

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 : **GENIE CIVIL**

Spécialité : Structure : Efficacité énergétique dans les bâtiments de construction

Par : Belkhodja Mohammed Nadir & Lallam Otmane

Sujet

**SIMULATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE ET
THERMIQUE DE L'AIR DANS UNE FACADE DOUBLE-PEAU**

Soutenu : 19 / 06 / 2025, devant le jury composé de :

BABA AHMED I.	Maitre-Assistant	Université de Tlemcen	Président
BENAHMED L.	Maitre de conférences	Université de Tlemcen	Examinatrice
HENAOUI M.	Docteur	Université de Tlemcen	Encadrant
EL HOUARI N.	Maitre de conférences	Université de Tlemcen	Co-Encadrante

Année universitaire : 2024 /2025

DEDICACES

Dédicaces

À ceux qui, par leur amour inconditionnel, leur patience et leurs prières, ont été les piliers
de notre chemin :

nos chers parents. Leur présence bienveillante et leur soutien constant nous ont portés
jusqu'à ce jour mémorable.

À nos familles, pour leurs générosités de cœur, leurs encouragements et leur foi en nous.

À nos amis et camarades de route, avec qui nous avons partagé les défis, les rires et les ré-
ussites de cette belle aventure étudiante.

Belkhodja Mohammed Nadir & Lallam Otmane

Remerciements

Remerciements

Tout d'abord, nous voudrions remercier Dieu, qui nous a donné la force et la patience nécessaires pour accomplir ce travail humble.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à nos encadrants, Mr Henaoui Mustapha Ingénieur de laboratoire à l'Université de Tlemcen et M^{me} EL Houari Nesrine, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen, pour leurs précieux conseils, leur patience et leur disponibilité, en particulier pour le confort et la facilité amenés pendant tous ces mois de travail.

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur Baba Ahmed Ismail, Maître Assistant à l'Université de Tlemcen, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de ce mémoire. Sa bienveillance, sa rigueur scientifique et l'intérêt qu'il porte à notre travail nous ont particulièrement touchés.

Nous adressons également nos remerciements les plus respectueux à Madame Benahmed Lamia, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire. Son expertise, ses remarques pertinentes et ses suggestions constructives ont grandement contribué à l'enrichissement de notre réflexion.

Enfin nous remercions toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous

Résumé

Résumé

Ces dernières années, les façades à double peau (Double Skin Façades – DSF) ont connu un développement important dans le secteur du bâtiment, en raison de leurs qualités esthétiques et leurs performances thermiques et mécaniques. Cependant, la majorité des recherches se concentrent sur le comportement global sans examiner en détail l'influence du type de vitrage intérieur. Dans ce travail, des simulations numériques tridimensionnelles ont été réalisées pour comparer le comportement thermo-aéraulique d'une DSF équipée d'un simple vitrage intérieur à celui d'une DSF munie d'un double vitrage intérieur. L'étude tient compte de l'écoulement turbulent en convection forcée, avec une analyse des champs de vitesse, d'énergie cinétique, du coefficient de pression (C_p) et de la distribution de température. Les résultats obtenus mettent en évidence l'intérêt du double vitrage intérieur, qui améliore significativement l'efficacité énergétique du système en limitant les pertes thermiques et en optimisant la dynamique de l'air dans la cavité.

Mots clés : cavité, simple vitrage, double vitrage, convection force, méthode des volumes finis.

Abstract

In recent years, Double Skin Façades (DSF) have seen significant development in the building sector due to their aesthetic appeal and their thermal and mechanical performance. However, most research focuses on the overall behavior without closely examining the influence of the type of inner glazing. In this study, three-dimensional numerical simulations were carried out to compare the thermo-aerodynamic behavior of a DSF equipped with single inner glazing to that of a DSF with double inner glazing. The study takes into account turbulent flow under forced convection, with an analysis of velocity fields, kinetic energy, pressure coefficient (C_p), and temperature distribution. The results highlight the benefits of double inner glazing, which significantly improves the energy efficiency of the system by reducing thermal losses and optimizing air dynamics within the cavity.

Keywords: cavity, single glazing, double glazing, forced convection, finite volume method.

المُلخَص

شهدت الواجهات ذات الغلاف المزدوج (Double Skin Façades - DSF) في السنوات الأخيرة تطورًا ملحوظًا في قطاع البناء، وذلك لما توفره من جمالية عالية وأداء حراري وميكانيكي متميز. ومع ذلك، تركّز معظم الدراسات على السلوك العام لهذا النوع من الواجهات دون التطرق بشكل دقيق لتأثير نوع الزجاج الداخلي. في هذا العمل، تم إجراء محاكاة رقمية ثلاثية الأبعاد لمقارنة السلوك الحراري والهوائي لواجهة DSF مزودة بزجاج داخلي مفرد مع واجهة أخرى مزودة بزجاج داخلي مزدوج. تأخذ الدراسة بعين الاعتبار الجريان المضطرب في حالة الحمل القسري، مع تحليل لمجالات السرعة، والطاقة الحركية، ومعامل الضغط (C_p)، وتوزيع درجة الحرارة. وقد أبرزت النتائج أهمية الزجاج الداخلي المزدوج، حيث يُحسن بشكل كبير من كفاءة الطاقة للنظام من خلال الحد من الفاقد الحراري وتحسين ديناميكية الهواء داخل التجويف.

الكلمات المفتاحية: التجويف، الزجاج المفرد، الزجاج المزدوج، الحمل القسري، طريقة الحجوم المنتهية.

Nomenclature

Lettres latines

Symboles	Désignations	Unités
α	Diffusivité thermique	(m ² /s)
C_p	Capacité calorifique du fluide	(J/kg.K)
h	Coefficient d'échange convectif	(W/m ² .K)
H	Hauteur	(m)
I	Intensité turbulente	(%)
I_λ	Luminance spectrale	(W/m ² .sr)
k	Energie cinétique turbulente	(m ² /s ²)
P	Pression	(Pa)
$\vec{\varphi}$	la densité du flux	(W /m ²)
T	Température	(K)
V	Vitesse	(m/s)
D	est une longueur caractéristique, telle que le diamètre hydraulique ou le diamètre du tube, exprimée en mètres	(m)
C_μ	est la constante empirique associée à la modélisation de la turbulence	
λ	est la conductivité thermique du matériau	(W/m.K)

Caractères grecs

Symboles	Désignations	Unités
α	Coefficient d'absorption	(-)
ε	Emissivité	(-)
ε	Dissipation de l'énergie cinétique	(m ² /s ³)
ε_d	Efficacité d'isolation dynamique	(%)
λ_f	Conductivité thermique du fluide	(W/m.K)
λ	Conductivité thermique	(W/m.K)
μ	Viscosité dynamique	(kg/m.s)
ν	Viscosité cinématique	(m ² /s)
ρ	Masse volumique	(kg/m ³)
ζ	Constante de Stefan-Boltzmann=5,67x10 ⁻⁸	(W/m ² .K ⁴)
γ	Angle azimutal de la paroi	(°)

Listes des figures et tableaux

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 : Isolation intérieure et extérieure des murs

Figure 1.2 : Isolation répartie des murs

Figure 1.3 : L'inertie thermique des murs

Figure 1.4 : Simple vitrage

Figure 1.5 : Double vitrage

Figure 1.6 : Triple vitrage

Figure 1.7 : Façade à double peau

Figure 1.8 : Protections solaires type vénitien, Poirazis

Figure 1.9 : Modes de ventilations

Figure 1.10 : Différents &changes thermiques

Figure 1.11 : Spectre électromagnétique

Chapitre 2

Figure 2.1 : Géométrie de la façade double peau

Figure 2.2 : Vitrage de la façade à double peau

Figure 2.4 : Principe de calcul numérique

Figure 2.3 : Représentation de la luminance monochromatique

Figure 2.4 : Domaine de calcul et conditions aux limites

Chapitre 3

Figure 3.1 : Les outils utilisés dans la création de la Géométrie

Figure 3.2 : Création de la géométrie

Figure 3.3 : Maillage des bords du domaine de calcul

Figure 3.4 : Le maillage final

Figure 3.5 : Conditions aux limites

Figure 3.6 : Exportation du maillage

Figure 3.7 : Le lancement du Fluent

Figure 3.8 : Importation de la géométrie dans Fluent

Figure 3.9 : Choix du matériel (Fluide air)

Figure 3.10 : Choix du matériel Solide verre

Figure 3.11 : Choix du modèle de radiation

Figure 3.12 : Choix du modèle de Turbulence

Figure 3.13 : Choix du modèle énergie

Figure 3.14 : Choix des différentes conditions aux limites

Figure 3.15 : Vitesse de l'air à l'entrée

Figure 3.16 : Condition out flow à la sortie

Figure 3.17 : Conditions aux limites thermiques au niveau du vitrage extérieur

Figure 3.18 : Précision de la solution

Chapitre 4

Figure 4.1 : Maillage des géométries

Figure 4.2 : Vecteurs de vitesse

Figure 4.3 : Contour de la vitesse pour les deux modèles de façade double peaux

(Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieure pour un flux de 820 w/m²)

Figure 4.4 : Contour de la vitesse pour les deux modèles de façade double peaux

(Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieure pour un flux de 700 w/m²)

Figure 4.5 : Contour de la vitesse pour les deux modèles de façade double peaux

(Modèle simple vitrage intérieur modèle double vitrage intérieure pour un flux de 600 w/m²)

Figure 4.6 : Profil de la vitesse à la position y=2.85 m de z=0 m à z=1.20 m pour x=0.12 m

Pour simple vitrage

Figure 4.7 : Profil de la vitesse à la position y=2.85 m de z=0 m à z=1.20 m pour x=0.12 m

Pour double vitrage

Figure 4.8 : Contour de l'énergie cinétique turbulente pour les deux modèles de façade double peaux
(Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieure pour un flux de 820 w/m²)

Figure 4.9 : Contour de l'énergie cinétique turbulente pour les deux modèles de façade double peaux
(Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieure pour un flux de 700 w/m²)

Figure 4.10 : Contour de l'énergie cinétique turbulente pour les deux modèles de façade double peaux
(Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieure pour un flux de 600 w/m²)

Figure 4.11 : Profil de l'énergie cinétique turbulente à la position $y=2.85$ m de $z=0$ m à $z=1.20$ m

Pour $x=0.12$ m Pour simple vitrage

Figure 4.12 : Profil de l'énergie cinétique turbulente à la position $y=2.85$ m de $z=0$ m à $z=1.20$ m

Pour $x=0.12$ m Pour double vitrage

Figure 4.13 : Contour de l'énergie cinétique turbulente pour les deux modèles de façade double peaux
(Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieure pour un flux de 820 w/m²)

Figure 4.14 : Contour de l'énergie cinétique turbulente pour les deux modèles de façade double peaux
(Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieure pour un flux de 700 w/m²)

Figure 4.15 : Contour de l'énergie cinétique turbulente pour les deux modèles de façade double peaux
(Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieure pour un flux de 600 w/m²)

Figure 4.16 : Profil de coefficient de pression à la position $y=2.85$ m de $z=0$ m à $z=1.20$ m pour $x=0.12$ m

Pour simple vitrage

Figure 4.17 : Profil de coefficient de pression à la position $y=2.85$ m de $z=0$ m à $z=1.20$ m pour $x=0.12$ m

Pour double vitrage

Figure 4.18 : Contour de la température pour les deux modèles de façade double peaux
(Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieure pour un flux de 820 w/m²)

Figure 4.19 : Contour de la température pour les deux modèles de façade double peaux
(Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieure pour un flux de 700 w/m²)

Figure 4.20 : Contour de la température pour les deux modèles de façade double peaux

(Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieure pour un flux de 600 w/m²)

Figure 4. 21 : Profil de la température à la position $y=2.85$ m de $z=0$ m à $z=1.20$ m pour $x=0.12$ m

Pour simple vitrage

Figure 4. 22 : Profil de la température à la position $y=2.85$ m de $z=0$ m à $z=1.20$ m pour $x=0.12$ m

Pour double vitrage

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 02

Tableau 2.1 : Conditions aux limites

Tableau 2.2 : Propriétés des matériaux

Chapitre 03

Tableau 3.1 : Les facteurs de sous-relaxation

Chapitre 04

Tableau 4.1 : valeurs moyennes de la vitesse, l'énergie cinétique turbulente, coefficient pression
et la température

Introduction générale

Introduction générale

Depuis plusieurs décennies, la communauté internationale est confrontée à une crise environnementale sans précédent, où les enjeux énergétiques et climatiques sont devenus centraux. L'urbanisation rapide, la croissance démographique et la forte dépendance aux énergies fossiles ont entraîné une augmentation continue de la consommation énergétique mondiale. Le secteur du bâtiment, à lui seul, représente environ 40 % de cette consommation, selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), et contribue significativement aux émissions de gaz à effet de serre. Ces constats soulignent l'urgence de concevoir des bâtiments plus économes en énergie et plus respectueux de l'environnement.

Face à ces défis, le concept de construction durable s'est progressivement imposé comme une nécessité. Il vise à concilier performance énergétique, confort des occupants et respect de l'environnement. Parmi les leviers d'action identifiés, l'enveloppe du bâtiment, et en particulier la façade, joue un rôle déterminant dans la régulation des échanges thermiques, la ventilation et l'éclairage naturel. La façade constitue ainsi une interface critique entre le bâtiment et son environnement extérieur.

Parmi les solutions innovantes, les façades à double peau (Double Skin Façades - DSF) attirent de plus en plus l'attention. Ce système, constitué de deux couches séparées par une lame d'air ventilée, permet d'améliorer les performances thermiques et acoustiques du bâtiment tout en offrant un fort potentiel d'adaptation aux conditions climatiques changeantes. Ces façades jouent un rôle stratégique dans la réduction des besoins en chauffage, en climatisation, et dans l'optimisation du confort intérieur. Elles peuvent aussi intégrer des dispositifs actifs (stores motorisés, capteurs de température, vitrages dynamiques), faisant d'elles des systèmes hybrides complexes.

Cependant, la littérature scientifique traite généralement de la façade double peau comme d'un système global, sans s'attarder suffisamment sur l'effet du type de vitrage intérieur sur la performance énergétique. Or, le choix entre simple et double vitrage peut avoir un impact significatif sur la dynamique thermique et aéroulque au sein de la lame d'air.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail de mémoire. Il s'attache à évaluer, par simulation numérique tridimensionnelle, le comportement dynamique et thermique de l'air dans deux configurations de façade double peau : l'une avec un simple vitrage intérieur, l'autre avec un double vitrage intérieur. L'étude se concentre notamment sur l'analyse de la vitesse de l'air, de l'énergie cinétique, du coefficient de pression (CFT) et de la distribution de température, sous des conditions de convection forcée en écoulement turbulent.

Les résultats obtenus visent à mettre en évidence les avantages potentiels du double vitrage intérieur, tant du point de vue de l'efficacité énergétique que du confort thermique. Ce travail s'inscrit dans une démarche d'optimisation de la conception des façades à double peau, en fournissant des repères utiles pour les architectes, ingénieurs et concepteurs engagés dans la transition énergétique du secteur du bâtiment.

De ce fait, ce mémoire est structuré en quatre chapitres complémentaires :

Chapitre 1 : Il fournit une vue globale sur le contexte énergétique et les avancées actuelles dans le secteur de l'efficacité énergétique des bâtiments. En analysant des notions essentielles comme le confort thermique, l'usage énergétique, les ouvertures et la ventilation, nous établissons les fondations requises pour élargir notre recherche sur l'isolation thermique d'une façade de bâtiment équipée de double vitrage.

Chapitre 2 : Il pose les fondations théoriques et physiques indispensables à notre analyse détaillée de l'isolation thermique d'une façade de bâtiment équipée de double vitrage. En appréhendant les divers éléments et en établissant une modélisation appropriée des éléments de la façade, nous serons capables de délivrer une estimation précise de l'efficacité énergétique de cette option architecturale.

Chapitre 3 : Ce chapitre décrit la simulation numérique qui constitue l'élément crucial de notre étude. En maîtrisant les principes fondamentaux de la CFD, en utilisant efficacement les logiciels Gambit et Fluent, et en choisissant les modèles appropriés, nous sommes en mesure de réaliser des simulations précises et fiables. Ces modélisations nous permettront

d'analyser en détail les performances thermiques de la façade, ainsi que d'évaluer l'efficacité de différentes configurations et stratégies d'isolation.

Chapitre 4 : Ce dernier chapitre synthétise les principaux résultats de l'étude des simulations numérique réalisée par le logiciel fluent 6.3, met en évidence les limites rencontrées, et propose des pistes d'amélioration pour de futures recherches sur les façades intelligentes et adaptatives. Les différents résultats de la simulation sont en termes de la vitesse ; énergie cinétique turbulente ; la pression et la température

A la fin, une conclusion générale et des perspectives seront présentées.

Chapitre 1

Généralités sur les façades à double peau ventilées

1.1 Introduction

Dans une conjoncture mondiale où l'urgence climatique et la réduction de notre consommation d'énergie sont primordiales, l'efficacité énergétique des bâtiments s'avère être un enjeu incontournable. Les édifices constituent une proportion importante de la consommation énergétique mondiale, et il est crucial d'améliorer leur efficacité énergétique pour réaliser les objectifs de durabilité. Dans ce segment intitulé « Contexte énergétique et état de l'Art », nous nous pencherons sur différents éléments concernant le confort thermique, la consommation d'énergie, les fenêtres et la ventilation au sein des édifices.

Assurer un environnement intérieur plaisant dépend essentiellement du confort thermique. Nous allons examiner les facteurs clés qui affectent le confort thermique, tels que les conditions environnementales comme la température des surfaces, la vitesse du flux d'air et sa température ambiante. Et les facteurs individuels tels que le métabolisme et le style vestimentaire. Il est essentiel de comprendre ces paramètres afin de concevoir des édifices qui répondent aux exigences demandées et qui optimisent la consommation d'énergie.

L'usage d'énergie représente un défi crucial dans le domaine de la construction. Nous allons étudier les sources d'énergie, l'usage mondial de l'énergie et plus précisément en Algérie. On mettra un accent particulier sur la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel, qui constitue une portion importante de la demande globale en énergie. Une compréhension des tendances et des obstacles liés à la consommation d'énergie dans ce domaine nous aidera à repérer les voies d'amélioration pour une utilisation énergétique plus performante.

La conception des édifices dépend fortement de l'utilisation des fenêtres et de la ventilation. Nous allons découvrir les éléments fondamentaux des fenêtres, en nous focalisant sur les cadres, les châssis et le verre. L'analyse du transfert thermique à travers les fenêtres sera aussi effectuée en profondeur. Sur le sujet de la ventilation, nous aborderons diverses techniques, y compris la ventilation naturelle, la ventilation mécanique contrôlée et la ventilation hybride. La compréhension des principes de ventilation nous aidera à mesurer l'influence de divers types de ventilation sur le rendement énergétique et le confort des occupants.

