour $v = 0.25$ m/s.

Figure 5.10. Température pour rayonnement = 420 w/m² et $v = 0.25$ m/s.

Figure 5.11. Vitesse de l'air pour rayonnement = 420 w/m².

Figure 5.12. Distribution de la vitesse – rayonnement faible.

Figure 5.13. Température pour rayonnement = 600 w/m².

Figure 5.14. Vitesse pour rayonnement = 600 w/m².

Figure 5.15. Température avec moucharabieh en position centrale.

Figure 5.16. Vue complémentaire de la température avec moucharabieh central

Figure 5.17. Vitesse de l'air avec moucharabieh central. Meilleure répartition du flux.

Figure 5.18. Renforcement du flux d'air à travers le moucharabieh central

Figure 5.19. Température dans le cas avec fenêtre.

Figure 5.20. Distribution de la vitesse dans le cas avec fenêtre.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1. les matériaux utilisés dans la conception des moucharabiehs et leur conductivité thermique [51]

Table des matières

Remerciements.....	III
Listes des figures et tableaux	VI
Table des matières	IX
Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Généralité sur les moucharabiehs	5
1.1. Introduction.....	6
1.2. Moucharabieh	6
1.2.1. Définition.....	6
1.3. Les différentes formes géométriques des moucharabiehs.....	9
1.4. Fonctions traditionnelle des moucharabiehs.....	11
1.5. Avantage des moucharabiehs.....	14
1.5.1. Avantage thermique et énergétique	15
1.5.2. Avantage thermique et énergétique	Erreur ! Signet non défini.
1.5.3. Avantage visuel et lumineux	15
1.5.4. Avantage acoustique.....	15
1.5.5. Avantage économique	16
1.5.6. Avantage esthétique et décoratif.....	16
1.5.7. Avantage social et culturel.....	16
1.6. Type de moucharabieh	17
1.6.1. Types de moucharabiehs selon le matériau	17
1.6.2. Types de moucharabiehs selon la forme.....	20
1.6.3. Types de moucharabiehs selon leur fonction.....	22
1.7. L'éclairage naturel.....	24
1.7.1. Rôle des moucharabiehs dans l'éclairage naturel	25
1.7.2. Filtration de la lumière	25
1.7.3. Réduction de la chaleur solaire.....	26
1.7.4. Une barrière climatique intelligente	26
1.7.5. Avantages de l'éclairage naturel grâce aux moucharabiehs	27
1.7.6. Économies d'énergie	27
1.7.7. Amélioration du confort visuel	28
1.7.8. Bien-être et santé	28
1.8. CONCLUSION	28
Chapitre 2 : Efficacité Energétique de moucharabieh	31
2.1 Introduction.....	32
2.2 Concept fondamentaux et fonctionnement	32
2.2.1 Rôle de moucharabieh dans la gestion thermique du bâtiment.....	32
2.3 Rôle climatique et énergétique du moucharabieh.....	36
2.3.1 Contrôle de la température.....	36
2.3.2 Contrôle de l'humidité	37
2.3.3 Ventilation naturelle	39
2.3.4 Préservation de l'intimité.....	40
2.3.5 Filtration de la lumière.....	41

Table des matières

2.4 Facteurs influençant l'efficacité énergétique	42
2.4.1 Matériaux utilisés	42
2.4.2 Orientation et positionnement.....	43
2.5 Adaptation moderne et technologies innovantes	44
2.5.1 Moucharabiehs paramétrique et conception assistée par ordinateur CAO	44
2.5.2 Exemples des projets architecturaux contemporains utilisant des moucharabiehs	45
2.6 Conclusion	48
Chapitre 3 : Formulation Mathématique	50
3.1. Introduction	51
3.2. CALCUL NUMERIQUE	51
3.3. Les différentes méthodes numériques de discrétisation	52
3.3.1. Méthode des différences finis	52
3.3.2 Méthode des éléments finis	53
3.3.2. La méthode des volumes finis	53
3.4 principe de la méthode des volumes finis	54
3.4.1 Maillage.....	54
3.4.2 Discrétisation des équations gouvernantes	55
3.4.3 Equation de continuité	55
3.4.4 Equation de la conservation de la quantité de mouvement	55
3.4.5 Equation de la conservation de l'énergie	56
3.5 Approximation de Boussinesq	56
3.6 LES NOMBRES ADIMENSIONNELS	57
3.6.1 Le nombre de Reynolds	57
3.6.2 Le nombre de Prandtl	57
3.6.3 Le nombre de Nusselt	57
3.6.4 Nombre de Rayleigh	58
3.7 Transfert radiatif	58
3.8 Conduction thermique	59
3.9 Convection thermique	59
3.10 Les Modèles Physique	59
3.11 les conditions aux limites	61
3.12 Conclusion	61
Chapitre 4 : Simulation Numérique	63
4.1 Introduction	64
4.2 Création de la géométrie	65
4.2.1 Description de Gambit	65
4.2.2 Dessin de la géométrie	66
4.2.3 Choix de maillage	66
4.2.4 Les conditions aux limites	68
4.2.5 Exportation de fichier	70
4.3 Analyse numérique	71
4.3.1 Introduction vers fluent.....	71
4.3.2 Lancement de fluent	72
4.3.3. choix de modèle.....	73
4.3.4 Choix de matériaux.....	73
4.3.4. conditions de fonctionnement.....	74
4.3.5. condition aux limites	75
4.3.6. Initialisation de solution.	77

Table des matières

4.3.7. Itération.....	77
4.3. Conclusion	78
Chapitre 05 : Résultats et interprétations	
5.1 Introduction.....	80
5.2 Effet du moucharabieh sur la distribution de la vitesse de l'air	80
5.3 Effet sur la température	84
5.4 Graphes pour les vitesses.....	87
5.5. Comparaison pour différents rayonnements.....	89
5.5.1 Rayonnement=420 ; vitesse=0.25m/s	89
5.5.2 Rayonnement= 600 ; vitesse =0.25m/s	91
5.5.6 Influence de la position du moucharabieh	93
5.5.7 Cas de la fenêtre	97
<i>Conclusion Générale.....</i>	<i>101</i>
<i>Bibliographie</i>	<i>103</i>

Introduction Générale

Introduction Générale

La question de la consommation énergétique dans le bâtiment occupe une place centrale dans les débats contemporains sur le développement durable et la lutte contre le changement climatique. Dans un monde confronté à des défis environnementaux majeurs, notamment la raréfaction des ressources énergétiques fossiles, l'augmentation continue des besoins en énergie, et la dégradation de l'environnement, les bâtiments représentent aujourd'hui l'un des secteurs les plus énergivores. Selon les estimations de l'Agence Internationale de l'Énergie, le secteur du bâtiment consomme environ 30 à 40 % de l'énergie finale mondiale, et contribue à près de 30 % des émissions globales de gaz à effet de serre. Ce constat alarmant appelle à une révision en profondeur des modes de conception architecturale et des stratégies d'optimisation énergétique.

Face à cette situation, les approches architecturales bioclimatiques et les stratégies passives de contrôle de l'environnement intérieur prennent de plus en plus d'importance. L'objectif est de concevoir des bâtiments capables de s'adapter aux conditions climatiques locales en utilisant les ressources naturelles (soleil, vent, ombre, inertie thermique) pour réguler la température intérieure, assurer le confort des occupants, et réduire la dépendance aux systèmes mécaniques de chauffage, de climatisation ou d'éclairage artificiel. Dans cette logique, plusieurs éléments architecturaux traditionnels, longtemps considérés comme de simples ornements, retrouvent une pertinence nouvelle lorsqu'ils sont réintégrés dans les conceptions contemporaines. Parmi eux, le moucharabieh apparaît comme un dispositif particulièrement intéressant pour son potentiel en matière de régulation thermique et lumineuse, notamment dans les régions chaudes et ensoleillées.

Le moucharabieh, également connu sous le nom de « mashrabiya », est un élément d'architecture islamique qui remonte à plusieurs siècles. Il s'agit d'un écran ajouré, souvent en bois ou en pierre, placé devant les fenêtres, balcons ou façades, et qui présente une double fonction : esthétique et fonctionnelle. D'une part, il joue un rôle décoratif, en enrichissant le langage architectural de motifs géométriques variés. D'autre part, et surtout, il agit comme filtre solaire, modulateur de lumière naturelle, barrière visuelle, et parfois dispositif de ventilation naturelle. Son agencement permet de créer un jeu complexe d'ombres et de lumière à l'intérieur des espaces tout en protégeant les occupants contre l'ensoleillement direct et les surchauffes, sans compromettre la ventilation.

Cette capacité du moucharabieh à moduler les échanges thermiques et lumineux avec l'environnement extérieur en fait un outil prometteur pour améliorer l'efficacité énergétique

Introduction Générale

des bâtiments. Dans les climats chauds – qu'ils soient arides, sahariens ou méditerranéens – l'un des enjeux majeurs est de limiter les gains solaires excessifs tout en favorisant la circulation de l'air. En ce sens, le moucharabieh s'inscrit pleinement dans une démarche de conception bioclimatique, en offrant une réponse architecturale passive et culturelle à des problèmes environnementaux actuels. Sa réintégration dans des projets contemporains, notamment grâce aux nouvelles technologies de modélisation paramétrique, permet d'optimiser ses formes, matériaux, orientations et perforations pour répondre aux exigences de confort thermique, d'éclairage naturel, et de performance énergétique.

Cependant, malgré l'intérêt croissant pour le moucharabieh dans les milieux académiques et professionnels, il subsiste un manque d'études quantitatives précises permettant d'évaluer son impact réel sur les performances énergétiques des bâtiments. Très souvent, son utilisation reste intuitive ou symbolique, sans validation scientifique rigoureuse. Il est donc nécessaire d'adopter une approche analytique, basée sur la simulation thermique et énergétique, afin de mesurer les effets du moucharabieh sur des indicateurs concrets tels que les apports solaires, les charges de refroidissement, l'éclairement naturel, et la température intérieure.

C'est dans cette optique que s'inscrit le présent mémoire, qui vise à étudier l'influence du moucharabieh sur l'efficacité énergétique des bâtiments. L'objectif général est de comprendre et quantifier les effets de cet élément architectural sur la performance thermique et énergétique d'une enveloppe bâtie, à travers une approche combinant étude bibliographique, modélisation numérique et simulation informatique. Cette recherche se donne pour ambition d'apporter une contribution à la fois théorique et pratique à la conception de bâtiments durables dans les zones climatiques chaudes, en s'appuyant sur les enseignements de l'architecture vernaculaire et les outils modernes de l'ingénierie du bâtiment.

Pour cela, le mémoire s'articule autour de plusieurs axes complémentaires :

- Dans un premier temps, une revue de littérature permettra de cerner les concepts fondamentaux liés à l'efficacité énergétique, à l'architecture bioclimatique, et aux stratégies passives de conception. Elle inclura également une étude historique et morphologique du moucharabieh, ainsi que ses diverses déclinaisons dans le monde arabo-musulman et dans les réalisations architecturales contemporaines.
- Dans un second temps, un cas d'étude sera défini à travers la modélisation d'un bâtiment type équipé de moucharabiehs sur ses façades, en comparaison avec un bâtiment de

Introduction Générale

référence dépourvu de ce dispositif. Les simulations seront effectuées à l'aide de logiciels spécialisés (tels que Gambit, Fluent, ou autres), en prenant en compte des paramètres climatiques réels, les propriétés des matériaux, et les scénarios d'occupation.

- Enfin, les résultats obtenus seront analysés afin de déterminer les apports thermiques et lumineux du moucharabieh, son efficacité en matière de réduction des charges de climatisation, et sa contribution globale à l'amélioration du confort thermique intérieur.

En somme, ce travail vise à démontrer que le moucharabieh, au-delà de sa valeur patrimoniale et esthétique, peut constituer une solution technique pertinente pour la réduction de la consommation énergétique dans les bâtiments contemporains, à condition qu'il soit conçu de manière rationnelle et adaptée au contexte local. Il s'agit de montrer comment la tradition peut se mettre au service de l'innovation, et comment les éléments d'architecture vernaculaire peuvent être intégrés dans une démarche scientifique pour construire un avenir plus durable.

Chapitre 1 : Généralité sur les moucharabiehs

1.1. Introduction

Dans un contexte où l'efficacité énergétique des bâtiments devient un enjeu majeur face aux défis environnementaux et climatiques, l'architecture traditionnelle offre des solutions passives remarquablement adaptées aux conditions locales. Le moucharabieh, élément emblématique de l'architecture arabo-islamique, en est un exemple particulièrement pertinent. Conçu à l'origine pour répondre aux besoins de confort thermique, d'intimité et de protection solaire dans les régions chaudes, il constitue aujourd'hui une source d'inspiration pour les stratégies bioclimatiques contemporaines.

Ce chapitre vise à présenter les fondements historiques, architecturaux et fonctionnels du moucharabieh. Nous explorerons son évolution à travers le temps, ses différentes formes, ainsi que ses fonctions symboliques et pratiques dans l'habitat traditionnel. Une attention particulière sera portée à son rôle climatique et énergétique, qui constitue l'objet principal de notre étude. En effet, comprendre les caractéristiques du moucharabieh est indispensable pour évaluer son impact sur les échanges thermiques et, par conséquent, sur le confort intérieur et la performance énergétique des bâtiments.

1.2. Moucharabieh

1.2.1. Définition

Le terme *moucharabieh* dérive du mot arabe (شرب), signifiant « boire ». À l'origine, il désignait un espace spécifique dans les maisons traditionnelles, destiné à accueillir un pot en argile rempli d'eau. Ce dispositif servait à rafraîchir l'eau par évaporation, en tirant parti du mouvement de l'air, contribuant ainsi à abaisser la température ambiante [20]. Ce simple aménagement fonctionnel a rapidement évolué, donnant naissance à un élément architectural unique et sophistiqué, qui associe utilité et esthétique tout en répondant à des besoins climatiques et sociaux spécifiques[9]. Au fur et à mesure de son développement, le *moucharabieh* est devenu un élément indispensable de l'architecture traditionnelle du Moyen-Orient, particulièrement adapté aux conditions climatiques locales caractérisées par des températures extrêmes et une forte exposition au soleil. Sa présence généralisée dans les constructions anciennes du Moyen-Orient peut être expliquée non seulement par ses vertus écologiques et thermiques, mais aussi par des raisons culturelles et sociales profondément ancrées. En effet, le respect de l'intimité et la préservation de la vie privée, essentiels dans les sociétés islamiques, ont été intégrés dans la

conception du moucharabieh, le transformant ainsi en un symbole de la culture et des valeurs traditionnelles. La structure même du moucharabieh illustre cette fusion entre confort thermique et protection sociale. Placé sur les façades des bâtiments, il permet aux habitants de voir l'extérieur tout en étant à l'abri des regards indiscrets. Le treillis est plus dense à hauteur des yeux pour garantir l'intimité des occupants, tandis que la partie supérieure du panneau est généralement plus ouverte, permettant une meilleure circulation de l'air et une ventilation naturelle[22]. Ce système de "fenêtre" ajourée favorise la création d'un microclimat intérieur, réduisant la chaleur tout en apportant une lumière douce et tamisée[10].

Au-delà de sa fonction de protection solaire, le moucharabieh joue également un rôle crucial dans la gestion thermique des habitations. Il permet de maintenir des températures intérieures agréables, particulièrement dans les régions chaudes et arides, en favorisant la circulation de l'air tout en bloquant l'entrée directe des rayons solaires. Grâce à sa conception, il agit comme un filtre naturel, tamisant la lumière et créant des ombres subtiles qui apportent à l'espace une sensation de fraîcheur et de confort visuel.

Ce dispositif est souvent réalisé en bois ou en plâtre, et s'intègre harmonieusement aux façades des bâtiments sous forme de panneaux ajourés [9]. Cette conception assure à la fois une ventilation naturelle, un contrôle de la lumière et un respect de l'intimité, tout en s'inscrivant dans une architecture bioclimatique, qui repose sur une connaissance approfondie du climat local. L'utilisation de formes circulaires et de motifs géométriques dans la fabrication des balustres contribue à adoucir les contrastes de lumière, apportant ainsi un confort visuel et une atmosphère agréable à l'intérieur des habitations[10]

Du Moyen Âge jusqu'au milieu du XXe siècle, le moucharabieh a été largement utilisé, non seulement pour ses qualités fonctionnelles, mais aussi pour son esthétisme. Il est devenu un véritable symbole de l'architecture islamique, alliant harmonieusement confort thermique, régulation de la lumière et respect des valeurs culturelles. Ce dispositif, souvent intégré à des fenêtres en saillie ou des oriels, permet aux habitants de profiter de la vue sur la rue ou la cour tout en restant protégés des regards extérieurs. En tant que tel, le moucharabieh reste un élément fondamental de l'architecture traditionnelle du Moyen-Orient, illustrant l'ingéniosité des solutions architecturales adaptées aux exigences locales[10].

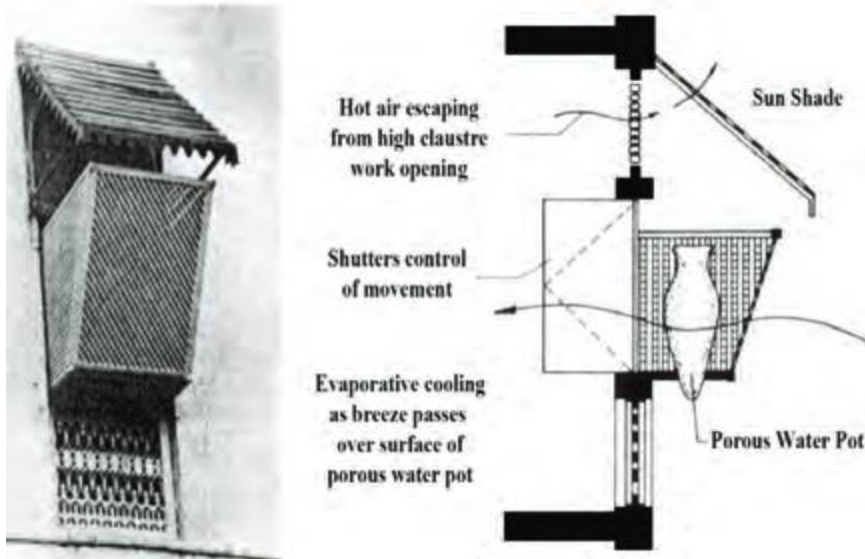


Figure 1. 1. Pot en argile contenant de l'eau stocké derrière le moucharabieh [52]



Figure 1. 2. Composants de Moucharabieh [21]



Figure 1. 3. Exemple de Moucharabieh en plan extérieur (à gauche) et en plan intérieur (à droite) [8]

1.3. Les différentes formes géométriques des moucharabiehs

Les moucharabiehs, au-delà de leur fonction climatique et sociale, sont aussi de véritables supports d'expression artistique et géométrique. Dans la tradition islamique, la géométrie ne se limite pas à l'ornementation : elle est porteuse de symboles, de règles mathématiques et de significations spirituelles. Les motifs géométriques qui composent les moucharabiehs relèvent d'un savoir-faire précis, transmis par des maîtres artisans à travers les siècles [10].

1.3.1. Le triangle

Le triangle est une forme de base utilisée dans les compositions modulaires. Il peut être :

Équilatéral: associé à la stabilité, utilisé comme module dans les pavages.

Multiplié ou juxtaposé pour créer des étoiles ou des formes hexagonales.

Symbolise souvent l'équilibre entre les éléments [10].

1.1.1. Le carré et le losange

Le carré est une figure fondamentale dans l'art islamique, car il symbolise la terre et la stabilité.

Dans les moucharabiehs : Il est utilisé pour créer des grilles régulières.

Le carré tourné devient un **losange**, plus dynamique et souvent employé dans les remplissages.

Ces motifs servent aussi à distribuer la lumière uniformément [10]

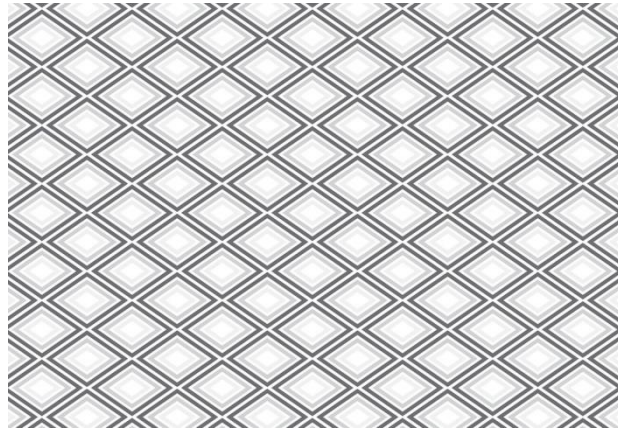


Figure 1. 4. Exemples sur moucharabieh carré

1.3.2. Les étoiles (à 6, 8, 12 ou 16 branches)

Les étoiles sont parmi les motifs les plus fréquents. Elles sont construites à partir de combinaisons de carrés et de triangles. Par exemple :

L'étoile à 8 branches provient de la superposition de deux carrés.

Les étoiles à 12 ou 16 branches ajoutent de la complexité et témoignent de l'influence andalouse et ottomane.

Ces formes ont souvent une valeur cosmologique ou mystique, en lien avec l'ordre divin [10].

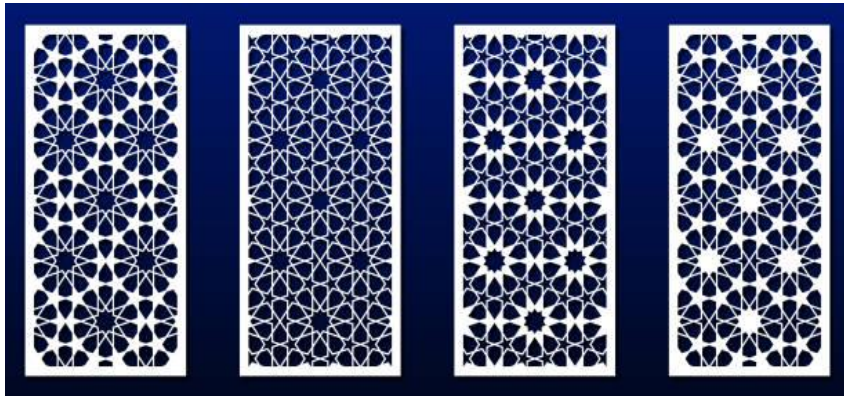


Figure 1. 5. Les moucharabiehs forment étoile

1.3.3. Le cercle

Le cercle représente l'**unité et l'infini**. Il est souvent utilisé comme cadre pour des compositions rayonnantes ou comme base pour construire d'autres formes (polygones réguliers, étoiles). Le cercle est rarement isolé : il **structure discrètement** les autres motifs [10].

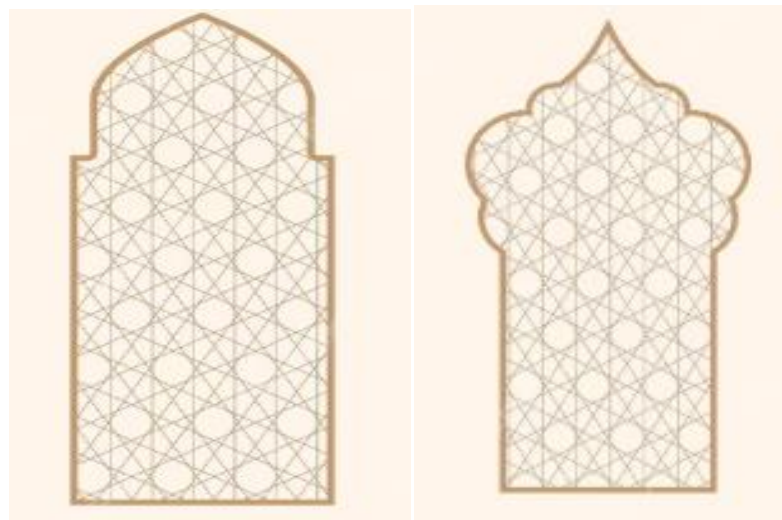


Figure 1. 6. Exemples de moucharabiehs forme cercle

1.3.4. Arabesques et formes florales

Certains moucharabiehs — notamment dans les régions du Maghreb — intègrent des **arabesques végétales stylisées**, qui s'enroulent de manière symétrique. Ces motifs traduisent l'**inspiration de la nature**, une autre source importante de l'art islamique [10].

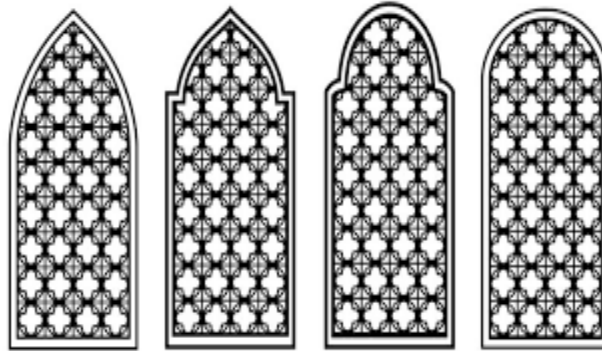


Figure 1. 7. Formes florales

1.4. Fonctions traditionnelle des moucharabiehs

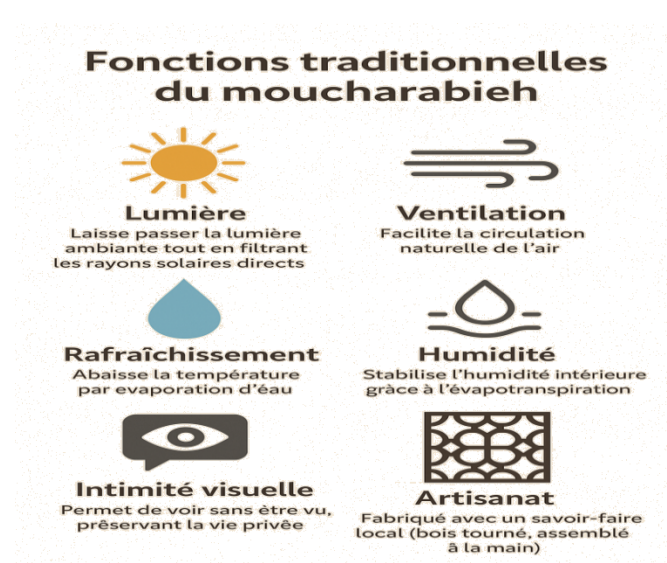


Figure 1. 8. Fonction du moucharabieh

Les moucharabiehs, bien plus que de simples éléments décoratifs, remplissent un ensemble de fonctions essentielles qui témoignent de l'ingéniosité de l'architecture traditionnelle du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord. Leur conception ajourée, combinée à une forte charge symbolique et culturelle, leur permet de répondre à des besoins variés allant du confort thermique à l'esthétique, en passant par la préservation de l'intimité

Le but principal du moucharabieh est de réguler la température dans l'espace intérieur du bâtiment qui donne au lieu de nombreux objectifs secondaires, en plus de l'aspect esthétique, et entre autres fonctions, notamment l'économie. L'énergie et les fonctions du bâtiment comprennent les éléments suivants [25]

1.4.1. Ventilation naturelle

L'une des premières fonctions des moucharabiehs est de favoriser la circulation de l'air à l'intérieur des bâtiments. Grâce à leur structure ajourée, ils permettent de générer un courant d'air constant en facilitant les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur. Ce phénomène repose sur le principe de convection naturelle : l'air chaud, plus léger, s'élève et s'échappe par les ouvertures supérieures, tandis que l'air plus frais pénètre par les ouvertures inférieures. Ce mécanisme simple mais efficace contribue à réguler la température intérieure, offrant une sensation de fraîcheur sans nécessiter d'équipements mécaniques, ce qui en fait une réponse écologique aux fortes chaleurs des climats arides [25]

1.4.2. Protection solaire

Autre fonction capitale : la maîtrise de l'ensoleillement. Les moucharabiehs font office de filtres solaires naturels, réduisant significativement l'impact des rayons directs du soleil. En modulant la quantité de lumière qui pénètre dans les espaces intérieurs, ils limitent l'effet de serre et les surchauffes, tout en assurant une température ambiante plus stable et plus agréable. Cette régulation passive permet également de diminuer les besoins en climatisation, et donc la consommation énergétique. Ainsi, les moucharabiehs s'inscrivent pleinement dans une logique de confort thermique bioclimatique, adaptée aux conditions environnementales locales [25].

1.4.3. Régulation de la lumière

Les motifs ajourés des moucharabiehs permettent de tamiser la lumière naturelle qui pénètre dans les espaces intérieurs. Ce filtrage réduit les éblouissements tout en diffusant une luminosité douce et homogène, créant ainsi une atmosphère agréable et confortable. Selon la densité du motif et l'orientation du bâtiment, il est possible d'optimiser l'éclairage naturel sans avoir recours à des sources artificielles pendant la journée [25].

1.4.4. Contrôle de la température

Le contrôle de la température intérieure est l'une des fonctions fondamentales des moucharabiehs dans l'architecture traditionnelle. Grâce à leur structure ajourée et finement travaillée, les moucharabiehs participent activement à la régulation thermique des espaces, en jouant le rôle de barrière climatique passive entre l'intérieur du bâtiment et l'environnement extérieur. L'un des principaux apports des moucharabiehs est leur capacité à bloquer les rayons

solaires directs, particulièrement ceux du soleil de midi qui sont les plus intenses. En filtrant la lumière à travers des motifs géométriques complexes, ils réduisent l'ensoleillement direct sur les parois et les ouvertures, évitant ainsi le réchauffement excessif de l'intérieur. Ce rôle de protection solaire limite la transmission de chaleur rayonnante tout en laissant entrer une lumière naturelle diffuse, plus douce et plus stable, qui contribue à maintenir un niveau de luminosité satisfaisant sans surchauffe [25]

1.4.5. Contrôle de l'humidité

Le contrôle de l'humidité, bien qu'une fonction moins immédiatement visible des moucharabiehs, joue un rôle important dans la gestion du confort intérieur et de la durabilité des bâtiments situés dans des régions au climat chaud, parfois humide ou sujet à des variations hygrométriques. Grâce à leur conception ajourée et à leur capacité à favoriser la circulation de l'air, les moucharabiehs participent activement à la régulation du taux d'humidité dans les espaces de vie.

Le fonctionnement repose en partie sur le principe de ventilation naturelle permanente, déjà évoqué dans les fonctions précédentes. En permettant à l'air de circuler librement à travers les ouvertures, les moucharabiehs facilitent l'évacuation de l'air humide généré à l'intérieur du bâtiment (par la respiration, la cuisson, la transpiration, etc.), tout en permettant à de l'air plus sec de pénétrer. Cette aération continue empêche la stagnation de l'humidité, qui est souvent responsable de la formation de moisissures, de mauvaises odeurs, ou encore de la dégradation des matériaux intérieurs [25]

1.4.6. Réduction des Besoins

En limitant la surchauffe intérieure grâce à la régulation thermique et à la ventilation naturelle, les moucharabiehs contribuent à réduire la consommation d'énergie liée à la climatisation. Cette solution architecturale traditionnelle s'inscrit donc dans une démarche durable, permettant de diminuer la dépendance aux systèmes de refroidissement artificiels et de réaliser des économies d'énergie [25]

1.4.7. Intimité visuelle

Les moucharabiehs permettent aux occupants de voir l'extérieur sans être vus, grâce à la disposition stratégique des motifs ajourés. Cette particularité répond aux normes culturelles de

pudeur dans certaines sociétés, notamment en protégeant les espaces de vie des regards extérieurs tout en maintenant une connexion visuelle avec l'environnement extérieur.

1.4.8. Esthétique

Les moucharabiehs jouent un rôle esthétique essentiel dans l'architecture, en apportant une touche d'élégance et de raffinement aux façades. Leurs motifs géométriques ou floraux, souvent réalisés avec une grande précision artisanale, créent un jeu d'ombres et de lumières qui anime les surfaces au fil de la journée. Ils reflètent également l'identité culturelle et artistique des régions où ils sont utilisés, tout en mettant en valeur les savoir-faire traditionnels. Par leur présence, les moucharabiehs renforcent le caractère architectural d'un bâtiment et lui confèrent une dimension à la fois décorative et symbolique.

La figure 3 et 4 illustre les principales fonctions de moucharabiehs, qui sont: a) de contrôler le passage de la lumière, b) de contrôler la circulation d'air, c) d'abaisser la température du courant d'air, d) d'augmenter l'humidité du courant d'air, et e) d'assurer l'intimité [25].

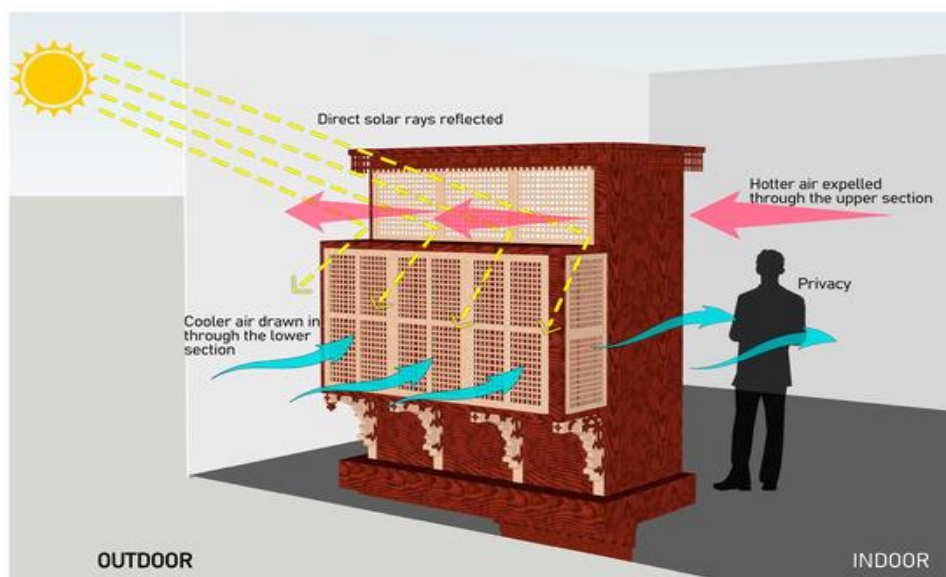


Figure 1. 9. Schéma d'un Moucharabiehs montrant ses caractéristiques et ses principales fonctions [26]

1.5. Avantage des moucharabiehs

Les moucharabiehs, en plus de leurs fonctions traditionnelles, offrent une multitude d'avantages qui expliquent leur longévité dans l'architecture vernaculaire et leur réapparition dans l'architecture contemporaine. Ces éléments ajourés, souvent réalisés en bois ou en pierre, représentent une solution à la fois fonctionnelle, esthétique et durable, parfaitement adaptée aux contraintes environnementales et culturelles des régions chaudes. Les avantages qu'ils offrent

peuvent être regroupés en plusieurs catégories : thermiques, lumineux, acoustiques, économiques, esthétiques et sociaux.

1.5.1. Avantage thermique et énergétique

Le premier avantage des moucharabiehs est leur capacité à améliorer considérablement le **confort thermique** des espaces intérieurs. En jouant le rôle de **filtre climatique passif**, ils réduisent les gains thermiques excessifs dus à l'exposition solaire tout en permettant une circulation naturelle de l'air. Ce double mécanisme de **protection solaire** et de **ventilation croisée** limite l'échauffement des surfaces intérieures, réduisant ainsi le recours à la climatisation ou aux systèmes de ventilation mécaniques. En régulant naturellement la température intérieure, les moucharabiehs participent à la **diminution de la consommation énergétique** des bâtiments, s'inscrivant ainsi dans une logique de développement durable et de performance énergétique.

1.5.2. Avantage visuel et lumineux

Sur le plan lumineux, les moucharabiehs permettent une **gestion raffinée de la lumière naturelle**. Leur structure ajourée tamise les rayons du soleil et évite les éblouissements, tout en créant un éclairage doux et homogène à l'intérieur. Les **jeux d'ombres projetés** au sol et sur les murs évoluent au fil de la journée, offrant une atmosphère intérieure vivante et poétique. Cette modulation de la lumière améliore non seulement le confort visuel des occupants, mais contribue également à la réduction de l'usage de l'éclairage artificiel pendant la journée, avec des bénéfices énergétiques notables.