Pour conclure, ce chapitre fournit une vue globale sur le contexte énergétique et les avancées actuelles dans le secteur de l'efficacité énergétique des bâtiments. En analysant des notions essentielles comme le confort thermique, l'usage énergétique, les ouvertures et la ventilation,

nous établissons les fondations requises pour élargir notre recherche sur l'isolation thermique d'une façade de bâtiment équipée de double vitrage.

1.2 Le confort thermique

Le confort thermique se réfère à la sensation agréable ressentie dans un environnement ayant trait à la température. Pour qu'un individu éprouve ce confort, trois conditions primordiales doivent être réunies :

- Il est nécessaire que le corps puisse conserver une température interne constante.
- L'excès de transpiration doit être évité et la température cutanée moyenne doit demeurer plaisante.
- Il est impératif qu'aucune partie du corps ne soit soumise à une chaleur ou un froid extrême, pour prévenir tout inconfort localisé.

Bien que le confort thermique soit souhaitable, il demeure difficile à atteindre dans de nombreux environnements de travail [1].

Plusieurs paramètres influencent ce confort, notamment :

- La température intérieure du local, ainsi que sa répartition dans l'espace et au cours du temps, particulièrement dans la zone de séjour située à environ 1,5 mètre du sol ;
- La température des surfaces intérieures (ou température moyenne des parois) ;
- L'humidité relative de l'air dans le local ;
- La vitesse de l'air et sa direction par rapport aux occupants, dans la zone de séjour ;
- La qualité et la pureté de l'air intérieur.

1.3 La solution bioclimatique

1.3.1 Isolation thermique

Un matériau isolant thermique est un matériau présentant une faible conductivité thermique apparente. Malgré son épaisseur plutôt mince, il offre une résistance thermique adéquate pour

les applications prévues. Ainsi, c'est un matériau qui a une mauvaise conductivité thermique, qu'il s'agisse de conduction, de convection ou de rayonnement.

Dans une habitation, l'isolation thermique joue trois rôles importants. Elle a pour principal objectif d'améliorer le confort thermique, aussi bien pendant l'hiver que l'été. Par la suite, elle contribue à diminuer la consommation d'énergie associée au chauffage et à la climatisation. Finalement, elle participe à la création d'un habitat plus écologique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. [2]

Il existe trois types de l'isolation thermique :

1.3.1.1 L'isolation intérieure

Ce type d'isolation est largement utilisé grâce à ses multiples avantages. La facilité de mettre en œuvre représente un de ses bienfaits avec une application moins cher que d'autres types d'isolation et ne nécessite pas l'intervention d'un professionnel.

Alors que ses inconvénients sont plus importants car elle diminue l'espace habitable, supprime les bienfaits de l'inertie thermique, provoque la condensation des parois et n'élimine pas les ponts thermiques. [2]

1.3.1.2 L'isolation extérieure

Consiste à installer l'isolant sur la surface extérieure du mur. Ce souvent la solution la plus coûteuse mais aussi la plus performante. Elle constitue la meilleure isolation pour le confort d'été et d'hiver car elle permet de conserver l'inertie thermique forte des murs intérieurs et supprime les ponts thermiques.

Un bon isolant est évidemment un mauvais conducteur de la chaleur. [3]

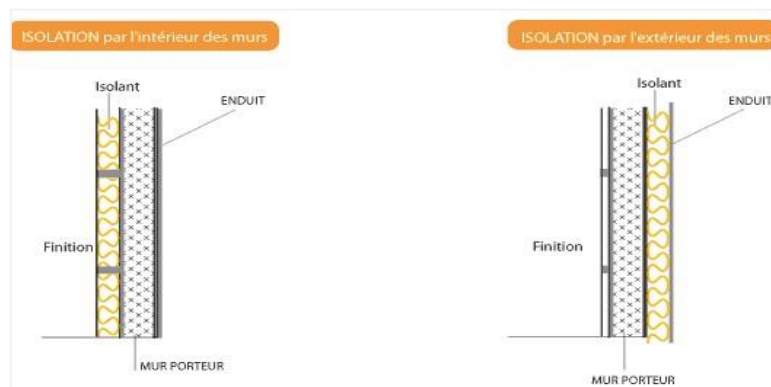


Figure 1.1 Isolation intérieure et extérieure des murs

1.3.1.3 L'isolation répartie

Elle est caractérisée par l'utilisation de l'isolation en tant que matériau de construction. Son rôle majeur est la stabilité de la construction, le remplissage et l'isolation en même temps. [2]



Figure 1.2 Isolation répartie des murs

1.3.2 L'inertie thermique

L'inertie thermique est la capacité d'un matériau à stocker l'énergie, traduite par sa capacité thermique. Plus l'inertie est élevée et plus le matériau restitue des quantités importantes de chaleur (ou de fraîcheur). Elle est utilisée en construction pour atténuer les variations de température extérieure, et permet de limiter un refroidissement ou une surchauffe trop importante à l'intérieur.

Deux types d'inertie existent, une inertie par absorption et une autre par transmission. Celle d'absorption augmente avec l'épaisseur et avec l'effusivité de la paroi. Celle de transmission augmente avec l'épaisseur et diminue avec la diffusivité de la paroi. [4]

La variation extérieure, due aux amplitudes thermiques du climat et aux effets du rayonnement solaire sur les parois d'enveloppe externe. En face de cette variation, l'inertie thermique agissante sera l'inertie thermique de transmission, celle qui s'oppose au transfert du flux à travers la paroi et ce sont les parois d'enveloppe exclusivement qui sont concernées.

- La variation intérieure due à l'intermittence des sources de chaleur interne et à la pénétration solaire par les baies (systèmes passifs à apports directs) face à laquelle on invoquera l'inertie par absorption et où les parois concernées sont toutes les parois internes y compris les planchers et le cloisonnement. [5]

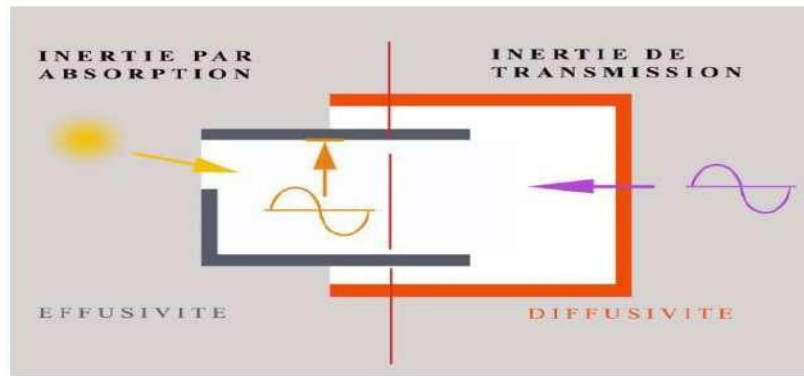


Figure 1.3 L'inertie thermique des murs

1.4 Le vitrage de fenêtre

Le vitrage est un moyen efficace d'augmenter la lumière naturelle, diminuant ainsi la nécessité de l'éclairage artificiel pendant le jour, tout en prévenant les risques d'aveuglement. Pour un usage optimal de cette lumière, le vitrage doit aussi contrôler le rayonnement solaire qui entre. Durant l'été, il est crucial de restreindre les gains solaires excessifs pour éviter la surchauffe des espaces intérieurs, ce qui peut engendrer un inconfort et une utilisation accrue de la climatisation. Cependant, pendant l'hiver, il est important de ne pas limiter trop sévèrement ces apports pour continuer à profiter de cette source d'énergie sans coût. [6]

1.4.1 Le type de vitrage

Il existe différents types de vitrages : simple vitrage, double vitrage, vitrage haut rendement et triple vitrage. Chaque type offre une valeur U_g . Celle-ci exprime la valeur d'isolation thermique du vitrage. Plus elle est basse, mieux c'est. [7]

1.4.1.1 Simple vitrage

Ce type de vitrage n'est composé que d'une simple feuille de verre. Vu sa haute valeur U_g (5,8 $W/m^2.K$), il n'est plus placé dans les nouvelles constructions, mais vous le trouvez encore souvent dans les maisons anciennes. [7]



Figure 1.4 Simple vitrage

1.4.1.2 Doubles vitrages

Le double vitrage se compose de deux feuilles de verre et offre une valeur U_g de 2,8 W/m²K.

Le vide, l'espace entre les deux feuilles de verre, est rempli avec de l'air sec. Plus épais est ce vide (entre 6 et 20 mm), meilleure sera l'isolation. [7]

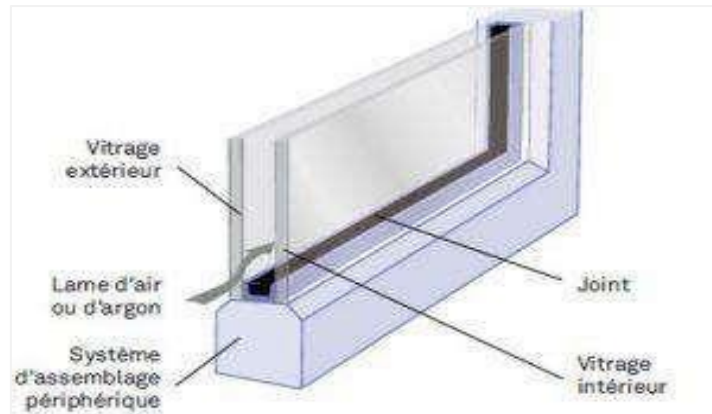


Figure 1.5 Double vitrage

1.4.1.3 Triples vitrages

Ce vitrage consiste à améliorer le pouvoir isolant en ajoutant une troisième plaque de verre séparé par deux espaces d'air ou le gaz. Il s'agit aussi d'une augmentation de l'épaisseur totale et du poids du vitrage. En outre les transmissions solaire et lumineuse diminuent. [6]



Figure 1.6 Triple vitrage

1.4.2 La façade à double peau de quoi s'agit-il ?

Ces dernières années, la façade à double peau (ou simplement façade ventilée) est apparue comme l'une des solutions architecturales les plus innovantes pour la construction de bâtiments durables et à haute efficacité énergétique [8,9,10,11]. Ce système, de plus en plus répandu dans

les projets de construction commerciale et résidentielle, offre non seulement des avantages esthétiques, mais également des bénéfices significatifs en termes d'économie d'énergie, d'isolation acoustique et de confort intérieur.

1.5 Description de la façade à double peau

Une façade double peau (DSF), faisant office de seconde enveloppe de bâtiment, se compose généralement d'une peau extérieure vitrée et d'une peau intérieure en matériau vitré ou partiellement vitré. Ces peaux sont séparées l'une de l'autre par une lame d'air dont la largeur peut varier de 0,2 m à plus de 2,0 m. Cette lame agit comme une zone tampon thermique et peut être ventilée par tirage thermique et vent ou par un système mécanique. Les systèmes DSF sont généralement proposés pour réduire les charges de chauffage en hiver en augmentant la température extérieure de la façade intérieure grâce au rayonnement solaire, et pour réduire les charges de refroidissement en été en abaissant la température de la façade intérieure grâce à la ventilation de la lame.

Dans les édifices traditionnels, la gestion du rayonnement solaire est généralement effectuée par des protections extérieures [12], une méthode qui s'avère souvent ardue à cause de l'interaction entre le climat et l'infrastructure (la protection).

Toutefois, dans le contexte de la DSF, l'utilisation d'un vitrage extérieur qui agit comme une seconde peau aide à surmonter ce problème. Cette double couche permet aussi l'ouverture de la fenêtre interne et facilite la ventilation naturelle de l'espace utilisé. [13]



(a). Sans protection solaire



(b). Avec protection solaire. Verre

Figure 1.7 : Façade à double peau, **Harrison et al.**

1.5.1 Le Verre

Il est possible que la surface externe de la DSF soit totalement en verre. Généralement, on installe un verre qui est souvent un verre trempé simple et hautement résistant. Il est soutenu par des éléments métalliques qui sont connectés à la structure de construction. La face intérieure de la DSF est généralement constituée d'un double vitrage, associé à un verre simple à basse émissivité. Dans la plupart des projets menés à bien, cette peau n'est pas entièrement vitrifiée. L'espace entre les vitres à double vitrage est comblé par de l'air, de l'argon ou du krypton. Le verre intérieur revêtu d'une émissivité faible diminue les apports de chaleur radiative intérieurement.

Poirazis et al [3] ont analysé quatre scénarios de façades à double peau en fonction de divers verres, ils recommandent l'utilisation d'un verre transparent de 8 mm pour le vitrage extérieur et d'un verre de 4 mm pour le vitrage intérieur, estimant que cela est suffisant pour assurer un bon facteur de transmission « U-factor ». Toutefois, c'est uniquement le mode de ventilation qui détermine la sélection du type de vitrage intérieur et extérieur. Dans de nombreuses situations, les deux vitrages ne sont pas identiques, selon Poirazis [15].

1.5.2 Protection solaire

Pour les façades traditionnelles, la protection solaire située soit à l'extérieur soit à l'intérieur du local. Alors, dans le cas d'une DSF et les grandes façades ventilées la protection peut être facilement située dans la cavité entre les deux verres de la façade.

Les caractéristiques de la protection solaire, tel que les propriétés du matériau (optiques et thermo-physiques), les dimensions, les formes géométriques et la position dans le canal, influent le comportement physique de la DSF. Donc, la sélection de la protection solaire doit être prise après la combinaison appropriée entre le choix du vitrage, la géométrie de la cavité et la stratégie de la ventilation, Poirazis [15].

Les protections solaires rencontrées dans la conception de la DSF, sont généralement de type, store vénitien, Figure 1.8, store enroulable ou store plissé. Un store vénitien se définit par un système de lamelles fines horizontales, reliées par des cordons et dont l'inclinaison peut être adaptée, ce qui permet de contrôler le rayonnement solaire pénétrant à l'environnement intérieur. Un store enroulable est constitué d'un rouleau sur lequel s'enroule la toile qui se déroule parallèlement à la vitre et un store plissé se compose d'une toile fine, souvent

translucide qui se replie verticalement grâce à un cordon de tirage. Les stores enroulables et les stores plissés sont rarement utilisés pour les DSF.



Figure I.8 : Protections solaires type vénitien, Poirazis [15].

1.5.3 Canal d'air

Pour la conception de la DSF, il est primordial de bien concevoir le canal d'air, car le comportement thermo-aéraulique de la DSF est déterminé par des paramètres tels que l'épaisseur du canal, sa hauteur et la nature de la ventilation. Le canal peut être étroit, avec une épaisseur allant de 0,1 m à 0,2 m.

On utilise souvent ce type de canal, car généralement, la ventilation naturelle est adéquate. Un canal est jugé large lorsqu'il a une épaisseur allant de 0,2 m à 2 m. Dans ce contexte, l'entrée dans la DSF pour des tâches de maintenance, par exemple, est autorisée. Pour la conception de la DSF, il est primordial de bien concevoir le canal d'air, car le comportement thermo-aéraulique de la DSF est déterminé par des paramètres tels que l'épaisseur du canal, sa hauteur et la nature de la ventilation. Le canal peut être étroit, avec une épaisseur allant de 0,1 m à 0,2 m.

Ce type de canal est fréquemment employé, car habituellement, la ventilation naturelle est appropriée. On qualifie un canal de large lorsqu'il possède une épaisseur variant de 0,2 m à 2 m. Ainsi, par exemple, l'accès au DSF pour des opérations de maintenance est permis.

1.6 Classification des configurations de la DSF

Dans cette étude, la classification de la DSF est bénéfique pour le choix de la façade. On identifie trois caractéristiques pour distinguer les différents types de façades à double peau. Ces

dernières se fondent sur les propriétés géométriques ainsi que sur le système et le genre de ventilation, Arons et al [16] et Saelens [17] :

- La forme de la ventilation.
- Le système de ventilation.
- La division de la façade.

1.5.4 Type de ventilation

Ceci se rapporte à la distribution d'air qui se trouve entre les deux panneaux de verre, (verre extérieur et intérieur), et peut inclure trois sortes, selon Loncour et al. [18].

1.5.4.1 Ventilation naturelle

La principale force motrice de la ventilation naturelle réside dans la différence entre la pression générée par l'effet de cheminée et celle générée par le vent. L'interaction de l'air froid entrant dans le conduit avec l'air chaud génère un écart de pression et de densité, ce qui facilite la circulation de l'air à travers le conduit. Dans le cas de la DSF et pour ce genre de ventilation, l'air peut être introduit dans les pièces pour des raisons de chauffage, ou alors il sera expulsé (aspiré) vers l'extérieur pour prévenir une surchauffe du conduit. Pour les immeubles à plusieurs étages séparés, tels que les bureaux, la ventilation naturelle est privilégiée. Cela facilite le mouvement de l'air entre les ouvertures des différents étages.

1.5.4.2 Ventilation mécanique

Dans le cas de la ventilation mécanique, le débit d'air traversant le canal de la façade à double peau est directement contrôlé par un ventilateur. Toutefois, la configuration des entrées et des sorties d'air, en particulier leurs dimensions et leurs emplacements, joue également un rôle déterminant sur la dynamique des écoulements dans le canal. Ces écoulements influencent fortement le champ thermique ainsi que les échanges convectifs au sein de la façade.

Par conséquent, il est essentiel de prendre en compte à la fois les propriétés thermodynamiques de l'air et le profil des écoulements à l'intérieur du canal. Une telle considération permet notamment d'éviter les phénomènes de condensation sur les surfaces vitrées. De la même manière, les protections solaires et leur position constituent un facteur important puisqu'ils influencent d'une manière sensible les mouvements d'air à l'intérieur du canal. Concernant les

vitesse à l'entrée et le Débit de soufflage du canal de la façade doivent engendrer un écoulement pleinement turbulent. Pour mieux connaître sa structure, les écoulements de l'air à l'intérieur du Canal des "façades de type double-peau" doivent être finement étudiés (la vitesse moyenne des écoulements et leur fluctuation turbulente doivent être considérées).

1.5.4.3 Ventilation hybride

Pour assurer la ventilation du canal dans les façades de type double-peau, il est possible d'opter pour une solution hybride. Ce système combine à la fois une ventilation naturelle et une ventilation mécanique, qu'on peut qualifier de ventilation naturelle assistée. Concrètement, la ventilation mécanique intervient lorsque la ventilation naturelle ne suffit plus à assurer un débit d'air adéquat. Généralement, le déclenchement de cette ventilation mécanique est automatisé : une station météorologique placée dans le bâtiment surveille les conditions climatiques, et active les ventilateurs en cas de conditions défavorables. C'est le cas, par exemple, du bâtiment de la Commerzbank à Francfort, en Allemagne, qui utilise ce type de système.

1.5.5 Mode de ventilation

La façade double peau ventilée peut également être classée selon son mode de ventilation. L'origine du flux d'air est une caractéristique importante car elle influence grandement la température moyenne finale de la cavité [19]. Le mode de ventilation fait référence au mécanisme de circulation de l'air dans la cavité, comme illustré à la Figure I.9 [20,21] :

1. Rideau d'air extérieur : Ce mode de ventilation permet à l'air extérieur d'entrer dans la cavité par le bas et d'être immédiatement rejeté vers l'extérieur par le haut. La ventilation de la cavité forme ainsi un rideau d'air enveloppant l'extérieur.
2. Rideau d'air intérieur : Dans ce mode de ventilation, l'air est introduit depuis l'intérieur de la pièce dans la cavité, puis réintroduit dans la pièce par le système de ventilation. Ce mode permet à la cavité de former un rideau d'air qui enveloppe la façade intérieure.
3. Alimentation en air : Le mode alimentation en air permet à l'air extérieur d'être introduit dans la cavité par le bas, puis ventilé à l'intérieur par le système de ventilation, créant ainsi une alimentation en air dans le bâtiment.

4. Extraction d'air : Ce mode de ventilation a pour but d'acheminer l'air intérieur vers l'extérieur à travers la cavité. Il évacue l'air du bâtiment vers l'extérieur.
5. Zone tampon : Le mode zone tampon fait que la peau agit comme une barrière hermétique. Aucune ventilation n'est autorisée, et elle sert de zone tampon entre l'intérieur et l'extérieur.

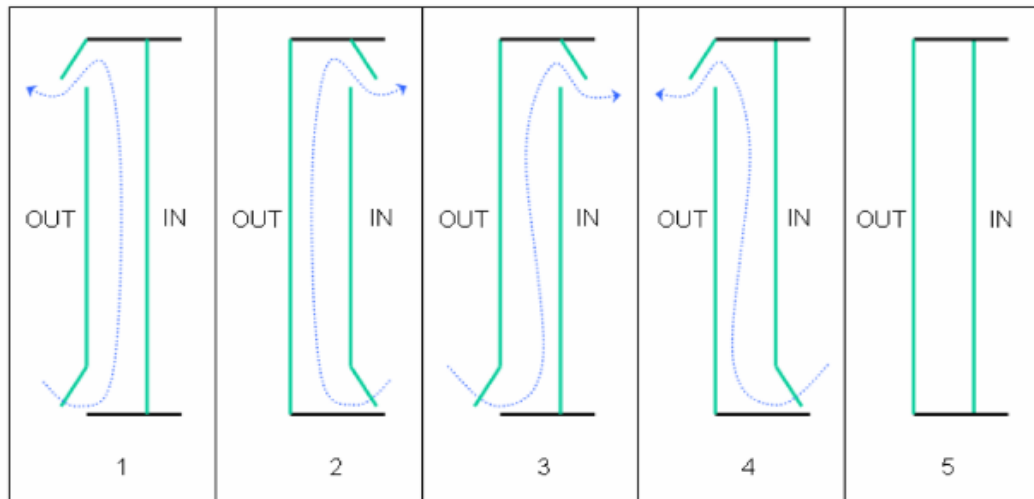


Figure I.9 Modes de ventilations

1.7 Avantages et inconvénients des DSF

La majorité des recherches concernant les performances de la DSF attestent que ses principaux atouts résident dans l'isolation thermique et acoustique. Voici un résumé des avantages principaux offerts par une DSF comparativement à une simple façade :

1.7.1 Avantages de la DSF

Malgré que le coût initial de la construction de la DSF soit supérieur, il peut être équilibré par une diminution des dépenses opérationnelles. Harrison et ses collaborateurs [22]. L'amélioration de l'isolation acoustique est la caractéristique la plus notable d'une DSF. Le degré d'isolation sonore est tributaire des ouvertures sur la surface externe, Bruneau et ses collaborateurs [23].

La majorité des études s'accordent à dire que l'isolation thermique est améliorée, surtout durant l'hiver, grâce à la surface additionnelle et la zone tampon, entraînant une diminution des déperditions de chaleur (amélioration du coefficient global de transfert de chaleur, U). Selon Poirazis et al. [14].

L'effet de tirage naturel généré par la façade, pendant l'exposition au soleil, favorise le déplacement et l'évacuation de l'air du canal. Quand on désire une ventilation naturelle, il est crucial de contrôler la position et le genre du matériau de l'ombrage, selon Poirazis et al. [19].

Au cours de l'été, le passage d'air forcé garantit une aération conséquente de toute la façade.

- Option de ventilation durant la nuit disponible.

La DSF préserve l'environnement interne des conditions climatiques (par exemple : pluie).

L'impact environnemental peut être réalisé par la diminution indirecte des émissions de CO₂.

- L'aspect esthétique de l'architecture et l'amélioration du design des édifices.
- Un éclairage naturel abondant qui optimise le confort visuel à l'intérieur.
- L'intégration possible à un système CVCA diminue les heures de fonctionnement de ce dernier.

1.7.2 Inconvénients de la DSF :

Le problème de surchauffe constitue l'enjeu principal lors de la conception d'une DSF, et mérite une évaluation approfondie. La littérature indique que la DSF présente d'autres désavantages, qui peuvent être synthétisés de la manière suivante :

Étant donné que la température de l'air du canal peut atteindre des niveaux très élevés, une attention particulière doit être portée à la conception du canal de ventilation de la cavité afin d'éviter tout problème de surchauffe.

Les coûts additionnels liés à l'exploitation tels que : les opérations de maintenance et les joints, entraînent une hausse des frais opérationnels, selon Oesterle et al. [10].

Le canal de ventilation présente généralement une largeur allant de 0,1 à 2 m, réduisant ainsi la surface utile disponible.

Lorsque la DSF n'est pas correctement conçue, le problème de surchauffe peut devenir critique. Dans certaines conceptions de la DSF, la prévention contre les incendies est un problème majeur. La connectivité du conduit de ventilation facilite la propagation en cas d'incendie. Oesterle et ses collègues [19].

1.8 Physique de la DSF

Les éléments influençant le comportement thermo-aéraulique de la DSF incluent l'ensoleillement, les températures intérieure et extérieure, la vitesse et l'orientation du vent, les

caractéristiques des matériaux constituant divers éléments de la DSF, ainsi que le genre et l'entretien des protections solaires, entre autres.

En fonction des vérifications et des conditions imposées, chacun de ces paramètres peut entraîner des effets appropriés ou non sur le comportement de la DSF. Dans ce travail, la DSF est simplement un canal vertical exposé aux conditions externes (ensoleillement, température extérieure, vent...) et aux conditions de l'environnement intérieur. Qu'elle soit équipée d'une protection solaire ou non, cette dernière paraît entraver le flux de l'air. On rencontre principalement les modes de transfert thermique suivants : le rayonnement, la convection et la conduction, comme l'illustre la Figure I.10 : [24]

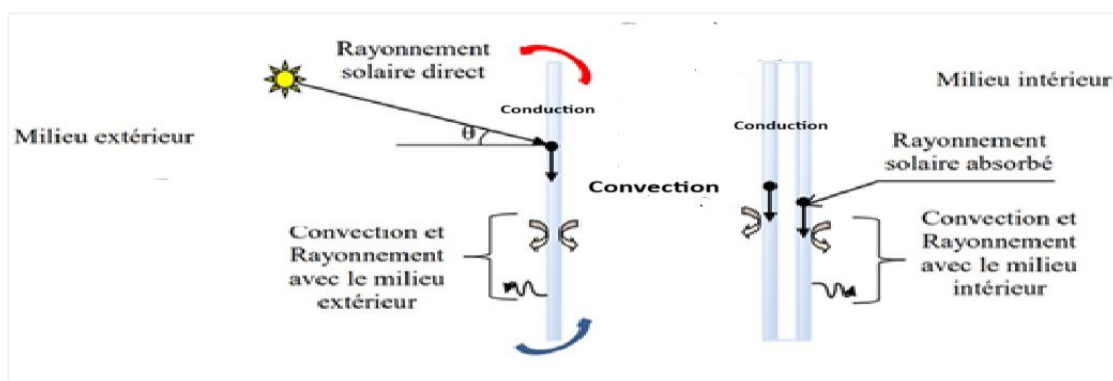


Figure I.10 Différents & échanges thermiques

1.9 La conduction

La conduction est le transfert de chaleur entre des matériaux ou des objets en contact direct. Ce phénomène repose sur l'agitation des molécules : dans une zone plus chaude, les molécules vibrent plus rapidement que dans une zone plus froide. Ces molécules rapides entrent en collision avec les plus lentes, leur transmettant de l'énergie et augmentant ainsi leur mouvement. Ce processus se propage de proche en proche, réchauffant graduellement l'objet ou la surface en contact.

La conduction peut aussi se produire à l'intérieur d'un même objet. Imagine un tisonnier en métal utilisé pour remuer des bûches enflammées. L'extrémité qui touche les braises devient très chaude. Cette chaleur se déplace ensuite le long de la tige métallique vers l'extrémité restée froide, jusqu'à ce que la température s'uniformise. Voilà pourquoi il est essentiel de porter un gant isolant pour éviter de se brûler !

Flux de chaleur échangé par conduction – loi de Fourier

Ce mécanisme de transfert est régi par une loi phénoménologique établie par Joseph Fourier en 1822, stipulant que la densité de flux échangée par conduction est proportionnelle au gradient de température (proportionnalité entre la cause (le gradient) et l'effet (le flux)). Cette loi, appelée loi de Fourier, s'écrit :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \vec{\nabla} T$$

Le signe '-' intervenant dans cette loi traduit le fait que le flux de chaleur circule des zones chaudes vers les zones froides (dans le sens opposé au gradient de température).

Le coefficient de proportionnalité, λ , est la conductivité thermique, en W/m/K.

La conductivité thermique dépend de la nature du corps considéré et dépend généralement de la température. Elle traduit la capacité d'un matériau à transporter la chaleur par conduction.

$$\lambda_{\text{Laine de verre}} = \mathbf{0,04 \text{ W/m/K}}$$

$$\lambda_{\text{air}} = \mathbf{0,026 \text{ W/m/K}}$$
 (l'air immobile est un très bon isolant)

$$\lambda_{\text{verre}} = \mathbf{1,2 \text{ W/m/K}}$$

$$\lambda_{\text{cuivre}} = \mathbf{390 \text{ W/m/K}}$$

1.10 La convection

La convection est un mode de transfert de chaleur qui se produit dans les liquides et les gaz, provoqué par des différences de température. Contrairement à la conduction, où les molécules vibrent sur place, la convection implique un déplacement physique des particules. En effet, dans les gaz et les liquides, les molécules sont plus espacées et ont donc plus de liberté de mouvement.

Lorsqu'un liquide ou un gaz est chauffé, les molécules dans la zone chaude gagnent de l'énergie, se déplacent plus rapidement, et deviennent moins denses. Cette partie chauffée monte, tandis que les zones plus froides, plus denses, descendent pour prendre sa place. Ce mouvement circulaire transporte la chaleur à travers le fluide : c'est ce qu'on appelle un courant de convection.

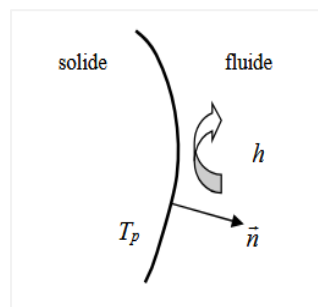
Un bon exemple est celui de l'eau chauffée dans une casserole sur une cuisinière. La chaleur est d'abord transmise par conduction du fond de la casserole à l'eau. Ensuite, l'eau chaude

devient moins dense et monte vers le haut, emportant avec elle l'énergie thermique. L'eau plus froide descend à son tour au fond, se réchauffe, et le cycle recommence. Ce processus dynamique constitue un courant de convection.

Flux de chaleur échangé par convection – loi de Newton

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton qui stipule que la densité de flux de chaleur échangé entre une paroi solide et un fluide en écoulement est proportionnelle à l'écart de température qui lui a donné naissance du point de vue du solide (flux entrant dans le fluide ou sortant du solide si $T_p > T_\infty$):

$$\vec{\varphi} = h(T_p - T_\infty)\vec{n}$$



h est une grandeur positive appelée coefficient d'échange convectif, en $(W.m^{-2}.K^{-1})$. Ce coefficient dépend de nombreux paramètres (fluide, type d'écoulement, état de surface...) est donc extrêmement difficile à quantifier précisément

1.11 Rayonnement

Le rayonnement est le troisième mode de transfert de chaleur, distinct de la conduction et de la convection. Contrairement à ces deux derniers, il ne nécessite aucun support matériel : le transfert d'énergie s'effectue par ondes électromagnétiques. C'est ainsi que le rayonnement thermique permet à l'énergie de se propager à travers le vide, sans intervention d'atomes ou de molécules.

Un exemple frappant est le Soleil, qui chauffe la Terre grâce à ce mécanisme : son énergie voyage dans l'espace sous forme d'ondes. Mais ce phénomène ne se limite pas au Soleil. Tous les corps chauds, comme un grille-pain, un radiateur ou même le corps humain, émettent du rayonnement thermique. Les micro-ondes, bien qu'utilisant un type spécifique d'ondes électromagnétiques, réchauffent également les aliments par un principe similaire de rayonnement.

Il existe différents types d'ondes électromagnétiques avec des longueurs d'ondes correspondantes. Le rayonnement thermique émis par les corps se situe entre 0,1 et 100µm. Le rayonnement est perçu par l'homme : - Par l'œil : pour 0,38 µm < λ < 0,78 µm rayonnement visible. - Par la peau : pour 0,78 µm < λ < 314 µm rayonnement IR.

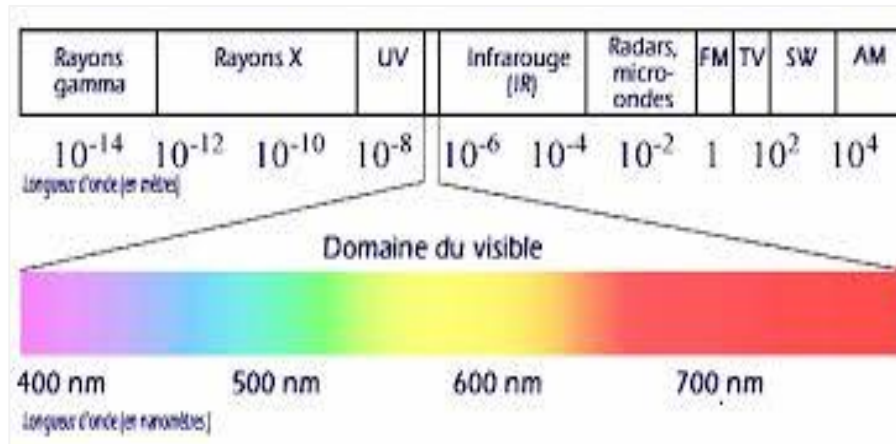


Figure I.11 Spectre électromagnétique

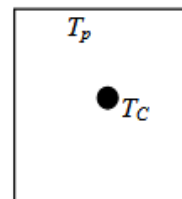
Flux de chaleur échangé par rayonnement – loi de Stefan

Le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps à des températures différentes séparés par du vide ou un milieu semi-transparent se produit par l'intermédiaire d'ondes

Électromagnétiques, donc sans support matériel. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Stefan.

Ex : corps de petite dimension placé dans une enceinte fermée

$$\varphi = \varepsilon\sigma(T_p^4 - T_c^4)$$



ε : émissivité du corps (0 < ε ≤ 1)

σ : constante de Stefan = 5.67 10⁻⁸ W/m²/K⁴.

1.12 État de l'art sur les approches de modélisation de DSF

L'intégration d'une façade à double peau (Double Skin Façade - DSF) dans la conception architecturale d'un bâtiment représente un levier stratégique en matière d'efficacité énergétique et de confort thermique.

Grâce à son principe de fonctionnement basé sur la création d'un espace tampon entre deux parois vitrées, la DSF permet de réguler les échanges thermiques et les mouvements d'air, contribuant ainsi à la réduction de la consommation énergétique, notamment en matière de chauffage, de climatisation et de ventilation. Par ailleurs, cette solution architecturale offre une amélioration notable du confort thermique et acoustique pour les occupants, tout en renforçant la protection solaire et la durabilité de la façade extérieure.

Les recherches consacrées à l'évaluation des performances thermo-aérauliques des façades à double peau se répartissent principalement selon deux approches complémentaires :

1. **La simulation numérique** à l'aide de codes de calcul (tels que CFD ou logiciels spécialisés en thermique du bâtiment) ;
2. **L'expérimentation en laboratoire ou institut**, impliquant des mesures réelles sur prototypes ou bâtiments existants.

La majorité des études numériques se focalisent sur l'analyse du champ de température et sur le comportement dynamique de l'écoulement de l'air à l'intérieur de la cavité ventilée. Ces simulations permettent de mieux comprendre les mécanismes de transfert thermique (conduction, convection, rayonnement) et d'évaluer l'efficacité du système en fonction de divers paramètres : configuration géométrique, type de ventilation (naturelle ou forcée), orientation, conditions climatiques, etc. Elles servent également d'outil de prédiction pour optimiser les performances de la façade avant sa mise en œuvre réelle.

Les approches expérimentales en laboratoire fournissent des informations fiables sur l'écoulement de l'air, la distribution de la température et le transfert de chaleur dans les DSF.

Des études expérimentales menées en laboratoire sur des façades à double peau sont présentées dans la littérature [18,25,24,26,20]. Le dispositif expérimental en laboratoire a permis d'obtenir des données plus fiables et plus variées.

Différentes stratégies de ventilation avec les conditions d'entrée du DSF ont été étudiées en utilisant des outils CFD pour obtenir des champs de vitesse et de température afin de réduire les consommations d'énergie [17].

Then parametrical studies conducted by CFD software were evaluated by non-dimensional heat transfer characteristics for forced convection through the surfaces of DSF's cavity. This kind

of fluid flow and heat transfer problems between two parallel plates are widely studied in the literature [27,28,29].

[30] Une étude notable a été menée par **Hazem Ahmed et al. (2016)**, qui ont utilisé la simulation numérique pour évaluer les performances thermo-aérauliques d'une façade à double peau ventilée naturellement. À l'aide du logiciel **ANSYS Fluent**, les auteurs ont modélisé le comportement de l'air dans la cavité d'une DSF sous différentes conditions climatiques et géométriques.