1.5.3. Avantage acoustique

Bien que rarement mise en avant, la contribution des moucharabiehs à l'**atténuation des nuisances sonores** est réelle. Leur structure filtre les bruits provenant de l'extérieur tout en permettant la ventilation. En agissant comme une **barrière acoustique partielle**, ils préservent une ambiance intérieure plus calme et plus intime, notamment dans les habitations situées en milieu urbain dense. Cela améliore la qualité de vie des occupants sans recourir à des vitrages épais ou à des fermetures étanches.

1.5.4. Avantage économique

Sur le plan économique, les moucharabiehs constituent une solution **efficace et durable**. Fabriqués à partir de matériaux locaux et renouvelables, comme le bois ou la pierre, ils nécessitent peu d'entretien et sont conçus pour résister au temps. Leur capacité à réduire les besoins en climatisation et en éclairage artificiel se traduit par une **diminution des factures énergétiques**. Par ailleurs, leur fabrication par des artisans locaux encourage **l'économie circulaire** et la **valorisation des savoir-faire traditionnels**, tout en réduisant les coûts liés à l'importation de matériaux industriels.

1.5.5. Avantage esthétique et décoratif

L'un des attraits majeurs des moucharabiehs réside dans leur **dimension esthétique**. Chaque motif, souvent inspiré de la géométrie islamique, confère une **identité visuelle forte** au bâtiment. Leur présence en façade ou à l'intérieur permet de **sublimier les espaces** tout en assurant une cohérence entre fonctionnalité et beauté. Par leur raffinement ornemental, les moucharabiehs deviennent de véritables **œuvres d'art architecturales**, exprimant la richesse culturelle et artistique des civilisations qui les ont développés. Dans l'architecture contemporaine, ils sont souvent utilisés comme éléments de signature visuelle, liant modernité et tradition.

1.5.6. Avantage social et culturel

Enfin, les moucharabiehs possèdent une **valeur sociale et symbolique profonde**. Traditionnellement, ils permettaient aux femmes de regarder l'extérieur sans être vues, respectant ainsi les normes de pudeur et d'intimité propres à certaines sociétés. Aujourd'hui encore, ils jouent un rôle dans la **gestion de l'intimité** vis-à-vis de la rue ou des voisins. De plus, ils incarnent un **héritage culturel** précieux, transmis de génération en génération par les maîtres artisans. Leur préservation et leur réinterprétation contemporaine participent à la **conservation de l'identité architecturale locale**, tout en répondant aux enjeux contemporains d'écologie et de confort.

1.6. Type de moucharabieh

Les moucharabiehs se déclinent en plusieurs types selon leur forme, leur matériau et leur fonction :

1.6.1. Types de moucharabiehs selon le matériau

1.6.1.1. Moucharabieh en bois

Les moucharabiehs en bois sont des éléments architecturaux traditionnels utilisés principalement dans les pays du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord. Fabriqués souvent en bois de cèdre pour sa durabilité et sa facilité de sculpture, ces moucharabiehs sont ornés de motifs géométriques complexes. Leur fonction principale est de protéger l'intimité des habitants tout en permettant la circulation de l'air. Ils agissent comme des paravents ou des grilles décoratives, offrant une protection contre la chaleur et les regards extérieurs, tout en laissant entrer la lumière et l'air frais. Les motifs découpés dans le bois créent également des jeux d'ombres et de lumière à l'intérieur des pièces, ajoutant une dimension esthétique.



Figure 1. 10. moucharabieh en bois.

1.6.1.2. Moucharabieh en métal

Les moucharabiehs en métal se distinguent par leur esthétique contemporaine et leur grande résistance. Grâce à l'utilisation de matériaux comme l'aluminium, l'acier ou le fer forgé, ces structures allient finesse du motif et robustesse, tout en offrant une excellente durabilité face aux intempéries et au temps. Leur finition peut être personnalisée à l'infini – peintures thermo laquées, patines, effets de rouille contrôlée – permettant ainsi une parfaite intégration dans des

projets architecturaux modernes ou des rénovations audacieuses. En plus de leur fonction décorative, ils assurent une protection solaire efficace, tout en préservant l'intimité et en favorisant la ventilation naturelle des espaces.

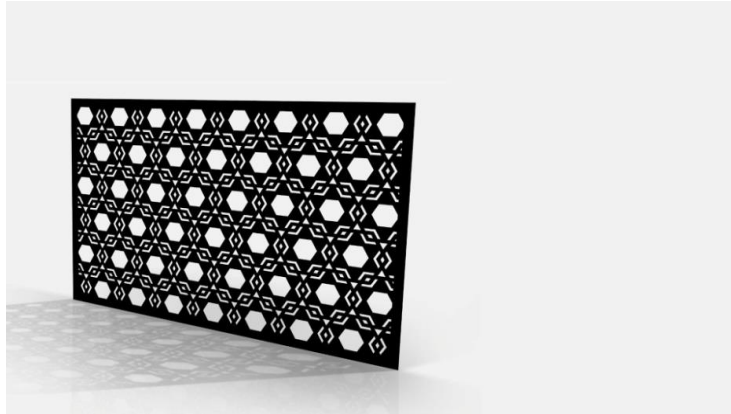


Figure 1. 11. moucharabieh en métal

1.6.1.3. Moucharabieh en plâtre

Utilisés principalement dans les régions du Maghreb et du Moyen-Orient, les moucharabiehs en plâtre sont prisés pour la richesse de leurs détails et la délicatesse de leurs motifs. La malléabilité naturelle du plâtre permet aux artisans de créer des décors extrêmement fins, parfois presque dentelés, qui rappellent la sophistication de la broderie. Ce matériau, facile à sculpter et à mouler, autorise une grande liberté artistique et une précision inégalée dans la réalisation de formes géométriques complexes, florales ou calligraphiques. Bien qu'il soit plus fragile que le bois ou le métal, le plâtre peut être renforcé et protégé par des traitements spécifiques, prolongeant ainsi sa durée de vie. Utilisé en intérieur, notamment dans les palais, les raids ou les mosquées, il contribue à une ambiance raffinée, en jouant subtilement avec la lumière et les ombres.



Figure 1. 12. moucharabiehs en plâtre

1.6.1.4. Moucharabieh en pierre

Les moucharabiehs en pierre représentent l'une des expressions les plus raffinées de cet élément architectural dans l'histoire de l'architecture islamique. Particulièrement présents dans le sous-continent indien, ces moucharabiehs, appelés « **jalis** », sont devenus emblématiques de l'**architecture moghole** du XVII^e siècle. Réalisés en **Pierre finement sculptée**, ils se distinguent par leur richesse ornementale, leur sophistication technique et leur capacité à conjuguer esthétique, symbolique et fonctionnalité.



Figure 1. 13. moucharabieh en pierre

1.6.2. Types de moucharabiehs selon la forme

1.6.2.1. Moucharabieh ajouré

Le moucharabieh ajouré est sans doute le plus représentatif de la tradition islamique. Il se distingue par sa structure ouverte, composée de motifs géométriques ou floraux finement découpés, permettant la circulation de l'air, la filtration de la lumière et la protection de l'intimité.

Ce type de moucharabieh incarne pleinement les principes de l'architecture bioclimatique traditionnelle : il limite les gains thermiques excessifs, assure une lumière tamisée et agréable, et participe à la ventilation naturelle. On le retrouve notamment :

En bois tourné, dans les pays du Mashreq (Égypte, Irak), où il orne les façades des maisons et les fenêtres donnant sur la rue. Et en plâtre sculpté au Maghreb, dans des raïds et palais, souvent associé à des claustras intérieurs. Et en pierre ajourée, dans certaines mosquées ou mausolées, avec des motifs inspirés du zellige ou de la géométrie sacrée.

Ces moucharabiehs ajourés ne sont pas seulement des éléments techniques, mais aussi des objets d'art, issus de savoir-faire artisanaux transmis de génération en génération. Leur rôle dépasse le simple décor : ils traduisent une philosophie de l'espace, entre lumière, ombre et respiration [10].

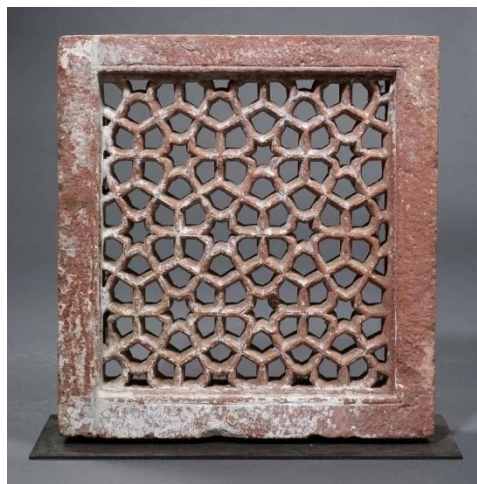


Figure 1. 14. Moucharabiehs ajourés [28]

1.6.2.2. Moucharabieh massif

Le moucharabieh massif est constitué de panneaux pleins, sans ouvertures significatives. Il ne permet ni le passage de l'air ni celui de la lumière, et son usage est donc davantage structurel ou décoratif que fonctionnel. Est sont souvent utilisés pour créer des séparations solides entre différentes zones d'un bâtiment (par exemple entre une salle de réception et une zone de service), ou pour accentuer visuellement une façade ou un mur intérieur. Ce type de moucharabieh est également courant dans l'aménagement intérieur, notamment dans des hôtels, des restaurants ou des résidences de luxe, où il joue le rôle de support visuel évoquant l'Orient, sans altérer la configuration spatiale de manière fonctionnelle [10].



Figure 1.15. moucharabiehs massifs [29].

1.6.2.3. Moucharabieh moderne

Le moucharabieh moderne incarne une fusion innovante entre tradition et technologie. En s'inspirant des principes fondamentaux du moucharabieh traditionnel (filtration de la lumière, ventilation, intimité), il adapte sa forme, ses matériaux et son fonctionnement aux exigences de l'architecture contemporaine : performance énergétique, flexibilité, esthétique minimaliste, haute technologie.

Ces moucharabiehs contemporains se caractérisent par :

L'utilisation de matériaux industriels comme le métal découpé au laser (aluminium, acier), le verre sérigraphié, le plastique, ou encore les composites thermiques.

L'intégration à des systèmes intelligents : certains moucharabiehs sont aujourd'hui motorisés, automatisés, et connectés à des capteurs climatiques, comme c'est le cas dans les Al Bahar à Abu Dhabi, où des moucharabiehs cinétiques s'ouvrent et se ferment en fonction de l'ensoleillement [10].

Une approche paramétrique de la conception : les logiciels d'architecture permettent aujourd'hui de générer des motifs complexes adaptés à chaque orientation ou fonction, dans une logique de design sur mesure.

Ces dispositifs modernes ne cherchent pas simplement à imiter le passé, mais à le réinterpréter de manière contextualité. Ils permettent à l'architecture islamique traditionnelle de dialoguer avec les préoccupations actuelles : durabilité, confort thermique, identité culturelle et innovation formelle.

Le moucharabieh moderne devient ainsi un symbole fort de résilience architecturale, capable d'évoluer sans trahir ses racines, en conciliant passé et avenir.

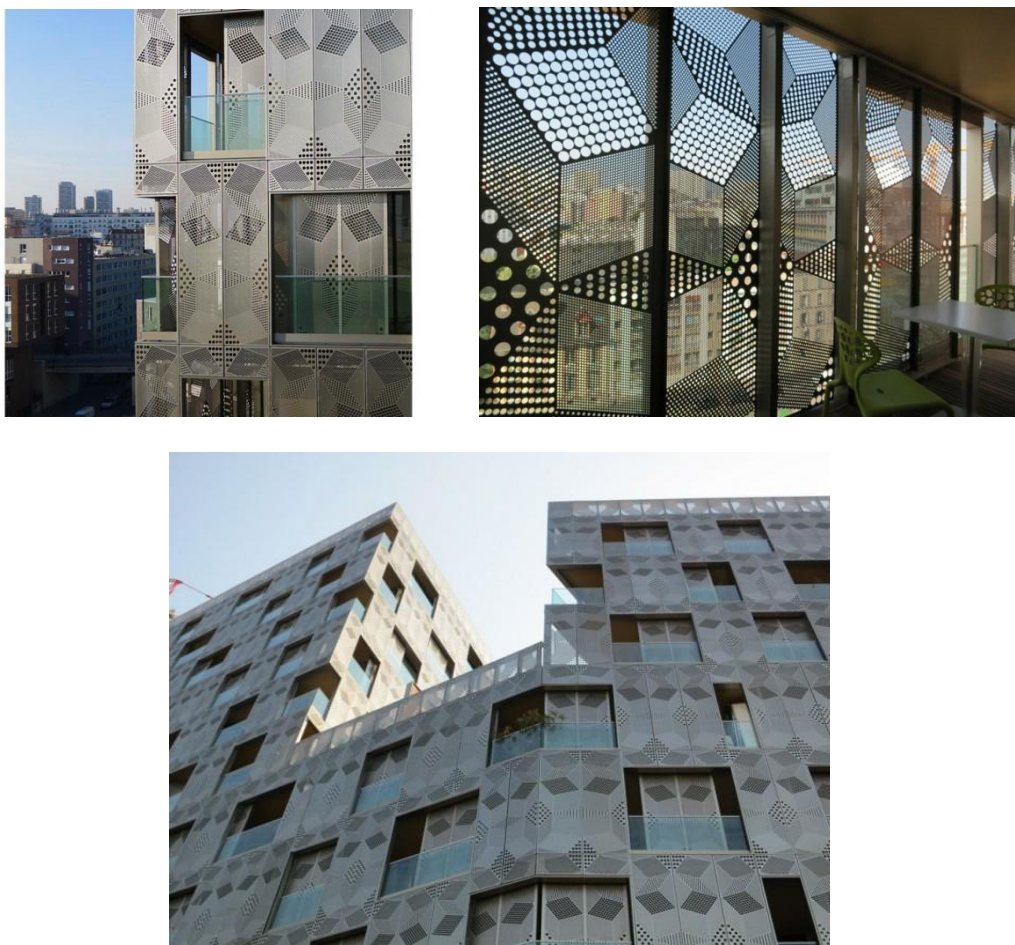


Figure 1.16. Moucharabiehs Moderne [32].

1.6.3. Types de moucharabiehs selon leur fonction

Le moucharabieh, en tant qu'élément architectural emblématique du monde arabo-islamique, peut être classé en plusieurs catégories selon la fonction qu'il remplit au sein de l'édifice. Cette typologie fonctionnelle permet de mieux comprendre les différentes manières dont le

moucharabiehs s'intègre à l'architecture, en répondant à des besoins pratiques, esthétiques ou culturels. On distingue principalement trois grands types de moucharabiehs : les moucharabiehs fixes, les moucharabiehs décoratifs et les moucharabiehs mobiles.

1.6.3.1. Moucharabiehs fixes

Les moucharabiehs fixes sont des éléments intégrés de manière permanente à la structure du bâtiment. Conçus comme des parties intégrantes de l'édifice, ils sont généralement réalisés avec des matériaux durables, tels que le bois massif, la pierre sculptée, ou encore le béton orné, dans le cas de réinterprétations contemporaines [10].

Ces moucharabiehs remplissent une fonction climatique et sociale importante : ils permettent de réguler l'entrée de la lumière et de l'air tout en préservant l'intimité des occupants. Leur intégration structurelle dans les façades, les fenêtres ou les cloisons intérieures les rend indissociables de l'identité même du bâtiment [27].

On retrouve ce type de moucharabiehs dans de nombreuses villes historiques, comme au Caire, à Bagdad ou à Damas, où ils forment une véritable peau climatique des bâtiments traditionnels. Leur caractère fixe permet également une résistance accrue aux intempéries et au temps, ce qui en fait un choix privilégié pour les architectures patrimoniales [27]

1.6.3.2. Moucharabiehs mobiles

Les moucharabiehs mobiles représentent une évolution moderne de l'élément traditionnel. Contrairement aux moucharabiehs fixes, ils sont conçus pour être ajustables, ce qui permet à l'utilisateur de moduler la lumière, la ventilation et la visibilité selon ses besoins et les conditions climatiques. Ce type de moucharabiehs s'inscrit dans une logique de confort adaptable et de technologie intégrée à l'architecture.

Généralement fabriqués en bois articulé, métal perforé ou verre traité, ces moucharabiehs peuvent être actionnés manuellement ou à l'aide de mécanismes automatisés, parfois même intégrés à des systèmes domotiques dans les bâtiments intelligents. Ils apparaissent notamment dans des résidences contemporaines qui cherchent à combiner design moderne et références traditionnelles. Ces moucharabiehs modernes conservent l'esprit du moucharabiehs traditionnel, tout en répondant aux exigences technologiques, environnementales et esthétiques de l'architecture contemporaine. Ils témoignent d'une volonté de fusion entre passé et présent, entre forme symbolique et fonction performative [27].

1.6.3.3. Moucharabiehs décoratifs

Les moucharabiehs décoratifs sont principalement utilisés pour leur valeur esthétique et symbolique. Bien qu'ils puissent être fixes ou mobiles, leur fonction première est d'embellir les façades et les intérieurs, tout en évoquant un héritage architectural riche et profondément ancré dans l'histoire du monde islamique.

Ces moucharabiehs sont souvent conçus dans un souci de représentation culturelle, plus que de performance climatique ou technique. Ils peuvent être utilisés :

- Sur les façades de bâtiments traditionnels dans des villes comme Marrakech, Le Caire, ou Damas, où ils jouent un rôle ornemental fort.
- À l'intérieur des maisons, notamment dans les salons ou patios, en tant que cloisons ajourées ou éléments muraux inspirés de l'architecture classique [27].
- Dans des constructions modernes, comme des hôtels ou des centres culturels, où ils servent à créer une atmosphère évocatrice des arts islamiques sans nécessairement remplir une fonction climatique active.

Ces moucharabiehs, parfois réalisés en matériaux modernes (PVC, résine, aluminium découpé au laser), témoignent de la réinterprétation contemporaine de cet élément traditionnel dans un cadre esthétique et symbolique [27].

1.7. L'éclairage naturel

L'éclairage naturel est une composante essentielle de l'architecture durable. Il permet de réduire la dépendance à l'éclairage artificiel, d'améliorer le confort visuel et de créer des espaces plus agréables. Les moucharabiehs, avec leurs motifs géométriques complexes, jouent un rôle clé dans la modulation de la lumière naturelle, en la filtrant et en la diffusant de manière optimale. Un moucharabieh joue un rôle crucial dans la régulation de la quantité de lumière du jour directe qui entre dans un bâtiment, avec les paramètres de conception déterminés par l'architecte. Pendant l'été, il aide à bloquer les rayons solaires nocifs, minimise l'accumulation de chaleur interne, et permet toujours une quantité adéquate de lumière pour pénétrer dans le bâtiment. La présence d'un moucharabieh permet à la lumière ambiante d'imprégner l'espace intérieur sans admettre la lumière directe du soleil, réduisant ainsi l'éblouissement excessif, ce qui peut provoquer une gêne visuelle même s'il n'augmente pas la température ambiante. En conséquence, un moucharabieh s'avère être l'une des solutions les plus efficaces à ce problème. L'architecte doit choisir un moucharabieh avec une section circulaire pour les balustres, car

cela crée une ombre progressive qui minimise le contraste. Cela contraste avec les balustrades à section carrée ou les dispositifs d'ombrage similaires qui peuvent provoquer des ombres vives. Il est important de noter que cette condition est souvent négligée dans les projets contemporains qui utilisent moucharabieh, en particulier lors de l'utilisation de l'acier dans leur construction, ce qui entraîne une erreur récurrente [17]

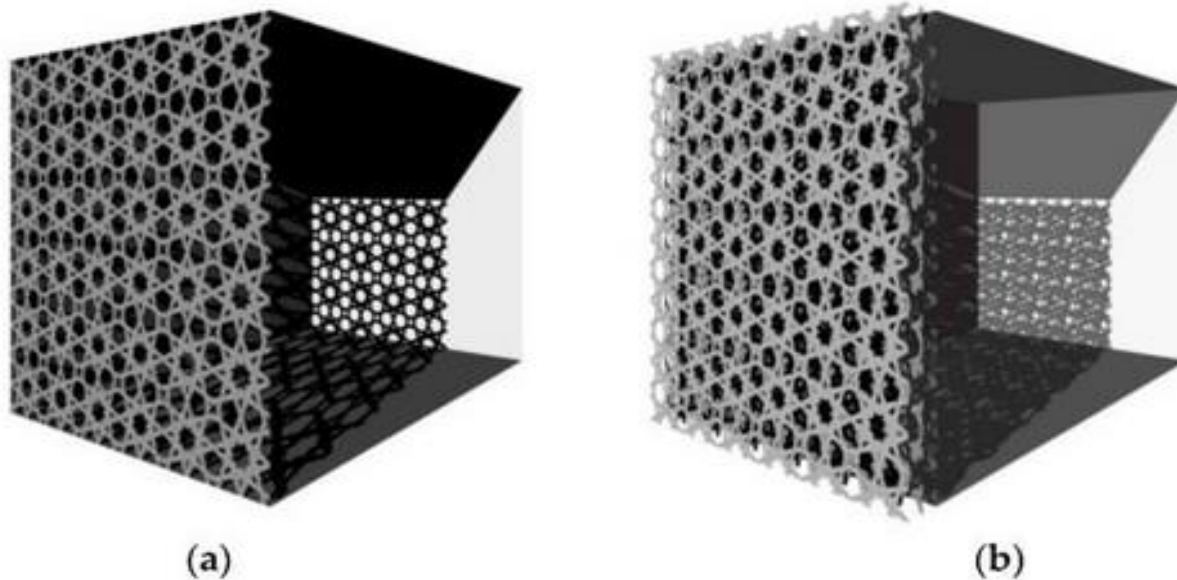


Figure 1.17. Images du SVM (a) ouvert; (b) fermé [35]

1.7.1. Rôle des moucharabiehs dans l'éclairage naturel

Les moucharabiehs jouent un rôle essentiel dans l'optimisation de l'éclairage naturel au sein des bâtiments. Leur conception ajourée permet de moduler la lumière du jour, créant ainsi un environnement intérieur confortable et économe en énergie. Contrairement aux ouvertures vitrées classiques, qui peuvent entraîner un éblouissement et une surchauffe, les moucharabiehs offrent une solution efficace pour filtrer, diffuser et réguler la lumière solaire, tout en préservant l'intimité et en améliorant l'esthétique des espaces [17]

1.7.2. Filtration de la lumière

Les moucharabiehs agissent comme des filtres naturels, réduisant l'intensité de la lumière directe du soleil tout en permettant une diffusion uniforme de la lumière dans les espaces intérieurs. Cela évite l'éblouissement et crée un éclairage doux et agréable [17]

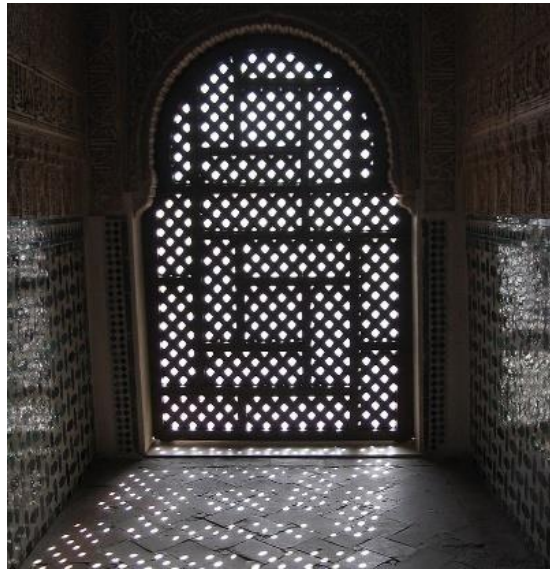


Figure 1.18. image sur la filtration de la lumière [37]

1.7.3. Réduction de la chaleur solaire

En filtrant la lumière, les moucharabiehs réduisent également la quantité de chaleur solaire entrant dans les bâtiments. Cela contribue à maintenir un confort thermique tout en réduisant les besoins en climatisation.



Figure 1.19. Mer-lumiere-jean-nouvel [38]

1.7.4. Une barrière climatique intelligente

Le moucharabieh agit comme une interface sensible entre l'environnement extérieur et l'espace intérieur. En fonction de sa densité, de l'orientation du bâtiment et des matériaux utilisés, il régule avec précision la quantité de lumière directe pénétrant dans les pièces.

Durant les mois d'été, lorsque le soleil est haut et les températures élevées, le moucharabieh constitue une protection solaire passive efficace. Il bloque les rayons solaires directs, réduisant

ainsi le risque de surchauffe intérieure, tout en laissant passer une lumière diffuse suffisante pour éclairer les espaces. Cette stratégie d'ombrage naturel permet de limiter le recours à la climatisation et à l'éclairage artificiel, contribuant ainsi à l'efficacité énergétique du bâtiment [17].

1.7.5. Avantages de l'éclairage naturel grâce aux moucharabiehs

Avantages	Explication
Modulation de la lumière	Réduction de l'éblouissement et filtrage de la lumière directe
Réduction des besoins énergétiques	Moins besoin d'éclairage artificiel durant la journée
Confort visuel	Lumière douce, homogène, adaptée à un environnement éducatif
Confort thermique	Empêche la surchauffe en été, permet une ventilation naturelle
Esthétique et identité	Élément architectural traditionnel valorisé pour son design et sa symbolique

L'éclairage naturel est un élément central dans la conception architecturale moderne. Non seulement il permet de réduire la consommation d'énergie, mais il joue également un rôle crucial dans l'amélioration du bien-être des occupants. En régulant l'apport lumineux et en filtrant la lumière du jour, les moucharabiehs maximisent les avantages de l'éclairage naturel tout en répondant à des besoins de confort visuel et de santé.

L'éclairage naturel, quand il est bien maîtrisé, offre une multitude d'avantages pour les bâtiments. En plus de réduire les coûts énergétiques, il améliore le confort et le bien-être des occupants. Les moucharabiehs, en régulant l'intensité lumineuse et en créant des effets esthétiques uniques, optimisent ces bénéfices en modulant l'apport de lumière selon les besoins. Voici une exploration approfondie de ces avantages avec des références clés.

1.7.6. Économies d'énergie

L'un des principaux avantages de l'éclairage naturel est la réduction de la consommation d'énergie, en particulier pour l'éclairage artificiel. Les moucharabiehs, avec leur structure ajourée et leurs motifs géométriques, permettent de maximiser l'apport de lumière naturelle dans les espaces intérieurs. En réduisant la nécessité d'utiliser des sources lumineuses artificielles pendant la journée, les moucharabiehs contribuent à des économies d'énergie substantielles.

1.7.7. Amélioration du confort visuel

La lumière naturelle est essentielle pour créer un environnement agréable et confortable. Cependant, une lumière trop intense peut entraîner des éblouissements et provoquer de la fatigue visuelle. Les moucharabiehs sont particulièrement efficaces pour moduler et diffuser la lumière, offrant ainsi une lumière plus douce et uniforme dans les espaces intérieurs.

En filtrant la lumière directe, les moucharabiehs créent une ambiance plus douce et évitent les contrastes forts, qui peuvent être gênants pour les yeux. Cette réduction de l'éblouissement améliore le confort visuel, particulièrement dans les espaces de travail ou de détente où les occupants passent de longues heures. De plus, une lumière plus uniforme permet de mieux répartir les éclairages dans la pièce, réduisant la fatigue oculaire et rendant l'espace plus agréable à vivre au quotidien.

1.7.8. Bien-être et santé

L'éclairage naturel est largement reconnu pour ses effets positifs sur le bien-être psychologique des occupants. Une exposition suffisante à la lumière du jour est essentielle pour le maintien d'une bonne santé mentale et physique. Il a été prouvé que l'éclairage naturel favorise la production de vitamine D, améliore l'humeur, réduit le stress, et améliore la concentration. Les moucharabiehs permettent de maximiser cet apport lumineux tout en préservant l'intimité et le confort des occupants. Cela crée des espaces de vie plus sains et plus agréables à habiter. De plus, l'éclairage naturel est essentiel pour maintenir des rythmes circadiens réguliers, ce qui a un impact positif sur la qualité du sommeil et la performance cognitive.

1.8. CONCLUSION

À travers ce chapitre, nous avons retracé les origines, l'évolution et les fonctions multiples du moucharabieh, en mettant en lumière son importance dans l'architecture traditionnelle des régions chaudes. Bien au-delà de son rôle décoratif, le moucharabieh incarne une solution architecturale ingénieuse, adaptée aux contraintes climatiques locales. Il combine des fonctions de régulation thermique, de contrôle de la lumière, de ventilation naturelle et de préservation de l'intimité.

La richesse de ses apports, tant sur le plan symbolique que sur le plan fonctionnel, justifie l'intérêt croissant porté à cet élément architectural dans les approches modernes de conception bioclimatique. Dans le contexte actuel où la maîtrise des consommations énergétiques est devenue une priorité, le moucharabieh représente une piste pertinente pour développer des solutions passives efficaces et adaptées aux environnements chauds et ensoleillés.

Cette étude introductive nous permet d'aborder, dans les chapitres suivants, une analyse plus approfondie de son interaction avec l'environnement thermique du bâtiment. Nous nous attacherons à modéliser son impact sur les transferts de chaleur et à évaluer ses performances énergétiques à travers des outils de simulation numérique.

Chapitre 2 : Efficacité Energétique de moucharabieh

2.1 Introduction

Les moucharabiehs aide à réduire la consommation d'énergie des bâtiments en assurant une ventilation naturelle efficace, partagé l'éclairage naturelle d'une façon régulière, du refroidissement et du confort thermique ont également conclu leurs conclusions sur la performance énergétique du bâtiment [1].

Les moucharabiehs combinent essentiellement des facteurs environnementaux, sociaux et architecturaux. Les moucharabiehs fonctionnent parfaitement comme protection contre la lumière directe du soleil et réduisent efficacement le gain de chaleur, en particulier pendant la saison estivale dans le désert et les zones chaudes. Les moucharabiehs traditionnels sont durables et ne nécessitent pas d'entretien régulier, car ils utilisent des types de bois de haute qualité, tels que le teck ou l'acajou, qui sont durables et peuvent être utilisés pendant de longues périodes sans dommage, et résistent aux conditions météorologiques difficiles telles que la chaleur et l'humidité [2]. Les moucharabiehs bloquent le rayonnement solaire direct et réduisent l'éblouissement direct du soleil. De plus, comme les moucharabiehs sont fabriqués en bois, ils aident à réguler l'humidité à l'intérieur des bâtiments. Le bois est connu pour absorber, retenir et libérer l'eau. Lorsque l'air traverse les interstices poreux du bois du moucharabieh, il évapore une partie de l'humidité accumulée dans le bois et la transporte à l'intérieur [3]. « Le moucharabieh fournit de l'ombre à l'intérieur de la maison sans fermer complètement les fenêtres et permet la circulation de l'air, ce qui contribue à baisser la température en été. » [4] Les ouvertures en maille sur les surfaces des moucharabiehs permettent le passage de l'air frais naturel et assurent ainsi un confort thermique. Le moucharabieh est idéal pour la vie sociale dans les maisons. Il assure l'intimité des occupants des pièces et leur donne une liberté dans leurs actions et leurs mouvements. En même temps, il permet une vue sur l'extérieur sans être isolé de l'environnement environnant. [5] Le moucharabieh et ses ouvertures en bois sculpté favorisent un dialogue unique entre l'intérieur et l'extérieur, créant un lien beau et agréable entre l'intimité et l'espace public de la maison. [6]

2.2 Concept fondamentaux et fonctionnement

2.2.1 Rôle de moucharabieh dans la gestion thermique du bâtiment

Plusieurs recherches contemporaines ont mis en évidence l'efficacité du moucharabieh en tant que dispositif de régulation thermique dans les zones à climat chaud et aride. des études de cas sur la tour Al Bahr à Abou Dhabi, un bâtiment emblématique intégrant un moucharabieh

cinétique. Les résultats ont démontré une réduction significative de la charge thermique, atteignant 25 % pour la climatisation, ainsi qu'une diminution du gain solaire estimée entre 20 % et 50 %. Ces performances s'expliquent par la capacité du système à s'adapter aux conditions d'ensoleillement, en modulant automatiquement son ouverture. [7,8].

Le moucharabieh à forme variable (SVM – Shape Variable Mashrabiya) constitue une solution innovante et prometteuse pour les environnements arides. Mis en œuvre dans des espaces périphériques, ce prototype a démontré son efficacité à travers diverses expérimentations.

- une réduction de 17,2 % de la demande énergétique pour le refroidissement par rapport au vitrage sélectif,
- une diminution de 9,9 % par rapport à l'utilisation de stores vénitiens,
- et une économie d'énergie pour l'éclairage allant jusqu'à 65,7 %, grâce à un meilleur contrôle de l'apport lumineux naturel.

L'étude conclut à une réduction globale de la consommation d'énergie primaire de l'ordre de 27 % (comparé au vitrage RG16) et de 16,3 % (par rapport aux stores vénitiens) [9].

Des expérimentations récentes ont démontré l'efficacité énergétique tangible du moucharabieh lorsqu'il est adapté aux surfaces vitrées des bâtiments contemporains. Dans l'une de ces études, un film adhésif décoratif, reproduisant des motifs inspirés du moucharabieh et possédant un taux d'opacité de 75 %, a été appliqué sur des vitrages. Ce film ne couvrait que 40 % de la surface vitrée totale, mais malgré cette couverture partielle, les résultats ont révélé une réduction significative de la charge thermique liée au refroidissement, atteignant 23 %. Cette amélioration s'explique par la capacité du motif ajouré à filtrer efficacement la lumière solaire directe tout en laissant passer une luminosité suffisante, réduisant ainsi le recours aux dispositifs de climatisation artificielle. Ce type d'intervention confirme le potentiel du moucharabieh revisité comme solution passive efficace pour la régulation thermique, particulièrement dans les environnements où les apports solaires excessifs représentent un défi majeur.[34]

À l'inverse, dans les constructions résidentielles de petite échelle, le recours au moucharabieh est souvent davantage motivé par des considérations esthétiques. En effet, 78 % des usagers interrogés considèrent l'apparence visuelle comme le critère principal dans l'adoption de ce motif architectural, reléguant l'aspect énergétique à un second plan, malgré ses avantages notables. Seuls 58,48 % placent l'efficacité énergétique en deuxième position, démontrant un écart entre la perception esthétique et la performance environnementale réelle du dispositif.[33]

Ce décalage soulève un enjeu crucial : celui de revaloriser le moucharabieh comme un système bioclimatique intelligent, et non comme une simple ornementation stylisée. Le potentiel de ce filtre ajouré à jouer un rôle dans la transition énergétique du bâti est indéniable, à condition que ses fonctionnalités d'origine — contrôle solaire, ventilation, confort thermique et intimité — soient pleinement comprises et intégrées dès la conception.[33]

2.2.1.1. Le refroidissement adiabatique

Le phénomène de refroidissement adiabatique repose sur l'évaporation de l'eau présente sur une surface humide. Cette évaporation nécessite un apport d'énergie, puisée directement sous forme de chaleur à la surface concernée, ce qui engendre un abaissement de sa température. Ce processus permet ainsi de refroidir l'air sans échange direct de chaleur avec l'environnement extérieur.

Dans ce cadre, l'air en contact avec cette surface humide se refroidit tout en augmentant son taux d'humidité. La température, la pression et l'humidité relative de l'air subissent donc des variations, sans que la quantité totale d'énergie ne soit modifiée. Ce mécanisme naturel s'avère particulièrement efficace dans les environnements chauds et secs.

Le moucharabieh, en tant que dispositif architectural traditionnel, joue un rôle essentiel dans la maîtrise de ce processus. En régulant la direction et la vitesse du flux d'air à travers ses ouvertures, il optimise le phénomène d'évaporation et favorise le refroidissement naturel de l'air pénétrant dans les espaces intérieurs, contribuant ainsi au confort thermique sans recours à des moyens mécaniques ou énergivores [10].