L'analyse portait sur le champ de température, la distribution de la vitesse de l'air, ainsi que sur l'effet de la largeur de la cavité et de la position des ouvertures. Les résultats ont montré que la convection naturelle dans la cavité permet une réduction significative de la température intérieure, en particulier lorsque les ouvertures sont correctement positionnées pour favoriser le tirage thermique.

Cette étude confirme que les simulations numériques permettent une compréhension fine du comportement thermo-aéraulique de la DSF, et aident à optimiser ses performances avant construction.

[31] La performance énergétique d'un bureau équipé d'un vitrage isolant conventionnel avec protection solaire extérieure et de trois typologies de façades multi-peaux (une fenêtre à flux d'air, une fenêtre d'alimentation en air et une fenêtre à ventilation naturelle) dans des conditions climatiques belges typiques.

Il a été constaté que les façades multi-peaux peuvent améliorer l'efficacité énergétique. Cependant, l'analyse montre que les variantes performantes en hiver ne sont pas nécessairement avantageuses en été. Combiner les typologies ou modifier les paramètres des systèmes en fonction de la situation particulière sera nécessaire pour obtenir une amélioration globale tout au long de l'année. Les résultats indiquent en outre que l'évaluation de l'efficacité énergétique des façades multi-peaux ne peut se résumer à l'analyse des pertes et des gains de transmission. Il est impératif de prendre en compte la variation d'enthalpie de l'air ambiant et de réaliser une analyse énergétique globale du bâtiment.

[1] Étude et analyse les performances thermiques d'une façade double peau à ventilation naturelle dans une région au climat chaud et humide, en prenant comme modèle le climat indonésien. L'étude s'appuie d'abord sur la simulation numérique afin de prédire les apports solaires et les performances thermiques des différents cas. Ces cas étaient basés sur la

combinaison de l'épaisseur du vitrage et de la distance entre les vitrages extérieur et intérieur, y compris l'orientation de la façade double peau.

Les résultats de la simulation numérique ont ensuite permis de calculer le coefficient U et le coefficient d'ombrage (COS) des façades double peau. Après avoir déterminé le coefficient U et le COS de la façade double peau, l'étape suivante a consisté à calculer la charge thermique du bâtiment modèle à l'aide de MicroHASP/TES.

La charge thermique résultant de l'outil de calcul a été utilisée pour concevoir le système de climatisation du bâtiment modèle, puis simulée à l'aide de l'outil LCEM afin d'évaluer la performance énergétique du bâtiment.

1.13 Conclusion

L'état de l'art présenté dans le premier chapitre met en évidence l'importance de la façade double peau (DSF) dans l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments. Pour une modélisation efficace, il est essentiel de prendre en compte les principaux phénomènes physiques en jeu, à savoir le rayonnement, la convection et la conduction. Par ailleurs, plusieurs paramètres influencent significativement les résultats, notamment les propriétés des vitrages, le choix des matériaux de la façade, ainsi que la nature et la gestion de la ventilation dans la cavité. Ces éléments sont indispensables pour évaluer précisément et optimiser les performances thermo-énergétiques du bâtiment.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser les performances thermo-aérauliques d'une façade double peau sans protection solaire, en considérant deux configurations : une première avec un simple vitrage intérieur et une seconde avec un double vitrage intérieur, appliquées à un immeuble soumis à des conditions spécifiques. Pour atteindre cet objectif, une approche basée sur la mécanique des fluides numérique (CFD) sera utilisée, offrant un outil puissant pour simuler les écoulements d'air et les transferts de chaleur au sein de la cavité.

Chapitre 2

Formulation du problème

2.1 Introduction

La section « Formulation du problème » est un élément crucial de notre étude. Ce chapitre vise à élaborer une modélisation physique des divers éléments de la façade, en intégrant les paramètres qui affectent son comportement thermo-aéraulique. En assimilant ces éléments essentiels, nous pourrons procéder à une évaluation précise et détaillée de l'efficacité énergétique de la façade.

Dans notre recherche, nous nous concentrons sur une configuration particulière de DSF, qui se distingue par une façade à double peau mesurant 3 mètres de haut, 1,2 m de large et 0,224 m d'épaisseur. Cette installation comprend, dans un premier cas, un vitrage extérieur et un vitrage intérieur en simple vitrage. Dans le deuxième cas, le vitrage extérieur est en simple vitrage, tandis que l'intérieur est équipé d'un double vitrage.

L'étude de cette géométrie nous permettra d'examiner en détail les transferts thermiques, les échanges d'air et l'efficacité thermique de la façade. La représentation physique de la façade s'appuie sur des équations de base qui illustrent la conservation de la masse, du mouvement et de l'énergie. Nous aborderons les diverses équations et les modèles de turbulence employés pour simuler avec précision le comportement thermo-aéraulique de la DSF.

De plus, nous traiterons aussi du transfert radiatif, qui a une importance primordiale dans les transferts thermiques à travers les éléments de la façade. Nous analyserons les relations entre le rayonnement solaire, la température de l'environnement et les caractéristiques des matériaux comme le verre et l'air.

Pour conclure, nous allons examiner la disposition géométrique de la DSF et les conditions aux limites qui doivent être intégrées dans notre modélisation. Cela englobe la vitesse et la température de l'air à l'extérieur comme à l'intérieur de la façade, sans oublier l'intensité turbulente. En outre, nous analyserons les conditions de frontière radiative spécifiques aux éléments de la façade, comme le verre et l'air.

Ainsi, ce segment intitulé « Formulation du problème » pose les fondations théoriques et physiques indispensables à notre analyse détaillée de l'isolation thermique d'une façade de bâtiment équipée de double vitrage. En appréhendant les divers éléments et en établissant une modélisation appropriée des éléments de la façade, nous serons capables de délivrer une estimation précise de l'efficacité énergétique de cette option architecturale.

2.2 Physique de la DSF

Ce chapitre vise à réaliser la modélisation physique des divers éléments de la façade.

Le comportement thermo-aéraulique de la DSF est influencé par divers facteurs tels que le rayonnement solaire, les températures extérieures et intérieures, vitesse de l'air, caractéristiques des matériaux constituant les divers éléments de la DSF.

2.3 Géométrie

La figure suivante présente la géométrie du modèle physique de notre façade à double peau.

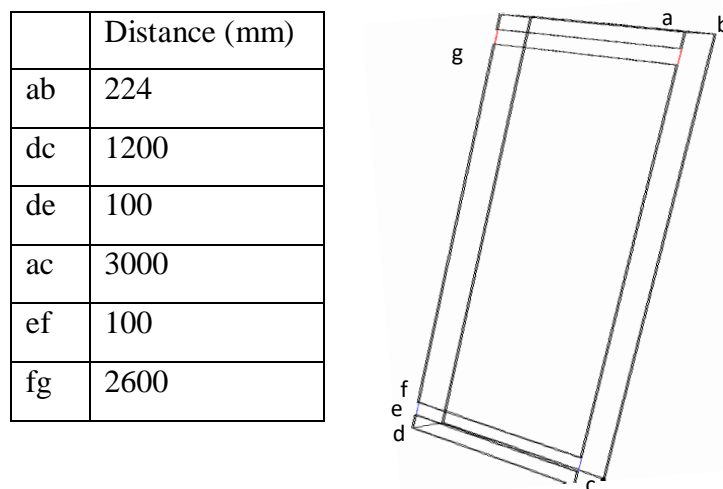
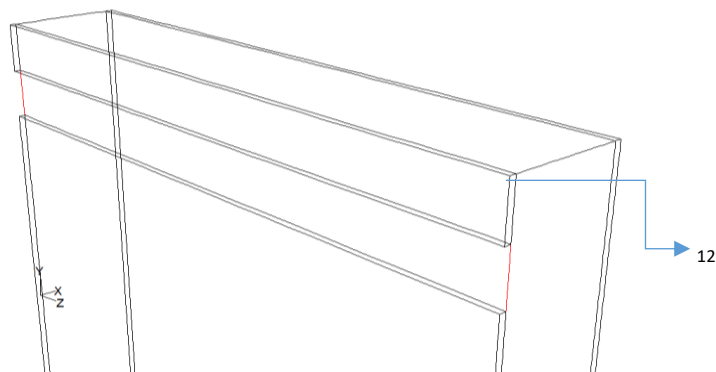
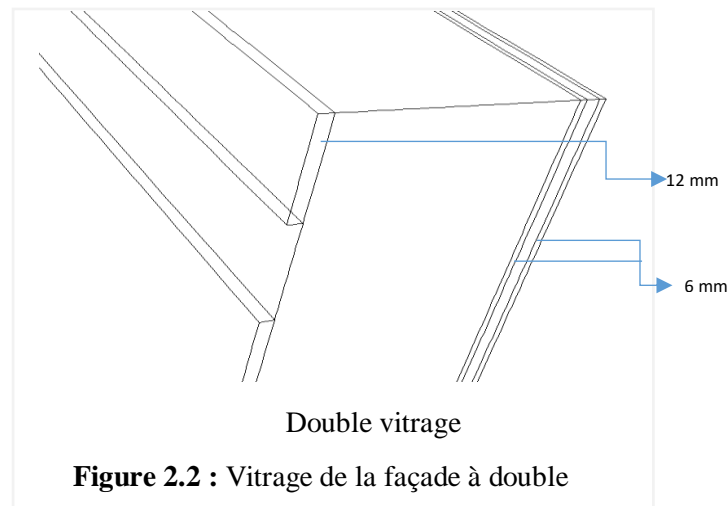


Figure 2.1 : Géométrie de la façade

Cette étude porte sur le domaine physique suivant : Une façade double peau de 3 mètres de hauteur avec une largeur de 1.2 mètres et une épaisseur de 0.224 mètres qui constitue la façade double peau, Dans un premier cas, le vitrage extérieur ainsi que le vitrage intérieur sont tous deux en simple vitrage. Dans le deuxième cas, le vitrage extérieur est en simple vitrage, tandis que l'intérieur est équipé d'un double vitrage.



Simple vitrage



2.4 Hypothèses simplificatrices

Dans l'étude, les suppositions simplificatrices adoptées sont les suivantes :

- 1 On utilise un fluide newtonien pour le processus.
- 2 Le fluide est incompressible.
- 3 On considère que l'écoulement de l'air est stationnaire.
- 4 Les caractéristiques de l'air sont jugées constants.

2.5 Equations générales

2.5.1 Equation de la conservation de la masse

Aussi connue sous le nom d'équation de continuité, l'équation de conservation de la masse est un principe crucial en mécanique des fluides qui illustre la préservation de la masse pendant le mouvement d'un fluide. [21]

La formule mathématique de la loi de conservation de la masse pour un fluide est la suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0$$

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$: terme instationnaire de la variation locale de la masse en fonction du temps

$\vec{u} = (u, v, w)$

$\nabla(\rho \vec{u})$: variation convective due au champ de vitesses

$\rho = \text{constante}$ (incompressible)

Alors $\nabla(\rho\vec{u}) = 0$

Pour un écoulement incompressible stationnaire $\frac{\partial\rho}{\partial t} = 0$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

2.5.2 Equation de la conservation de la quantité de mouvement

L'équation de Navier-Stokes, qui représente la conservation de la quantité de mouvement, est une équation essentielle dans le domaine de la mécanique des fluides. Elle explique comment la quantité de mouvement d'un liquide évolue avec le temps sous l'effet des forces qui lui sont imposées. Dans le cas d'un flux incompressible et stationnaire, cette équation est formulée en coordonnées cartésiennes : [34]

Les équations de Navier-Stokes moyennées, qui régissent le mouvement du fluide, sont :

Equation de la conservation de la quantité du mouvement

Suivant l'axe x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.3)$$

Suivant l'axe y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.4)$$

Suivant l'axe z :

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.5)$$

$u = \bar{u} + u'$, \bar{u} : est la vitesse moyenne et u' est la fluctuation turbulente dans la direction de l'axe x.

$v = \bar{v} + v'$, \bar{v} : est la vitesse moyenne et v' est la fluctuation turbulente dans la direction de l'axe y.

$w = \bar{w} + w'$, \bar{w} : est la vitesse moyenne et w' est la fluctuation turbulente dans la direction de l'axe z.

Equation de la conservation de l'énergie :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.6)$$

$p = \bar{p} + p'$, \bar{p} : est la pression moyenne et p' est la fluctuation de pression.

$T = \bar{T} + T'$, \bar{T} : est la température moyenne et T' est la fluctuation de température

2.5.3 Le modèle de turbulence

On a employé le modèle standard k-ε dans cette recherche. C'est un modèle qui s'appuie sur les équations de transport de la turbulence cinétique k et de sa dissipation ε. Dans le modèle k-ε, la viscosité turbulente est définie en termes de k et ε à l'aide de l'équation ci-dessous[33]:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

Où :

ε : appelé taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente [m^2/s^3].

k : énergie cinétique turbulente [m^2/s^2].

ρ : Masse volumique [kg/m^3]

C_μ : est la constante empirique associée à la modélisation de la turbulence.

$$I = 0.16(Re)^{-1/8} \quad (2.8)$$

I : est l'intensité turbulente

2.5.4 Le nombre de Reynolds

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

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.9)$$

2.5.5 Le nombre de Prandtl

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

$$\alpha = \lambda_f / \rho C_p \quad (2.10)$$

λ : conductivité thermique du fluide [$W/m.K$]

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

On le définit par :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda_f} \quad (2.11)$$

2.5.6 Le nombre de Nusselt

Le Nombre de Nusselt Nu est le rapport du flux thermique e, transmis par convection à un flux[34].

$$Nu = \frac{hD}{\lambda_f} \quad (2.12)$$

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].

2.5.7 Equation de la conduction

La conduction est le procédé de transmission de chaleur à travers un matériau solide ou un liquide stationnaire, en raison d'un écart de température. Elle est régie par la loi de Fourier :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \nabla T \quad (2.13)$$

Où :

$\vec{\varphi}$ est le vecteur densité de flux thermique [W/m²],

λ est la conductivité thermique du matériau [W/m·K],

∇T est le gradient de température [K/m].

2.5.8 Equation de pression

Le coefficient de pression, souvent noté Cp, est un paramètre utilisé en aérodynamique et en mécanique des fluides pour quantifier la variation de pression locale d'un fluide par rapport à la pression de référence (habituellement la pression stagnation ou la pression ambiante). Il est défini par la formule :

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (2.14)$$

Où :

P est la pression locale à un point donné,

P_∞ est la pression de référence (par exemple, pression ambiante ou pression de l'écoulement libre),

ρ est la densité du fluide,

V est la vitesse du fluide à ce point.

Ce coefficient permet de comparer la pression locale à la pression dynamique du fluide. Il est largement utilisé pour analyser les profils de pression sur des surfaces comme les ailes d'avion, les profils hydrauliques, ou les surfaces de véhicules en mouvement.

2.6 Calcul numérique

Le modèle mathématique est exprimé en tant que système d'équations aux dérivées partielles (EDP), qui est par la suite transformé en un ensemble d'équations algébriques à l'aide d'une méthode appropriée.

La Figure illustre le processus de calcul numérique.

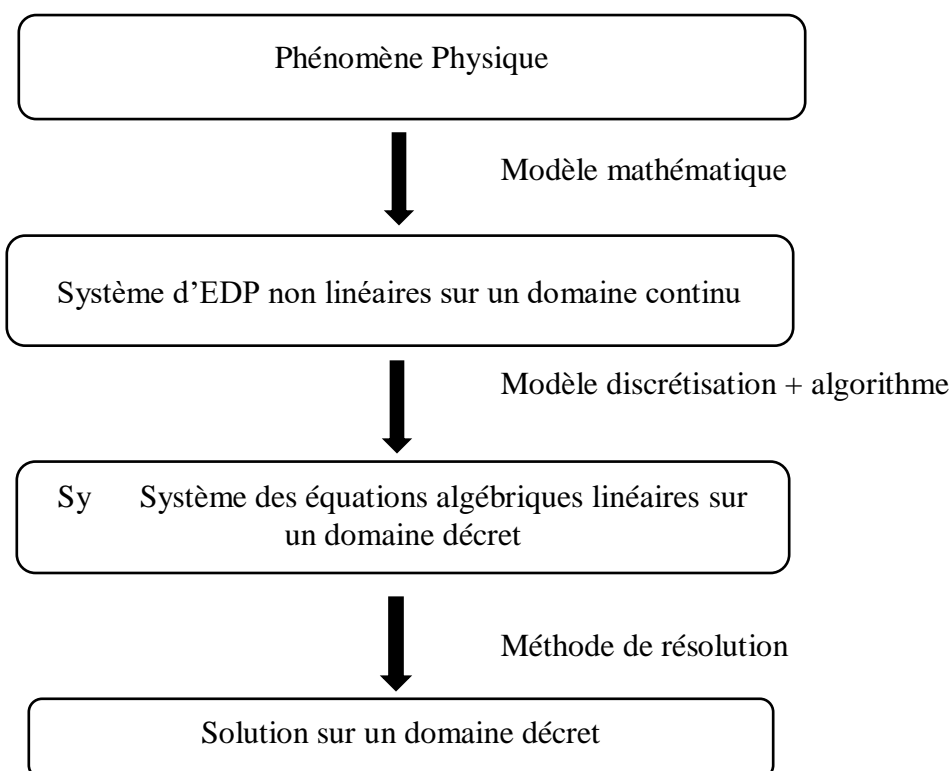


Figure 2.3 : Principe de calcul numérique

2.7 Les différentes méthodes numériques de discrétisation

Il existe diverses méthodes concurrentes et complémentaires pour passer d'un problème précis (continu) à un problème approximatif (discret), les plus réputées étant :

- Méthode des Différences Finies (MDF).
- Méthode des éléments finis (MEF).
- Technique de volumes finis (MVF).

2.7.1 Méthode des différences finis

Entre 1960 et 1965, la méthode des différences finies a été à l'avant-garde des premières simulations en mécanique des fluides et en transfert thermique. Sa méthode repose sur la discrétisation des équations aux points de la grille, en déterminant chaque dérivée partielle par le biais de l'expansion de Taylor. Ceci conduit à l'établissement d'équations linéaires qui lient les variables méconnues à un nœud aux valeurs de ces mêmes variables sur les nœuds adjacents. La justesse du schéma est conditionnée par le nombre de nœuds de l'ensemble sélectionné pour approcher une certaine dérivée et par la qualité du maillage réalisé, qui nécessite souvent l'emploi d'un maillage ordonné et organisé.

2.7.2 Méthode des éléments finis

L'approche des éléments finis consiste à discrétiser l'espace en employant des éléments géométriques basiques, comme des triangles ou des quadrangles. Souvent choisie pour sa faculté à modéliser des géométries complexes, cette technique a été originellement conçue dans les années 1970 dans le but de résoudre les équations de Navier-Stokes. Dans cette technique, les équations sont réécrites en une forme affaiblie, où les variables indéterminées sont estimées par une combinaison linéaire de fonctions de base possédant un support élémentaire. Cette combinaison linéaire de fonctions est ensuite utilisée pour calculer les valeurs manquantes. La méthode des éléments finis s'effectue en deux phases majeures :

On commence par approcher les fonctions inconnues à l'aide de fonctions d'interpolation sur des sous-domaines, puis on applique la méthode des résidus pondérés, comme la technique de Galerkin.

Cela permet d'élaborer une expression complète des équations aux dérivées partielles, proposant ainsi une méthode conservatrice sur un domaine spécifique.

2.7.3 La méthode des volumes finis

La technique des volumes finis se base sur la division du domaine physique de l'écoulement en éléments volumineux connus sous le nom de volumes de contrôle. Ces volumes présentent généralement des formes variables et uniformes. Ces volumes de contrôle intègrent de manière conservatrice les équations qui gouvernent l'écoulement. Le but est de convertir les équations différentielles en un ensemble d'équations algébriques, associant les valeurs des variables comme la pression, la vitesse ou la température aux points voisins du volume de contrôle.

- L'implémentation de la méthode des volumes finis implique généralement le respect de plusieurs phases :
- On divise le domaine de calcul en volumes de contrôle distincts grâce à un maillage.
- Les équations de flux sont incorporées dans chaque volume de contrôle séparé, ce qui permet d'élaborer des équations algébriques pour les variables discrètes (qu'on ne connaît pas), comme la vitesse, la pression, la température et d'autres grandeurs scalaires conservées.
- Les équations discrétisées sont transformées en équations linéaires, et le système d'équations linéaires obtenu est résolu afin de trouver les valeurs des variables dépendantes. Plusieurs programmes de simulation numérique en mécanique des fluides utilisent la technique des volumes finis, parmi eux Fluent, Star CD, CFX et Fine turbo.

2.7.3.1 Avantages et inconvénients

Comme toute méthode numérique, la technique considérée présente à la fois des points forts et des limites. Il est important d'en évaluer les principaux avantages ainsi que les contraintes qu'elle peut imposer, notamment dans le cadre de simulations complexes.

Avantage :

- 1 Méthode adaptée de manière rigoureuse aux lois de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie).
- 2 Permet l'utilisation de **maillages non structurés**, ce qui est particulièrement avantageux pour la modélisation de **géométries complexes**.

Inconvénients :

- 3 Présente des difficultés pour le passage à des ordres supérieurs (montée en rang), ce qui peut limiter la précision pour certaines applications avancées.

2.8 Principe de la méthode des volumes finis

Voici les étapes pour résoudre en utilisant la méthode des éléments finis :

2.8.1 Maillage

La technique consiste à diviser le champ d'étude en grilles longitudinales et transversales, chaque point de croisement représentant un nœud avec les éléments u et v de la vitesse

vectorielle. Ces éléments se trouvent entre les segments qui relient deux nœuds voisins. Le maillage comprend un ensemble de points où les valeurs scalaires comme la pression et la température sont conservées au point nodal P, alors que les grandeurs vectorielles u et v se situent au centre des segments entre ces nœuds.

Les équations de transport sont appliquées sur les volumes de contrôle liés aux variables scalaires, alors que les équations du mouvement sont appliquées sur les volumes de contrôle associés aux composantes de vitesse. Le volume de contrôle pour la composante longitudinale u est décalé le long de l'axe x par rapport au volume de contrôle principal, alors que celui de la composante transversale v est décalé le long de l'axe y .

Cette technique de maillage, connue sous le nom de maillage décalé, favorise une approximation précise des flux convectifs et optimise l'évaluation des gradients de pression, ce qui aide à assurer la stabilité numérique de la solution.

2.8.2 Discrétisation des équations gouvernantes

L'étape essentielle de la technique des volumes finis consiste à intégrer les équations qui gouvernent l'écoulement pour chaque volume de contrôle. Cette intégration génère des équations algébriques qui facilitent la résolution des équations de transport. Un volume de contrôle est défini par un groupe de surfaces qui entoure chaque nœud du maillage. Les nœuds de ces volumes contiennent les variables pertinentes au problème et les propriétés du fluide. Les équations décrivant le flux sont formulées en moyenne dans un cadre de coordonnées cartésiennes (x, y, z) .

2.9 Transfert radiatif

Le phénomène physique du rayonnement thermique se définit par l'émission et l'absorption d'énergie électromagnétique par des corps ayant une température déterminée. Tous les corps, indépendamment de leur composition ou état physique, peuvent émettre et absorber du rayonnement thermique.

Le phénomène du rayonnement thermique se définit par une transmission d'énergie électromagnétique, sans que le milieu entre les deux parties concernées doive nécessairement être impliqué dans cet échange. Il se définit par des longueurs d'ondes allant de $0.1\mu\text{m}$ à $100\mu\text{m}$, intégrant le spectre visible (ondes lumineuses ou lumière de $0.4\mu\text{m}$ à $0.8\mu\text{m}$) et ne représentant qu'une petite part du spectre des ondes électromagnétiques.

L'expression de la luminance spectrale d'une source lumineuse ponctuelle, symbolisée par $I_\lambda(s, \Delta)$ à une distance s de l'observateur, dans une direction définie par le vecteur unitaire Δ , pour une longueur d'onde spécifique λ . On obtient cette expression à l'aide de la formule ci-dessous :

$$I_\lambda(s, \vec{\Delta}) = \frac{dQ}{ds \cdot \cos\theta \cdot d\lambda \cdot d\Omega} \quad (2.15)$$

Définitions des termes :

dQ_λ : quantité de lumière (flux énergétique ou rayonnement) émise à la longueur d'onde λ , dans une direction donnée, dans l'élément d'angle solide $d\Omega$, par l'élément de surface ds .

ds : élément de surface de la source lumineuse d'où est émise la lumière.

$\cos\theta$: le cosinus de l'angle θ entre la normale à la surface et la direction d'observation (il permet de tenir compte de la projection de la surface apparente dans la direction d'émission).

$d\Omega$: élément d'angle solide, mesurant l'extension angulaire dans laquelle la lumière est émise.

Unité de la luminance spectrale :

En radiométrie : $W * m^{-2} * sr^{-1} * nm^{-1}$

En photométrie (pondérée par la sensibilité de l'œil humain) : $cd * m^{-2} * nm^{-1}$

Où dQ représente la quantité de lumière émise dans une direction spécifique à une longueur d'onde précise, ds correspond à l'élément de surface de la source lumineuse, $\cos\theta$ est le cosinus de l'angle formé entre la normale à la surface de la source et le vecteur directionnel de l'observation, $d\lambda$ symbolise l'élément de longueur d'onde tandis que $d\Omega$ désigne l'élément d'angle solide.

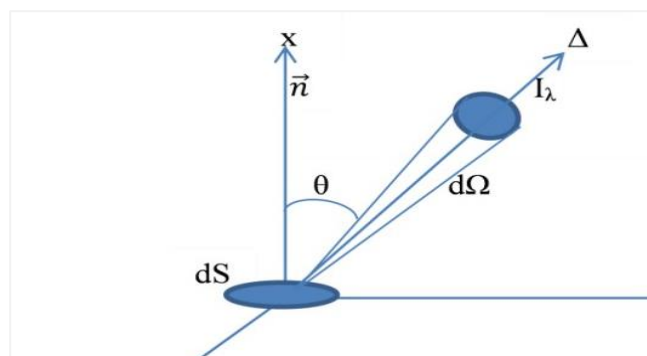


Figure 2.4 : Représentation de la luminance monochromatique

Le code CFD FLUENT offre cinq modèles distincts pour la simulation du rayonnement thermique :

- modèle de transfert radiatif discret (DTRM),
- modèle P-1 de rayonnement,
- modèle de rayonnement de Rosseland,
- modèle S2S (Surface-to-Surface) de rayonnement et le -modèle à ordonnées discrètes (DO).

La sélection du modèle approprié pour résoudre l'ETR, mentionné précédemment, se fonde essentiellement sur les caractéristiques optiques particulières du verre et l'exigence de traiter l'ETR sur deux bandes spectrales distinctes.

En effet, l'approche des OD (Méthode des Ordonnées) est fréquemment employée pour représenter les parois semi-transparentes dans le contexte du transfert radiatif. Cette approche segmente l'espace en se basant sur des directions de rayonnement discrètes, dénommées ordonnées, et autorise la prise en compte des interactions radiatives à travers les surfaces.

2.10 Configuration géométrique et conditions aux limites

La figure II.2 illustre la configuration de la cavité employée pour l'analyse numérique. L'entrée et la sortie du flux d'air est modélisé au niveau de la première façade (PF).

L'écoulement dans la cavité de la façade double peau est considéré turbulent incompressible et on a supposé la condition de couplage à l'interface solid-fluid.

Le flux thermique du rayonnement a été appliqué sur la première façade pour trois simulations (600, 700, 820 w/m²).

Tableau 2.1 : Conditions aux limites

Conditions aux limites		
Vitesse de l'air	$V = 0.5 \text{ m/s}$	
Température de l'air	302 K	
Intensité turbulente	5.9%	
Verre extérieur		
Coefficient d'échange hex	10 W/m ² K	
Rayonnement solaire	Simple vitrage	600 W/m ² K
		700 W/m ² K
		820 W/m ² K
	Double vitrage	600 W/m ² K
		700 W/m ² K
		820 W/m ² K
Verre intérieur		
Coefficient d'échange h_{in}	2.5 W/m ² K (double vitrage) 6 W/m ² K (simple vitrage)	
Température ambiant	298 K (double vitrage) 300 K (simple vitrage)	

2.10.1 Condition aux limites à la sortie

Lors de la sortie du domaine, on impose la condition « Outflow », qui est utilisée lorsqu'on ne dispose pas d'informations sur la vitesse et la pression. Cette condition convient aux fluides incompressibles et dans les situations où l'écoulement à la sortie est pleinement développé.

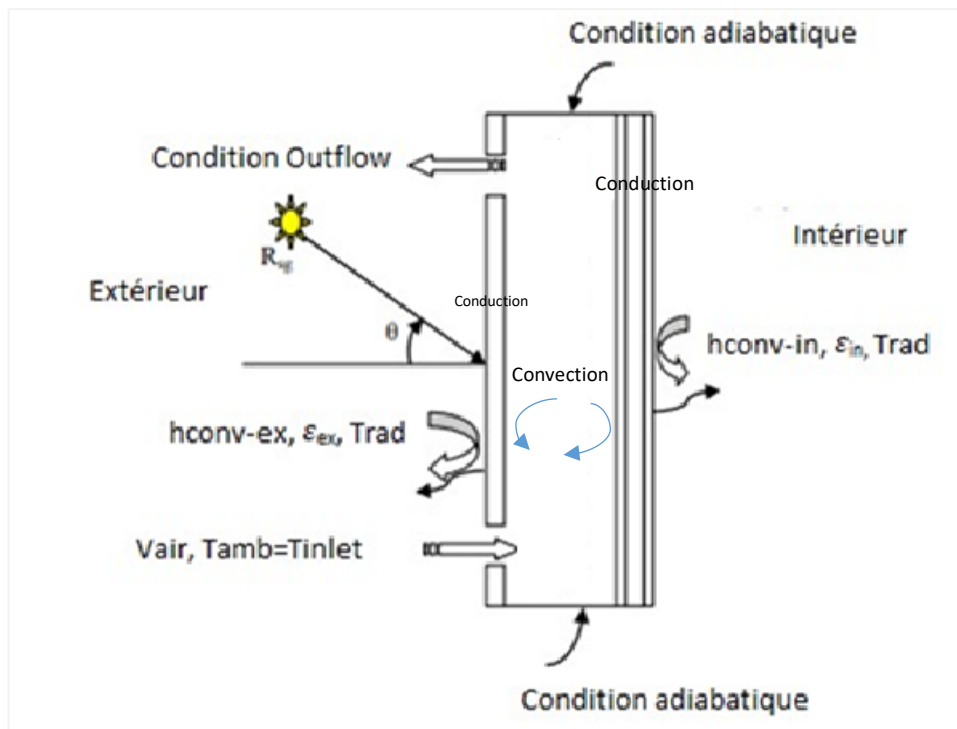


Figure 2.5 : Domaine de calcul et conditions aux limites

2.10.2 Conditions aux limites radiatives

Concernant les caractéristiques des matériaux, le verre, l'air dans le canal et le double vitrage ont été pris en compte comme étant des milieux semi-transparentes. L'aluminium, utilisé comme matériau de protection solaire, est considéré comme un milieu opaque.

Tableau 2.2 : Propriétés des matériaux

	ρ Kg/m ³	Cp J/kg K	μ kg/ms	λ W/m.K	n	α	ϵ
air	1.225	1006.43	1.789×10^{-5}	0.0243	1.0	0.01	
Verre	2430	840		1.4	1.5	0.11	0.85

2.11 Conclusion

En résumé, ce chapitre intitulé "Formulation du problème" a joué un rôle crucial dans la mise en place des fondations nécessaires à notre étude sur l'isolation thermique d'un bâtiment doté d'une façade équipée de double vitrage comparait a une façade dotée d'un simple vitrage.

À travers une modélisation physique détaillée des différents composants de ses façades, en tenant compte des paramètres clés qui influencent son comportement thermo-aéraulique, nous avons pu approfondir notre compréhension des mécanismes fondamentaux qui régissent la transmission thermique et le flux d'air au sein de ses structures.

La formulation des équations générales, intégrant également les phénomènes liés au transfert radiatif, constitue un cadre analytique robuste qui nous permettra d'analyser avec précision les échanges de chaleur et d'air, de mieux comprendre leur impact sur la performance énergétique des façades. Par ailleurs, la prise en compte de la configuration géométrique spécifique du bâtiment ainsi que des conditions aux limites adaptées assure une modélisation réaliste et fidèle à la réalité du système étudié.

Ces éléments théoriques et méthodologiques constituent une étape essentielle avant de passer à la phase suivante de notre projet. À ce stade, nous sommes désormais en mesure de développer la géométrie des modèles, de réaliser des simulations numériques approfondies, et d'évaluer de manière précise les performances énergétiques des façades doubles vitrage et simple vitrage.

Ces démarches futures nous permettront d'identifier les améliorations possibles en matière d'isolation thermique et d'efficacité énergétique, dans le but d'optimiser la conception des façades pour réduire la consommation énergétique des bâtiments, tout en améliorant le confort thermique des occupants.

En somme, cette étape de formulation du problème constitue le socle sur lequel reposera l'ensemble de notre étude, et elle nous prépare à aborder avec rigueur et méthodologie les prochains défis liés à l'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments modernes.

Chapitre 3

Simulation Numérique

3.1 Introduction

Dans le chapitre intitulé « Simulations Numériques », nous mettons l'accent sur l'utilisation de la dynamique des fluides numérique (CFD) comme outil essentiel pour analyser notre géométrie. Nous abordons les aspects clés de la simulation numérique, en insistant notamment sur les logiciels Gambit et Fluent, ainsi que sur le choix des modèles et des conditions aux limites.

La modélisation numérique des fluides (CFD) est une spécialité qui offre la possibilité de résoudre numériquement les équations essentielles de la dynamique des fluides, dans le but de simuler et anticiper le comportement des fluides au sein de systèmes complexes. Nous débutons par l'explication de la CFD et son importance, en mettant en évidence les secteurs où cette méthode est employée dans le milieu industriel.

Nous examinons ensuite le logiciel Gambit, qui est couramment utilisé pour la conception de la géométrie et l'élaboration du maillage des modèles CFD. Nous examinons les diverses phases de construction de la géométrie, ainsi que la sélection du maillage approprié à notre géométrie d'analyse. En outre, nous abordons les conditions aux limites propres à la géométrie que nous examinons, qui sont cruciales pour déterminer les propriétés du système à modéliser.

Ensuite, nous présentons le logiciel Fluent, qui est l'un des outils les plus couramment utilisés pour les simulations numériques en CFD. Nous expliquons les étapes importantes pour démarrer le logiciel, importer la géométrie créée avec **Gambit**, et choisir les matériaux appropriés pour chaque partie. Ces étapes sont essentielles pour garantir que les résultats de la simulation soient à la fois précis et fiables.

Un élément crucial de la simulation numérique est la sélection des modèles, qui conditionne la résolution des équations fondamentales et la prise en compte des phénomènes physiques.

En résumé, ce chapitre consacré à la simulation numérique constitue l'élément central de notre étude. En maîtrisant les principes fondamentaux de la CFD, en utilisant efficacement les logiciels Gambit et Fluent, et en choisissant les modèles appropriés, nous sommes en mesure de réaliser des simulations précises et fiables. Ces modélisations nous permettront d'analyser en détail les performances thermiques de la façade, ainsi que d'évaluer l'efficacité de différentes configurations et stratégies d'isolation.

3.2 Définition CFD

La CFD, ou « Computational Fluid Dynamics » en anglais, se traduit par la dynamique numérique des fluides.

3.3 Le rôle de CFD

La dynamique des fluides numérique (CFD) est une discipline qui se concentre sur la résolution numérique des phénomènes de transport — tels que le transfert thermique et la turbulence — associés à la mécanique des fluides, en particulier aux équations de Navier-Stokes, à l'aide d'ordinateurs puissants.

Elle permet de simuler et d'évaluer le comportement des systèmes dans des conditions réalistes, parfois impossibles à reproduire expérimentalement. Ainsi, la CFD rend le processus de développement plus efficace, tout en contribuant à améliorer la qualité, la performance et la sécurité des produits.

Les modélisations numériques des écoulements de fluides offrent des avantages concrets dans plusieurs domaines :

- Aux architectes, elles permettent de concevoir des bâtiments plus confortables, éco-énergétiques et sécurisés.
- Aux concepteurs automobiles, elles servent à optimiser l'aérodynamisme et à réduire la consommation de carburant.
- Aux ingénieurs du secteur pétrolier, elles aident à planifier des stratégies d'extraction plus efficaces et moins risquées.
- Aux experts en sécurité, elles permettent d'anticiper et de réduire les risques sanitaires liés aux radiations, aux contaminations ou autres dangers.
- Aux institutions militaires, la CFD aide à concevoir des équipements, à évaluer les impacts et à simuler des situations complexes.

3.4 Les domaines d'utilisation de CFD dans l'industrie

La dynamique des fluides numérique (CFD) est utilisée dans de nombreux secteurs, notamment :

- L'aérospatial et l'aéronautique ;
- L'industrie automobile ;
- Les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) des bâtiments ;

- La production d'énergie ;
- L'étude de l'écoulement sanguin dans les veines ;
- L'analyse des flux d'air dans des dispositifs domestiques, comme les têtes de douche.