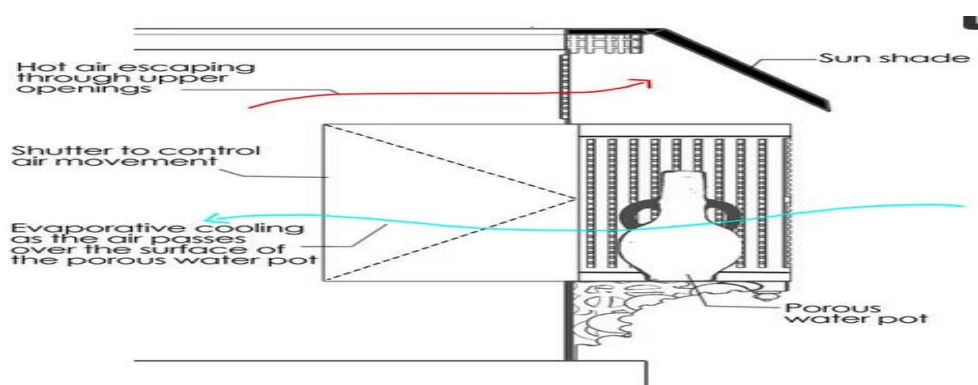


Figure 2.1. Système de refroidissement de l'air intérieur créé en plaçant des pots d'eau poreux dans le moucharabieh [27]

2.2.2 Les modes de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur représente le processus par lequel l'énergie thermique se déplace d'une zone à température élevée vers une zone à température plus basse. Trois mécanismes principaux permettent cette transmission : la conduction, le rayonnement et la convection. Chacun agit dans des conditions spécifiques et met en jeu des phénomènes physiques distincts.

2.2.1.2. La conduction thermique : le transfert par contact

La conduction est le mode de transfert de chaleur qui se produit à l'intérieur d'un corps ou entre des corps en contact direct, sans mouvement global de la matière. Elle se manifeste principalement dans les solides. Lorsqu'une partie d'un objet est chauffée, les particules (atomes ou molécules) vibrent davantage. Cette agitation se transmet progressivement aux particules voisines, propageant ainsi l'énergie thermique à travers le matériau.

◆ Caractéristiques principales :

Se produit uniquement dans la matière (pas dans le vide)

Dominante dans les matériaux solides (ex. : métal, pierre)

L'efficacité dépend de la conductivité thermique du matériau [15].

2.2.2.2. Le rayonnement thermique : le transfert à distance

Le rayonnement est un mode de transfert de chaleur qui n'exige aucun support matériel. Il peut donc se produire à travers le vide. La chaleur est transmise sous forme d'ondes électromagnétiques (infrarouges principalement), émises par tout corps ayant une température supérieure au zéro absolu (0 K).

Cette énergie rayonnée voyage à la vitesse de la lumière, soit environ 3×10^8 m/s dans le vide.

◆ Exemples concrets :

Le Soleil chauffe la Terre par rayonnement

Un radiateur électrique rayonne de la chaleur vers son environnement

◆ Rayonnement humain selon l'activité :

Une personne au repos : environ 75 W

Une personne assise, en activité modérée : 100 W

Une personne en effort physique : jusqu'à 150 W [15].

2.2.2.3. La convection thermique : le transfert par mouvement de fluide

La convection se produit dans les fluides (liquides ou gaz). Elle implique le déplacement de la matière, engendré par des différences de température qui modifient la densité du fluide. Ce processus entraîne des mouvements de masse qui permettent à la chaleur de se répartir.

On distingue deux types de convection :

❖ Convection naturelle : résulte spontanément des différences de densité (ex. : air chaud qui monte, air froid qui descend)

❖ Convection forcée : induite par un dispositif mécanique (ex. : ventilateur, pompe, climatisation)

⚡ Domaines d'application :

Chauffage d'une pièce par radiateur à air

Refroidissement des composants d'un ordinateur par ventilation[15].

2.3 Rôle climatique et énergétique du moucharabieh

2.3.1 Contrôle de la température

Régulation Thermique Estivale par le Moucharabieh : Une Barrière Contre les Rayons Solaires Directs.

Durant la saison estivale, l'un des principaux facteurs responsables de l'élévation des températures dans les espaces intérieurs est l'exposition directe aux rayons solaires. La lumière solaire, lorsqu'elle frappe directement les surfaces vitrées, engendre un important gain de chaleur, rendant les ambiances intérieures inconfortables, voire insoutenables dans les climats chauds.[14]

Le moucharabieh, en tant qu'élément architectural ajouré, constitue une solution passive et ingénieuse à ce problème. Son système de perforations finement réparties permet d'éviter l'ensoleillement direct tout en autorisant la pénétration d'une lumière tamisée, limitant ainsi le gain thermique tout en préservant la luminosité naturelle.[14]

De plus, son design favorise une ventilation naturelle croisée : l'air extérieur pénètre librement à travers les petites ouvertures, renouvelant l'air ambiant. Historiquement, les habitants y plaçaient souvent des jarres ou des pots en argile contenant de l'eau. Ce dispositif, agissant selon le principe de refroidissement par évaporation, permettait à l'air entrant de se rafraîchir avant d'atteindre l'intérieur, offrant une sensation de fraîcheur naturelle et constante.[14]

Optimisation Thermique Automnale : Le Moucharabieh comme Collecteur Solaire.

À l'arrivée de l'automne, la fonction du moucharabieh se transforme subtilement. Le soleil étant plus bas sur l'horizon et ses rayons projetés à des angles différents, la configuration des lames, baguettes et ouvertures du moucharabieh est conçue pour en tirer parti.[14]

Les artisans et concepteurs traditionnels prenaient soin de calculer précisément les angles de projection solaire automnaux. Grâce à ce savoir-faire, les rayons solaires réussissent à pénétrer davantage à l'intérieur des habitations pendant cette saison. Ce phénomène entraîne une légère élévation de la température intérieure, permettant de réchauffer les espaces sans recours à des sources de chauffage artificielles.[14]

Ainsi, le moucharabieh joue un rôle bioclimatique double : il bloque et tempère la chaleur excessive en été, tout en favorisant une transmission sélective de chaleur utile à l'automne. Cette capacité d'adaptation saisonnière témoigne d'une compréhension fine des dynamiques climatiques et d'un savoir architectural ancestral respectueux de l'environnement.[14]

Dans les approches architecturales récentes, l'intégration du moucharabieh dépasse sa fonction décorative pour devenir un véritable outil de régulation environnementale. Des essais réalisés sur des surfaces vitrées ont démontré qu'en appliquant un motif de moucharabieh sous forme de film adhésif givré ou teinté à 75 %, couvrant seulement 40 % de la surface vitrée, il était possible de réduire jusqu'à 23 % de la charge de refroidissement. Ce résultat met en évidence l'efficacité de ce dispositif traditionnel adapté aux exigences climatiques actuelles.

2.3.2 Contrôle de l'humidité

Les moucharabiehs, souvent réalisés en bois, constituent un élément architectural traditionnel favorisant la ventilation naturelle des espaces intérieurs. Grâce à leur structure ajourée, ils permettent la circulation de l'air tout en jouant un rôle régulateur sur son humidité. En effet, le bois possède la capacité d'absorber partiellement l'humidité présente dans l'air extérieur, contribuant ainsi à améliorer la qualité de l'air ambiant en le rendant plus sec et donc plus confortable pour les occupants.

Par ailleurs, dans certaines régions comme Djeddah, un matériau localement utilisé dans la construction est la pierre corallienne. Très poreuse par nature, cette pierre agit comme un réservoir d'humidité. Lorsqu'elle entre en contact avec l'air chaud et sec, l'eau emmagasinée

dans ses pores s'évapore progressivement, induisant un effet de rafraîchissement de l'air intérieur par le biais du phénomène naturel d'évaporation [20].

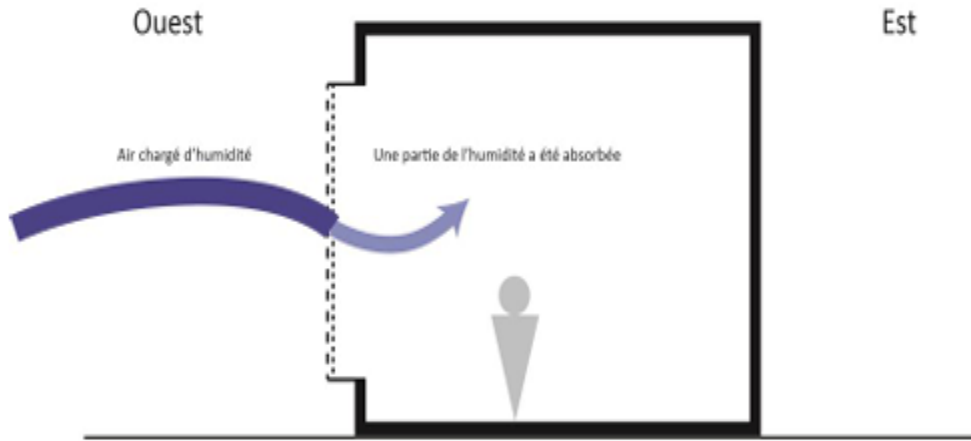


Figure 2.2. Absorption de l'humidité par les moucharabiehs en bois.[48]

Dans les climats désertiques extrêmes, l'un des défis majeurs pour le confort humain est la très faible humidité relative de l'air ambiant. Celle-ci peut chuter à des niveaux inférieurs à 20 %, provoquant une sensation d'inconfort marquée. Dans de telles conditions, la peau se dessèche rapidement, les muqueuses s'irritent, et l'organisme perd une quantité importante d'eau par évaporation, ce qui peut nuire à l'hydratation globale du corps.[19]

À l'opposé, une humidité excessive empêche l'évaporation de la sueur, principal mécanisme naturel de refroidissement du corps humain, entraînant une sensation d'oppression thermique. Les études en confort thermique s'accordent à recommander un taux d'humidité relative compris entre 30 % et 80 % pour maintenir un équilibre satisfaisant entre fraîcheur et désirabilité.[19]

Dans ce contexte, le moucharabieh joue un rôle bioclimatique subtil mais crucial. Agissant comme un médiateur entre l'extérieur et l'intérieur, il permet non seulement l'admission contrôlée de l'air, mais aussi une régulation indirecte de l'humidité intérieure.[19]

Traditionnellement, des jarres d'eau ou des contenants en argile poreux étaient disposés à proximité des ouvertures du moucharabieh. L'air sec, en entrant en contact avec la surface humide de ces récipients, provoquait une évaporation partielle de l'eau, augmentant ainsi l'humidité relative de l'air qui pénétrait dans la pièce. Ce processus simple mais efficace, fondé sur le principe du refroidissement par évaporation, permettait de rafraîchir l'air tout en le

rendant plus humide, améliorant considérablement le confort intérieur sans recours à la climatisation.[19]

De plus, le design ajouré du moucharabieh, qui favorise un flux d'air constant et modéré, permet d'éviter les effets indésirables d'une ventilation trop sèche ou trop agressive. L'air ainsi filtré, humidifié et ralenti, devient un vecteur de confort thermique et hygrométrique dans les espaces de vie, particulièrement dans les zones arides.[19]

En intégrant le contrôle de l'humidité à ses fonctions de ventilation et de protection solaire, le moucharabieh se révèle être un dispositif climatique polyvalent, combinant fraîcheur, humidité régulée et confort sensoriel, dans le respect des principes de l'architecture passive.

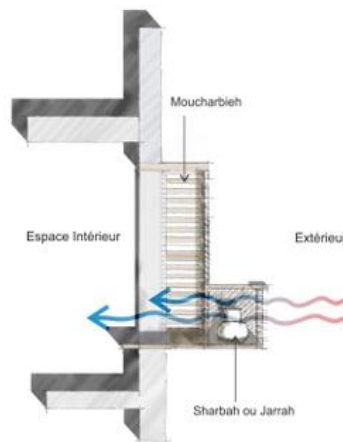


Figure 2.3. coupe dans le mur et moucharabieh [49]

2.3.3 Ventilation naturelle

Dans les régions désertiques où la chaleur atteint des niveaux extrêmes, la ventilation naturelle constitue une stratégie essentielle pour assurer le confort thermique à l'intérieur des bâtiments. L'un des principes fondamentaux de cette stratégie repose sur l'utilisation de courants d'air frais pour accélérer la dissipation de la chaleur emmagasinée par les parois extérieures. En effet, lorsqu'un vent relativement plus frais entre en contact avec des façades plus chaudes, il contribue à un phénomène de refroidissement passif en favorisant le transfert thermique vers l'extérieur.[14]

Le moucharabieh, élément ajouré à la fois esthétique et fonctionnel, joue un rôle central dans la mise en œuvre de cette ventilation naturelle. Installé sur les façades, mais aussi parfois sur les toits ou dans des patios intérieurs, il agit comme un filtre dynamique entre l'environnement extérieur et l'espace domestique. Contrairement à une simple ouverture, le moucharabieh permet une porosité mesurée qui protège du rayonnement solaire tout en autorisant un renouvellement constant de l'air.[14]

La disposition traditionnelle des maisons, notamment dans les zones arides, tient compte de ce principe : les pièces sont souvent interconnectées de manière à favoriser une ventilation croisée. Ce type de configuration permet à l'air de circuler librement d'une pièce à l'autre, créant un flux régulier et stable qui renforce l'efficacité thermique globale de l'habitat.[14]

2.3.4 Préservation de l'intimité

Au-delà de leur rôle purement fonctionnel en matière de régulation thermique ou de protection contre les intempéries, les éléments architecturaux traditionnels comme les moucharabieh, persiennes, ou autres écrans ajourés, incarnent une vision du monde profondément ancrée dans des valeurs culturelles et sociales. Dans de nombreuses sociétés, en particulier dans les régions du Maghreb, du Moyen-Orient ou de l'Asie du Sud, l'architecture domestique n'est pas simplement conçue pour abriter, mais pour organiser une relation codifiée entre l'intérieur et l'extérieur, entre l'individu et la communauté, entre le visible et l'invisible.

La recherche d'intimité, souvent perçue comme une valeur cardinale dans ces contextes, se manifeste autant dans l'agencement spatial des habitations (avec des cours intérieures, des couloirs de transition, des pièces tournées vers l'intérieur) que dans le choix de matériaux et dispositifs. Le moucharabieh, en tant que filtre visuel et climatique, illustre parfaitement cette tension entre ouverture et protection. Il permet de voir sans être vu, d'entendre sans être entendu clairement, et ainsi de maintenir une présence sensorielle au monde extérieur tout en préservant la pudeur et la sphère privée, considérées comme des attributs essentiels, notamment pour les femmes dans certaines traditions.

Cette analogie entre l'architecture et le voile est particulièrement significative. Le voile, comme le moucharabieh, n'efface pas le regard, mais le restructure : il hiérarchise qui peut voir, à quel moment, et dans quelles conditions. Il ne s'agit pas d'une fermeture absolue, mais plutôt d'une mise en scène subtile de la visibilité, où la discrétion devient une forme de pouvoir. Ce pouvoir se traduit aussi dans l'habitat : on choisit ce que l'on montre, ce que l'on cache, ce que l'on laisse deviner. L'habitat devient ainsi un prolongement du corps, un habit qui protège tout en exprimant des choix identitaires, moraux et religieux.

Dans cette perspective, les dispositifs architecturaux ajourés deviennent de véritables médiateurs culturels. Ils assurent une perméabilité contrôlée entre l'espace domestique et l'environnement urbain ou naturel, entre l'intimité familiale et la vie collective. Cette porosité, maîtrisée et pensée, répond à des impératifs climatiques – comme la ventilation naturelle et la régulation de la lumière – mais surtout à une éthique sociale du regard et de la présence dans l'espace. On pourrait parler d'une architecture du tact : elle ne s'impose pas, mais suggère, effleure, laisse passer sans se livrer complètement.

Dans un monde de plus en plus tourné vers la transparence et l'exposition constante de la vie privée, ces formes architecturales traditionnelles offrent un contre-modèle fascinant. Elles nous invitent à repenser notre rapport à l'intimité, au partage de l'espace, à la visibilité sociale, et à considérer que l'architecture, loin d'être neutre ou universelle, est toujours inscrite dans une culture, porteuse de valeurs et révélatrice d'un imaginaire collectif.[30]

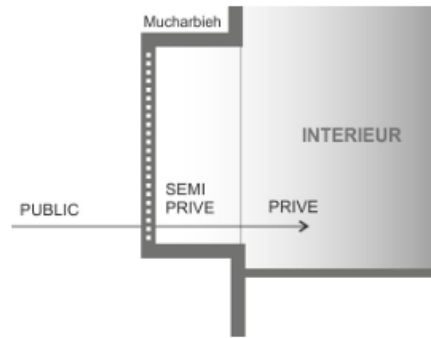


Figure 2.4. préservation de l'intimité [48]

2.3.5 Filtration de la lumière.

La lumière naturelle constitue une ressource précieuse en conception architecturale durable. Toutefois, son exploitation efficace nécessite une compréhension fine de ses caractéristiques physiques et de ses interactions avec l'enveloppe bâtie. En effet, la lumière incidente issue du rayonnement solaire direct peut s'avérer problématique à l'échelle de l'espace intérieur : elle engendre fréquemment des phénomènes d'éblouissement, des surcharges thermiques localisées, et une dégradation du confort visuel. Dans cette optique, le moucharabieh se révèle être un outil architectural d'une grande pertinence. Grâce à sa structure ajourée, il joue un rôle d'interface entre l'extérieur lumineux et l'espace intérieur, permettant d'atténuer l'éblouissement et de limiter les apports thermiques excessifs générés par une exposition directe au soleil. Contrairement à la lumière directe – souvent trop intense et inconfortable pour un usage intérieur – la lumière filtrée par un moucharabieh génère un éclairage naturel indirect, plus doux, plus uniforme, et particulièrement adapté aux espaces de vie et de travail.[16]

Le moucharabieh permet ainsi de transformer un flux lumineux incident direct en une luminance diffuse contrôlée, minimisant les contrastes excessifs entre les zones éclairées et les zones d'ombre. Cette homogénéisation du champ lumineux participe à la prévention de la fatigue visuelle et réduit considérablement le besoin en éclairage artificiel, notamment en zone tertiaire.

Sur le plan thermique, la densité et la forme du motif influencent les coefficients de transmission solaire (g-value) et de transmission thermique (U-value) des façades. En interceptant le rayonnement solaire avant qu'il ne pénètre le vitrage, le moucharabieh diminue la charge thermique interne du bâtiment, limitant ainsi le recours à des systèmes de refroidissement mécanique, ce qui participe à une réduction de la consommation énergétique annuelle.

La performance lumineuse peut être mesurée à l'aide de plusieurs indicateurs normés, notamment le Facteur de Lumière du Jour (FLJ), qui exprime le ratio entre l'éclairement intérieur d'un point et l'éclairement extérieur sur une surface horizontale de référence, sous un ciel couvert standardisé (norme CIE). L'intégration d'un moucharabieh à géométrie paramétrique permet de moduler ce facteur en fonction de l'orientation, de la latitude, et des conditions climatiques locales.

Par ailleurs, le flux lumineux (en lumens) – quantifiant l’intensité lumineuse perçue par l’œil humain dans le spectre visible (entre 380 et 780 nm) – peut être optimisé en jouant sur la taille, la fréquence et la profondeur des perforations. Un design paramétrique basé sur l’analyse spectrale permet d’adapter ces paramètres pour maximiser la transmission de la lumière utile tout en bloquant les longueurs d’onde responsables de la chaleur ou de l’éblouissement.

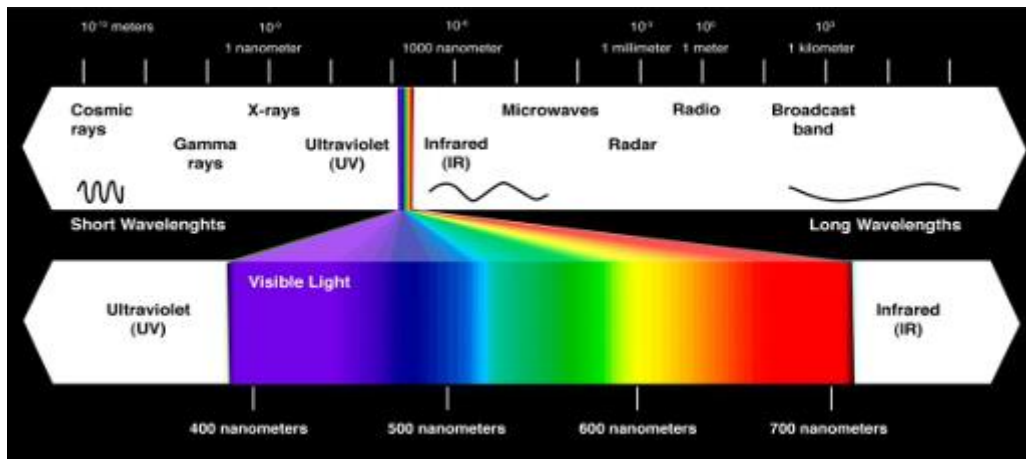


Figure 2.5. le spectre visible et le spectre électromagnétique [49]

2.4 Facteurs influençant l’efficacité énergétique

2.4.1 Matériaux utilisés

Historiquement, le bois a été le matériau privilégié pour la conception des moucharabiehs. Son choix ne relevait pas uniquement de sa disponibilité, mais surtout de ses propriétés physiques adaptées au climat chaud des régions où ces éléments architecturaux étaient intégrés. Le bois permettait une gestion efficace de la lumière et de la ventilation : il filtrait les rayons directs du soleil, réduisait les phénomènes d’éblouissement à l’intérieur des habitations, et contribuait à la régulation thermique et hygrométrique des espaces[36],

Parmi les essences localement disponibles, trois types de bois étaient couramment utilisés : le pin, le noyer et le hêtre. Ces bois étaient suffisamment robustes pour permettre un travail artisanal détaillé, tout en étant adaptés aux conditions environnementales.

Tableau 2.1. les matériaux utilisés dans la conception des moucharabiehs et leur conductivité thermique [51].

Matériaux	Conductivité thermique (W/m.k)
Bois	Entre 0.12 et 0.23
Pierre	Entre 0.85 et 3
Métal	Entre 35 et 380
Béton	Entre 0.1 et 2.5
Gypse (plâtre)	Entre 0.25 et 0.5

En parallèle, des essences de bois importées ont enrichi les possibilités esthétiques et techniques des artisans. Des bois précieux comme le chêne ou encore le noyer européen provenaient d'Europe et d'Asie occidentale, tandis que des essences exotiques telles que l'ébène, originaires de Somalie, du Soudan du Sud ou d'Éthiopie, apportaient une dimension décorative et raffinée aux réalisations les plus élaborées [30].

Dans certaines régions comme Bahreïn ou d'autres parties du Moyen-Orient, l'utilisation des matériaux dépendait fortement des ressources locales et des savoir-faire artisanaux propres à chaque zone. Ainsi, le moucharabieh y reflétait non seulement une fonction climatique, mais aussi une identité culturelle régionale unique. Lorsque le bois massif se faisait rare ou difficile à obtenir, un matériau de substitution était parfois utilisé : le plâtre à base d'argile (ou gypse). Bien que plus fragile que le bois, le plâtre offrait une bonne résistance dans les environnements humides, grâce à sa porosité naturelle, qui facilitait les échanges d'humidité. Toutefois, cette alternative entraînait des limitations techniques et esthétiques : les moucharabiehs en plâtre étaient moins fins dans les détails, et leurs motifs souvent plus simples ou moins ajourés que ceux sculptés dans le bois.[31]

2.4.2 Orientation et positionnement

L'orientation des façades constitue un facteur déterminant dans l'évaluation de l'efficacité des dispositifs architecturaux passifs tels que les moucharabiehs. En effet, selon l'exposition au soleil, aux vents dominants ou à l'humidité, les performances des protections solaires ajourées peuvent varier significativement, influençant directement le confort thermique, lumineux et aéralique ressentie par les occupants.[14]

Les observations recueillies mettent en évidence que les logements orientés vers le nord sont perçus comme les plus confortables, avec un taux de satisfaction moyen de 4,65/7, et sont préférés par plus de 60 % des habitants. Cette orientation, naturellement protégée des apports solaires directs, bénéficie d'un climat intérieur plus stable et moins soumis aux variations thermiques. Dans ce contexte, les dispositifs de protection solaire comme les moucharabiehs jouent un rôle secondaire, leur impact étant plus limité du fait de l'absence de surchauffe à réguler.

En revanche, les façades orientées vers le sud ou l'ouest présentent des résultats plus contrastés. La façade sud, bien qu'exposée à un ensoleillement important, affiche un taux de satisfaction légèrement inférieur (4,59/7), traduisant une efficacité modérée des protections solaires. Le rôle du moucharabieh y est alors crucial pour atténuer les gains thermiques tout en laissant passer une lumière naturelle diffuse. Cependant, c'est surtout sur la façade ouest que les variations sont les plus notables. Cette orientation, sujette à une forte irradiation en fin de journée et aux vents humides venus de l'océan, génère des conditions climatiques complexes. Les logements exposés directement sans obstacles bénéficient de la ventilation naturelle mais souffrent d'un excès d'humidité et de lumière tardive, tandis que ceux situés à proximité d'autres bâtiments profitent d'un masque solaire et d'un effet de coupe-vent, améliorant le confort intérieur.

Dans ces cas, l'intégration d'un moucharabieh peut agir comme un facteur de régulation supplémentaire, mais son efficacité dépend de la configuration du site et de la densité

Urbaine environnante. Il s'avère ainsi que pour les façades exposées au sud ou à l'ouest, les performances du moucharabieh ne sont pas uniformes, mais fortement influencées par le contexte architectural et climatique immédiat.

Cette analyse montre que l'orientation n'influence pas uniquement les performances globales du bâtiment, mais conditionne aussi la pertinence et l'efficacité des dispositifs bioclimatiques comme le moucharabieh. Comprendre cette relation orientation/dispositif permet une mise en œuvre plus stratégique de ces éléments dans les futures conceptions architecturales.

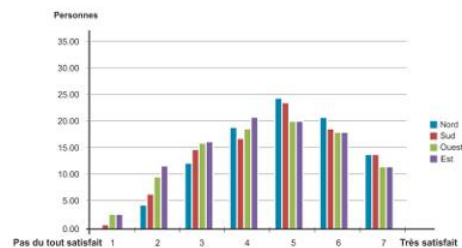


Figure 2.6. Le confort thermique vu par les habitants en fonction de l'orientation[50]

2.5 Adaptation moderne et technologies innovantes

2.5.1 Moucharabiehs paramétrique et conception assistée par ordinateur CAO

La redécouverte et la réinterprétation contemporaine du moucharabieh ne peuvent être dissociées de l'évolution rapide des technologies numériques et des nouvelles méthodes de conception et de fabrication en architecture. Aujourd'hui, les avancées dans les outils de modélisation paramétrique, la programmation algorithmique et les procédés de fabrication numérique ont profondément transformé la manière dont les architectes imaginent, conçoivent et réalisent les enveloppes bâties.[39]

Alors que le verre représentait au début du XXe siècle une révolution technologique dans le domaine architectural, l'époque actuelle est marquée par l'arrivée de technologies dites « intelligentes ». Celles-ci ont non seulement modifié les pratiques constructives, mais aussi redéfini les attentes esthétiques et fonctionnelles des concepteurs. L'histoire montre que l'apparition de chaque nouvelle technologie engendre l'émergence de styles et de mouvements architecturaux inédits.[39]

Dans ce contexte, une nouvelle grammaire architecturale a vu le jour, portée par des notions comme l'architecture paramétrique, l'architecture numérique ou encore l'architecture génétique. Ces approches offrent des possibilités de création presque infinies, en permettant la génération de formes complexes issues d'équations, de paramètres environnementaux ou d'algorithmes, et ouvrent la voie à une architecture plus adaptable, plus interactive et plus ancrée dans son époque.[39]

L'un des tournants majeurs de cette transformation est le concept de « file to factory » (de l'ordinateur à l'usine), qui consiste à concevoir un objet ou une façade entièrement de manière numérique, puis à en assurer la fabrication directe à l'aide de machines à commande numérique. Contrairement aux outils classiques de modélisation, qui génèrent des formes géométriques figées, les outils paramétriques permettent de créer des objets flexibles, pouvant être modifiés en temps réel en ajustant leurs paramètres. Cette capacité offre une liberté formelle et une capacité d'adaptation contextuelle sans précédent.[39]

L'architecture de ZahaHadid, notamment à travers le projet de la tour Marsa à Dubaï, illustre parfaitement cette nouvelle approche. La peau de la tour a été pensée selon un motif paramétrique évolutif, où les ouvertures deviennent plus grandes à mesure que la façade s'élève, optimisant ainsi les performances structurelles et environnementales du bâtiment.[40]

De son côté, le projet emblématique des Al Bahar Towers aux Émirats arabes unis propose une façade interactive inspirée du moucharabieh traditionnel. Ce dispositif cinétique réagit aux conditions solaires en temps réel, grâce à des unités mobiles qui s'ouvrent et se ferment automatiquement. Les concepteurs y ont intégré à la fois la symbolique culturelle du moucharabieh et des références à la nature locale, en évoquant notamment les mouvements des plantes endémiques. Ce projet, rendu possible grâce à la modélisation algorithmique, constitue un modèle d'intégration entre héritage architectural et innovation technologique.[41]

Dans la ville durable de Masdar, le moucharabieh a également été réinterprété à travers une façade constituée de béton renforcé de fibres de verre (GRC). Ici, les motifs traditionnels ont été réadaptés pour offrir des protections solaires efficaces tout en respectant l'identité visuelle de l'architecture islamique. Les écrans semi-circulaires moulés sur les façades des immeubles résidentiels sont à la fois décoratifs et performants thermiquement.[42]

Parallèlement, des collectifs comme EmergingObjects expérimentent des solutions encore plus avancées. En combinant algorithmes paramétriques et impression 3D, ils ont conçu des briques de refroidissement inspirées du moucharabieh, appelées « Frescoes ». Ces briques, conçues en nid d'abeilles, permettent le passage de l'air et de l'eau froide à travers leurs parois, améliorant ainsi la ventilation naturelle tout en apportant un bénéfice esthétique et symbolique.[39]

L'intégration croissante de technologies telles que la modélisation 3D, la fabrication numérique assistée par ordinateur (CAM), le BIM (Building Information Modeling) ou encore les algorithmes génétiques révolutionne non seulement les outils de conception, mais aussi la pédagogie de l'architecture, les méthodes d'enseignement et les références culturelles du domaine. Ainsi, la réinvention contemporaine du moucharabieh illustre la capacité de l'architecture à évoluer sans rompre avec son passé, en combinant mémoire vernaculaire et innovation numérique.[39]

2.5.2 Exemples des projets architecturaux contemporains utilisant des moucharabiehs

-Al Bahar Towers à Abu Dhabi : une façade cinétique inspirée du moucharabieh pour une architecture climatique intelligente [43].

Situées au cœur d'Abu Dhabi, les tours Al Bahar incarnent une fusion remarquable entre tradition architecturale islamique et technologie contemporaine. Leur façade dynamique, directement inspirée du moucharabieh, constitue une réponse innovante aux contraintes climatiques extrêmes de la région tout en préservant une esthétique culturelle forte.

Une peau intelligente fondée sur la géométrie et le mouvement :

Chaque tour est enveloppée sur trois de ses faces par une structure cinétique modulaire, tandis que la façade nord demeure ouverte, car moins exposée au rayonnement solaire direct. Le système est constitué de modules triangulaires isocèles interconnectés par des liaisons linéaires. Ces modules sont conçus pour se plier et se déplier grâce à des mécanismes géométriques précis : les plis convexes s'articulent le long des bissectrices, tandis que les courbures concaves émergent des lignes reliant le centre de gravité du triangle à ses côtés.

L'activation des modules s'effectue via une force perpendiculaire appliquée au centre du triangle : la pression déclenche une ouverture ou une fermeture du panneau, modifiant ainsi la perméabilité lumineuse de la façade. Cette dynamique entraîne une légère translation des sommets des modules, augmentant ou réduisant la transparence locale, en fonction des besoins en lumière et en protection thermique.

Ces unités sont fixées sur une superstructure hexagonale ancrée autour des deux bâtiments jumeaux, permettant une indépendance de contrôle pour chaque module. L'énergie nécessaire au fonctionnement du système est partiellement fournie par des panneaux photovoltaïques installés en toiture, assurant une certaine autonomie énergétique à l'ensemble.

Une réponse climatique contextuelle :

Les Émirats arabes unis se trouvent dans une zone subtropicale aride, où les températures oscillent entre 20°C et 45°C au fil des saisons, avec une forte exposition solaire et un risque élevé de surchauffe. La conception de la façade cinétique d'Al Bahar Towers est donc directement orientée vers la régulation thermique passive et la gestion de l'éclairage naturel.

Un système centralisé de gestion technique du bâtiment (BMS) régule l'ouverture de chaque module en fonction des données collectées par des capteurs de température, de lumière et d'ensoleillement. Le système ajuste dynamiquement les modules tout au long de la journée, répondant ainsi aux variations de l'environnement tout en optimisant le confort intérieur.

Ce choix s'avère particulièrement pertinent dans un bâtiment à usage majoritairement tertiaire, où l'occupation est maximale en journée, période où le rayonnement solaire est également le plus intense. La façade mobile agit alors comme un bouclier thermique adaptatif, limitant le recours aux systèmes de climatisation.

Évaluation post-occupation : entre innovation et ajustements

Une enquête menée après l'occupation des lieux a révélé un retour globalement positif, mais nuancé, des utilisateurs :

54 % des occupants jugent l'ambiance intérieure agréable.

32 % expriment une neutralité, témoignant d'une acceptation technologique sans enthousiasme marqué.

14 % considèrent l'environnement intérieur comme désagréable, en raison de certains effets secondaires.

Parmi les critiques formulées, deux éléments majeurs ressortent :

Un refroidissement excessif dans certaines zones, induit par un réglage automatique non adapté aux préférences individuelles.

L'impossibilité de contrôle individuel sur les modules de façade, ce qui génère une frustration liée à la perte d'autonomie sur le confort thermique et lumineux.

En ce qui concerne l'apport de lumière naturelle, 20 % des utilisateurs se déclarent insatisfaits, notamment dans les espaces périphériques où la lumière est parfois trop filtrée par les panneaux mobiles.

-L'Institut du Monde Arabe à Paris : une façade mécanique inspirée du moucharabieh, entre symbolisme et innovation

Situé sur les quais de Seine à Paris, l'Institut du Monde Arabe (IMA) conçu par Jean Nouvel est un projet emblématique qui conjugue technologie, culture et lumière. Le bâtiment est surtout connu pour sa façade sud unique, intégrant un dispositif cinétique inspiré du moucharabieh, élément traditionnel de l'architecture islamique. Ce projet incarne une tentative avant-gardiste de transposer un principe vernaculaire dans une architecture contemporaine, tout en tenant compte du contexte climatique parisien

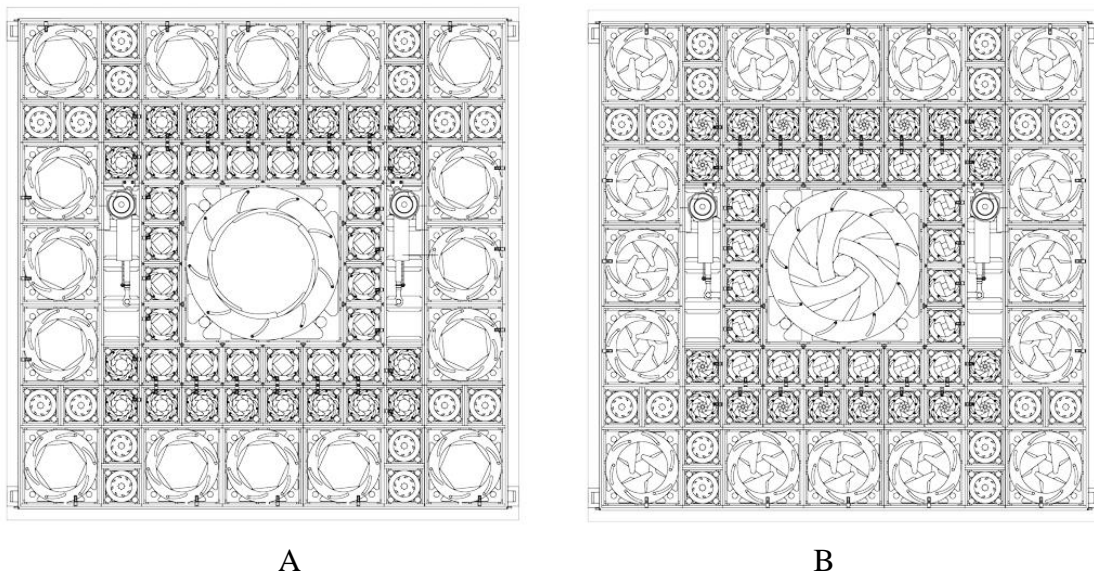


Figure 2.7. position différent de moucharabieh (A :ouvert ; B :fermé)[50]

Une façade dynamique à diaphragmes : symbolisme et mécatronique :

Le système développé pour la façade se compose de 25 000 diaphragmes métalliques photosensibles, répartis en mille modules indépendants. Chaque module est constitué d'un

système opto-mécanique inspiré de l'ouverture de l'objectif d'un appareil photographique. Les lamelles, en forme de fentes circulaires articulées, s'ouvrent ou se ferment selon le degré de rotation d'un anneau périphérique, actionné par une seule force motrice centralisée par super module.