Cette technologie innovante permet aux chercheurs d'évaluer l'efficacité de leurs conceptions dans divers scénarios. Elle offre ainsi un gain considérable en temps, en énergie et en coûts, en réduisant le besoin de prototypes physiques et d'essais expérimentaux coûteux.

3.5 Description de Gambit

Gambit est un outil de prétraitement qui nous permet de :

- Établir la géométrie du domaine de calcul ;
- Diviser ce dernier en petites sections appelées volumes de contrôle (maillage) ;
- Spécifier les conditions aux limites.

3.4.1 Création de la géométrie

Dans une simulation CFD, la première étape consiste à créer la géométrie du domaine d'étude, en deux ou trois dimensions. Cette géométrie peut être réalisée soit à l'aide d'un logiciel intégré au code de calcul CFD, tel que GAMBIT, soit à l'aide d'un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Dans ce second cas, il est nécessaire d'exporter la géométrie dans un format compatible avec le logiciel de maillage.

Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser le logiciel GAMBIT pour la création de la géométrie, ce qui nous a permis d'assurer une intégration fluide avec la phase de maillage.

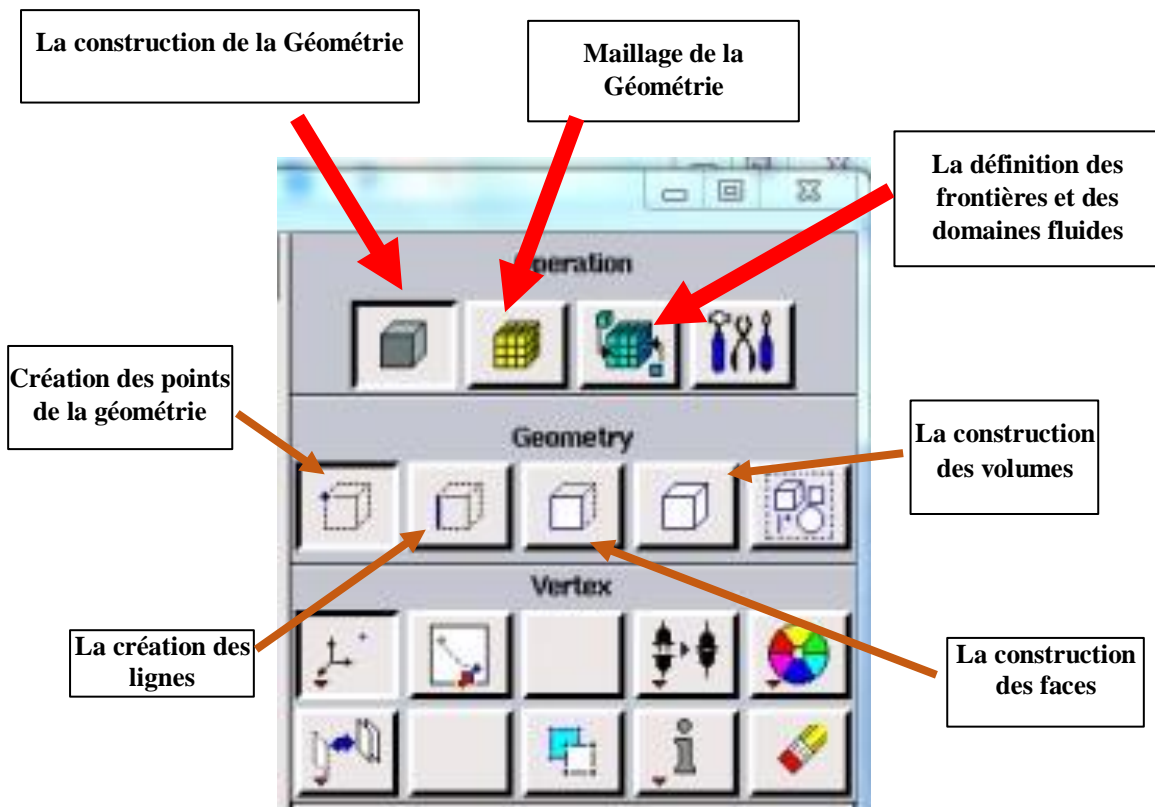


Figure 3.1 : Les outils utilisés dans la création de la Géométrie

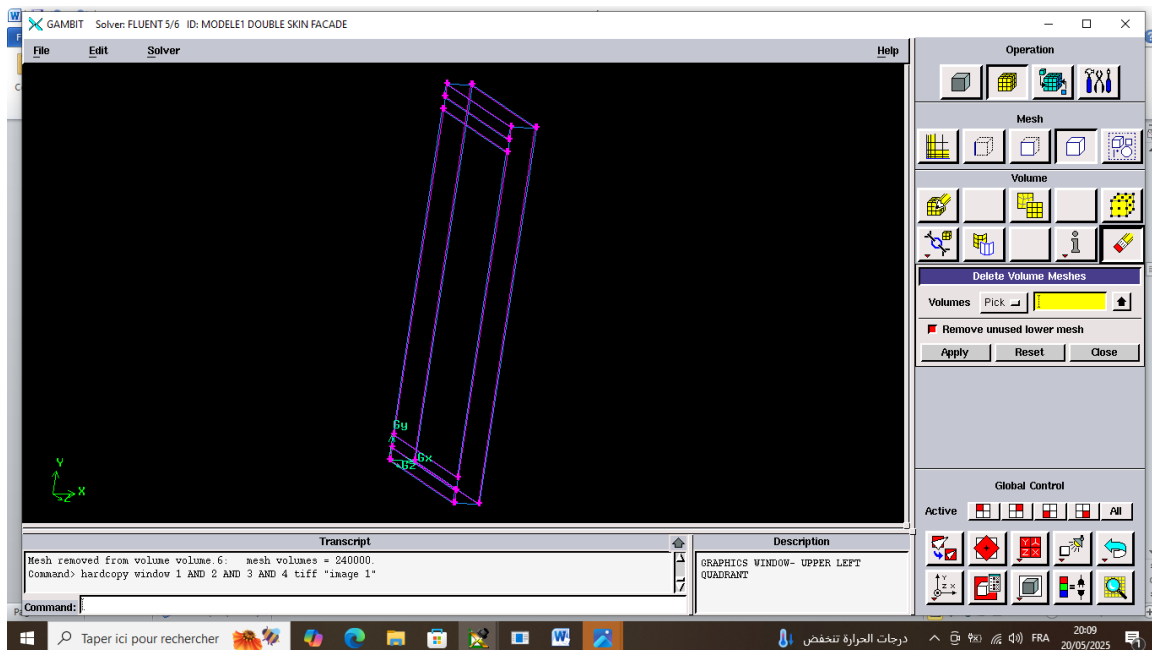


Figure 3.2 : Création de la géométrie

3.4.1 Choix de maillage

Dans notre cas, nous avons opté pour un **maillage structuré de type hexaédrique**, en raison de sa régularité et de sa capacité à mieux contrôler la qualité des cellules, ce qui favorise la stabilité et la précision des calculs.

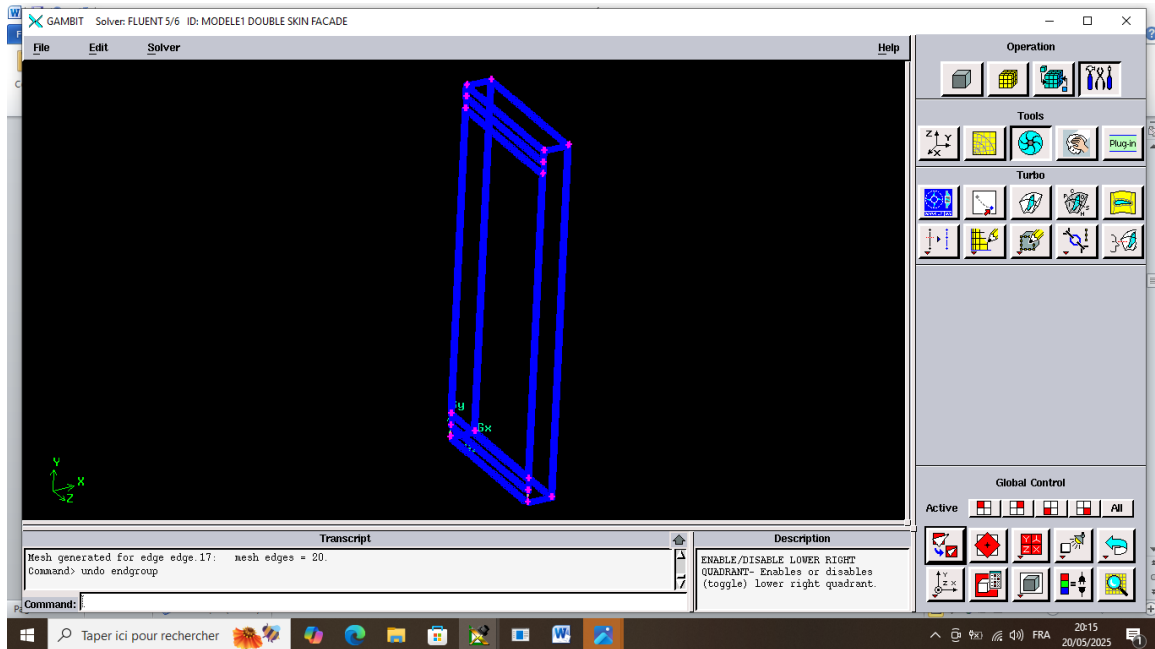


Figure 3.3 : Maillage des bords du domaine de calcul

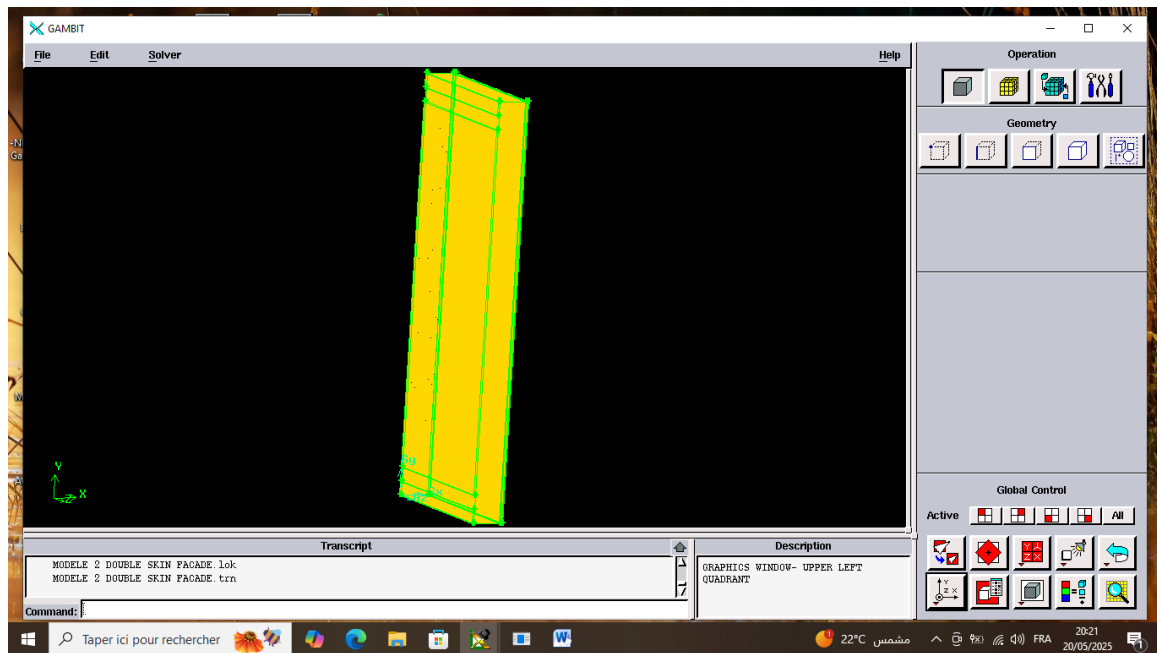


Figure 3.4 : Le maillage final

3.4.2 Les conditions aux limites :

La figure suivante illustre les conditions aux limites définies dans Gambit pour un modèle de façade double peau, avec une entrée d'air (VELOCITY_INLET) représentant la convection forcée, des parois chauffée et non chauffée (WALL) simulant les vitrages, et des parois en haut et en bas également définies comme parois adiabatiques.

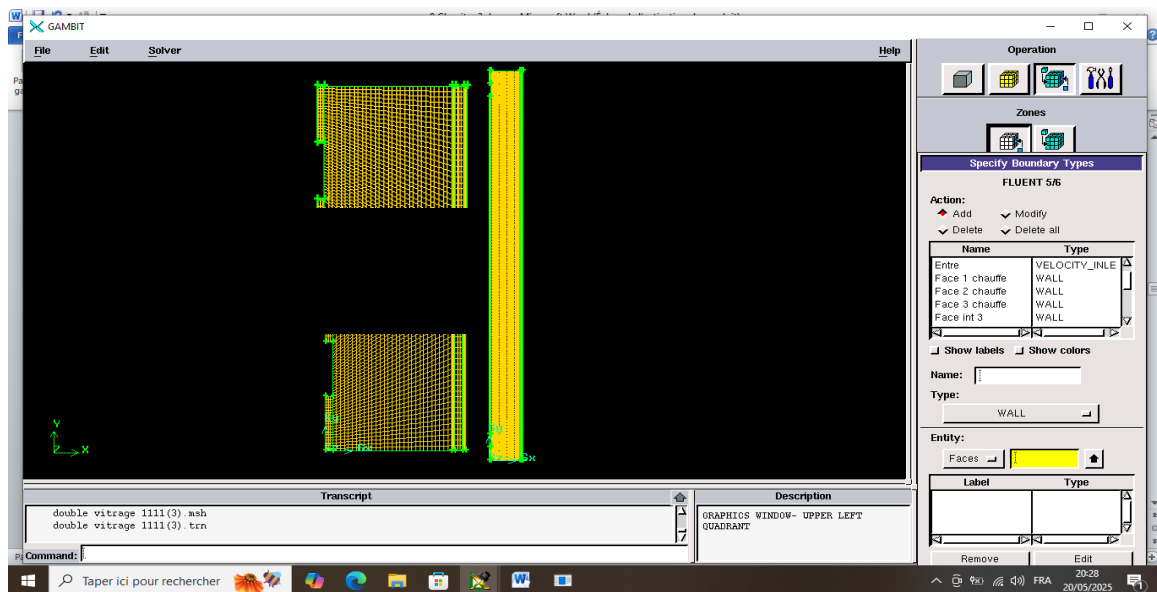
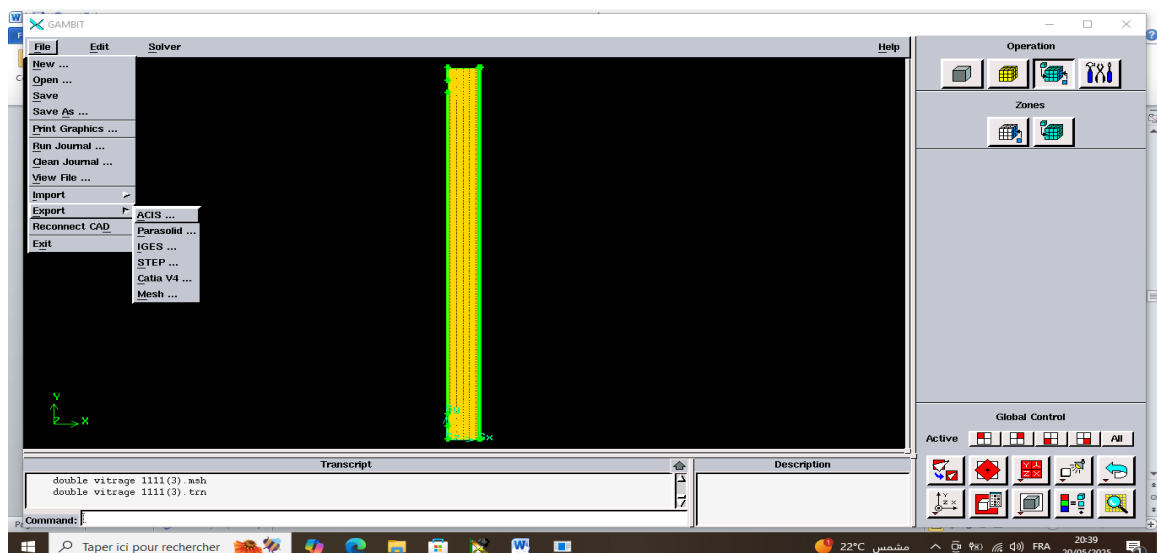


Figure 3.5. Conditions aux limites.

3.4.3 Exportation du maillage de Gambit

Suite à la conception de la géométrie et l'établissement des conditions limites, nous exportons le maillage vers le Solveur Fluent à l'étape suivante : File -export- mesh.

Pour que Fluent puisse lire et utiliser le maillage après son enregistrement, il faut l'exporter au format « Mesh », comme indiqué ci-dessous.



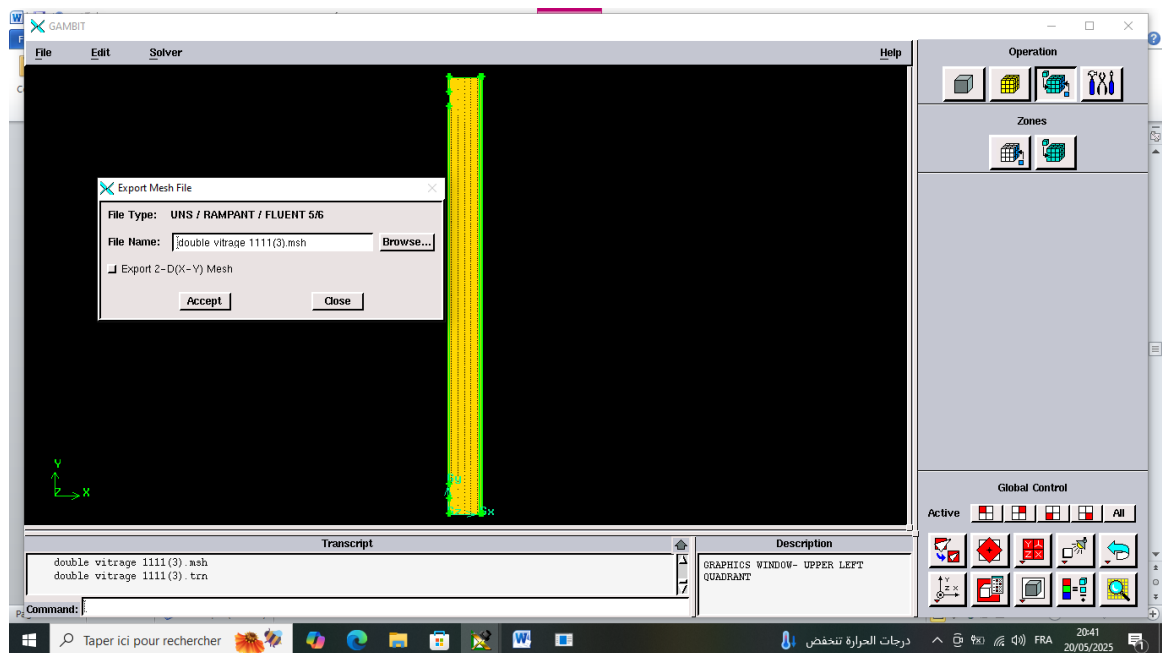


Figure 3.6 : Exportation du maillage.

3.6 Définition de Fluent

Fluent est un outil de calcul en dynamique des fluides numérique (Computational Fluid Dynamics – CFD) qui intègre deux fonctionnalités principales :

- **Solveur** : Ce composant permet de définir numériquement les conditions opératoires de la simulation, telles que la gravité, la pression, etc. Il gère également la définition des conditions aux limites, le choix des méthodes de discrétisation spatiale et temporelle, ainsi que le couplage entre la vitesse et la pression. Il prend en charge le processus itératif de résolution des équations de conservation.
- **Post-processeur** : Il offre des outils de visualisation pour la géométrie, le maillage et surtout les résultats de la simulation. Il permet d'afficher des champs scalaires et vectoriels (pression, vitesse, température, etc.) ainsi que des grandeurs dérivées. Il est également possible de tracer des lignes de courant, des profils de variation ou encore des contours de distribution.

3.6.1 Lancement de Fluent

Étant donné que notre étude porte sur une géométrie tridimensionnelle, nous avons opté pour le choix du **solveur 3D en double précision**. Ce choix s'avère le plus adapté à notre analyse, car il permet de mieux représenter les phénomènes physiques en trois dimensions tout en garantissant une plus grande précision numérique.

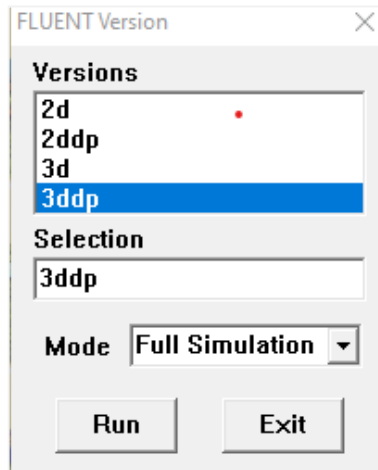


Figure 3.7 : Le lancement du Fluent

3.6.2 Importation de la géométrie

Étape pour importer le fichier maillage :

File → Read → Case...

Puis, tu sélectionnes le fichier .cas exporté depuis Gambit.

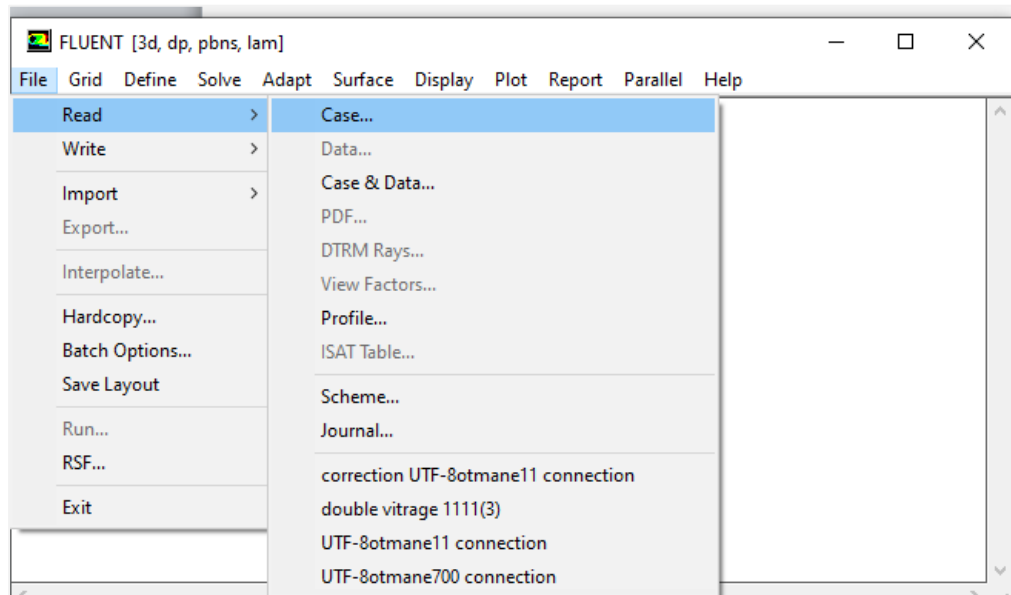


Figure 3.8 : Importation de la géométrie dans Fluent

3.6.3 Choix du matériau

L'air est utilisé comme fluide de travail dans la simulation CFD. Les propriétés thermo physiques de l'air (masse volumique, viscosité, conductivité thermique, capacité calorifique) sont bien documentées et intégrées dans la base de données de Fluent, ce qui facilite la mise en œuvre du modèle.

Le verre est sélectionné comme matériau solide, notamment pour représenter les parois rigides d'une façade ou d'une enveloppe dans les simulations. Il possède une conductivité thermique modérée et une faible capacité de stockage thermique, ce qui influence les échanges de chaleur avec le fluide environnant. Ses propriétés sont également disponibles dans la bibliothèque de matériaux Fluent.

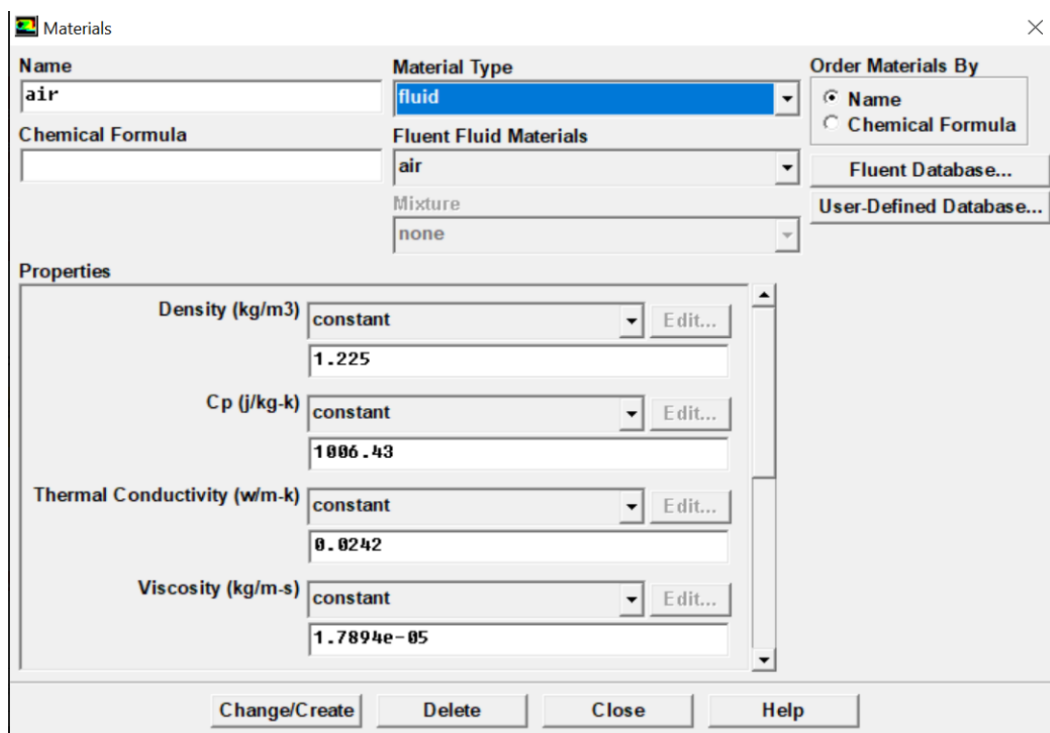


Figure 3.9 : Choix du matériel (Fluide air)

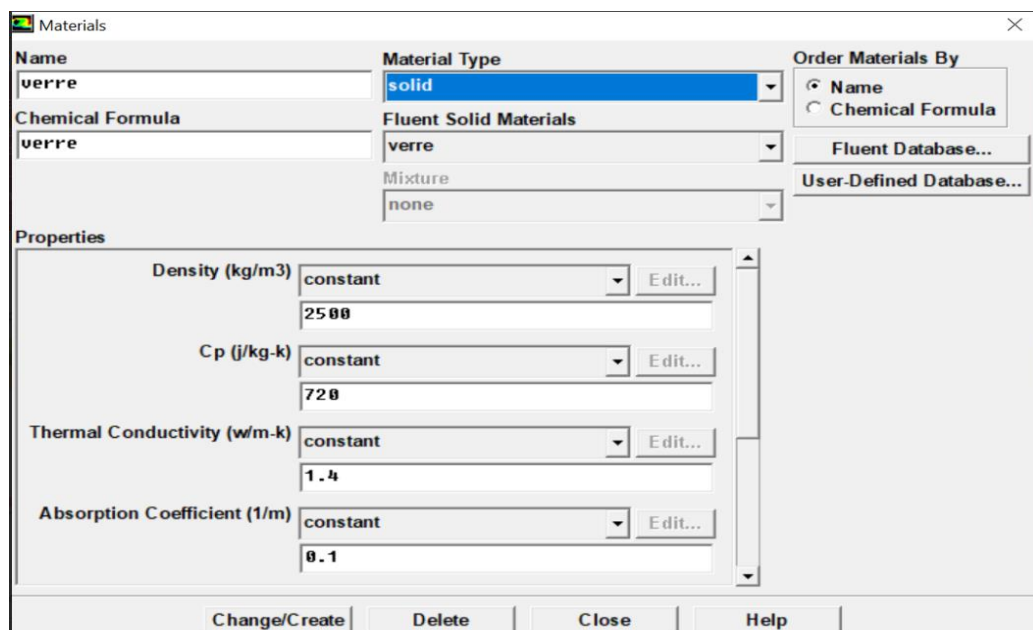


Figure 3.10 : Choix du matériel Solide verre

3.7 Choix du modèle de rayonnement

Le rayonnement thermique étant un mode de transfert important dans le système étudié, un modèle adapté a été sélectionné dans Fluent.

Parmi les modèles disponibles (P1, DO, Rosseland, S2S...), le modèle [Discrete Ordinate : DO) a été choisi pour sa capacité à représenter avec précision les échanges radiatifs dans des géométries complexes. Ce choix permet de prendre en compte les effets de rayonnement sans alourdir excessivement les temps de calcul.

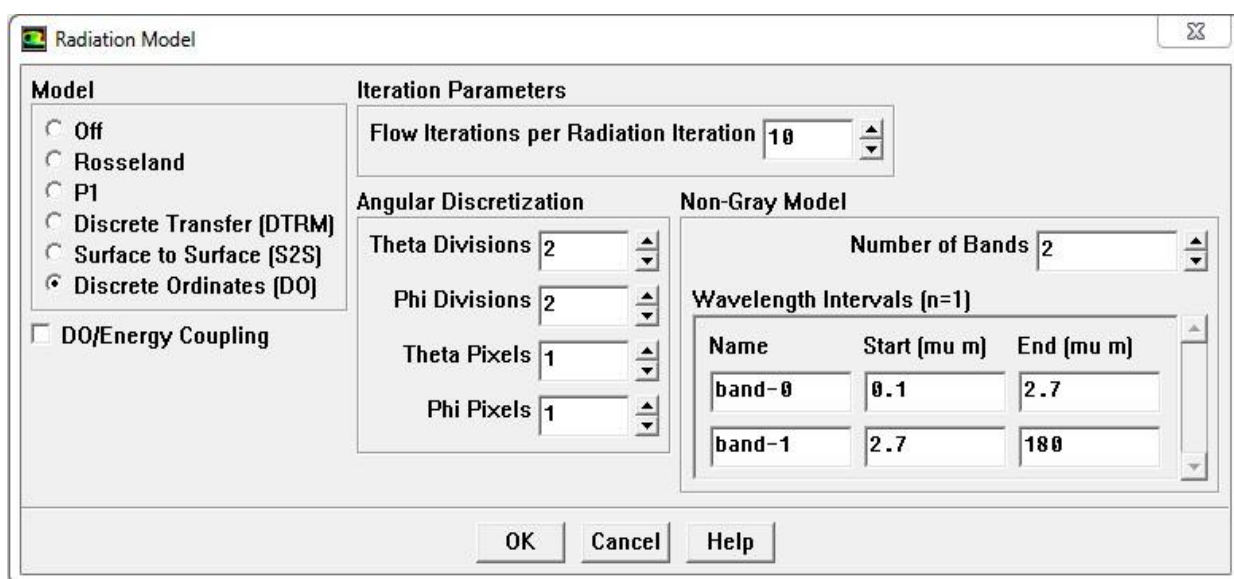


Figure 3.11 : Choix du modèle de radiation

Le modèle (k- epsilon) a été choisi pour sa précision dans les géométries complexes tout en limitant les temps de calcul. Il intègre efficacement les échanges radiatifs couplés à la convection et la conduction, et s'adapte bien aux variations thermiques du système étudié. Ce choix a été validé par comparaison avec des données de référence.

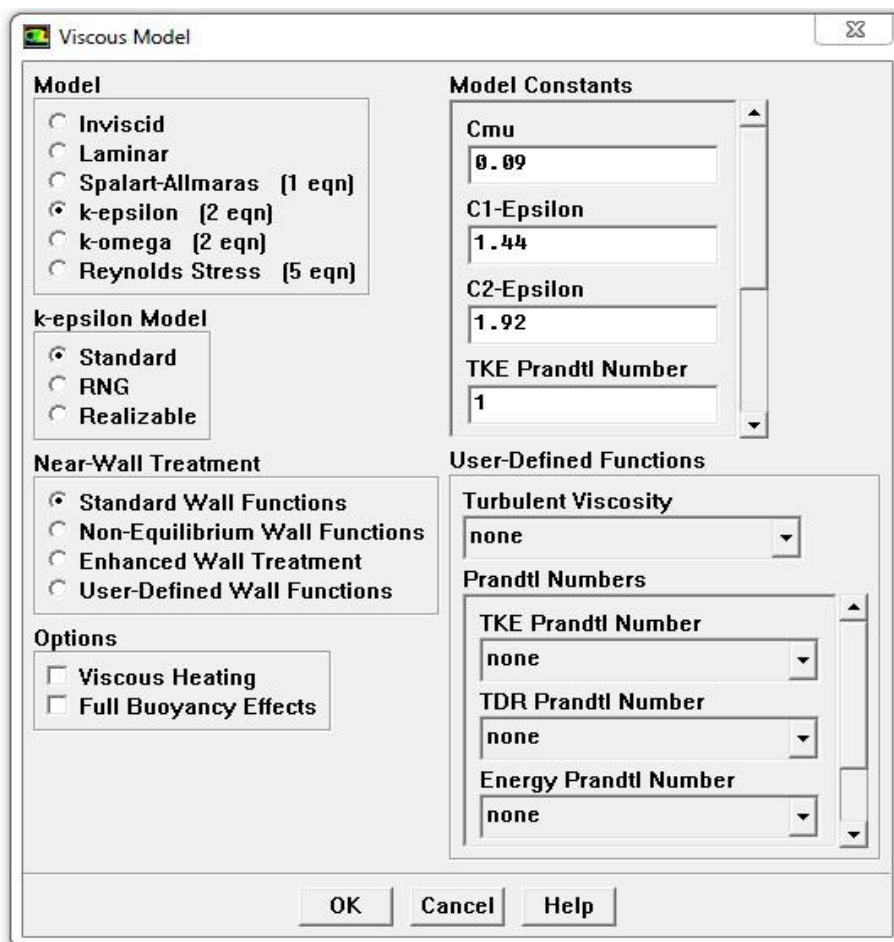


Figure 3.12 : Choix du modèle de Turbulence

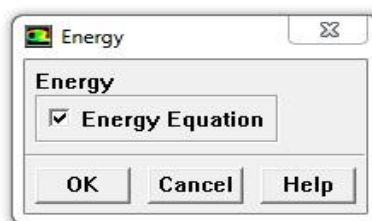


Figure 3.13 : Choix du modèle énergie

3.6.4 Conditions de limites

La condition aux limites de type out flow est appliquée à la zone de sortie d'air du système. Elle permet au fluide de quitter le domaine sans imposer de profil de vitesse ou de pression, en supposant un écoulement pleinement développé. Ce choix est approprié lorsque les gradients en aval sont négligeables et que le comportement du flux est principalement dicté par les conditions en amont.

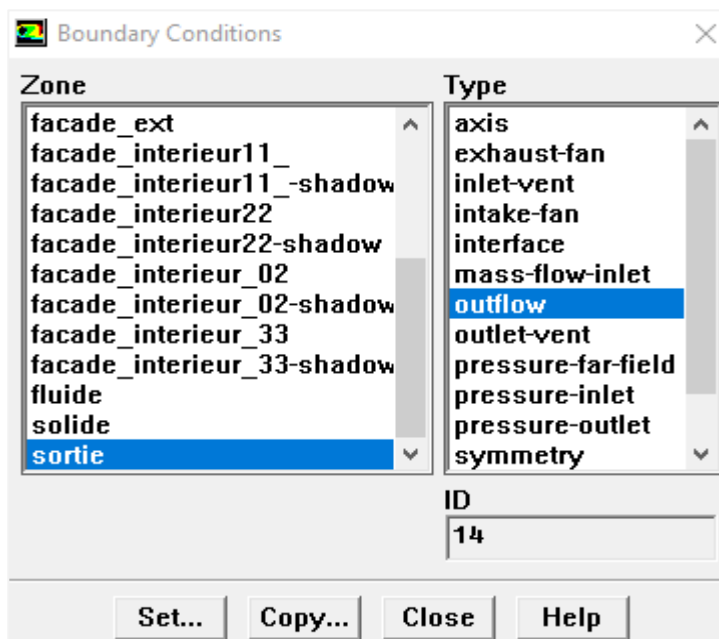


Figure 3.14 : Choix des différentes conditions aux limites

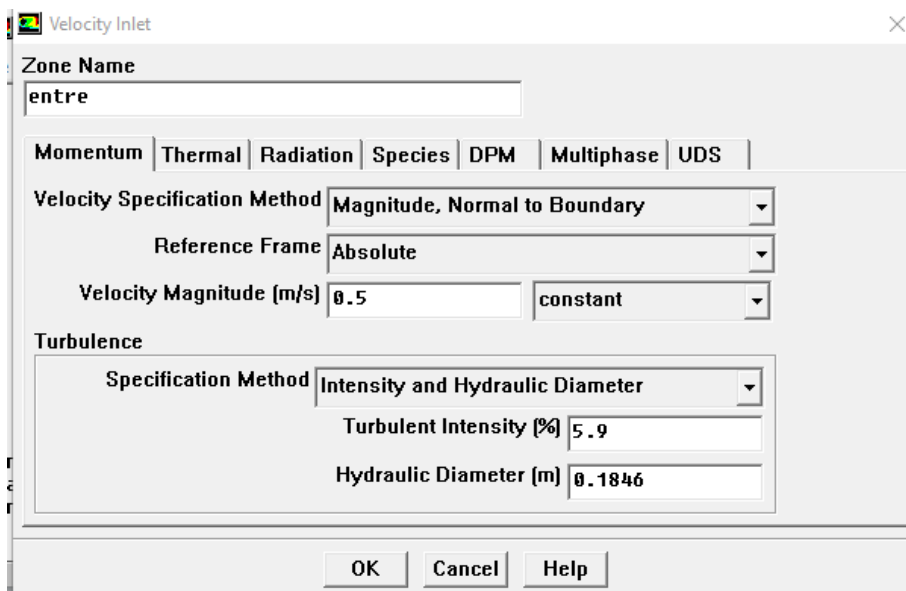


Figure 3.15 : Vitesse de l'air à l'entrée.