Cette mécanique permet un contrôle fin de la lumière naturelle, en modulant dynamiquement la quantité de rayonnement pénétrant à l'intérieur du bâtiment. Le système ne se limite pas à une fonction pratique : il constitue aussi un hommage visuel à la tradition arabo-islamique, reprenant la grille ornementale des moucharabiehs sous une forme modernisée et technologique.

2.6 Conclusion

À travers l'étude des fondements physiques du moucharabieh, il apparaît clairement que cet élément architectural, souvent perçu à tort comme purement ornemental, s'avère être une réponse intelligente, durable et contextuelle aux contraintes climatiques des régions chaudes et ensoleillées. Sa structure ajourée agit de manière synergique sur plusieurs plans : elle favorise la régulation thermique en limitant l'absorption directe des rayons solaires, améliore le confort lumineux par un filtrage naturel de la lumière du jour, et assure une ventilation naturelle efficace tout en préservant l'intimité des occupants. Ce triple rôle – thermique, lumineux et visuel – inscrit le moucharabieh dans une logique bioclimatique où l'architecture devient un acteur actif de la performance énergétique du bâtiment.

Par sa géométrie complexe et répétitive, le moucharabieh réussit à conjuguer esthétique traditionnelle et fonctionnalité environnementale. Il crée des ambiances intérieures modulées, réduit les besoins en climatisation mécanique et renforce le lien entre espace intérieur et environnement extérieur. Dans les contextes urbains actuels, où les enjeux de durabilité, d'économie énergétique et d'intégration culturelle sont centraux, le retour à ces principes passifs ancestraux trouve tout son sens. Toutefois, la simple reproduction des motifs traditionnels ne suffit plus : face aux défis de l'architecture contemporaine, une réinterprétation plus flexible et technologique devient indispensable.

C'est ici qu'intervient la transition vers une architecture augmentée par les technologies numériques. À l'ère de la transition digitale et de la construction intelligente, le moucharabieh connaît une véritable renaissance à travers les outils de conception paramétrique, l'algorithme et les systèmes adaptatifs. Ce glissement de la tradition artisanale vers une architecture computationnelle permet non seulement de conserver l'esprit et les vertus physiques du moucharabieh, mais aussi d'en accroître la précision, la personnalisation et l'efficacité. Les solutions générées ne sont plus fixes, mais évolutives, capables de répondre dynamiquement aux données climatiques, aux exigences programmatiques et aux contraintes structurelles.

L'évolution des logiciels de conception (CAO, BIM, Grasshopper, Rhino, etc.) et des méthodes de fabrication numérique (impression 3D, découpe CNC, fabrication robotique) offre désormais aux architectes la possibilité de créer des enveloppes intelligentes, hautement performantes, aux géométries complexes et adaptatives. Dans ce cadre, le moucharabieh devient un support de recherche paramétrique idéal : sa nature géométrique modulaire, sa vocation climatique et sa

richesse symbolique en font un terrain fertile pour explorer l'alliance entre tradition et innovation. Le moucharabieh paramétrique peut ainsi réagir en temps réel à des données environnementales (ensoleillement, vent, température) et adapter ses perforations, son ouverture ou ses motifs en conséquence.

Le chapitre suivant s'attache à analyser en profondeur cette nouvelle approche paramétrique du moucharabieh. Il mettra en lumière les méthodologies numériques employées, les logiques de conception algorithmique, ainsi que des études de cas emblématiques ayant su tirer parti de ces innovations pour redonner vie au moucharabieh dans des contextes contemporains. À la croisée de l'artisanat ancestral et de la technologie de pointe, le moucharabieh paramétrique incarne une vision d'avenir pour une architecture durable, contextuelle et résolument innovante.

Chapitre 3 : Formulation

Mathématique

3.1. Introduction

Ce chapitre s'attache à présenter les fondements théoriques et physiques nécessaires à la compréhension des phénomènes d'écoulement d'air et de transfert de chaleur à travers un moucharabieh, dans le cadre d'une étude portant sur son impact sur l'efficacité énergétique d'un espace intérieur.

À travers la mécanique des fluides, nous mettons en lumière les équations qui régissent les mouvements de l'air — notamment dans un contexte non isotherme — où la température varie à l'intérieur de la pièce selon les apports extérieurs et la ventilation naturelle induite par la façade ajourée. Une attention particulière est portée aux **écoulements turbulents**, caractéristiques des passages d'air à travers les motifs complexes du moucharabieh. Ces écoulements se distinguent par leur comportement instable, tourbillonnaire et difficilement prévisible, nécessitant une modélisation numérique précise.

Le présent chapitre expose donc les équations fondamentales de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie), nécessaires à la simulation des performances thermiques et aérauliques de la pièce étudiée. Ces équations sont ensuite résolues à l'aide d'un outil de simulation numérique : **GAMBIT** pour la génération du maillage, et **FLUENT** pour le calcul CFD (Computational Fluid Dynamics), reposant notamment sur la résolution des équations de **Navier-Stokes**. Ce traitement permet de reproduire fidèlement l'interaction entre l'air, les parois, et la structure du moucharabieh, dans le but d'évaluer ses effets sur la **régulation thermique passive** et les **économies d'énergie**.

3.2. CALCUL NUMERIQUE

Le modèle mathématique repose sur un ensemble d'équations aux dérivées partielles (EDP), qui sont transformées en un système d'équations algébriques grâce à un procédé de discrétisation adapté [45].

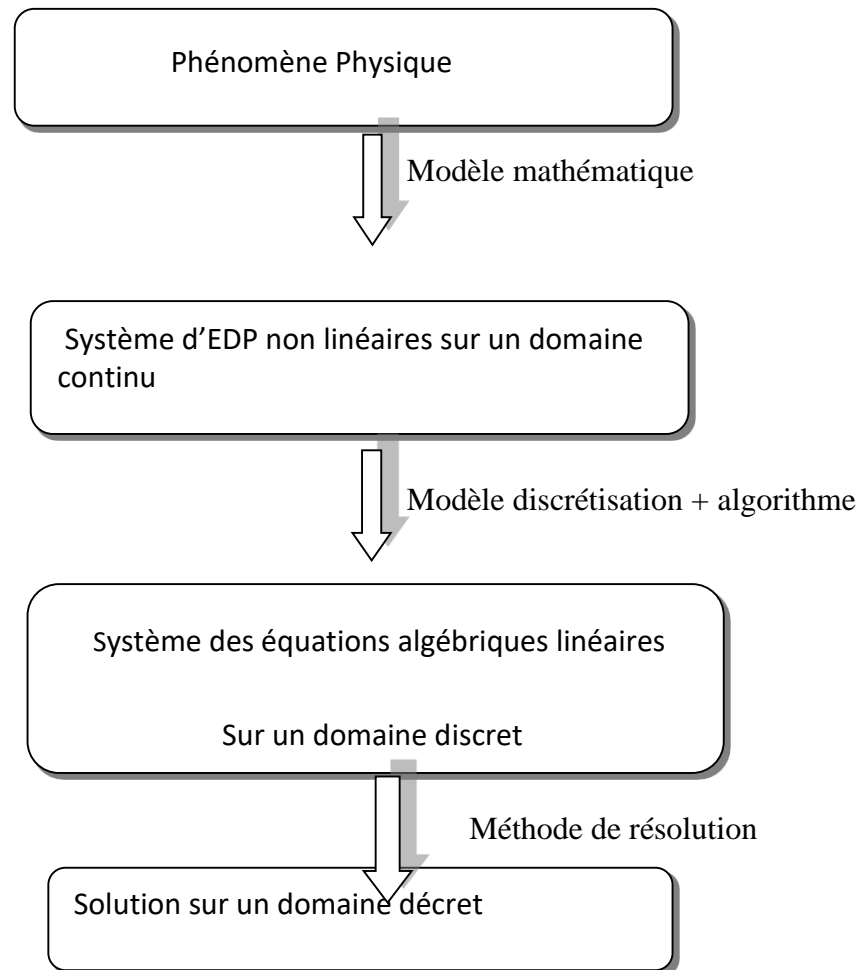


Figure 2. 2 Principe de calcul numérique [46]

3.3. Les différentes méthodes numériques de discrétisation

Pour passer d'un problème exact (continu) à un problème approximatif (discret), il existe différentes techniques concurrentes et complémentaires parmi lesquelles les plus connues sont

- Méthode des différences finis (MDF).
- Méthode des éléments finis (MEF).
- Méthode de volumes finis (MVF) [46].

3.3.1. Méthode des différences finis

La méthode des différences finies consiste à transformer un domaine continu en un réseau de points discrets, appelé **maillage**, afin d'approximer les dérivées spatiales à partir des valeurs de

la fonction en des points voisins. Cette approche est largement utilisée pour la résolution des équations différentielles ordinaires ainsi que des équations aux dérivées partielles.

Son principe fondamental repose sur la discrétisation des équations au niveau des nœuds du maillage. Les dérivées sont estimées en utilisant des développements en série de Taylor, ce qui permet d'établir des relations algébriques entre les variables inconnues à un point donné et celles de ses voisins immédiats [45].

La précision de cette méthode dépend principalement du nombre de points du maillage utilisés pour chaque dérivée et de la taille des mailles. En pratique, on privilégie souvent un maillage structuré et régulier en raison de sa simplicité d'implémentation. Toutefois, la qualité du maillage joue un rôle crucial dans la capacité à bien capturer les gradients locaux et à représenter fidèlement les phénomènes physiques étudiés [46]

3.3.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis constitue une technique numérique largement utilisée pour la discrétisation de domaines complexes, en les divisant en éléments géométriques simples tels que des triangles ou des quadrilatères. Sa flexibilité à représenter des formes géométriques irrégulières en fait un outil particulièrement adapté à la simulation de phénomènes physiques dans des structures architecturales complexes, a été initialement développée dans les années 1970 pour résoudre les équations de Navier-Stokes. Dans cette méthode, les équations sont reformulées sous une forme faible, où les inconnues sont approchées par une combinaison linéaire de fonctions de base ayant un support élémentaire. Les valeurs inconnues sont ensuite calculées en utilisant cette combinaison linéaire de fonctions. L'approche des éléments finis se déroule en deux étapes principales :

Tout d'abord, l'approximation des fonctions inconnues par des fonctions d'interpolation définies sur des sous-domaines, puis l'utilisation de la méthode des résidus pondérés, telle que la méthode de Galerkin [45]

Cette dernière permet de construire une formulation intégrale des équations aux dérivées partielles, offrant ainsi une approche conservatrice sur un domaine donné.

3.3.2. La méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis consiste à diviser le domaine physique de l'écoulement en sous-domaines appelés volumes de contrôle, généralement de forme régulière. Ces volumes servent de base à l'intégration, sous forme conservative, des équations gouvernant l'écoulement.

L'objectif principal est de convertir les équations différentielles en un système d'équations algébriques, en établissant des relations entre les valeurs des variables — telles que la pression, la vitesse ou la température — dans les cellules voisines du maillage.

La mise en œuvre de cette méthode s'effectue en plusieurs étapes :

- Le domaine de calcul est discrétisé en volumes de contrôle à l'aide d'un maillage adapté.
- Les équations physiques sont ensuite intégrées sur chaque volume de contrôle, ce qui permet de générer un ensemble d'équations algébriques pour les variables inconnues comme la vitesse, la température ou la pression.
- Enfin, après linéarisation, le système d'équations obtenu est résolu numériquement pour accéder aux champs de variables recherchés.

La méthode des volumes finis est largement adoptée dans les logiciels de mécanique des fluides numérique, notamment dans des outils comme **Fluent**, **CFX**, **STAR-CD** ou encore **Fine Turbo**, en raison de sa robustesse et de sa capacité à conserver les quantités physiques à travers le domaine de calcul [46].

Avantages et inconvénients

- Cette méthode respecte naturellement les lois de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie), ce qui en fait un choix pertinent pour les écoulements fluides.
- Elle offre une grande flexibilité géométrique grâce à la possibilité d'utiliser des maillages non structurés, facilitant ainsi la modélisation de domaines complexes.
- Difficulté à monter en ordre [46]

3.4 principe de la méthode des volumes finis

Les étapes des résolutions de la méthode des méthodes finis sont les suivantes :

3.4.1 Maillage

La méthode implique de subdiviser le domaine d'étude en grilles longitudinales et transversales, où chaque intersection représente un nœud contenant les composantes u et v de la vitesse vectorielle. Ces composantes sont situées au milieu des segments reliant deux nœuds adjacents. Le maillage est constitué d'un réseau de points où les grandeurs scalaires telles que la pression et la température sont stockées au nœud P , tandis que les grandeurs vectorielles u et v sont placées au milieu des segments entre les nœuds [46].

Les équations de transport sont intégrées sur les volumes de contrôle associés aux variables scalaires, tandis que les équations de quantité de mouvement sont intégrées sur les volumes de contrôle associés aux composantes de vitesse. Le volume de contrôle pour la composante longitudinale u est décalé selon la direction x par rapport au volume de contrôle principal, tandis que celui de la composante transversale v est décalé selon la direction y .

Ce type de maillage, appelé maillage décalé, permet une approximation précise des flux convectifs et une meilleure évaluation des gradients de pression, ce qui contribue à stabiliser numériquement la solution.

3.4.2 Discrétisation des équations gouvernantes

Dans la méthode des volumes finis, l'étape essentielle consiste à intégrer les équations gouvernantes sur chaque volume de contrôle du domaine. Cette démarche permet de transformer les équations différentielles de transport en un ensemble d'équations algébriques plus simples à résoudre numériquement. Chaque nœud du maillage est associé à un volume de contrôle délimité par des surfaces adjacentes. Les propriétés du fluide ainsi que les variables physiques (comme la pression, la température ou la vitesse) sont définies à ces nœuds. Les équations sont ensuite formulées sous une forme moyennée dans un repère cartésien (x, y, z) , ce qui facilite leur traitement numérique [46].

3.4.3 Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

- u, v, w sont les composantes de la vitesse dans les directions x, y, z respectivement.

3.4.4 Equation de la conservation de la quantité de mouvement

Suivant l'axe x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.2)$$

Suivant l'axe y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.3)$$

Suivant l'axe z :

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g\beta(T - T_0) \quad (3.4)$$

3.4.5 Equation de la conservation de l'énergie

$$\mathbf{u} \frac{\partial T}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial T}{\partial y} + \mathbf{w} \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.5)$$

Où :

u : est la composante de la vitesse suivant la direction x.

v : est la composante de la vitesse suivant la direction y.

w : est la composante de la vitesse suivant la direction z.

ρ : La masse volumique.

T : Température du local.

α : Diffusivité thermique.

g : l'accélération gravitationnelle.

β : est le coefficient de dilatation thermique.

3.5 Approximation de Boussinesq

L'approximation de Boussinesq est une hypothèse fréquemment utilisée en mécanique des fluides pour modéliser les écoulements de fluides incompressibles, en particulier lorsqu'il existe de faibles variations de température. Elle permet de simplifier les équations de la dynamique des fluides tout en conservant les effets de la flottabilité, essentiels dans les phénomènes de convection naturelle.

Dans ce cadre, on considère que la densité du fluide est constante dans toutes les équations, sauf dans le terme de force de gravité, où sa variation en fonction de la température joue un rôle crucial.

Cette variation est alors exprimée par un **développement au premier ordre** :

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)) \quad (3.6)$$

où :

- ρ est la densité locale de l'air (kg/m^3),
- ρ_0 est la densité de référence à la température T_0
- β est le **coefficient de dilatation thermique** (K^{-1}),
- T est la température locale (K),
- T_0 est la température de référence (K).

Pour un gaz parfait, ce coefficient peut être exprimé de manière approchée comme :

$$\beta = \frac{1}{T}$$

3.6 LES NOMBRES ADIMENSIONNELS

3.6.1 Le nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité. Il est défini comme suit :

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (3.7)$$

ρ : la densité du fluide (en kg/m³).

V : la vitesse du fluide (en m/s).

L : une longueur caractéristique (en m).

μ : la viscosité dynamique du fluide (en Pa·s ou N·s/m²).

3.6.2 Le nombre de Prandtl

Le Nombre de Prandtl est le rapport de la viscosité cinématique μ/ρ et la diffusivité thermique [46]

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (3.8)$$

λ : conductivité thermique [W/m.K]

C_p : Capacité calorifique massique [J/kg.K]

On le définit par :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (3.9)$$

3.6.3 Le nombre de Nusselt

Le Nombre de Nusselt Nu est le rapport du flux thermique q , transmis par convection à un flux [46].

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (3.10)$$

h : est le coefficient de transfert de chaleur convective, exprimé en [W/(m²·K)].

D : est une longueur caractéristique, telle que le diamètre hydraulique ou le diamètre du tube, exprimée en mètres [m].

3.6.4 Nombre de Rayleigh

Le nombre de Rayleigh (Ra) est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser les écoulements de la convection naturel.

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T.L^3.Pr}{\nu^2} \quad (3.11)$$

g : est l'accélération due à la gravité, exprimée en $[m/s^2]$

β : est le coefficient de dilatation thermique, exprimé en $[1/K]$

ΔT : est la différence de température entre la surface solide et le fluide, exprimée en $[K]$.

Pr : est le nombre de Prandtl

ν : est la viscosité cinématique du fluide, exprimée en $[m^2/s]$.

3.7 Transfert radiatif

Le rayonnement thermique est un mode de transfert d'énergie basé sur l'émission et l'absorption de **rayonnement électromagnétique** par les corps en fonction de leur température. Ce phénomène se produit indépendamment de l'état physique ou chimique des matériaux concernés. Contrairement à la conduction et à la convection, le transfert radiatif peut se produire **dans le vide**, sans nécessiter de support matériel.

Ce rayonnement thermique couvre une plage de longueurs d'onde allant approximativement de **0,1 μm à 100 μm** , englobant notamment le **domaine du visible** (de 0,4 μm à 0,8 μm), bien que cette partie ne représente qu'une fraction restreinte du spectre électromagnétique global.

L'ETR est résulte d'un bilan énergétique effectué sur un volume élémentaire de fluide, et repose sur le principe de conservation de la luminance.

La luminance spectrale est définie comme la quantité d'énergie rayonnée dans une direction donnée $\Delta^{\vec{}}$, par unité de surface perpendiculaire à cette direction, par unité de longueur d'onde $d\lambda$ autour de λ , et par unité d'angle solide $d\Omega$ autour de $\Delta^{\vec{}}$.

L'expression de la luminance spectrale d'une source ponctuelle de rayonnement est notée $I_{\lambda}(s, \Delta^{\vec{}})$. Elle représente l'intensité du rayonnement reçu à une distance s de la source, dans une direction définie par le vecteur unitaire $\Delta^{\vec{}}$, pour une longueur d'onde donnée λ .

Cette expression est donnée par la formule suivante :

$$I_{\lambda}(s, \Delta^{\vec{}}) = \frac{dQ}{ds \cdot \cos\theta \cdot d\lambda \cdot d\Omega} \quad (3.12)$$

Où dQ est la quantité d'énergie lumineuse émise dans une direction donnée à une longueur

d'onde donnée, ds est l'élément d'aire sur la surface de la source lumineuse, $\cos \theta$ est le cosinus de l'angle entre la normale à la surface de la source et la direction de l'observation, $d\lambda$ est l'élément de longueur d'onde et $d\Omega$ est l'élément de solide angle [47].

3.8 Conduction thermique

La conduction est le mécanisme de transfert de chaleur à travers un matériau solide ou un fluide immobile, dû à un gradient de température. Elle est gouvernée par la loi de Fourier [46] :

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (DT/Dx) \quad (3.13)$$

où :

\vec{q} est le vecteur densité de flux thermique [W/m^2],
 k est la conductivité thermique du matériau [$W/m \cdot K$],
 ∇T est le gradient de température [K/m].

3.9 Convection thermique

La convection est un mode de transfert de chaleur dans les fluides (gaz ou liquides), qui combine un transport par mouvement du fluide (convection forcée ou naturelle) et un transfert par conduction au sein du fluide [46].

Elle est modélisée par :

$$\vec{q} = h(T_s - T_f) \quad (3.14)$$

où :

h est le coefficient de convection [$W/m^2 \cdot K$],
 T_s est la température de la surface,
 T_f est la température du fluide environnant.

3.10 Les Modèles Physique

AB = CD	3
AD = BC	3
CK	5
EF	1
GH	2.5
HI	2
KG	0.5
moucharabieh	0.2 / 0.12

Premier Cas :

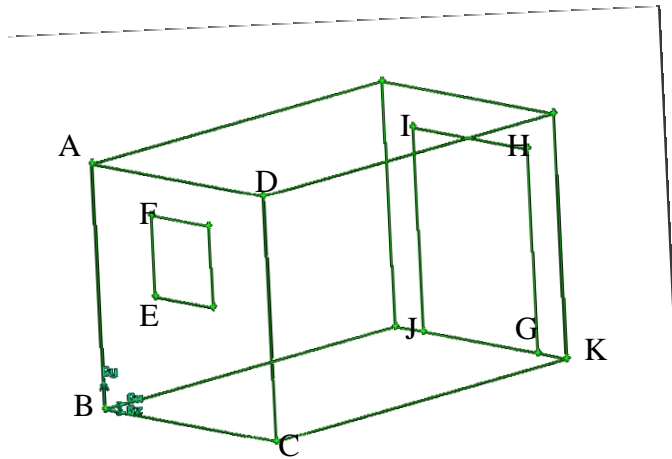
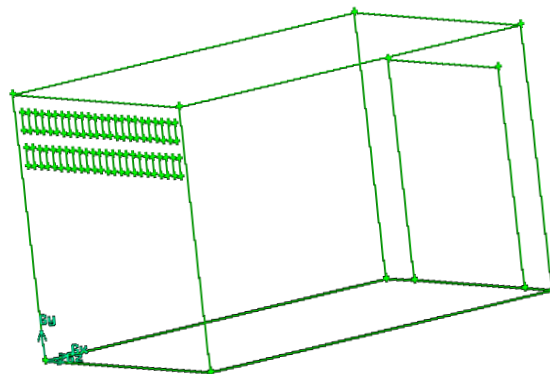


Schéma II. 2Premier cas étudié

Deuxième Cas :



Troisième Cas :

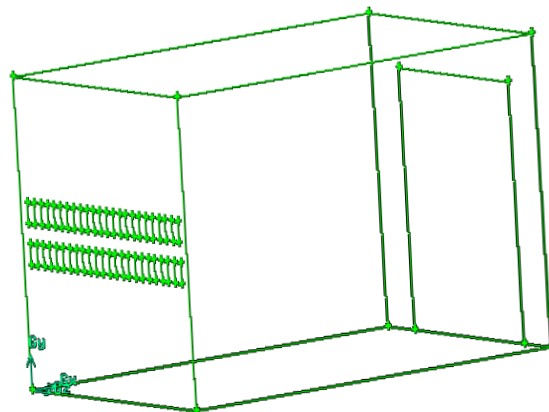


Schéma II. Troisième cas étudié.

3.11 les conditions aux limites

Tableau 1 Propreté thermo-physique de l'air.

PROPRETES	SYMBOLE	UNITE	VALEUR
CAPACITE THERMIQUE	C_p	J/Kg.K	1006.43
MASSE VOLUMIQUE	ρ_o	Kg/m ³	1.225
CONDUCTIVITE THERMIQUE DU FLUIDE	λ_f	W/m.K	0.0242
COEFFICIENT DE DILATATION	β	1/K	0.0033
VISCOSITE CINEMATIQUE	θ	m ² /s	1.7894×10^{-5}

Tableau 2 Propreté thermo-physique de beton.

PROPRETES	SYMBOLE	UNITE	VALEUR
CAPACITE THERMIQUE	C_p	J/Kg.K	880
MASSE VOLUMIQUE	$\rho_{\text{béton}}$	Kg/m ³	2400
CONDUCTIVITE DE BETON	$\lambda_{\text{béton}}$	W/m.K	1.75

3.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le cadre théorique et les outils mathématiques nécessaires à la modélisation des phénomènes de transfert thermique et de dynamique des fluides dans le système étudié. Nous avons détaillé les équations fondamentales, telles que les équations de Navier-Stokes pour le mouvement des fluides, ainsi que l'équation de l'énergie pour le transfert de chaleur.

Nous avons également abordé les différents modes de transfert thermique, notamment la conduction, la convection et le rayonnement, en expliquant leur principe, leur formulation et leur rôle dans le comportement thermique global de la pièce. Ces éléments nous permettent de représenter de manière rigoureuse les échanges d'énergie et de quantifier l'influence des paramètres physiques sur les performances thermiques de l'espace étudié.

L'ensemble de ces outils fournit une base solide pour l'analyse numérique qui suivra. Ils permettent non seulement de simuler avec précision le comportement du fluide et les transferts thermiques associés, mais également de mieux interpréter les résultats issus des simulations et d'en tirer des conclusions pertinentes. Ce chapitre constitue ainsi une étape clé de notre démarche, en posant les fondations nécessaires pour évaluer l'impact architectural et énergétique des dispositifs de ventilation naturelle, tels que le moucharabieh.

Chapitre 4 : Simulation Numérique

4.1 Introduction

La géométrie constitue l'un des fondements essentiels de l'architecture, car elle permet de structurer l'espace, d'en définir les proportions, et d'en contrôler les perceptions visuelles et fonctionnelles. Dans le cadre de ce projet, la chambre a été conçue comme un espace où la géométrie joue un rôle à la fois structurant et symbolique. Ce chapitre se propose d'analyser en détail l'organisation spatiale, les formes et les compositions géométriques qui définissent cette chambre, en mettant l'accent sur l'intégration du moucharabieh dans la conception globale.

La chambre se caractérise par une géométrie rigoureusement définie, combinant des volumes simples et lisibles (comme le cube ou le parallélépipède) avec des éléments décoratifs complexes inspirés de l'art islamique. Les dimensions de la pièce, les hauteurs sous plafond, les ouvertures, ainsi que les éléments de mobilier intégrés ont été conçus selon une trame géométrique précise, assurant une harmonie d'ensemble et une fluidité fonctionnelle. Le positionnement des parois, et des axes de circulation ont été étudiés en relation avec l'orientation, la lumière naturelle et les principes de confort spatial.

Au cœur de cette composition géométrique se trouve le moucharabieh, élément architectural majeur qui structure la façade intérieure ou la séparation entre espaces. Sa présence ne se limite pas à une fonction ornementale : il influence la perception de l'espace par le jeu des ombres projetées, la modulation de la lumière, et la création de rythmes visuels répétitifs. Le motif du moucharabieh utilisé dans cette chambre a été conçu selon une logique géométrique basée sur des grilles modulaires régulières, le motif utilisé est le carré ou le rectangle, fréquemment rencontrés dans le patrimoine islamique.

L'étude géométrique de la chambre inclut également une réflexion sur les proportions : le rapport entre la hauteur, la largeur et la profondeur de l'espace a été pensé pour garantir une sensation d'équilibre et de confort. Ces proportions ont parfois été directement inspirées du nombre d'or ou d'autres systèmes de composition traditionnels, utilisés dans l'architecture islamique et méditerranéenne. Le moucharabieh, en tant que filtre spatial, contribue à renforcer cette harmonie en introduisant une trame intermédiaire entre l'intérieur et l'extérieur, entre l'intime et le public.

Sur le plan technique, la mise en œuvre de cette géométrie repose sur l'utilisation d'outils numériques de modélisation 2D et 3D, permettant de générer des motifs complexes tout en garantissant leur faisabilité constructive. La géométrie du moucharabieh a été adaptée à l'échelle de la chambre, aux contraintes structurelles et aux matériaux choisis, dans une logique de précision et d'optimisation de la fabrication.

En somme, ce chapitre met en lumière comment la géométrie, en tant que langage architectural, structure et enrichit la chambre "Moucharabieh", en alliant rigueur formelle, inspiration culturelle et performances spatiales. Par l'étude des formes, des proportions et des trames décoratives, nous verrons comment la géométrie devient le fil conducteur d'une conception architecturale intégrée, sensible et contextuelle.

Il est important de noter que l'orientation et le positionnement de la chambre n'ont pas été pris en considération dans cette approche. L'accent a été mis principalement sur la composition et géométrique du moucharabieh, indépendamment des contraintes d'ensoleillement, de ventilation ou de vues extérieures.

4.2 Création de la géométrie

4.2.1 Description de Gambit

La création de la géométrie a été réalisée à l'aide du logiciel GAMBIT, un outil de prétraitement largement utilisé dans le domaine de la simulation numérique. GAMBIT a permis de modéliser avec précision les éléments géométriques du moucharabieh grâce à ses fonctionnalités de dessin et de maillage adaptées aux formes répétitives et modulaires. Cette étape a été essentielle pour préparer une géométrie propre et structurée, en vue d'analyses ultérieures, notamment en mécanique des fluides ou en étude thermique.



Cet outil permet de créer un volume 3D à partir d'éléments géométriques de base ou par des opérations booléennes sur des surfaces existantes. Il s'agit d'une étape essentielle dans la modélisation, car les volumes sont les entités sur lesquelles s'appliquent les maillages volumiques pour les simulations CFD.



Cet outil permet de générer un maillage surfacique ou volumique à l'intérieur d'une surface ou volume 3D déjà défini dans la géométrie. C'est une étape cruciale pour la simulation numérique, car le solveur (comme FLUENT) a besoin d'un maillage du domaine entier pour résoudre les équations.



Cet outil permet à l'utilisateur de définir les conditions aux limites pour les différentes zones de la géométrie maillée dans Gambit. C'est une étape cruciale avant l'exportation vers un solveur CFD comme Fluent.



pour crée des points sur le plan



Pour traçage des lignes



Création des surfaces



Déclarer le volume totale

4.2.2 Dessin de la géométrie

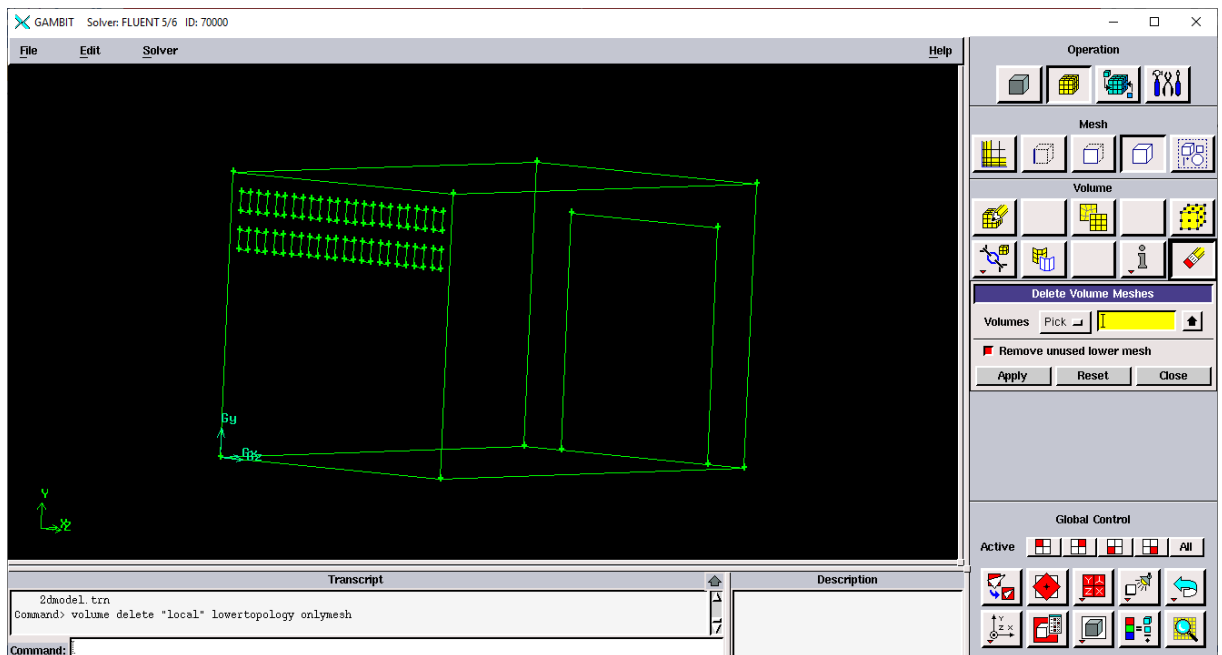


Figure 4.1. Création de la géométrie.

4.2.3 Choix de maillage

Pour notre géométrie on a choisi un maillage de type triangulaire définie par le nombre d'intervalles.

Montrer dans les figures suivantes :

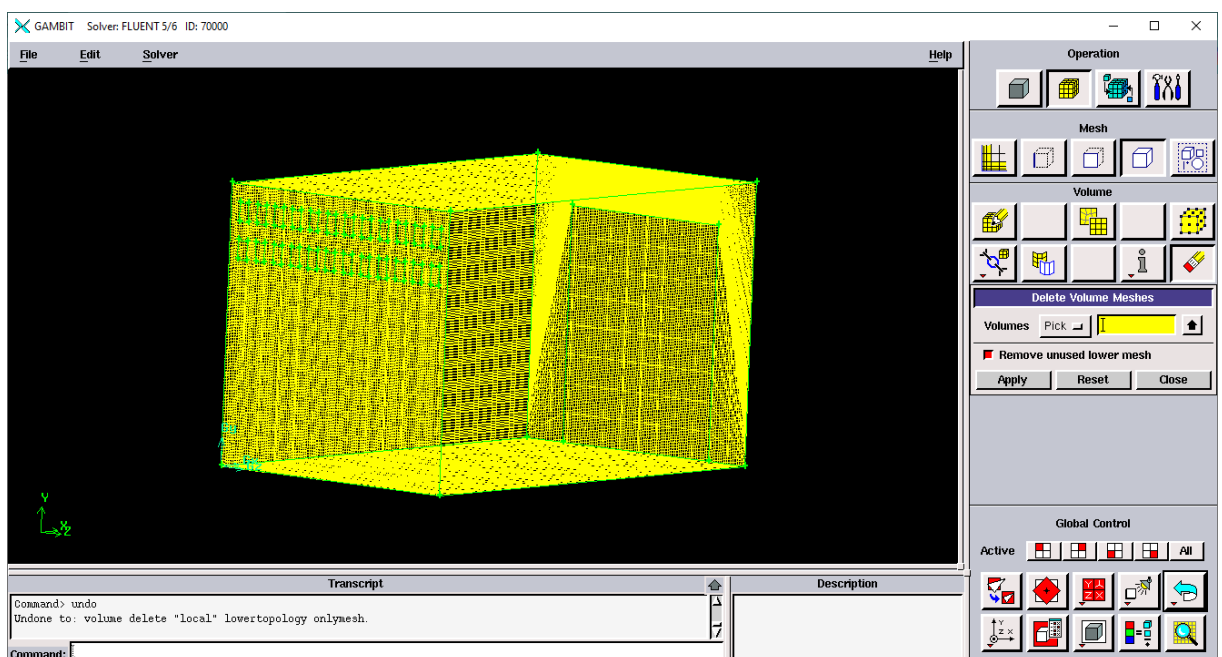


Figure 4.2. Maillage de la chambre

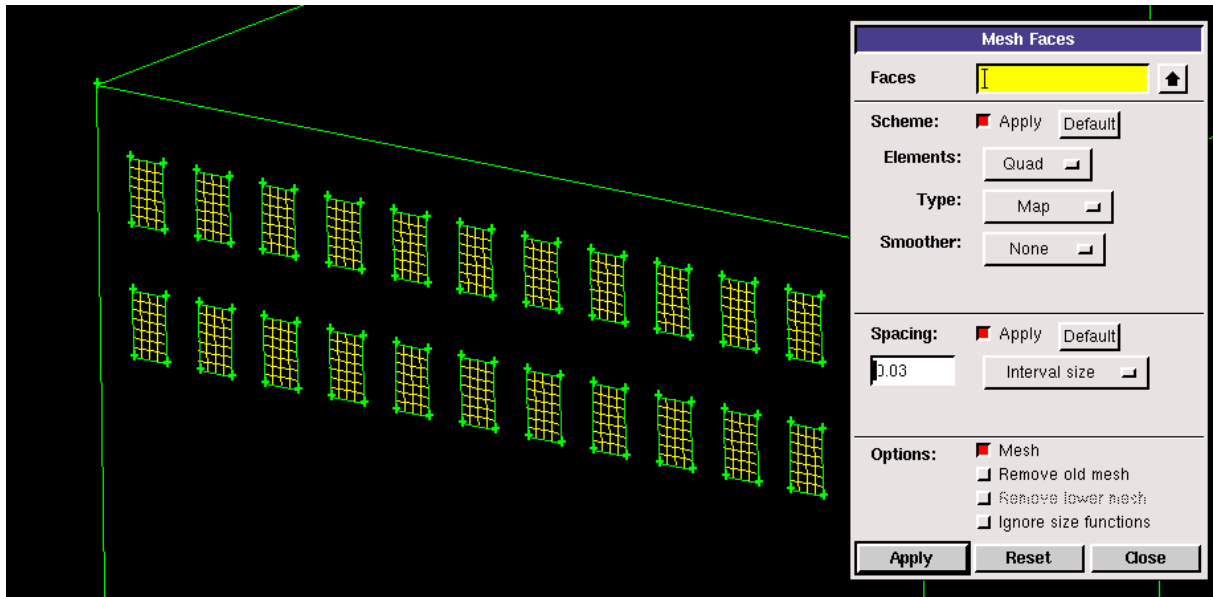


Figure 4.3. Maillage des ouvertures (moucharabieh)

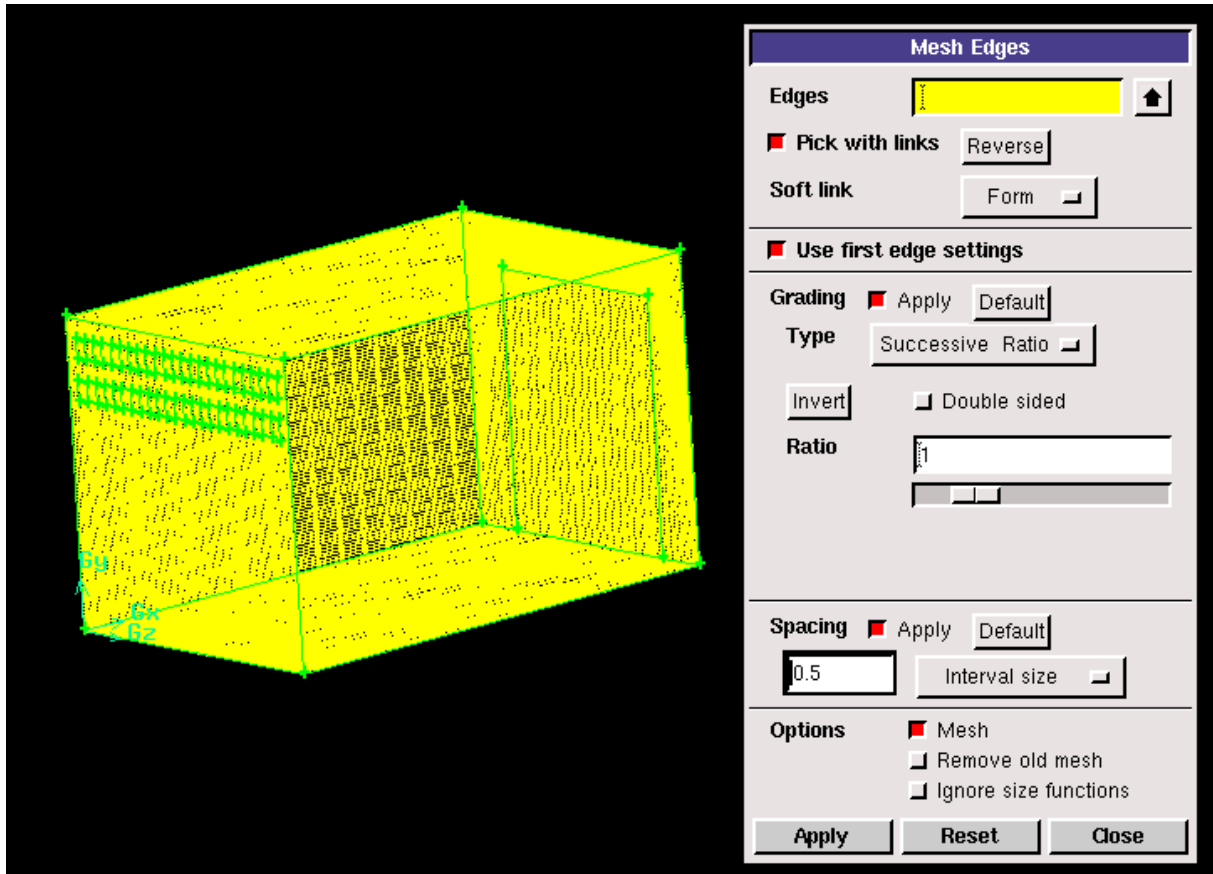


Figure 4.4. adaptation des mesh

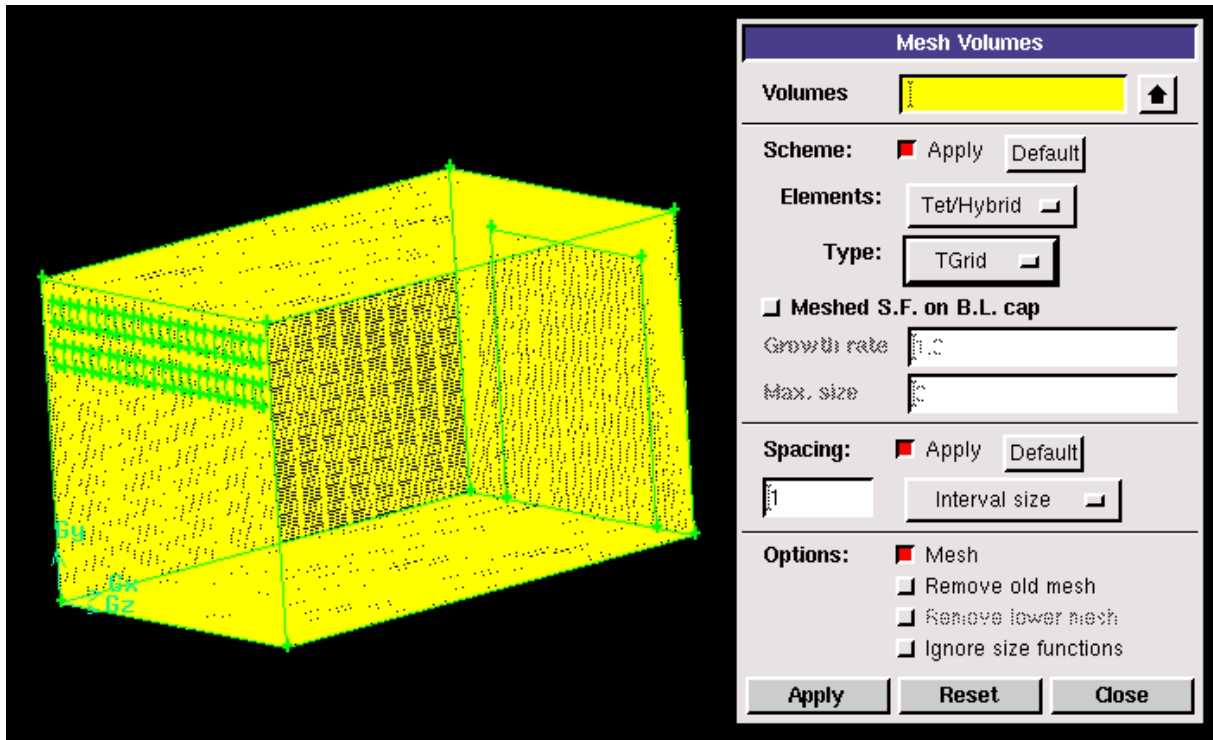


Figure 4.5. Mesh volume

4.2.4 Les conditions aux limites

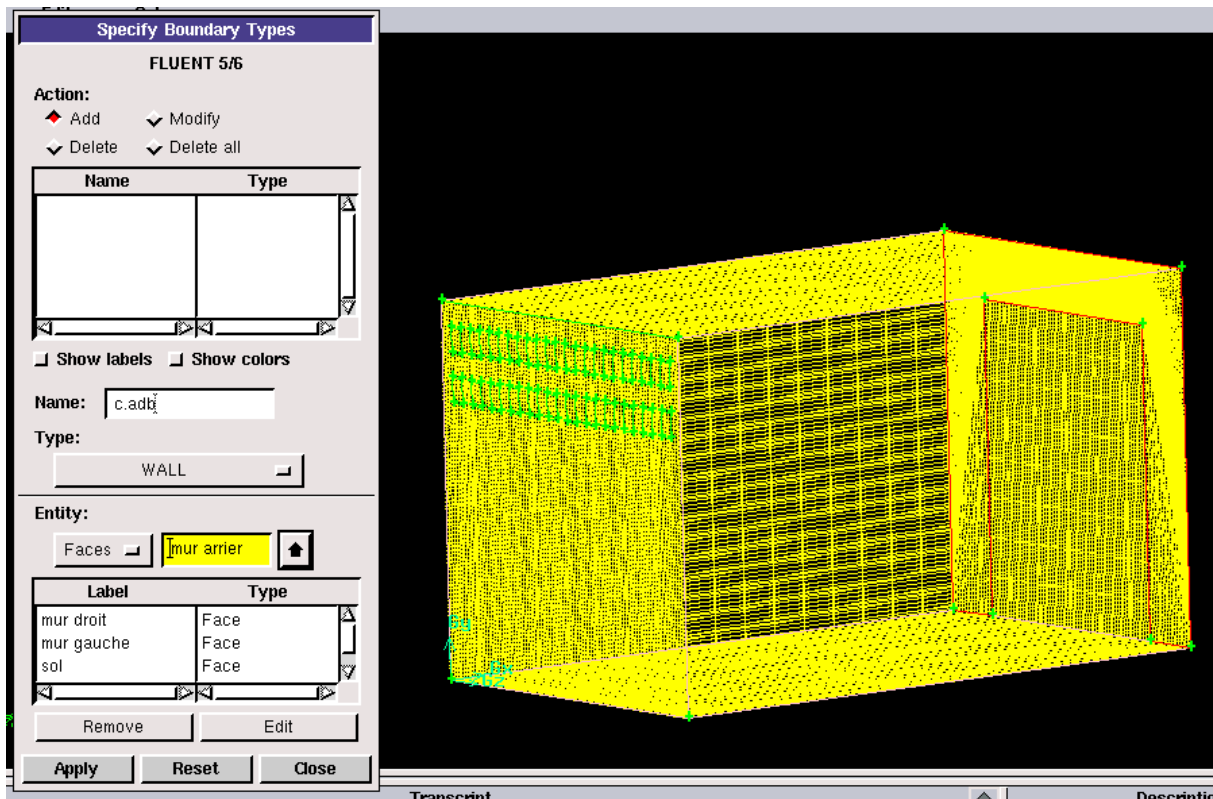


Figure 4.6. Condition aux limites des parois

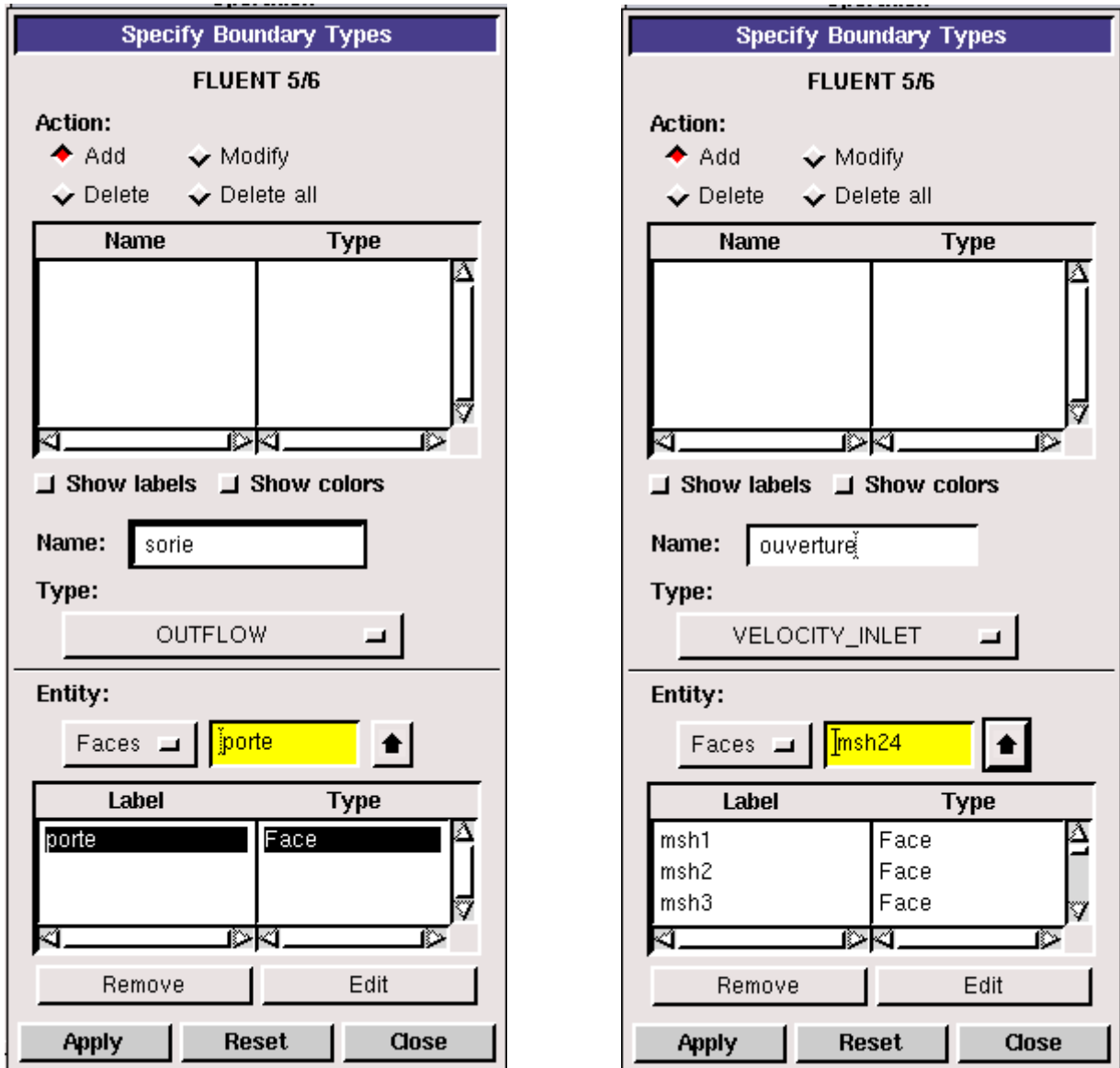


Figure 4.7. Conditions aux limites d'entrée et de sortie.

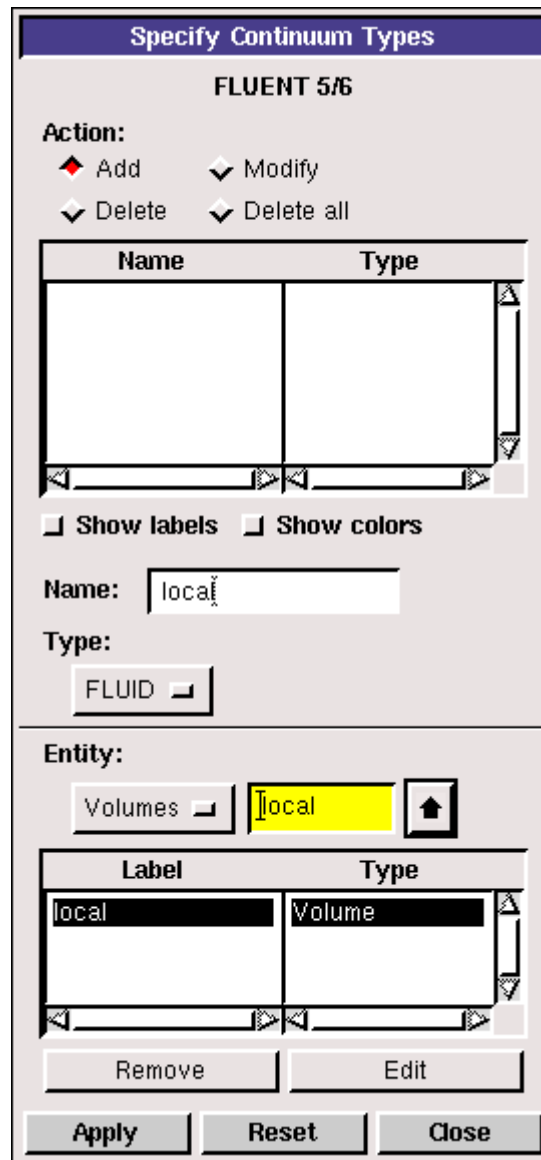


Figure 4.8. Conditions aux limites de volume intérieur.

4.2.5 Exportation de fichier

Une fois la géométrie construite et les conditions aux limites correctement définies, il est essentiel d'exporter le maillage vers le solveur Fluent. Pour cela, on suit le chemin suivant :

File → Export → Mesh.

Le maillage doit être sauvegardé au format « .msh », qui est le format reconnu par Fluent. Cette étape garantit que le maillage et les informations associées seront correctement importés et utilisables dans Fluent.

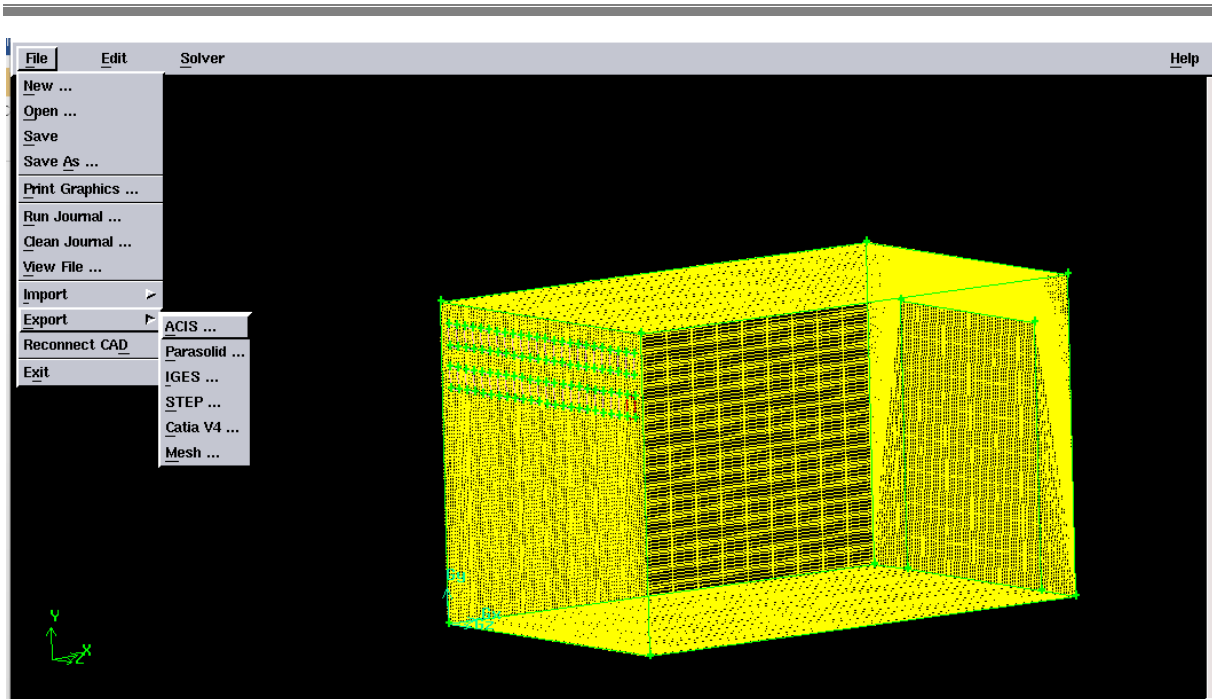


Figure 4.9. Exportation de fichier «.mch »

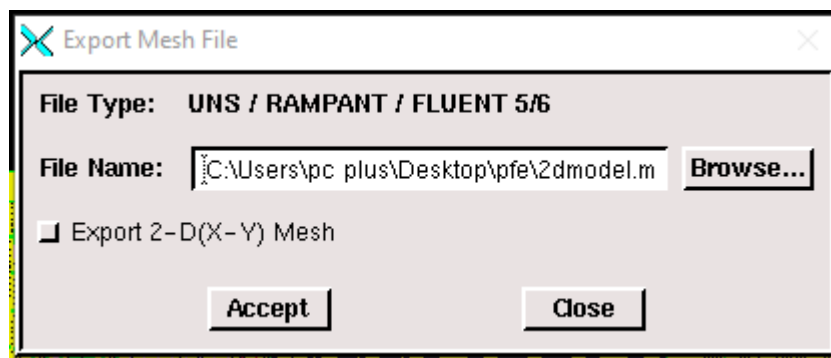


Figure 4.10. Choix de fichier d'exportation.

4.3 Analyse numérique

4.3.1 Introduction vers fluent

ANSYS Fluent est un logiciel de simulation numérique spécialisé dans la dynamique des fluides (CFD – Computational Fluid Dynamics). Il permet d'analyser et de prédire le comportement des fluides (liquides et gaz), ainsi que les phénomènes liés au transfert de chaleur, aux réactions chimiques, à l'aérodynamique, et à d'autres processus physiques.

Utilisé dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, l'automobile, l'énergie, l'environnement ou encore la biomédecine, Fluent est un outil puissant qui aide les ingénieurs et chercheurs à modéliser des écoulements complexes autour ou à l'intérieur de structures, dans des conditions réalistes.

Grâce à une interface conviviale et des capacités de calcul avancées, Fluent permet de :

1. Résoudre les équations de Navier-Stokes de manière numérique.

2. Appliquer des conditions aux limites adaptées à chaque cas.
3. Visualiser les résultats sous forme de champs de pression, de vitesse, de température, etc.
4. Optimiser des conceptions sans passer immédiatement par des prototypes physiques coûteux.

Fluent s'intègre dans l'environnement ANSYS Workbench, facilitant ainsi la chaîne complète de simulation : de la création de la géométrie à l'analyse des résultats

4.3.2 Lancement de fluent

Notre travail est un 3D alors il faut choisir le 3D double précision

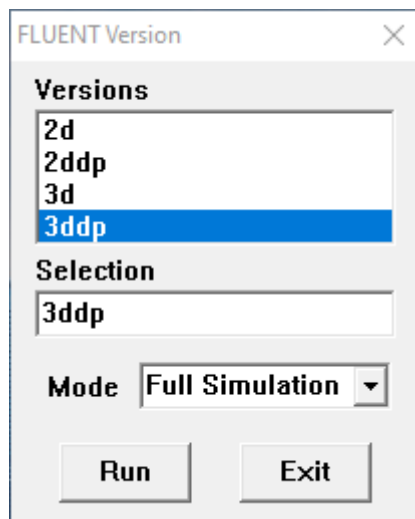


Figure 4.11. Le lancement de fluent

Et maintenant sélectionné le fichier mech importé par GAMBIT

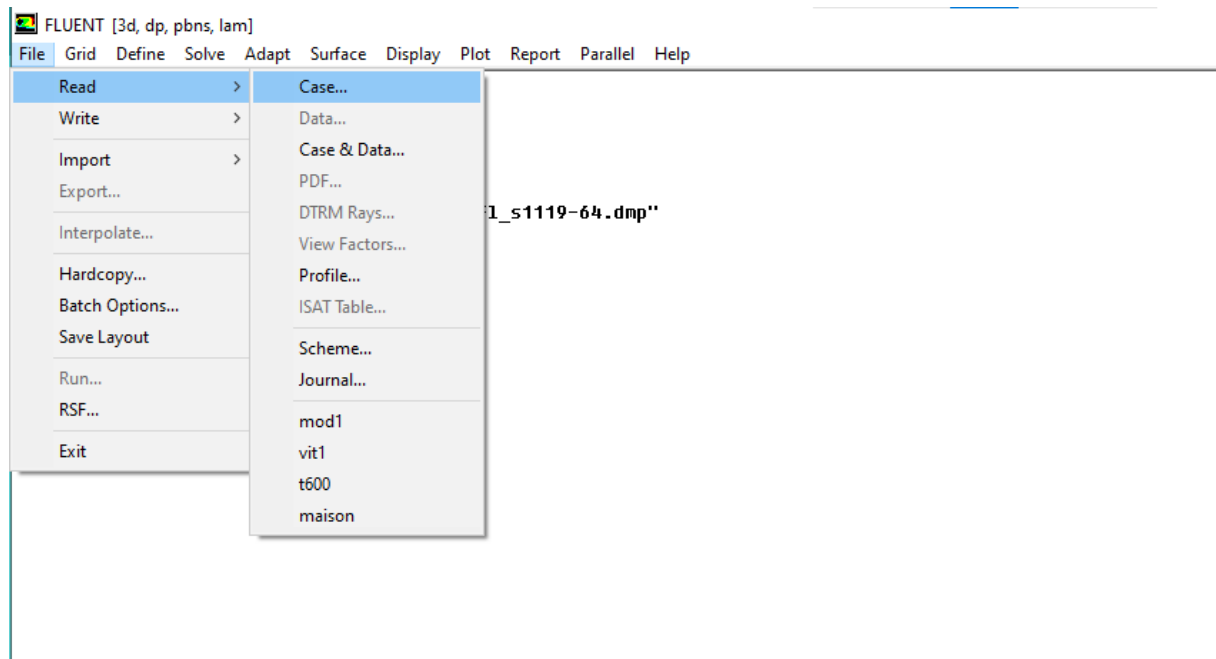


Figure 4.12. Importation de la géométrie

File → Read → Case.

4.3.3. choix de modèle

define → models → energy.

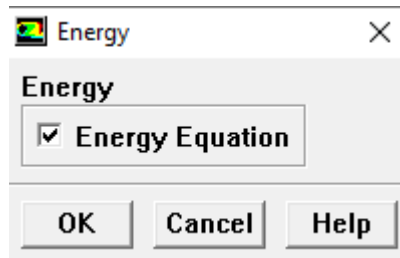


Figure 4.13. Choix de modèle énergie

4.3.4 Choix de matériaux

define → materials.

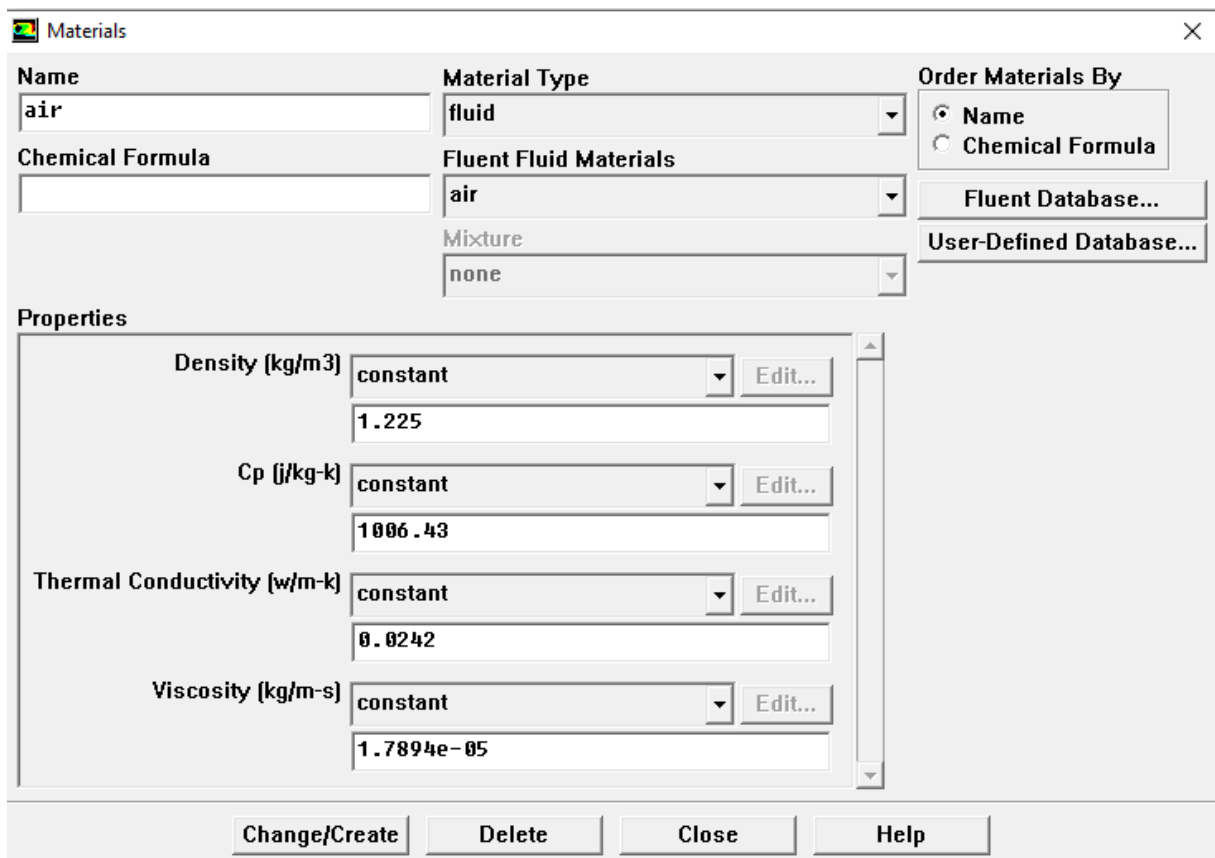


Figure 4.14. les paramètres du fluide

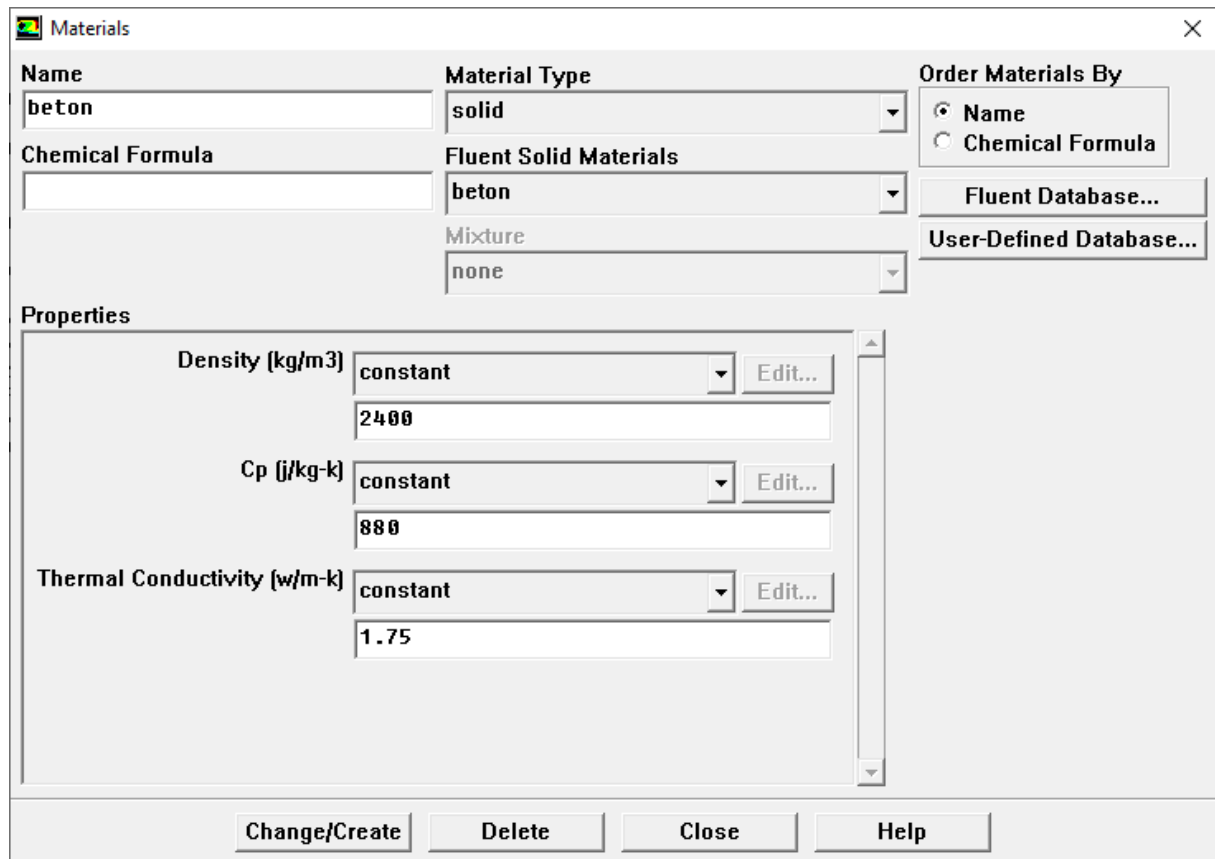


Figure 4.15. les paramètres du solide

4.3.4. conditions de fonctionnement

define → operating conditions.

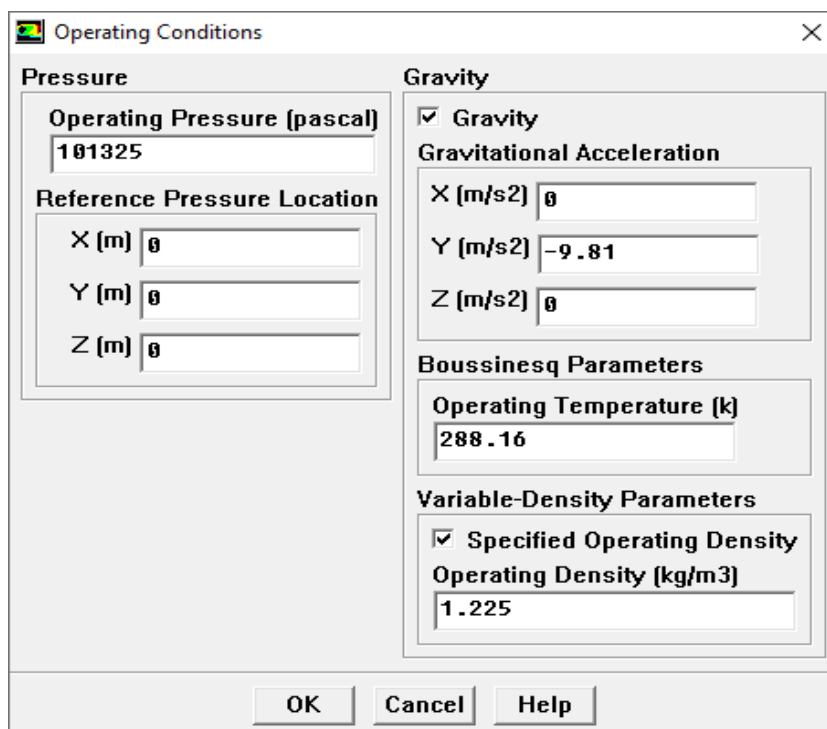


Figure 4.16. déclaration de la gravité

4.3.5. condition aux limites

define → boundary conditions.

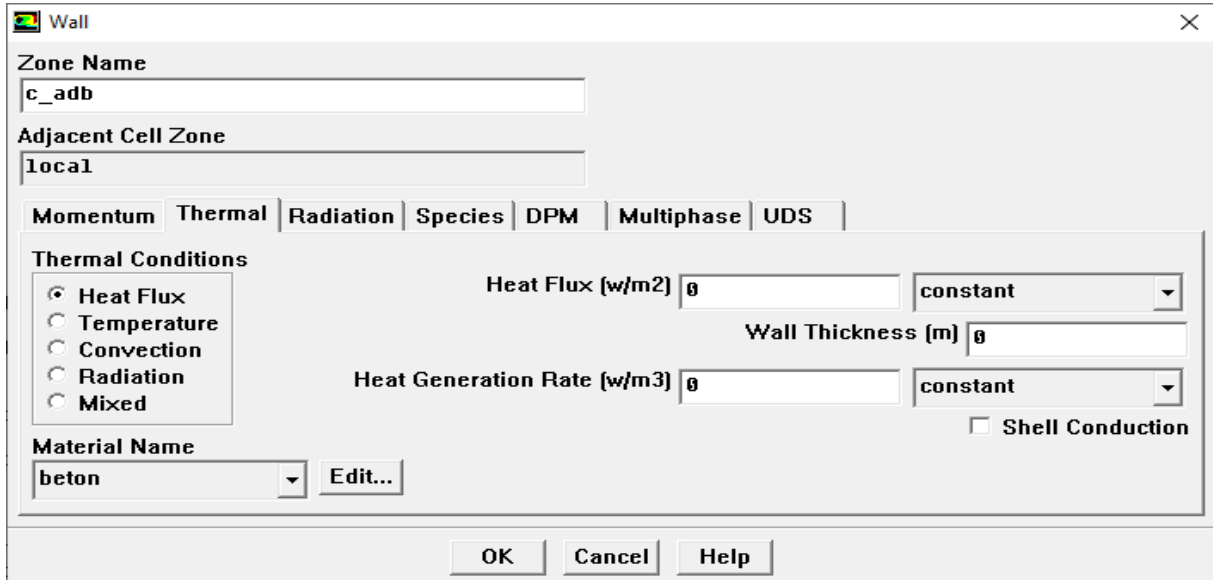


Figure 4.17. Condition aux limites des parois adiabatiques.

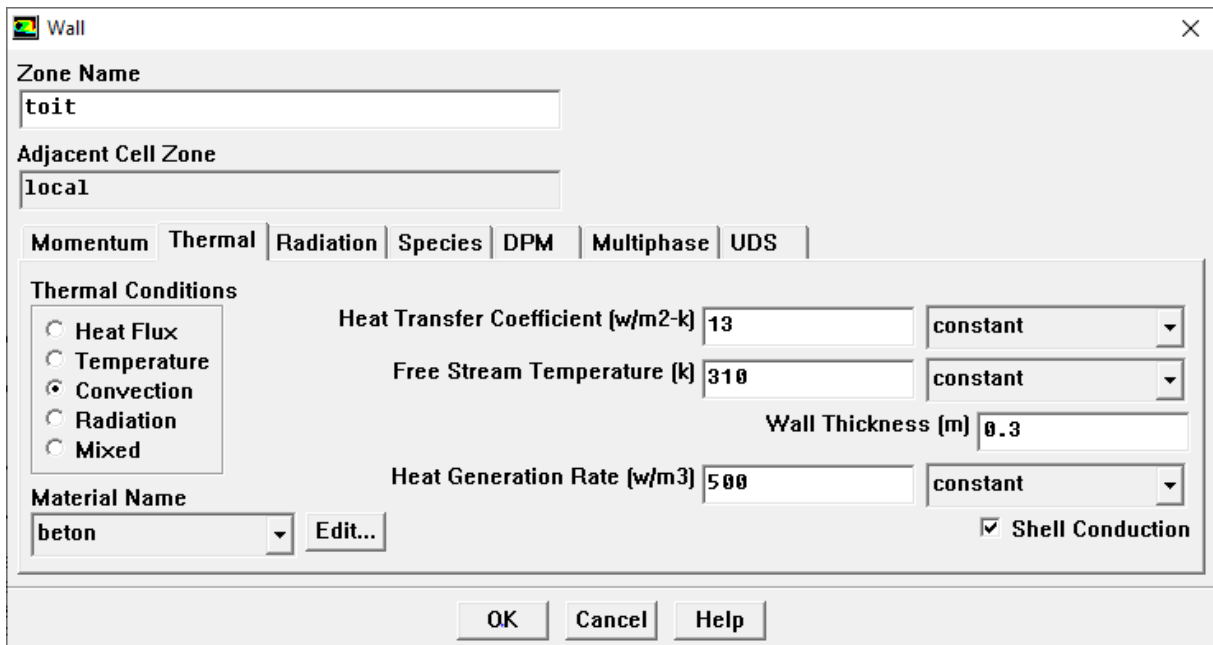


Figure 4.18. condition aux limites toit et mur avant

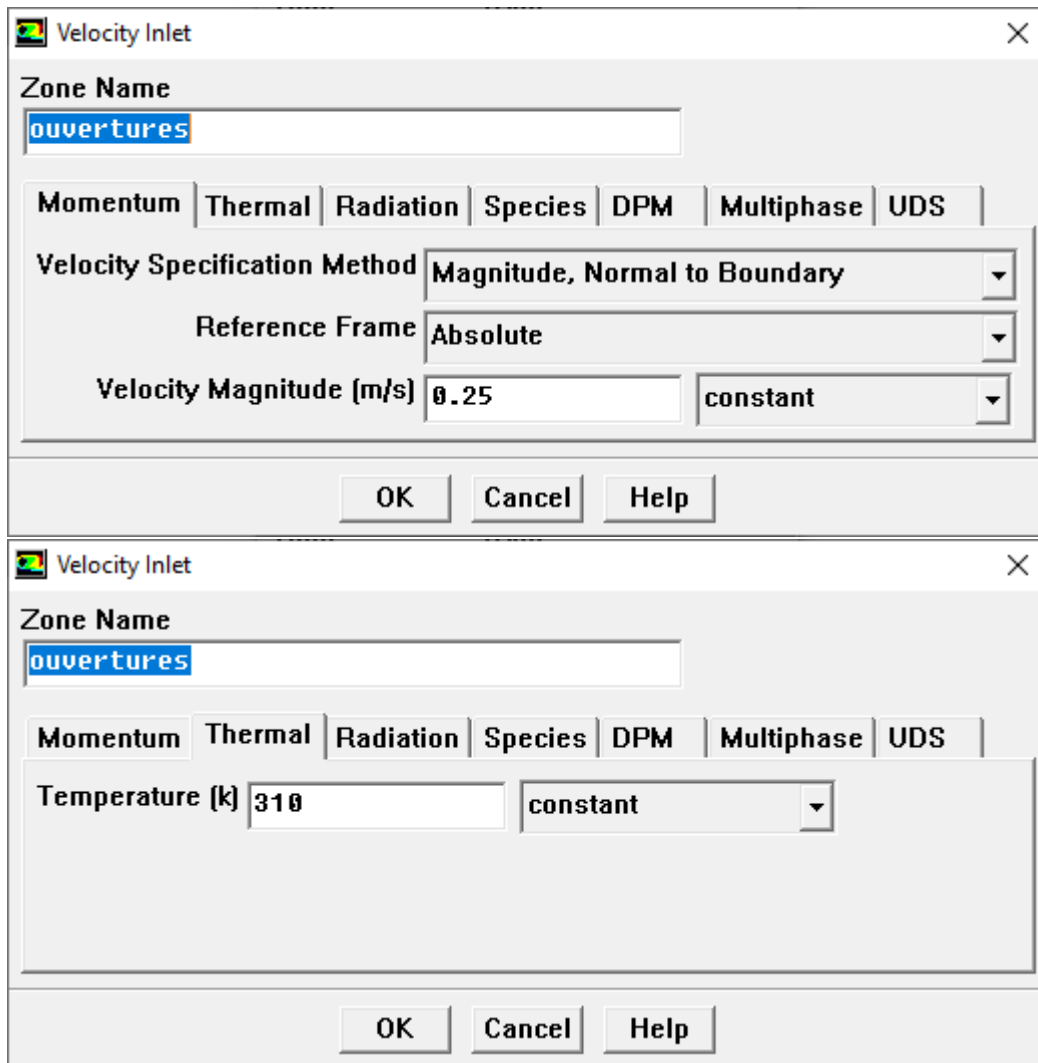


Figure 4.19. condition aux limites des ouvertures



Figure 4.20. condition aux limites de la porte

4.3.6. Initialisation de solution.

solve → initialize → initialize.

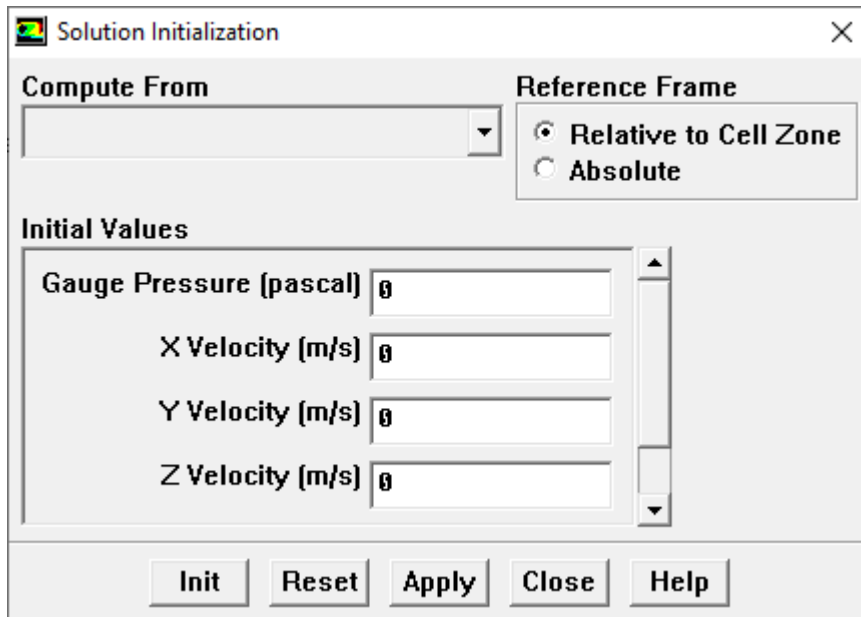


Figure 4.21. Initialisation

4.3.7. Itération

solve → iterate.

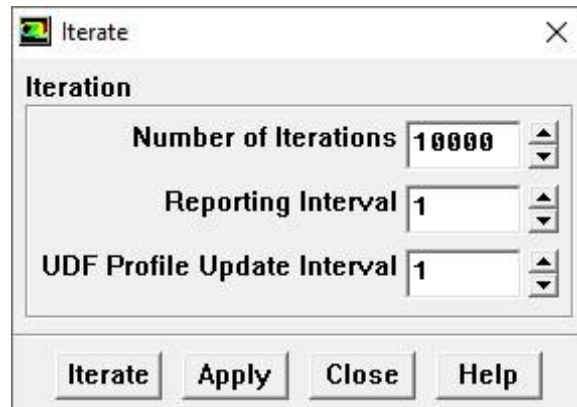


Figure 4.22. Itération

4.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini et construit la géométrie du domaine d'étude en tenant compte des contraintes physiques et des objectifs de la simulation. Cette étape constitue la base essentielle de toute analyse CFD, car la qualité de la géométrie influence directement la qualité du maillage et, par conséquent, la précision des résultats. Une attention particulière a été portée à la définition des zones critiques ainsi qu'à la préparation du domaine pour l'application correcte des conditions aux limites. La géométrie ainsi finalisée est maintenant prête à être utilisée pour l'étape de simulation dans Fluent. Après avoir exécuté le calcul dans Fluent, il est essentiel de comprendre le comportement du fluide, les distributions de pression, de vitesse et éventuellement de température. L'interprétation rigoureuse des résultats permet de vérifier la validité des hypothèses, d'évaluer la performance du système étudié, et d'en tirer des conclusions techniques pertinentes. Les visualisations (courbes, champs de vecteurs, profils) serviront de support à cette analyse.

Chapitre 05 :

Résultat et interprétation

5.1 Introduction

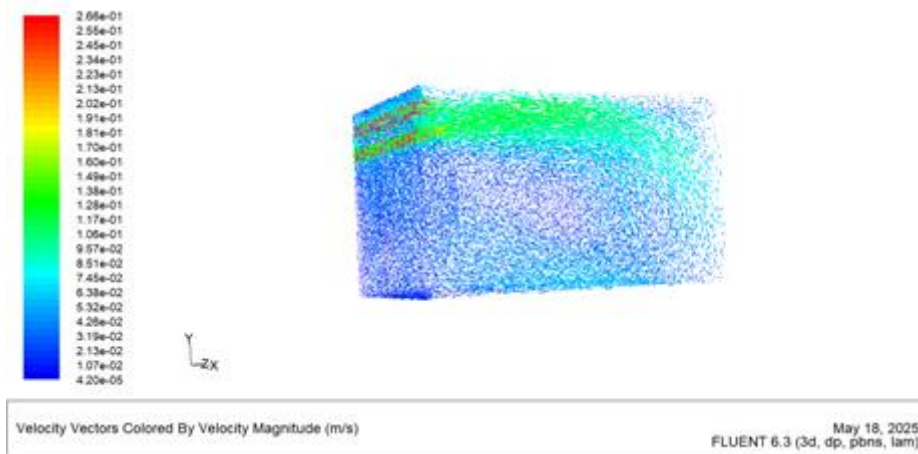
Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats est interprétation des simulations numérique réaliser par le logiciel fluent (6.3)

Les différents résultats de la simulation sont en termes de la vitesse et la température

Le maillage du solide (type béton) est un maillage hexaédrique de type map et le maillage de fluide (l'air) est un maillage hexaédrique de type submap

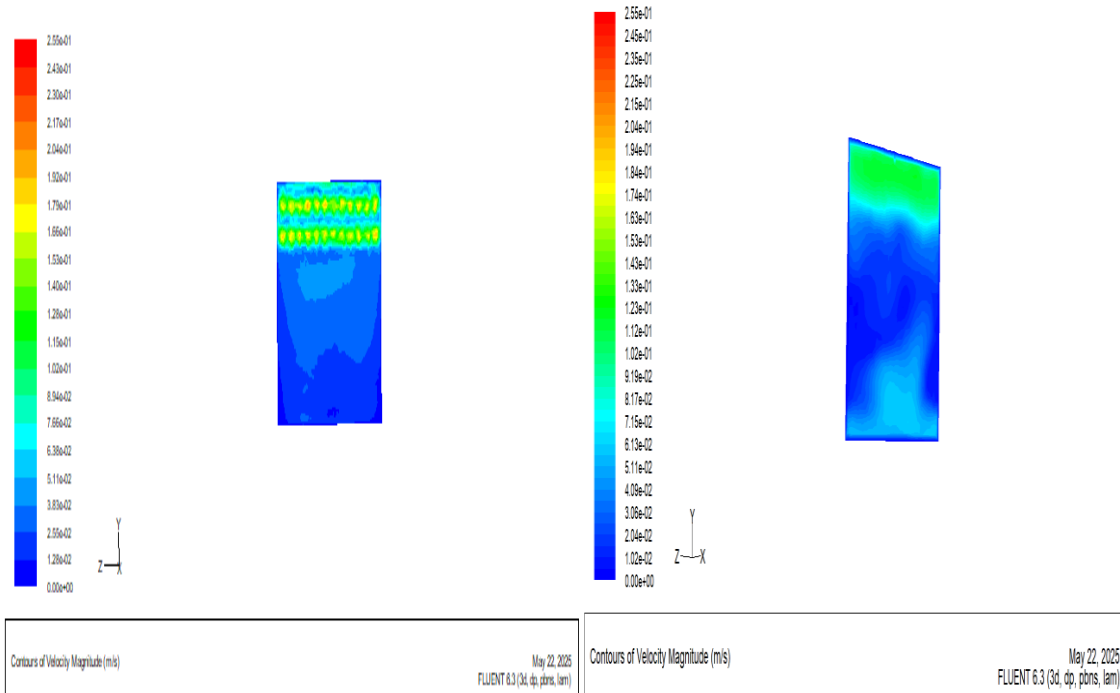
5.2 Effet du moucharabieh sur la distribution de la vitesse de l'air

$V=0.25 \text{ m/s}$ rayonnement= 500 w/m^2



Plane X= 0.2m

Plane X=2.5m



Plane X=4.8m Plane Z=1.5m

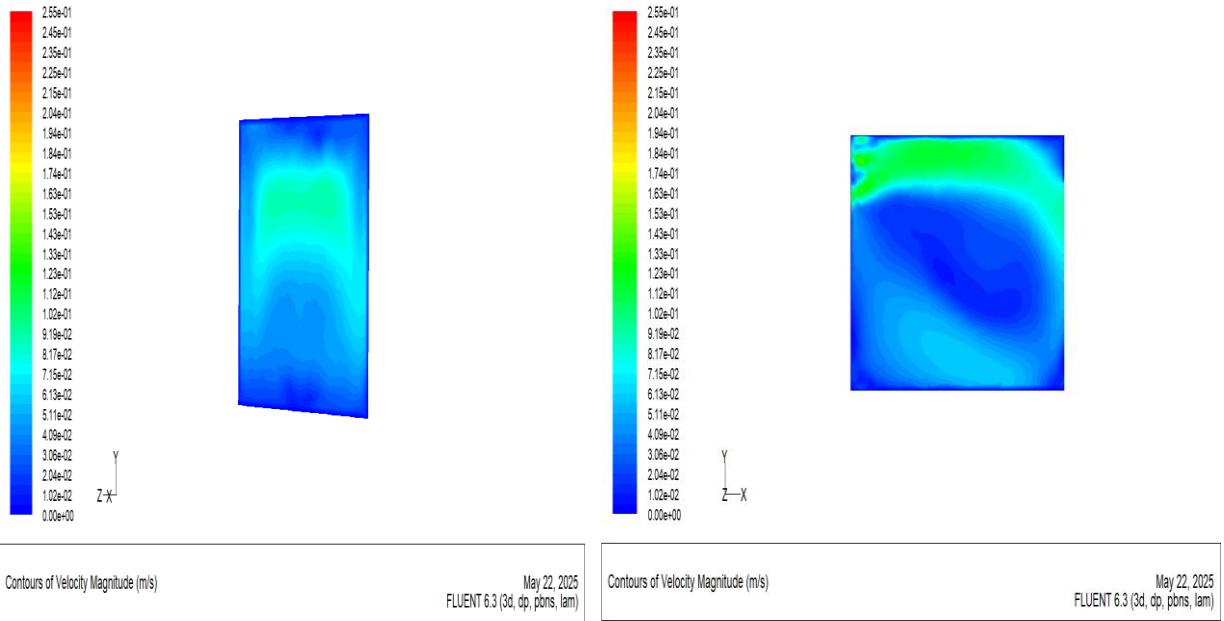
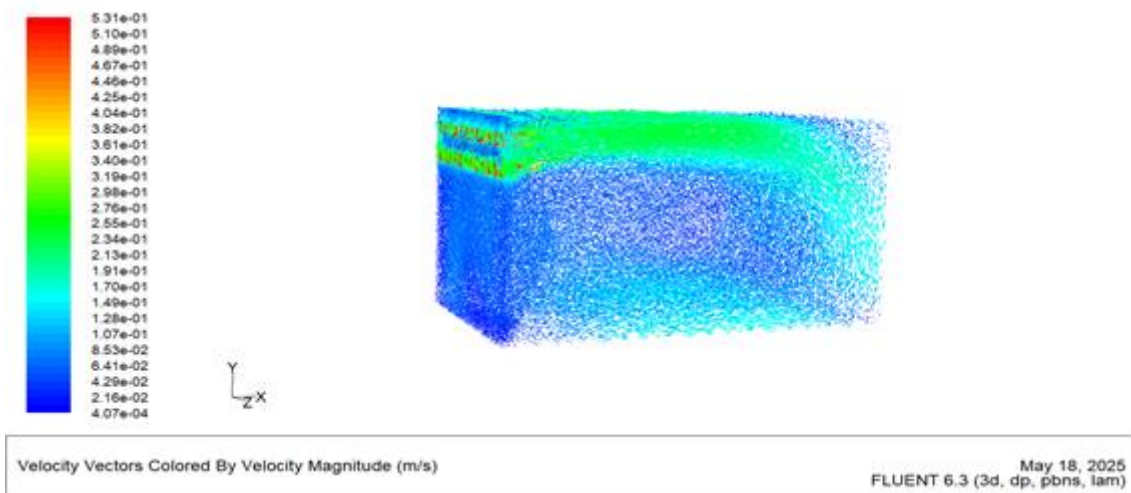


Figure 5.1. Distribution de la vitesse pour $v = 0.25$ m/s et rayonnement = 500 w/m².

On remarque que l'air commence à se réchauffer au contact des parois.



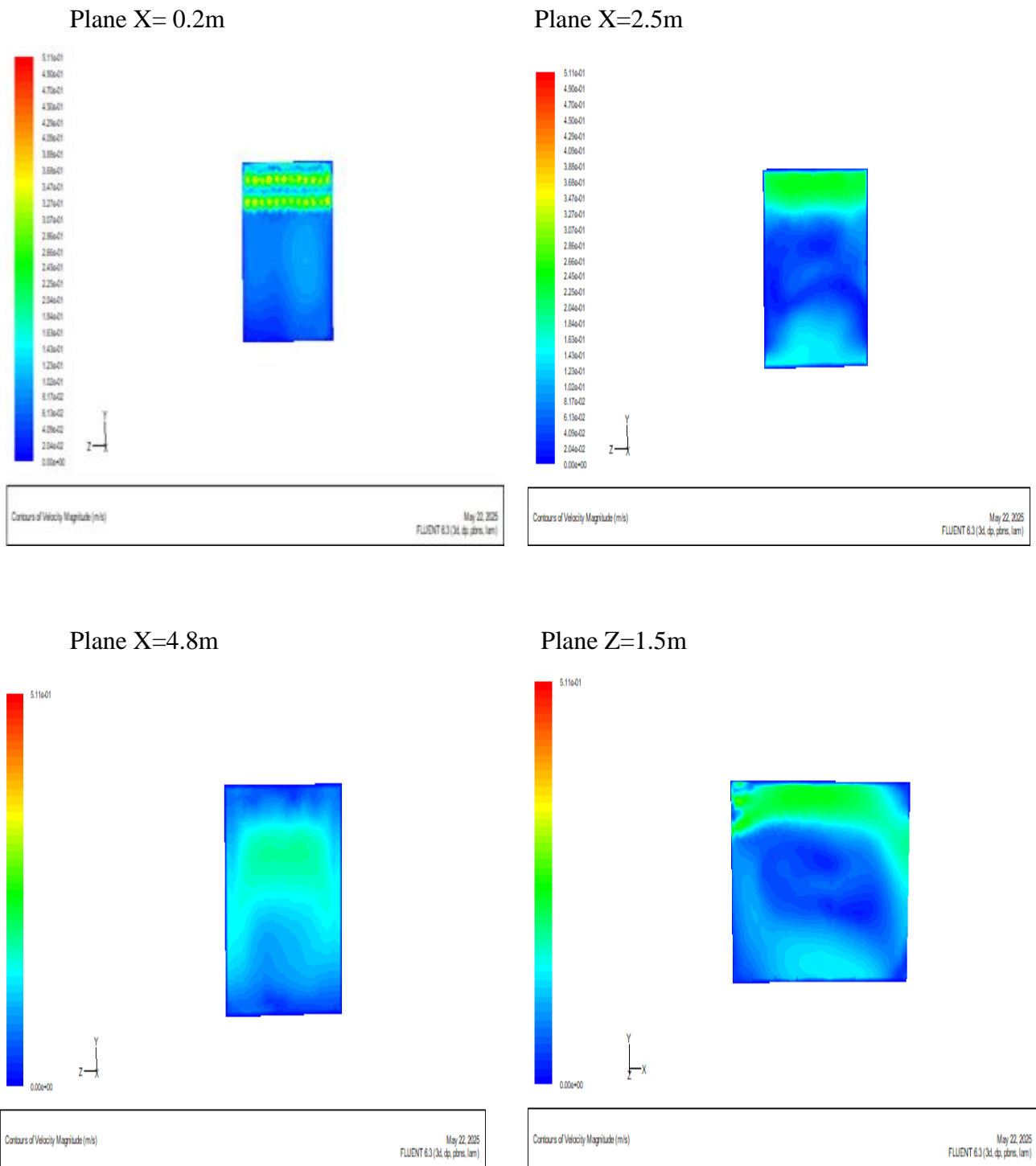
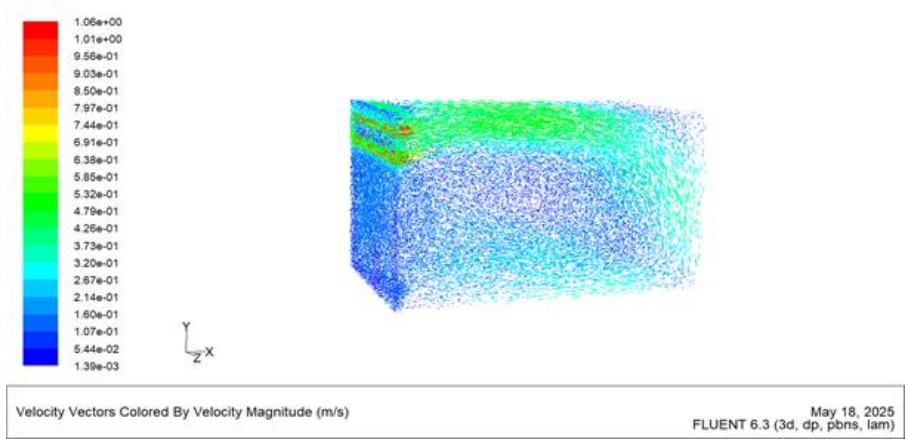


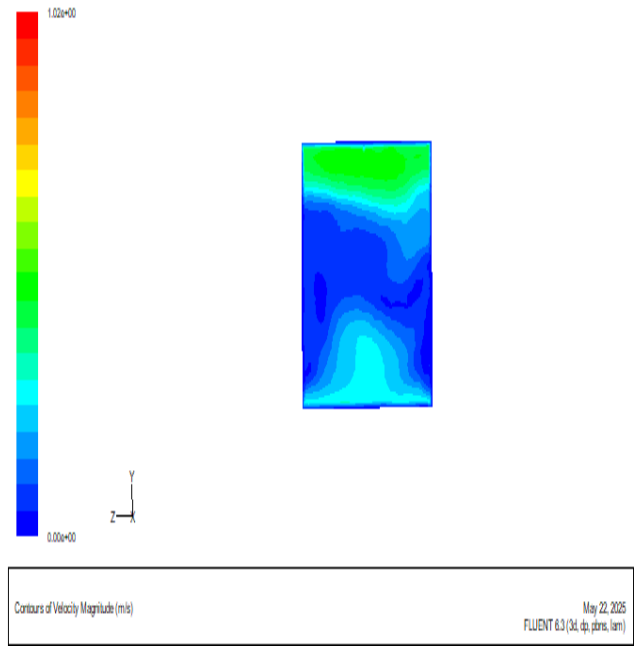
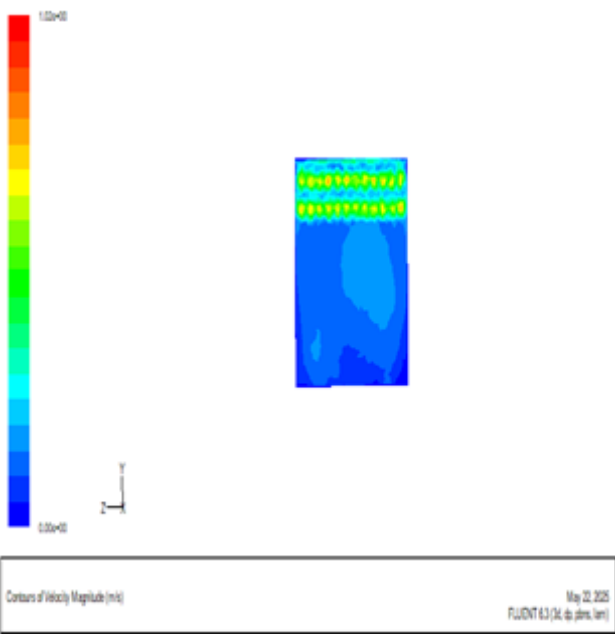
Figure 5.2. Distribution de la vitesse pour $v = 0.5$ m/s.

Le flux d'air est plus dense et mieux réparti dans la cavité.



Plane X=0.2m

Plane X=2.5m



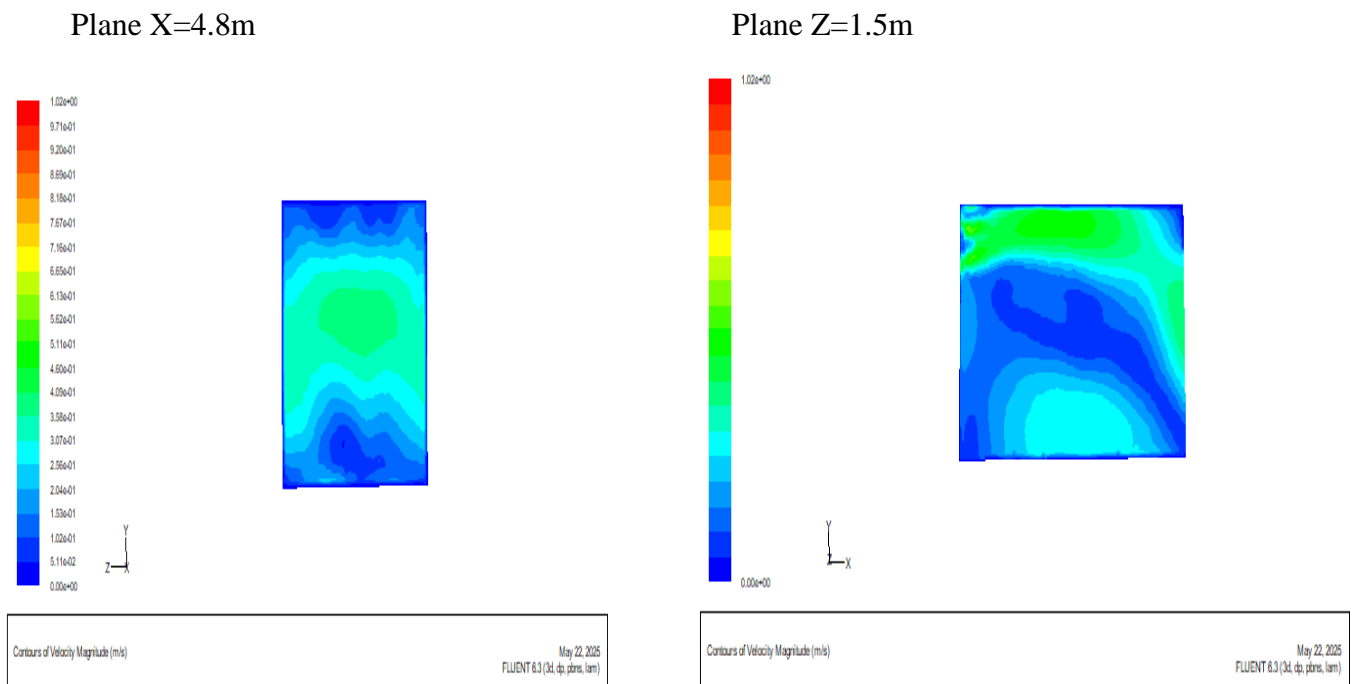


Figure 5.3. Distribution de la vitesse pour $v = 1 \text{ m/s}$.

On remarque d’après la figure 3 que l’écoulement devient plus homogène, ce qui améliore la ventilation.

D’après les figures 1. 2.3, on remarque que plus la vitesse d’entrée augmente, plus le flux d’air pénètre efficacement dans la cavité.

La présence du moucharabieh perturbe légèrement l’écoulement, induisant une distribution plus complexe mais favorisant une meilleure diffusion de l’air dans la pièce.

5.3 Effet sur la température

Les figures ci-dessous illustre la distribution de la température dans les cavités des différents modèles avec et sans moucharabieh

A l’entrée de la cavité la vitesse est de 0.25m/s , l’aire commence à chauffer au contact des parois

$V=1\text{m/s}$

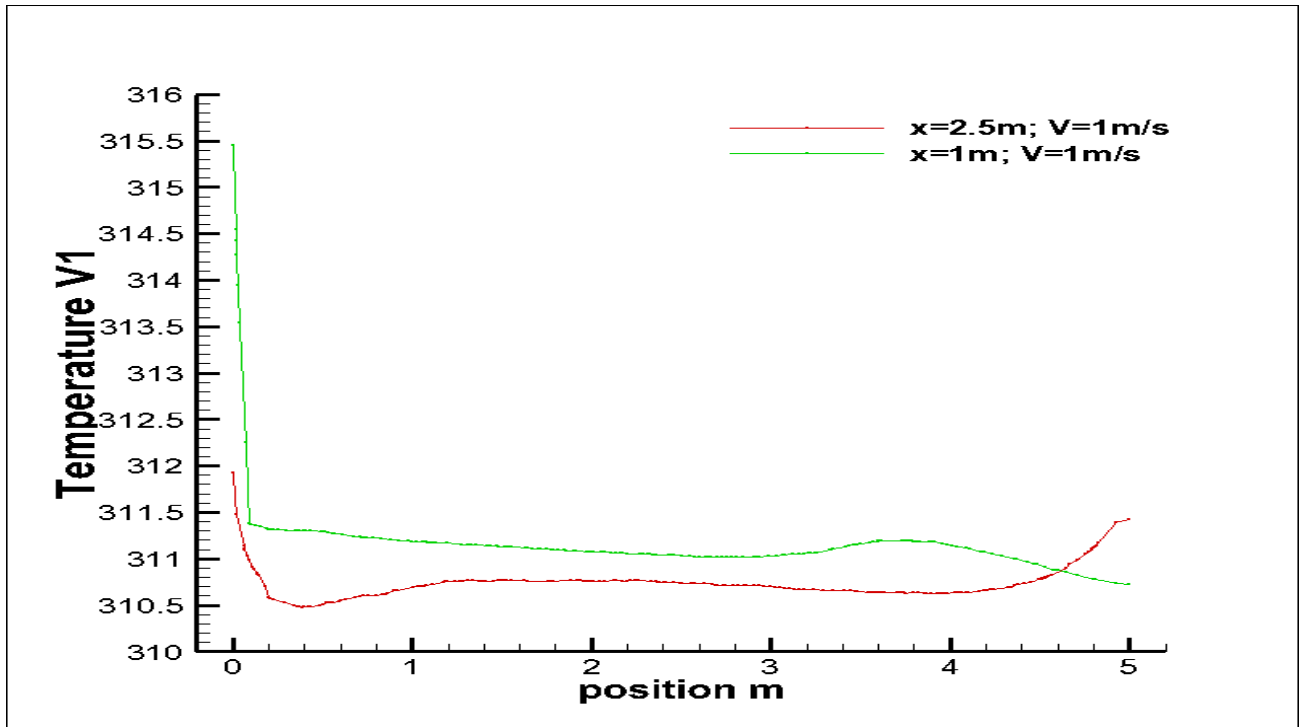


Figure 5.4. Température pour la vitesse $v = 1 \text{ m/s}$.

D'après la figure 4, l'air chaud est évacué plus efficacement, réduisant la température intérieure.

$V = 0.5 \text{ m/s}$

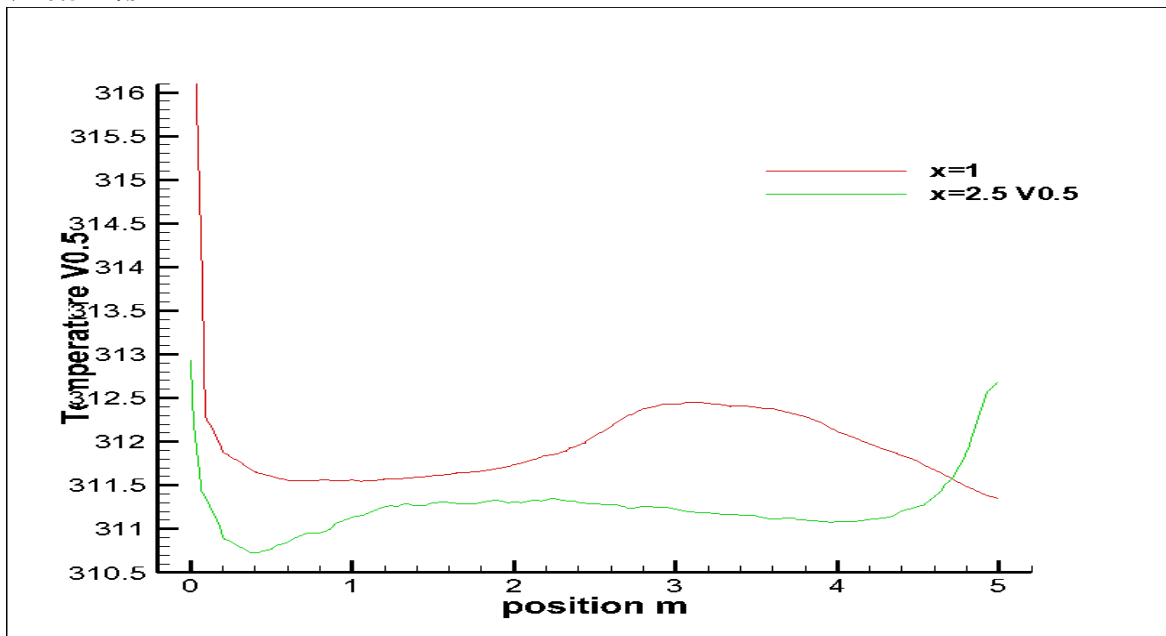


Figure 5.5. Température pour $v = 0.5 \text{ m/s}$.

Equilibre modéré entre refroidissement et échauffement des parois.

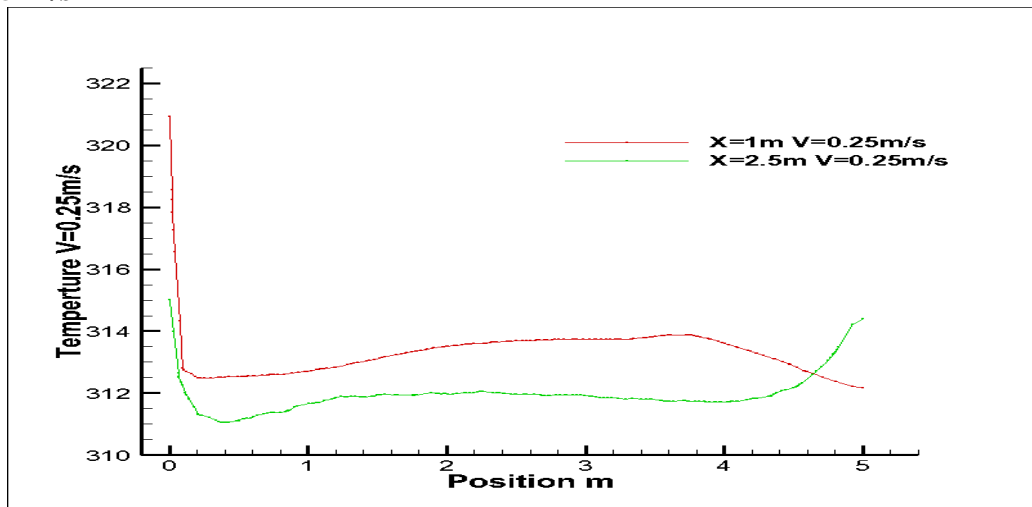
$V=0.25 \text{ m/s}$ 

Figure 5.6. La température pour $v = 0.25 \text{ m/s}$.

D'après la figure 6, l'air chauffe rapidement, mauvaise évacuation de la chaleur.

Les figures 4 à 6 montrent clairement que plus la vitesse de l'air n'est élevée, plus le flux d'air chaud n'est efficacement évacué de la cavité. Cette augmentation de la vitesse favorise le renouvellement de l'air et réduit le temps de résidence de l'air chaud, ce qui conduit à une diminution notable de la température interne.

A 0.25 m/s , l'air chauffe au contact des parois, surtout si la convection est faible.

A 1 m/s , le rafraîchissement est plus significatif.

5.4 Graphes pour les vitesses

V=1m/s

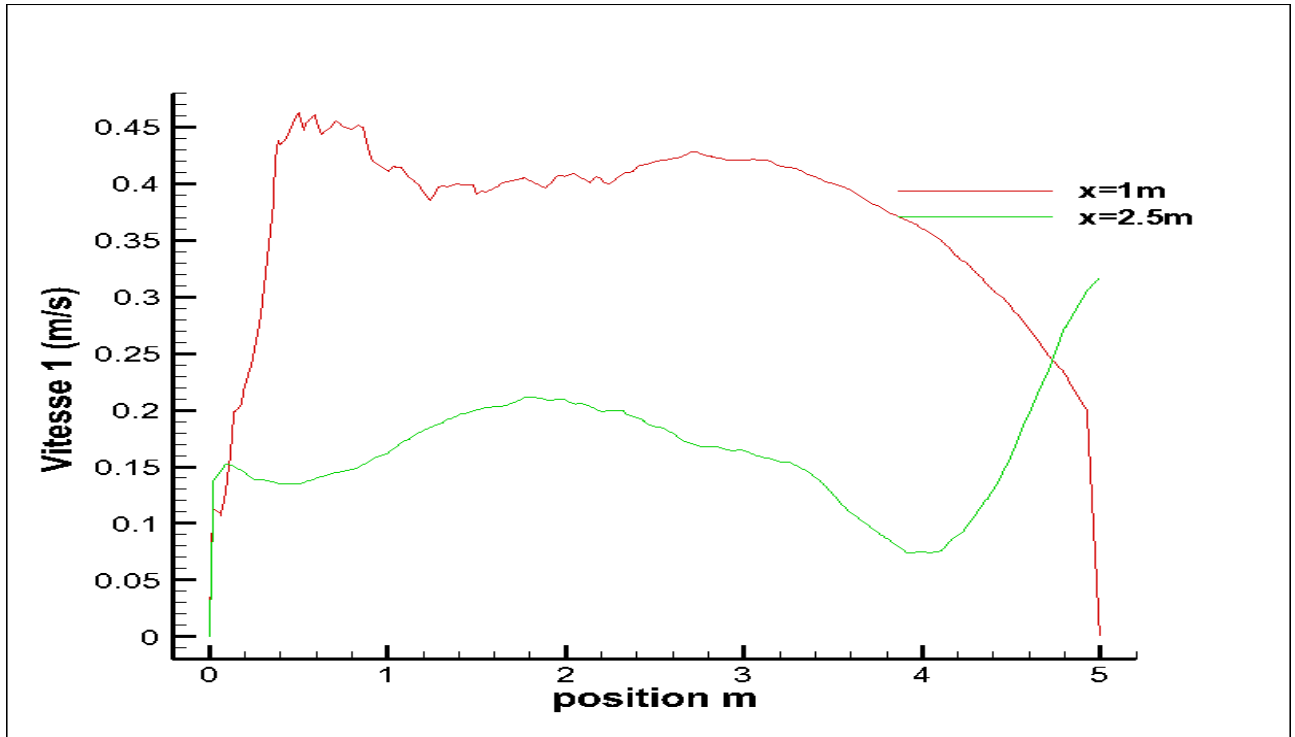


Figure 5.7. Graphique de la vitesse pour $v = 1$ m/s.

On remarque dans la figure 7 une bonne distribution du flux d'air.

$V=0.5\text{m/s}$

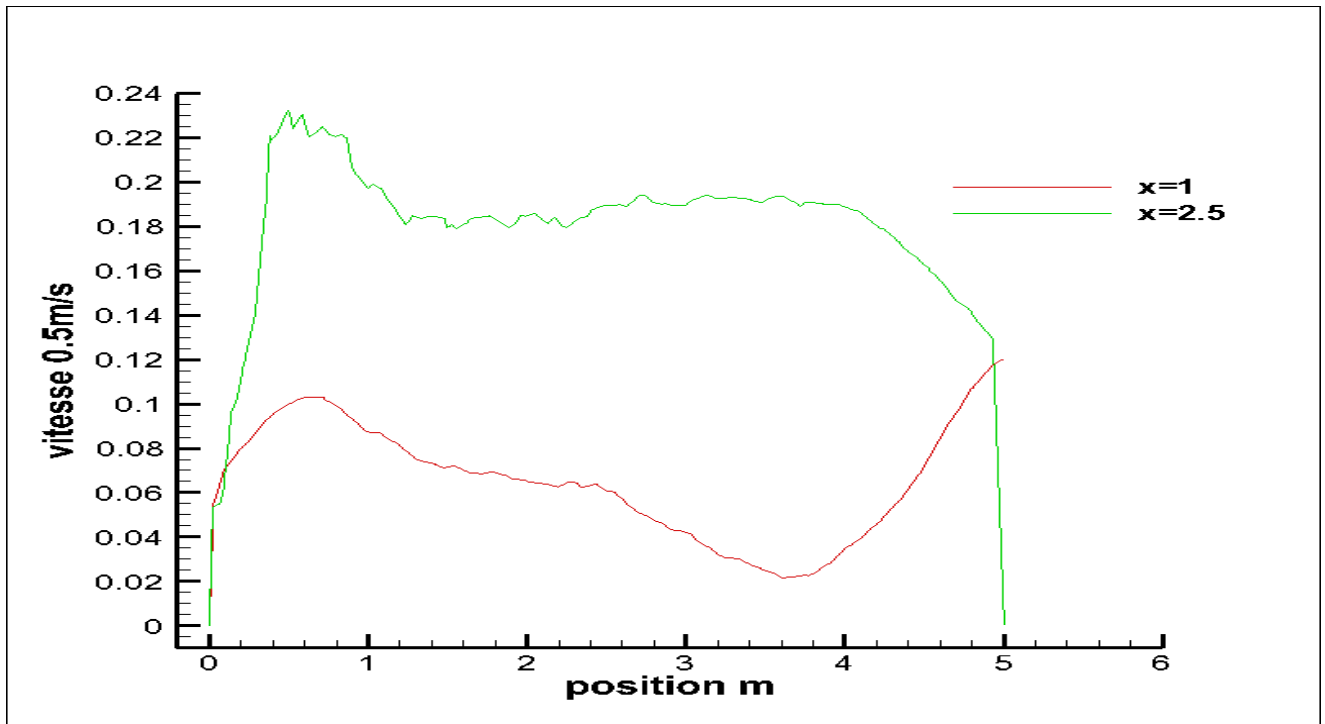


Figure 5.8. Graphique de la vitesse pour $v = 0.5 \text{ m/s}$.

On remarque dans la figure 5.8, un flux modéré avec légères zones de stagnation.

$V=0.25\text{m/s}$

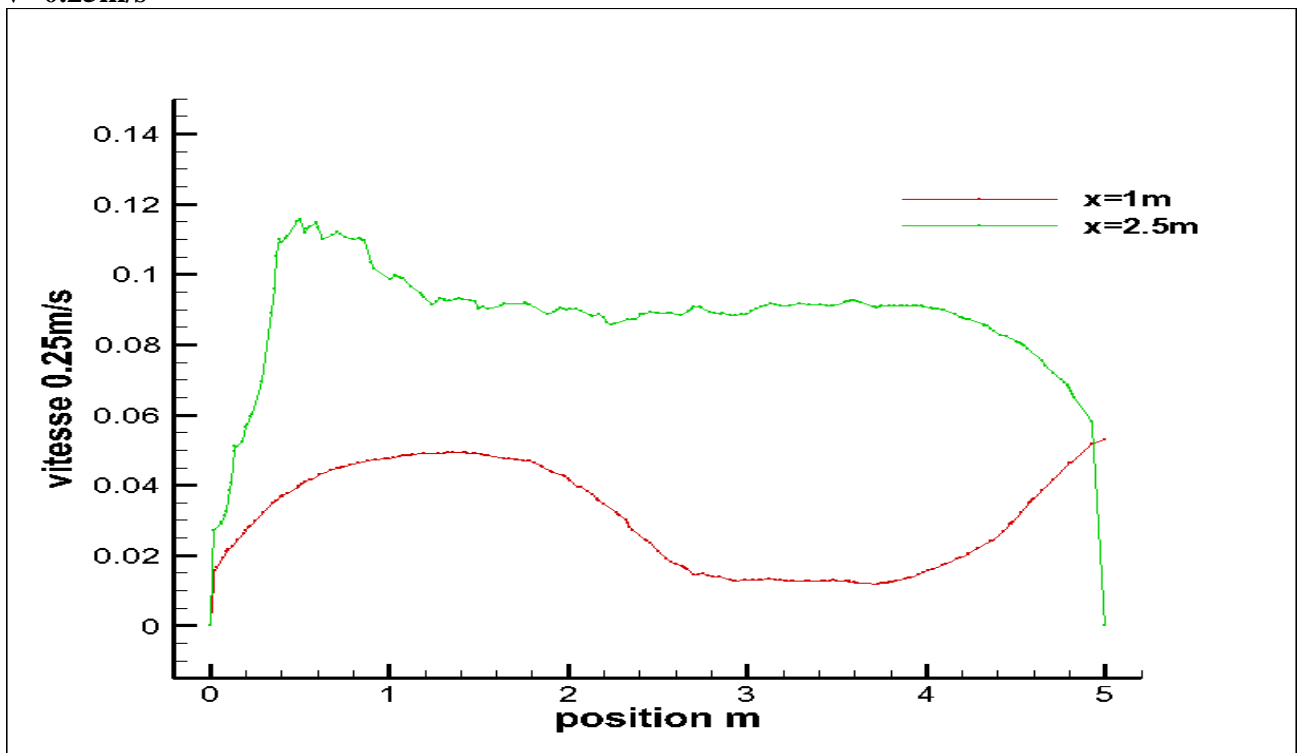


Figure 5.9. Graphique de la vitesse pour $v = 0.25 \text{ m/s}$.

La figure 5.9 montre qu'une vitesse faible donne des zones mortes importantes.

Les figures 7-9 illustrent la vitesse de l'air dans différents points de la pièce :A vitesse plus élevée (1 m/s), l'air est bien réparti, ce qui améliore la ventilation naturelle. Comme on peut dire que le moucharabieh crée un effet de turbulence locale, ce qui peut être favorable pour briser les couches limites stagnantes.

5.5. Comparaison pour différents rayonnements

5.5.1 Rayonnement=420 ; vitesse=0.25m/s

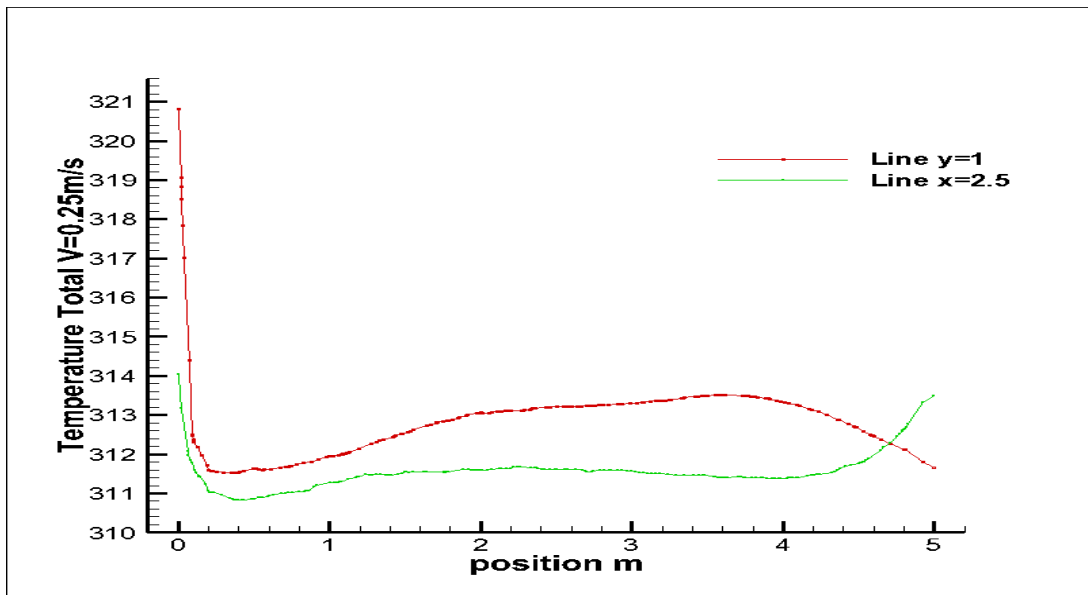
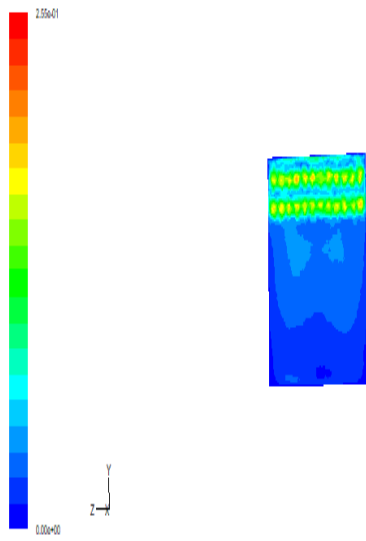


Figure 5.10. Température pour rayonnement = 420 w/m² et v = 0.25 m/s.

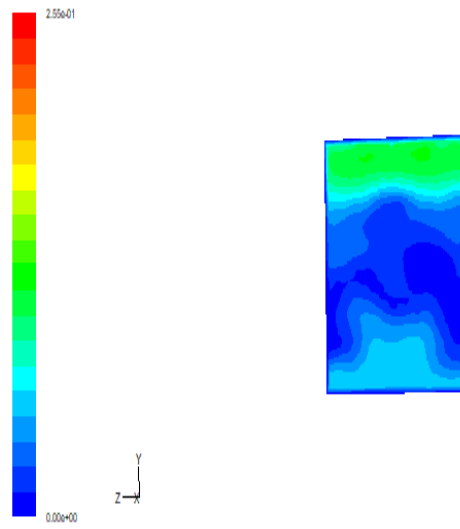
Un rayonnement de 420 w/m² et une vitesse 0.25 m/s donnent une température plus basse figure 10.

Plan X= 0.2m

Plan X=2.5m



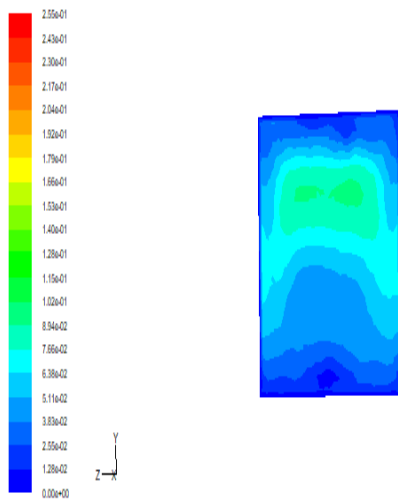
Contours of Velocity Magnitude (m/s) May 22, 2025
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbrs, lam)



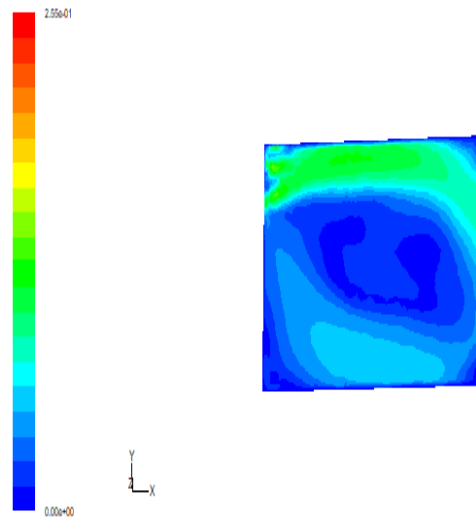
Contours of Velocity Magnitude (m/s) May 22, 2025
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbrs, lam)

Plan X=4.8m

Plan Z=1.5m



Contours of Velocity Magnitude (m/s) May 22, 2025
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbrs, lam)



Contours of Velocity Magnitude (m/s) May 22, 2025
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbrs, lam)

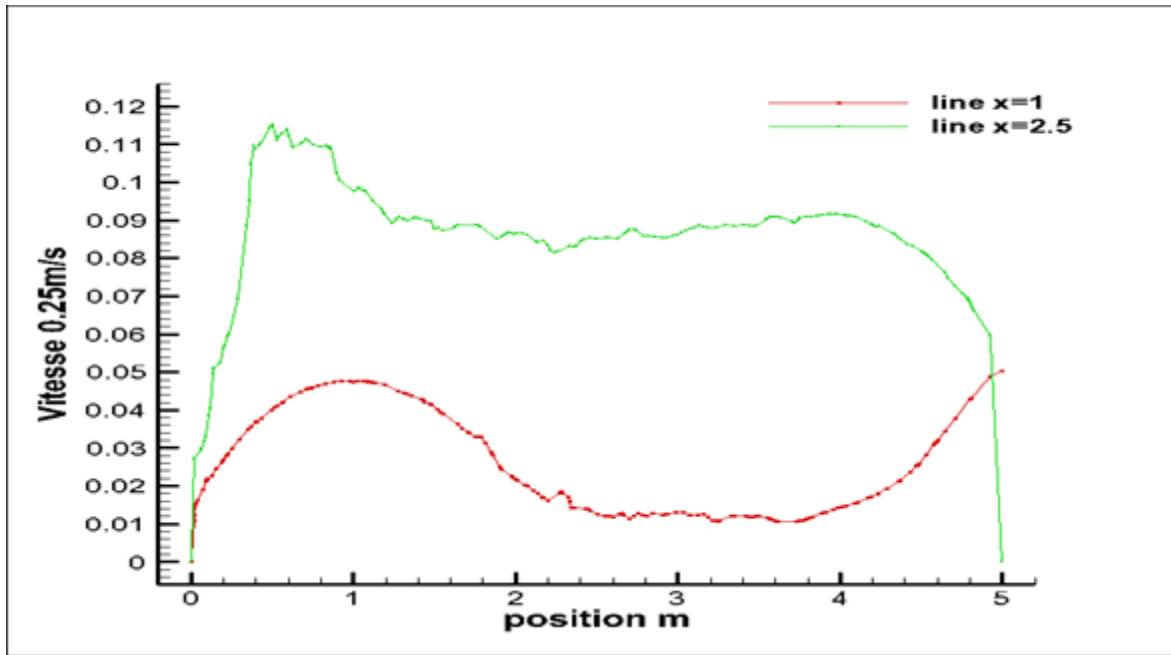
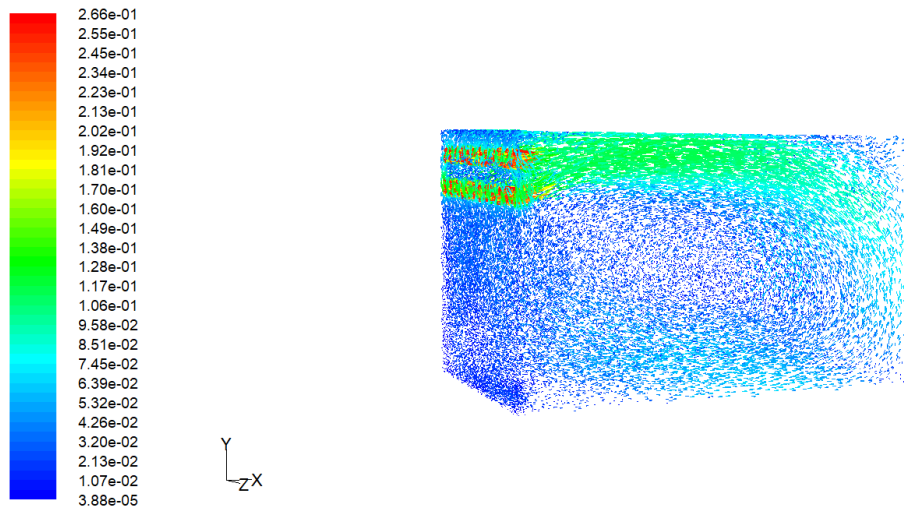


Figure 5.11. Vitesse de l’air pour rayonnement = 420 w/m².

Concernant la vitesse et d’après la figure 11, on peut dire qu’il y a une réduction légère de la vitesse dans certaines zones.



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

May 20, 2025
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, lam)

Figure 5.12. Distribution de la vitesse – rayonnement faible.

On remarque d’après la figure 12, qu’il y a un faible gradient thermique.

D’après les figures 10–12, on remarque que à **420 w/m²**, les températures sont légèrement inférieures à celles à **500 w/m²**.

5.5.2 Rayonnement= 600 ; vitesse =0.25m/s

Température

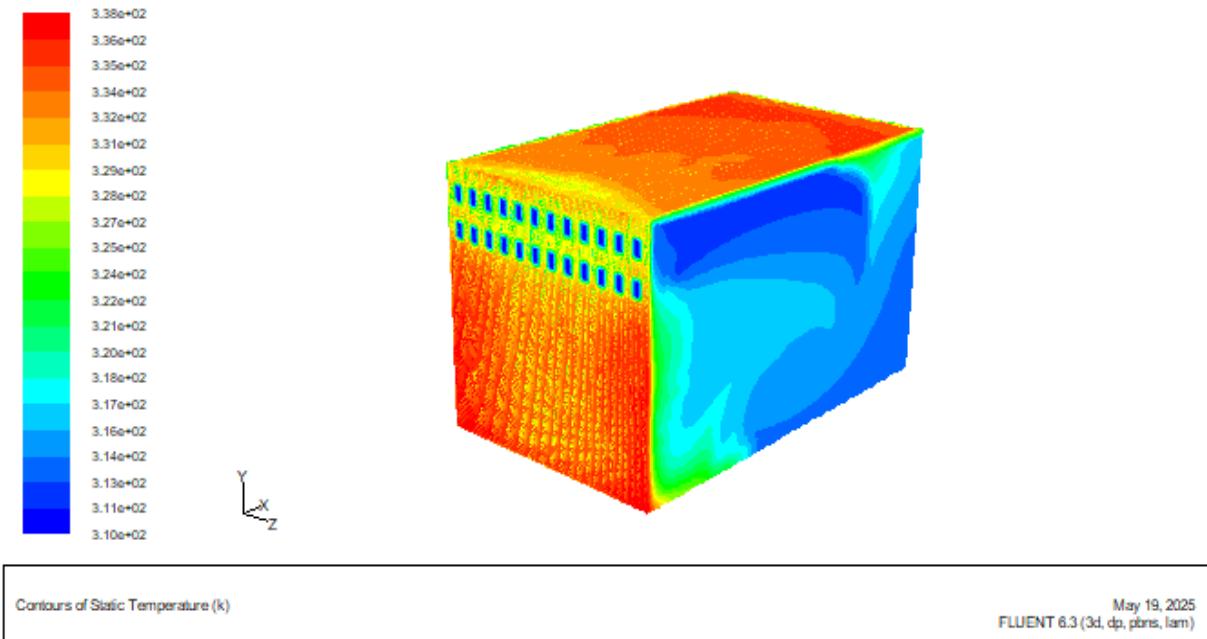


Figure 5.13. Température pour rayonnement = 600 w/m².

D’après la figure 13, il y a une forte augmentation de la température intérieure.

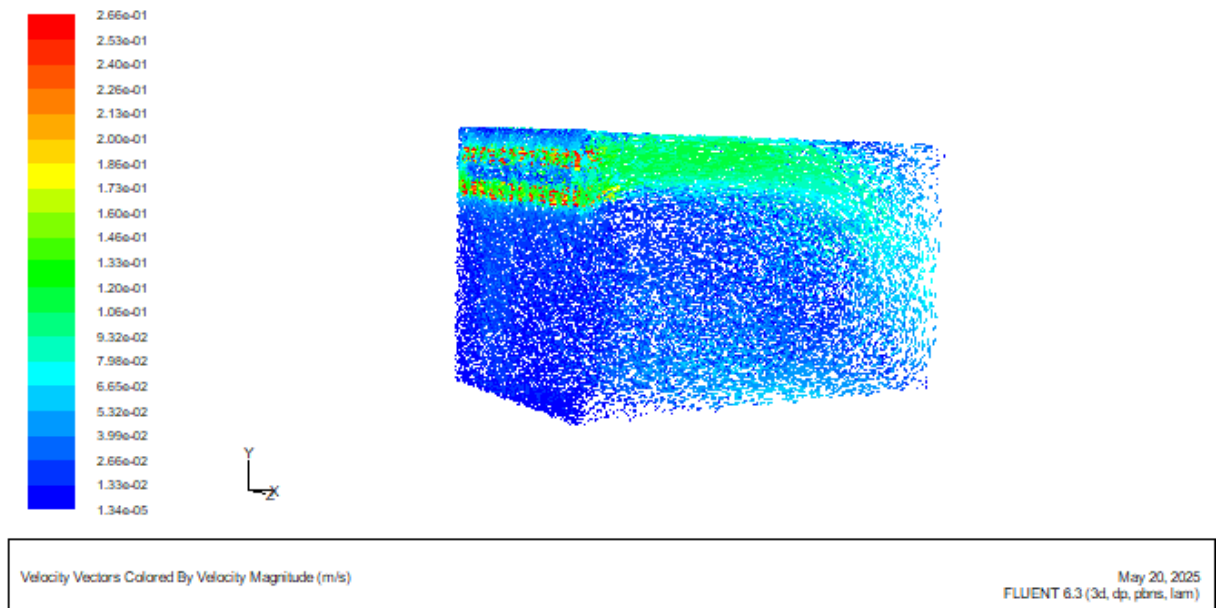


Figure 5.14. Vitesse pour rayonnement = 600 w/m².

On remarque dans la figure 14 que l’écoulement reste efficace malgré la chaleur.

D’après les figures 13–14, on remarque que à 600 w/m², les températures augmentent significativement, ce qui montre l’importance du rayonnement incident.

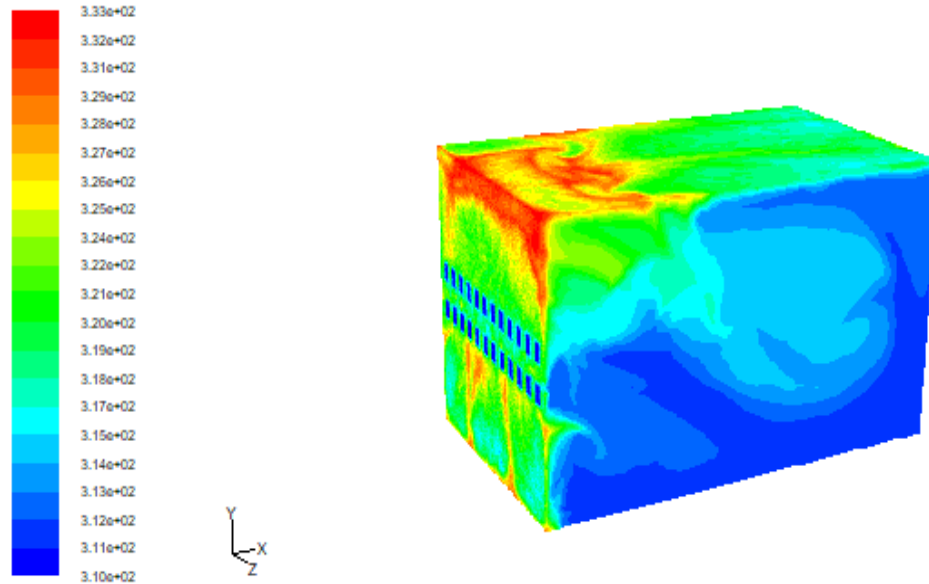
On peut conclure que le moucharabieh modère l’effet du rayonnement, car il filtre la lumière directe.

5.5.6 Influence de la position du moucharabieh

5.5.6.1 Le cas de moucharabieh au milieu

Rayonnement =500 ; vitesse =0.25m/s

La température

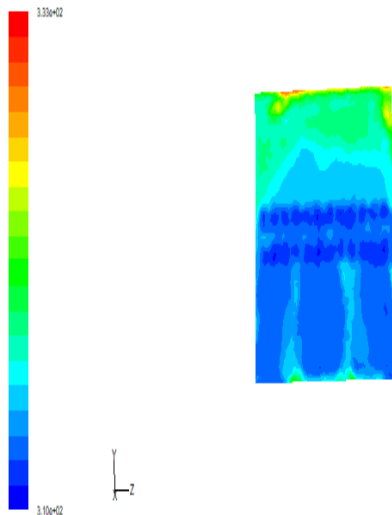


Contours of Total Temperature (K)

May 20, 2025
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbrs, lam)

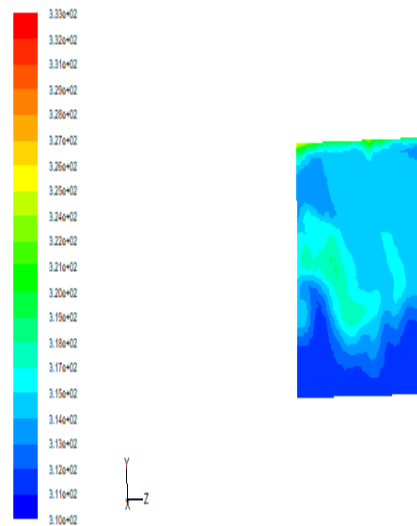
Plan X=0.2m

Plan X=2.5m



Contours of Total Temperature (K)

May 22, 2025
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbrs, lam)



Contours of Total Temperature (K)

May 22, 2025
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbrs, lam)

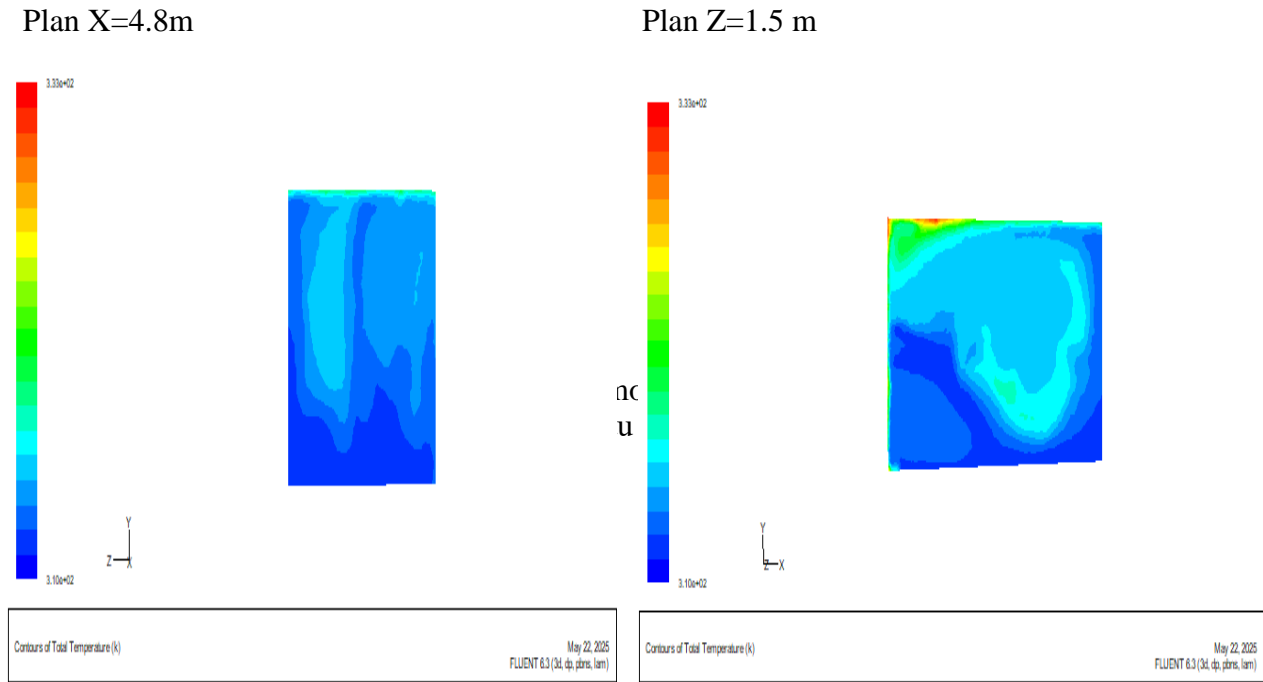


Figure 5.15. Température avec moucharabieh en position centrale.
D’après la figure 15, le cas de moucharabieh au milieu donne une bonne régulation thermique.

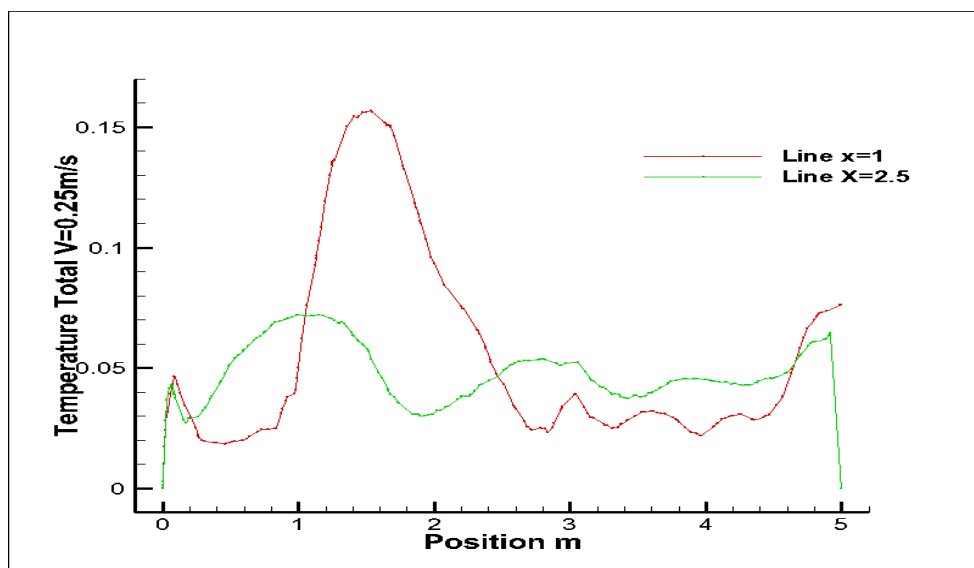
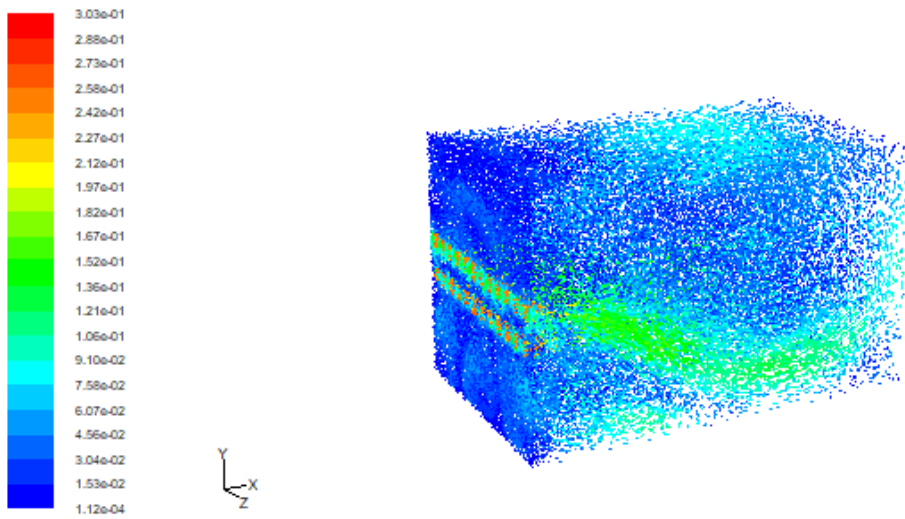


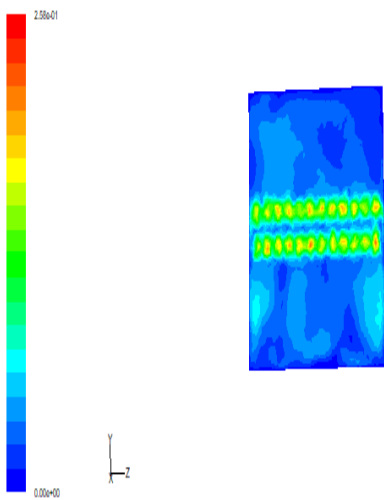
Figure 5.16. Vue complémentaire de la température avec moucharabieh central.

La vitesse



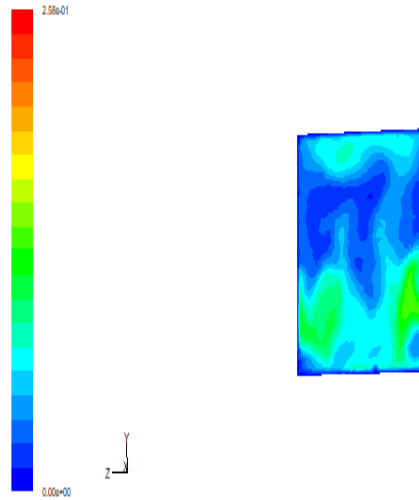
Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s) May 20, 2025
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbrns, lam)

Plan X= 0.2m



Contours of Velocity Magnitude (m/s) May 22, 2025
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbrns, lam)

Plan X=2.5m



Contours of Velocity Magnitude (m/s) May 22, 2025
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbrns, lam)

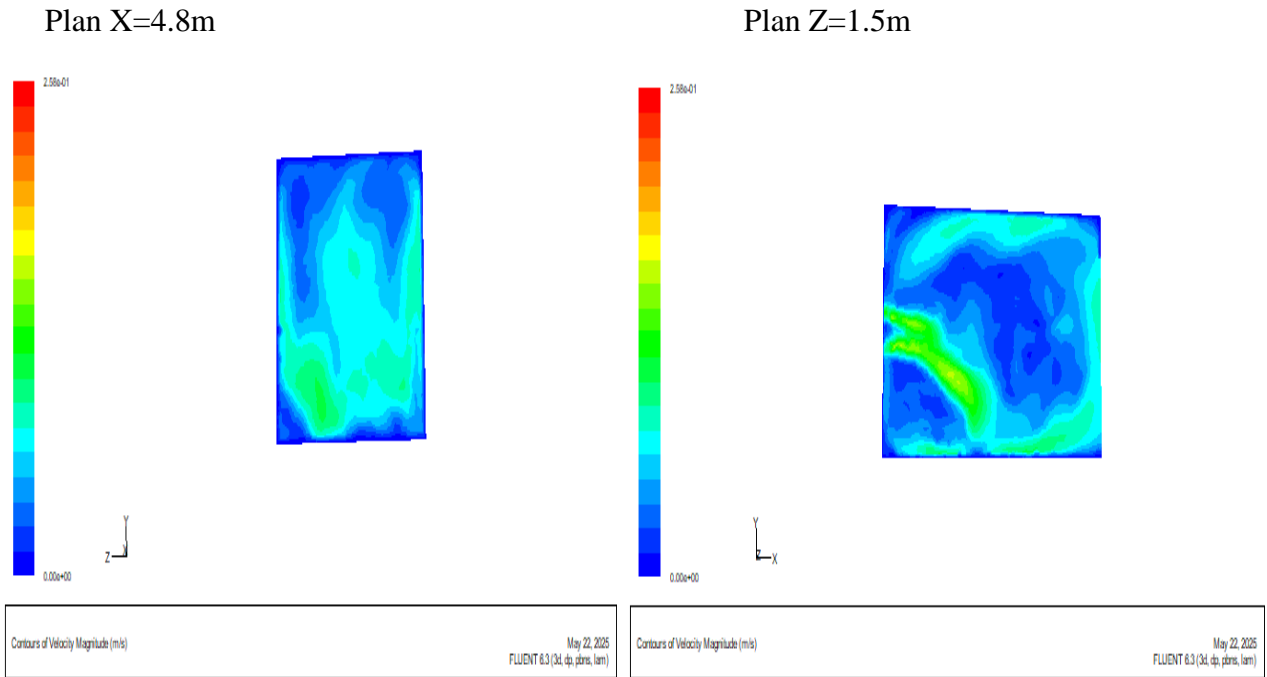


Figure 5.17. Vitesse de l'air avec moucharabieh central. Meilleure répartition du flux.

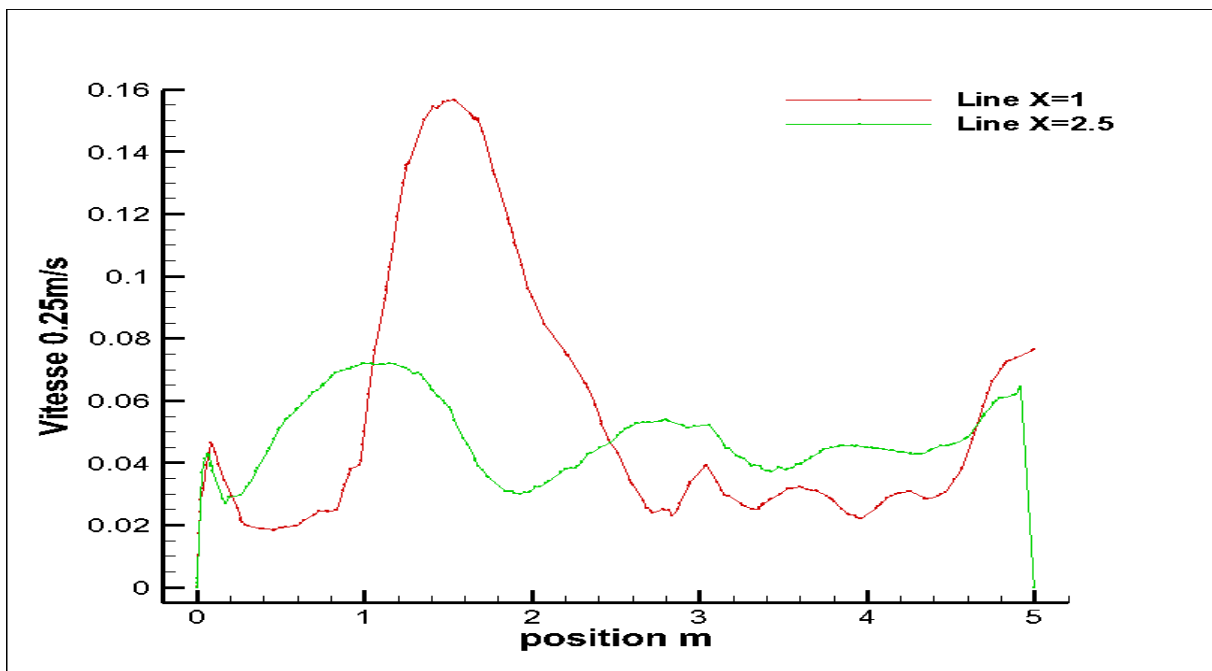
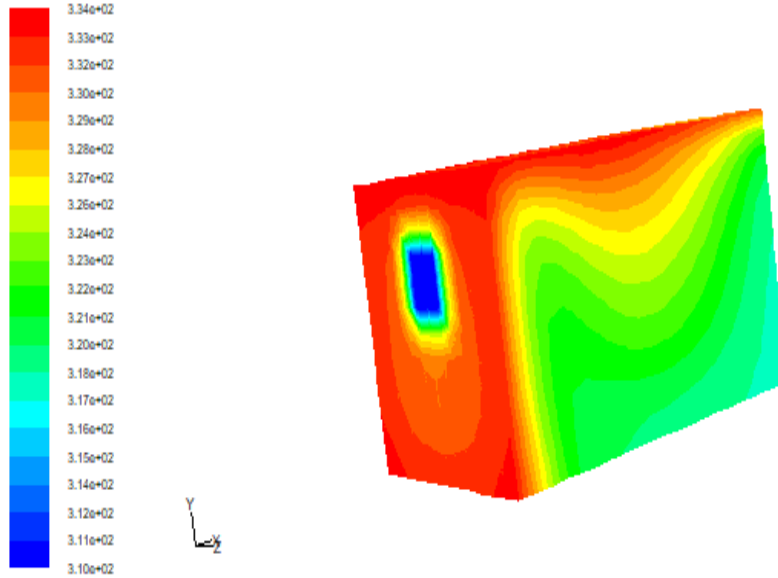


Figure 5.18. Renforcement du flux d'air à travers le moucharabieh central.

On peut conclure que d'après les figures 15-18 que le moucharabieh en position centrale donne un bon compromis entre éclairage, ventilation et protection solaire. La température est modérée, et la distribution de l'air est équilibrée.

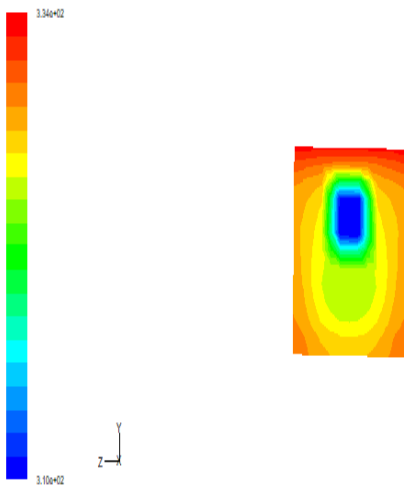
5.5.7 Cas de la fenêtre

Rayonnement 500w/m² ; vitesse=0.25m/s



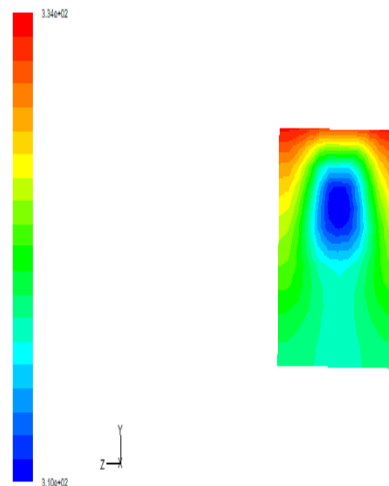
Contours of Total Temperature (k) May 19, 2025
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbrns, lam)

Plan X=0.2m



Contours of Total Temperature (k) May 22, 2025
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbrns, lam)

Plan X=2.5m



Contours of Total Temperature (k) May 22, 2025
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbrns, lam)

Plan X=4.8m

Plan Z=1.5m

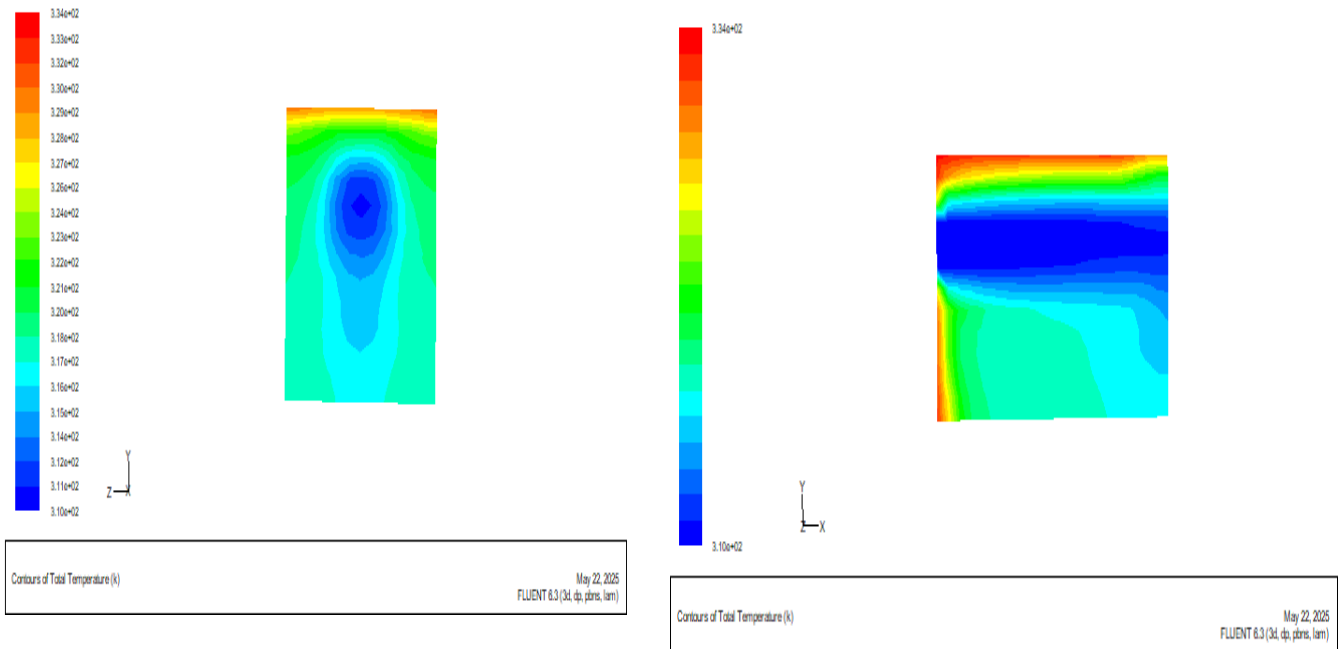
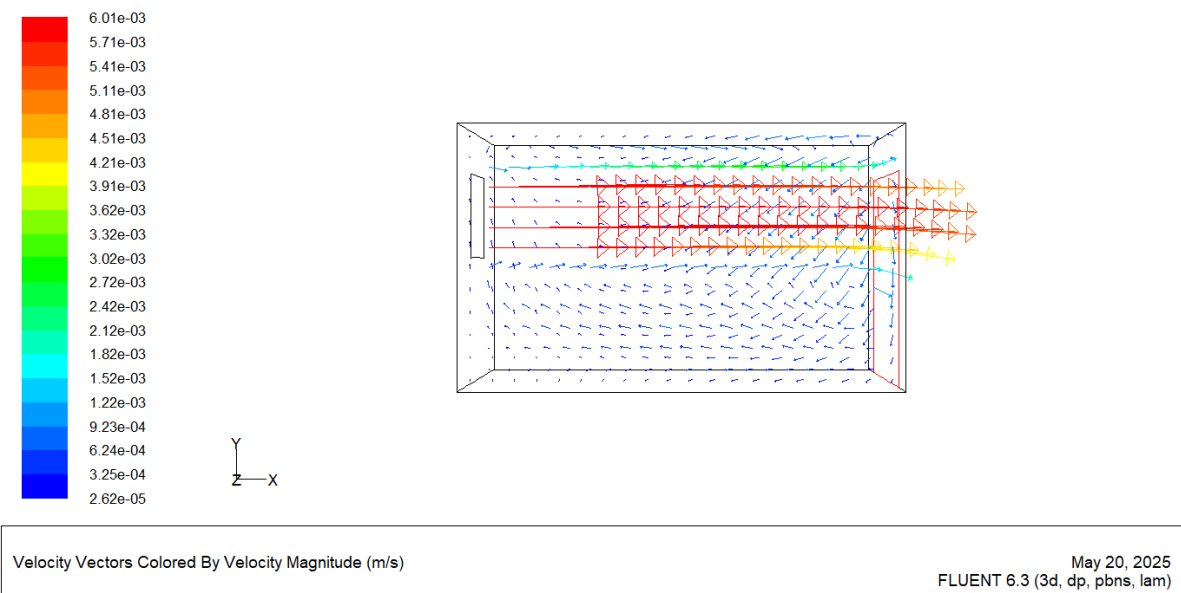
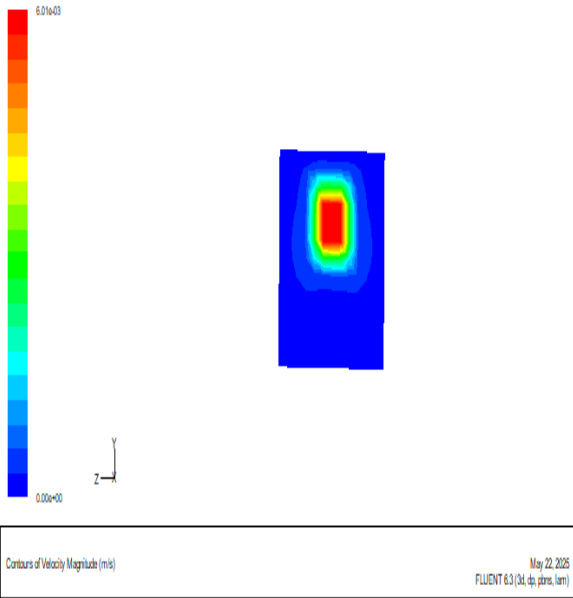


Figure 5.19. Température dans le cas avec fenêtre.

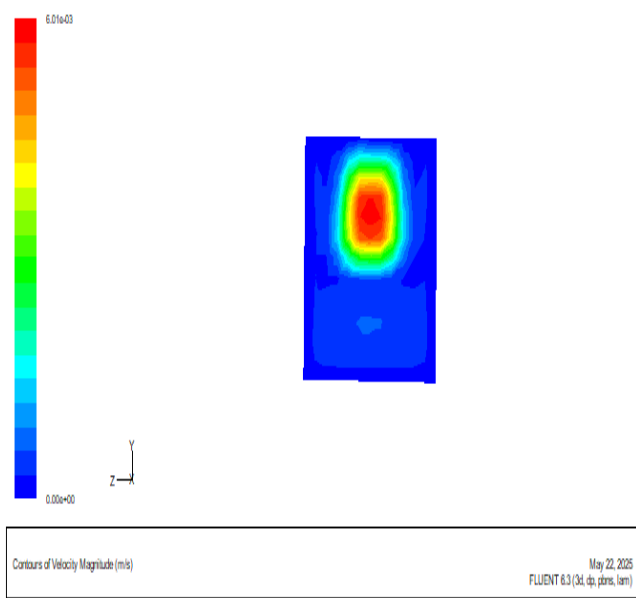
Pour le cas de la fenêtre L'échauffement plus marqué dû au rayonnement direct (figure 19).



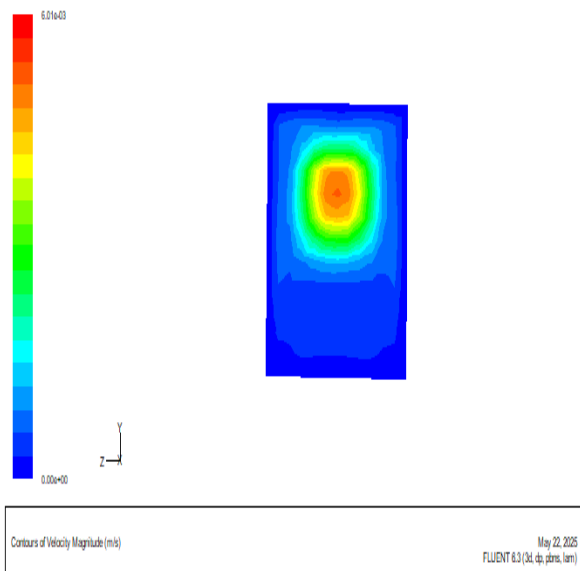
Plan X= 0.2m



Plan X=2.5m



Plan X=4.8 m



Plan Z=1.5m

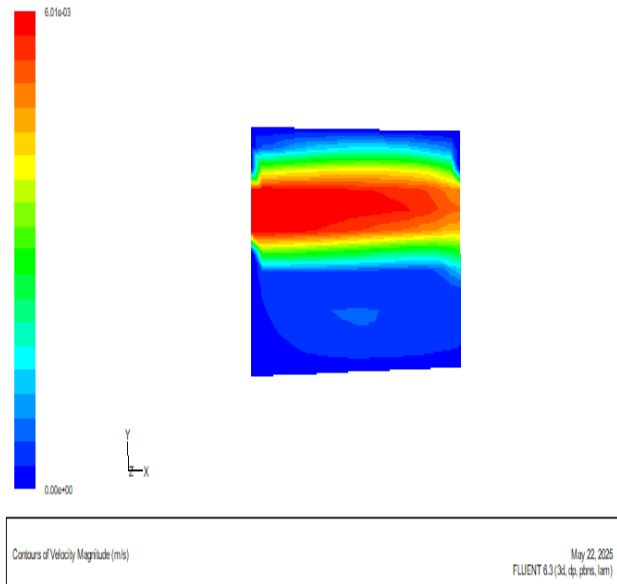


Figure 5.20. Distribution de la vitesse dans le cas avec fenêtre.

D'après les figures 19-20, on conclut que la fenêtre laisse entrer davantage de rayonnement direct, ce qui augmente la température intérieure. la ventilation peut être moins homogène, surtout si la fenêtre est petite ou mal orientée.

5.6. Conclusion

L'étude menée à l'aide du logiciel Fluent a permis d'analyser en détail l'impact du moucharabieh sur les conditions de confort thermique et de ventilation naturelle dans une chambre.

Les résultats montrent clairement que :

- ✓ La présence du moucharabieh améliore la ventilation par rapport à une fenêtre classique, en induisant une répartition plus homogène de la vitesse de l'air, surtout lorsque celui-ci est placé au centre du mur de façade.
- ✓ La régulation thermique est plus efficace avec le moucharabieh, car il réduit l'impact direct du rayonnement solaire tout en permettant une bonne circulation de l'air.
- ✓ L'augmentation de la vitesse d'entrée de l'air contribue significativement à l'abaissement des températures internes, tandis que l'intensité du rayonnement solaire influence fortement le réchauffement de l'air à l'intérieur.
- ✓ Comparativement, une fenêtre simple laisse entrer un rayonnement direct, ce qui se traduit par une élévation importante de la température intérieure, malgré une ventilation moins contrôlée.

Ainsi, le moucharabieh se révèle être un dispositif passif efficace pour améliorer le confort thermique dans les zones chaudes, tout en assurant une bonne qualité de l'air intérieur, sans recours à des systèmes mécaniques de ventilation ou de climatisation.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié le comportement thermo-aéraulique d'un moucharabieh dans des environnements arides. L'analyse a été menée à l'aide de la simulation numérique CFD à travers le logiciel FLUENT, permettant d'évaluer l'impact de moucharabieh sur la circulation de l'air et le confort thermique intérieur.

Une étude comparative a été réalisée entre un moucharabieh et une fenêtre classique, afin d'évaluer leurs performances respectives en matière de confort thermique et de circulation de l'air. Les simulations ont montré que le moucharabieh permet un meilleur contrôle de la ventilation naturelle tout en limitant les apports solaires directs, ce qui le rend particulièrement adapté aux environnements. En revanche, la fenêtre classique, bien qu'efficace en termes d'éclairage naturel, présente une moins bonne régulation thermique, notamment en l'absence de dispositifs de protection solaire.

Les résultats ont permis de démontrer l'efficacité du moucharabieh à ouvertures carrées modulables, qui a montré de bonnes performances en termes de régulation thermique et de renouvellement d'air. L'étude a également mis en évidence l'influence notable de la forme, des dimensions et du positionnement des ouvertures sur les performances globales du dispositif.

Comme perspectives à ce travail, nous proposons une continuité à travers :

1. Des études expérimentales sur les géométries de moucharabieh proposées dans ce mémoire.
2. Une comparaison entre les moucharabiehs traditionnels fixes et les modèles à géométrie variable.
3. L'analyse de l'impact de l'utilisation de matériaux différents (bois, métal, polymères, etc.) sur les performances thermiques et esthétiques.

Bibliographie

- [1]. Ta, skan, D. ; Ismaël, A.B. Un élément architectural : le moucharabieh. *Art Sanat*. 2022, 17, 475–496. [CrossRef]
- [2]. Hariri, M. Conception du Rowshan et son importance pour l'habitat. *J. Umm-Al-Qura Univ*. 1992, 3, 175–237.
- [3]. Naciri, N. « Caractéristiques durables de l'architecture vernaculaire », dans « Étude de cas sur les contrôles climatiques dans les régions chaudes et arides du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord » ; 2007 ; p. 15. Disponible en ligne : <https://www.solaripedia.com/files/488.pdf>
- [4]. Sabry, E. ; Dwidar, S. L'architecture islamique contemporaine pour la préservation du patrimoine islamique. *ResearchGate* 2015,
- [5]. Algburi, O. ; Beyhan, F. Réduction de la charge de refroidissement dans une maison individuelle : une approche écoénergétique. *Gazi Univ. J. Sci*. 2019, 32, 385–400.
- [6]. Al-Ban, A.Z.G. « Architecture et identité culturelle dans les maisons traditionnelles de Djeddah. Université du Colorado à Denver.»
Docteur en philosophie, design et urbanisme, Université du Colorado, Denver, CO, États-Unis, 2016. Disponible en ligne <https://search.proquest.com/openview/bf247bf137581eda868bab9ca90181d5/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- [7]. Madan, B.S. ; Saxena, S. Patrimoine architectural islamique : Moucharabieh, de la tradition à l'innovation. *Révérend J. Archit. Des*. 2021, 3, 1-13.
- [8]. ElSemary, Y.M.; Attalla, H.; Gawad, I. Moucharabiehs modernes avec systèmes de haute technologie sensibles à la lumière du jour. *Acad. Res. Community Publ*. 2017, 1, 11. [CrossRef] R3
- [9] Bagasi, AA ; Calautit, K.J. Étude expérimentale sur le terrain de l'intégration des techniques de refroidissement passif et par évaporation avec le moucharabieh dans les climats chauds. *Énergie Build*. 2020, 225, 110325. [CrossRef]. R2
- [10]- (Fathy, H. *Natural Energy and Vernacular Architecture: Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates*, 5e éd.; University of Chicago Press: Chicago, IL, USA, 1986; p. 105-117)
- [11]. Karamata, B. ; Giovannini, L. ; Verso, V.L. ; Andersen, M. Concept, conception et performance d'un moucharabieh de forme variable en tant que système d'ombrage et d'éclairage naturel pour les climats arides. *Décret sur l'énergie* 2015, 78, 370 à 375.
- [12]- Article (Evaluation of the Integration of the Traditional Architectural Element Mashrabiya into the Ventilation Strategy for Buildings in Hot Climates reaserchgat)
- [13]- Source Examining Mashrabiya's Impact on Energy Efficiency and Cultural Aspects in Saudi Arabia. *Sustainability* 2023
- [14] L'habitat durable en Arabie Saoudite: dimension climatique et socio-culturelle: cas d'étude: la ville de Djeddah par Ahmed Khan
- [15] transfert thermique par : khalilfoudil
- [16] JOHNSEN ET WATKINS, 2010
- [17]- [examining *Mashrabiya* Impact on Energy Efficiency and Cultural Aspects in Saudi Arabia by Ahmad Taki \[ORCID\] and Haripriya Kumari](#))
- [18]- Giovannini, L.; Lo Verso, V.R.; Karamata, B.; Andersen, M. Éclairage et performance énergétique d'un système d'ombrage adaptatif et d'éclairage du jour pour les climats arides. *Procédaient énergétique* 2015, 78, 37-375 researchgat)
- [19]. BRIGGS, 2010
- [20]. ECOLE D'AVIGNON, 2006

- [21]- Abdelkader, R.; Park, J.-H. Façades de construction durables: Usages modernes de la Machrabiya traditionnelle. *Open House Int.* 2018, 43, 69-76. [Google ScholarScelle-Scholar-Google-Crosf-CrossRef-Cross-CrossRef-Cross-C
- [22]- Abdelkader, R.; Park, J.H. La transformation en évolution de Mashrabiya en tant qu'élément d'architecture traditionnel du Moyen-Orient. *Int. J. Civ. Environ. Eng. IJCEE IJENS* 2017, 17, 15-20.
- [23]- calautit, j.k. experimental field study of the integration of passive and evaporative cooling techniques with mashrabiya in hot climates. *energy build.* 2020)
- [24]- (Experimental Field Study of the Integration of Passive and Evaporative Cooling Techniques with Mashrabiya in Hot Climates Abdullah Abdulhameed Bagasi)
- [25]- source : Thèse doctorat OUKACI
- [26]- Citation: Taki, A.; Kumari, H. Examining Mashrabiya's Impact on Energy Efficiency and Cultural Aspects in Saudi Arabia. *Sustainability* 2023, 15, 10131.
- [27]- Article (Evaluation of the Integration of the Traditional Architectural Element Mashrabiya into the Ventilation Strategy for Buildings in Hot Climates reaserchgat
- [28] <https://www.boisgirard-antonini.com/lot/ecran-ajoure-ou-moucharabieh-quadrangle-en-gres-rose-jali-inde-moghole/>
- [29] <https://www.solomas.com/portfolio/brise-vue-moucharabieh-massif/brise-vue-moucharabieh-massif/>
- [30]. Karamata, B. ; Giovannini, L. ; Verso, V.L. ; Andersen, M. Concept, conception et performance d'un moucharabieh à forme variable comme système d'ombrage et d'éclairage naturel pour les climats arides. *EnergyProcedia* 2015, 78, 370–375.
- [31]. Ta, skan, D. ; Ismaeel, A.B. Un élément architectural : le moucharabieh. *Art Sanat.* 2022, 17, 475–496.[CrossRef]
- [32] <https://www.batiactu.com/edito/des-moucharabiehs-futuristes-pour-des-logements-pa-35766.php>
- [33]. Alelwani, R.; Ahmad, W.M.; Rezgui, Y. Perception publique de l'architecture vernaculaire dans la péninsule arabique : le cas de Rawshan. *Bâtiments* 2020, 10, 151.
- [34]. Taleb, H.M.; Antony, A.G. Évaluation de différents vitrages pour améliorer les performances d'éclairage des immeubles de bureaux aux Émirats arabes unis (EAU). *J. Build. Eng.* 2019, 28, 101034. [CrossRef]
- [35] Giovannini, L.; Lo Verso, V.R.; Karamata, B.; Andersen, M. Lighting and energy performance of an adaptive shading and daylighting system for arid climates
- [36]. Abiya disponible en ligne : <https://www.abiya.ae/knowledge-nehel/3d-printing-the-ideal-manufacturing-process>.
- [37] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Moucharabieh>
- [38] [louvre-abu-dhabi-architecture-mer-lumiere-jean-nouvel](#)
- [39] De la fenêtre traditionnelle à la façade intelligente : Transcription du Moucharabieh en architecture contemporaine. Ecole Nationale d'Architecture de Rabat, Maroc.
- [40] Ali Rahim, HinaJamelle, 2007, Beyond the Structural Skin ZahaHadidArchitects:MarsaDubaiResidential
- (41) Karen Cilento, 2012, Article: Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas. Plateforme-web:archdaily.
- [42] Tower, Elegance (pp 64). John Wiley& Sons, 23 mars. 2007.
- [43] SHADY, A. 2017. Evaluation of adaptive facades: The case study of Al Bahr Towers in the UAE, Liège, University of Liège
- [44] SEFROU, A. et BETTIOUI, M. SIMULATION NUMERIQUE DE LA VENTILATION

Annexe

D'UN LOCAL, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, Faculté de Technologie,
Département de Génie Civil, MEMOIRE pour l'obtention du diplôme de MASTER en
Structures : Efficacité Energétique Dans Les Bâtiments de Construction,

[45] Melle ELHADJ-ALI Ahlem MrBENSALAH Mohammed Alaeddine Analyse de la
position des ouvertures sur l'écoulement d'air dans une pièce d'habitation

[46] Melle Hedeili Ikram Mr Komichi Abdelmounaim Simulation numérique de modèle de Mur
Trombe

[47] ASKEUR Anes MEZIANE Ahmed Zakaria Étude de l'isolation thermique d'une Façade de
bâtiment (double vitrage)

[48] L'habitat durable en Arabie Saoudite : dimension climatique et socio-culturelle : cas
d'étude : la ville de Djeddah par Ahmed Khan 48

[49]- source : [<http://www.immunolight.com/>].

[50]- <https://www.imarabe.org/fr/batiment-et-son-histoire>

[51]- Tableau 2.1 : DTR3.2/4 11:2

[52]- CAIN A, et al. 19