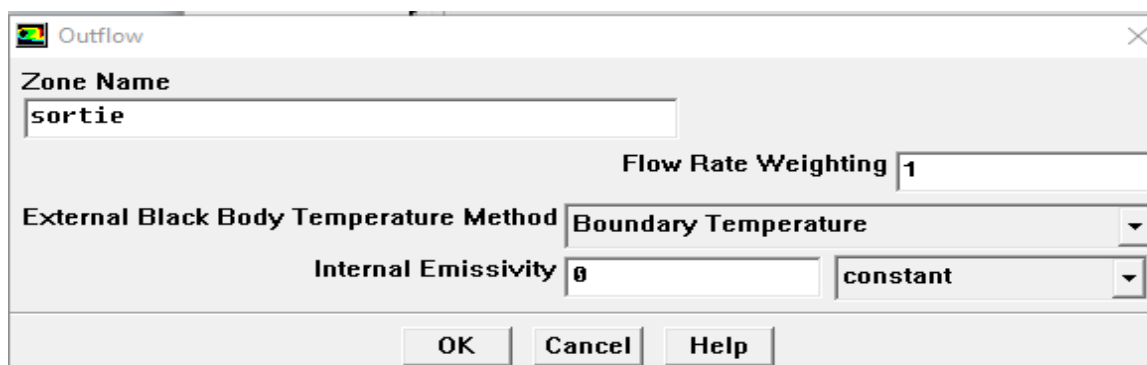


Figure 3.16 : Condition out flow à la sortie.

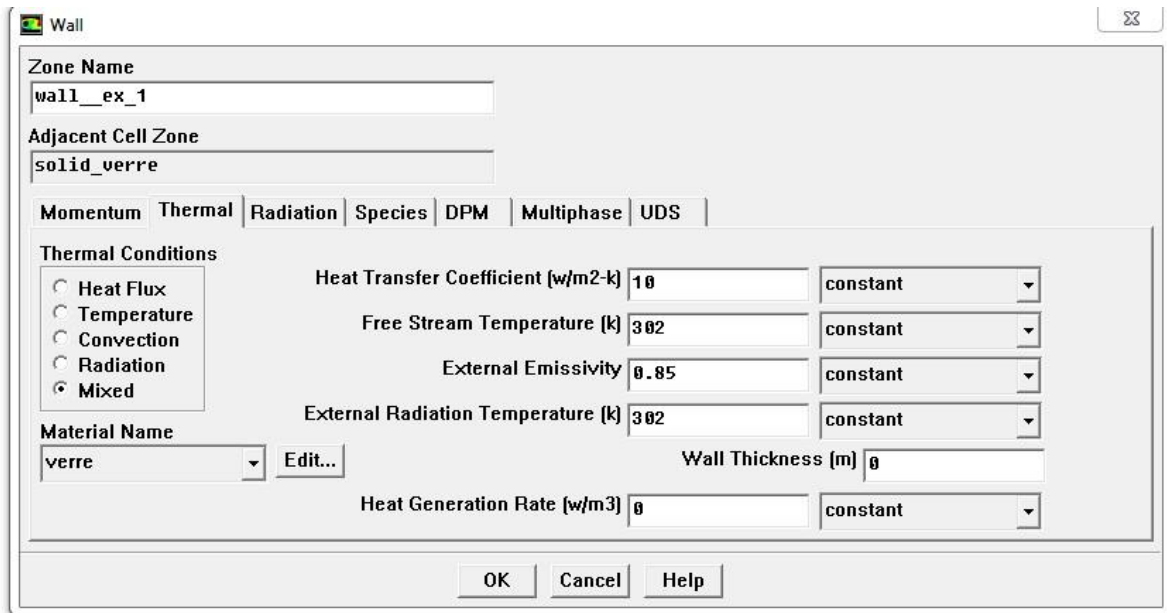


Figure 3.17 : Conditions aux limites thermiques au niveau du vitrage extérieur

3.7 Contrôle de la solution

Le contrôle de la solution est une étape déterminante pour assurer la stabilité et la convergence numérique de la simulation. Dans cette étude, les paramètres de contrôle ont été ajustés avec soin dans l'onglet Solution Control de Fluent (voir Figure 3.17).

Le couplage pression-vitesse a été réalisé à l'aide de l'algorithme SIMPLE, largement utilisé pour les écoulements incompressibles. Pour la discrétisation des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie, de l'énergie cinétique turbulente, du taux de dissipation ainsi que de l'équation du rayonnement, des schémas *Second Order Upwind* ont été adoptés. Ce choix vise à améliorer la précision des gradients dans le domaine de calcul, en particulier dans les zones à forts gradients.

variables	facteur de sous-relaxation
la pression	0,3
la quantité de mouvement	0,7
la masse volumique	1
la viscosité turbulente	1
l'énergie	1
Les ordonnées discrètes	1

Tableau 3.1 : Les facteurs de sous-relaxation

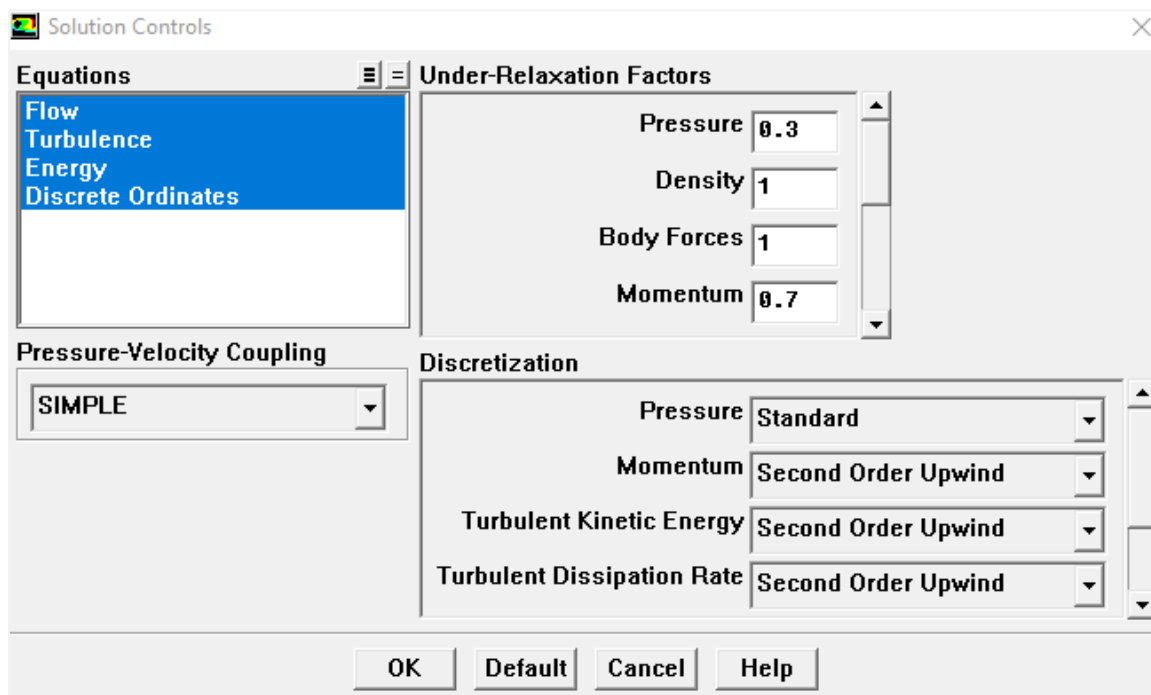


Figure 3.18 : Précision de la solution

3.8 Conclusion

Pour conclure, ce chapitre consacré à la simulation numérique a établi les fondements nécessaires à l'analyse de l'isolation thermique d'une façade équipée, dans un premier cas, d'un simple vitrage pour la peau intérieure, et dans un second cas, d'un double vitrage.

Grâce à l'utilisation de la dynamique des fluides numérique (CFD) à travers les logiciels Gambit et Fluent, nous avons pu modéliser avec précision les différents éléments de la façade et analyser leur comportement thermique.

Cette approche nous permet d'évaluer en détail les performances thermiques de la façade et d'envisager des pistes d'amélioration pour optimiser son isolation.

Le chapitre a décrit les principales étapes de la simulation, depuis la création de la géométrie sous Gambit jusqu'à l'analyse des cas étudiés dans Fluent.

Chapitre 4

Résultats et interprétations

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté et analysé les résultats issus des simulations numériques réalisées à l'aide du logiciel Fluent 6.3. Les différentes sorties de calcul concernent principalement les champs de vitesse, d'énergie cinétique turbulente, de pression et de température. Ces résultats ont permis de mieux comprendre le comportement thermo-aérodynamique au sein de la façade double-peau modélisée, et d'évaluer l'impact du type de vitrage intérieur utilisé.

Ce travail s'inscrit dans le contexte actuel de développement des façades à double peau (DSF), dont les performances thermiques et esthétiques en font une solution de plus en plus prisée dans le secteur du bâtiment. Toutefois, la majorité des recherches existantes se focalisent sur le comportement global du système, sans analyser de manière approfondie l'influence du type de vitrage intérieur.

Ainsi, une modélisation numérique tridimensionnelle a été entreprise pour comparer deux configurations : une DSF équipée d'un simple vitrage intérieur, et une autre avec un double vitrage intérieur. L'étude intègre les phénomènes d'écoulement turbulent en convection forcée, en s'appuyant sur des analyses détaillées des champs de vitesse, de l'énergie cinétique turbulente, du coefficient de pression (CPT) et de la distribution de température.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'intérêt du double vitrage intérieur, qui améliore sensiblement l'efficacité énergétique du système. Il permet notamment de réduire les pertes thermiques et d'optimiser la circulation de l'air dans la cavité, contribuant ainsi à de meilleures performances globales du dispositif.

4.2 Maillage de la géométrie

Le maillage des solides (type verre) et un maillage hexaédrique de type Map et le maillage du fluide (Aire) et un maillage hexaédrique de type Submap (Figure 4.1).

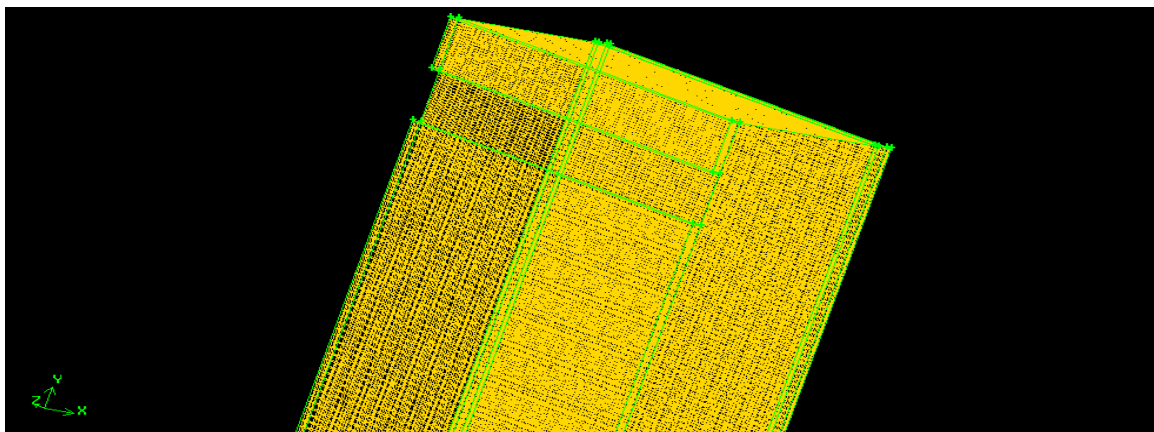


Figure 4.1 : Maillage des géométries

4.3 Distribution de La vitesse

Les figures (4 .2) et (4 .3), (4 .4) et (4 .5) illustrent la distribution de la vitesse dans les cavités des deux façades ventilées à double peaux, simple vitrage intérieure dans un premier cas et double vitrage intérieure dans un deuxième cas.

A l'entrée de la cavité la vitesse est de 0.5 m/s l'air commence à chauffer au contact des parois ce qui se traduit par une augmentation de pression.

L'ascension de l'air le long de la cavité est surtout due à la convection forcée.

On remarque qu'à la sortie de la cavité, la vitesse de l'air est importante. Cela est dû à la différence de pression avec l'extérieur.

Les valeurs de vitesse à la sortie sont supérieures pour la façade double vitrage intérieur par rapport à la façade simple vitrage (Figure 4.2).

Les profils de la figure (4.6) et de la figure (4 .7) montrent l'évolution de la vitesse à la sortie à la position $y=3.00 \text{ m}$ de $z=0 \text{ m}$ à $z=1.20 \text{ m}$ pour $x=0.12 \text{ m}$.

On observe un changement dans la distribution de la vitesse à la sortie pour la façade à double peau avec simple vitrage, notamment pour les flux de 600 w/m^2 et 700 w/m^2 par rapport au flux de 820 w/m^2 .

Une accélération de la vitesse à la sortie est constatée pour les flux de 600 w/m^2 et 700 w/m^2 , comparativement au flux de 820 w/m^2 .

En revanche, aucun changement significatif n'est observé entre les flux de 600 w/m^2 et 700 w/m^2 , leurs profils de vitesse étant pratiquement superposables (Figure 4.6).

Pour la façade ventilée à double peau avec double vitrage intérieur, la distribution de la vitesse reste inchangée pour les trois flux de 600 w/m^2 , 700 w/m^2 et 820 w/m^2 . Les profils de vitesse sont identiques (figure 4.7).

Le double vitrage agit comme une barrière thermique, limitant les pertes de chaleur et renforçant l'isolation thermique, ce qui influence la stabilité des courbes des profils de vitesse.

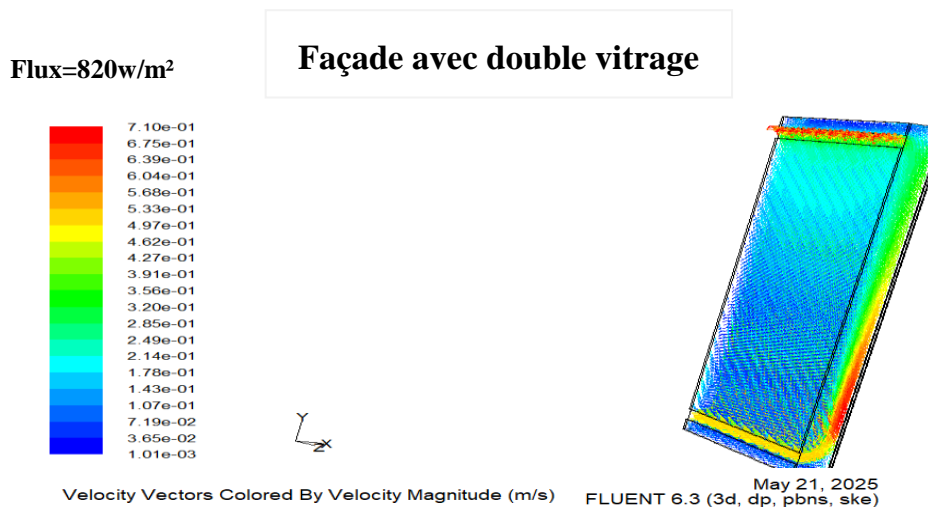
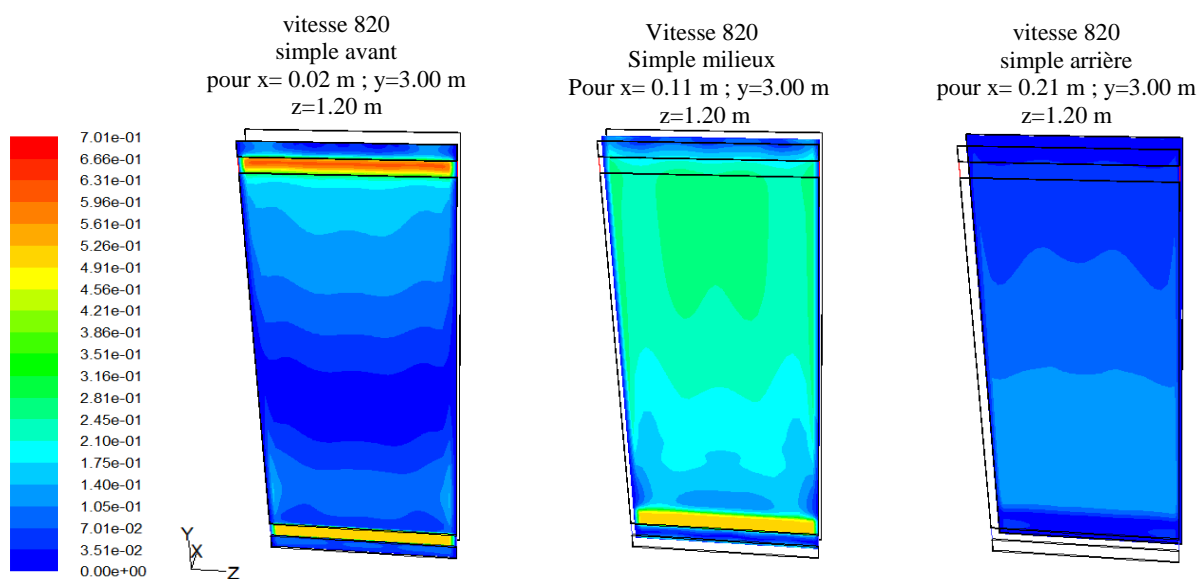


Figure 4.2 : Vecteurs de vitesse

Simple vitrage



Double vitrage

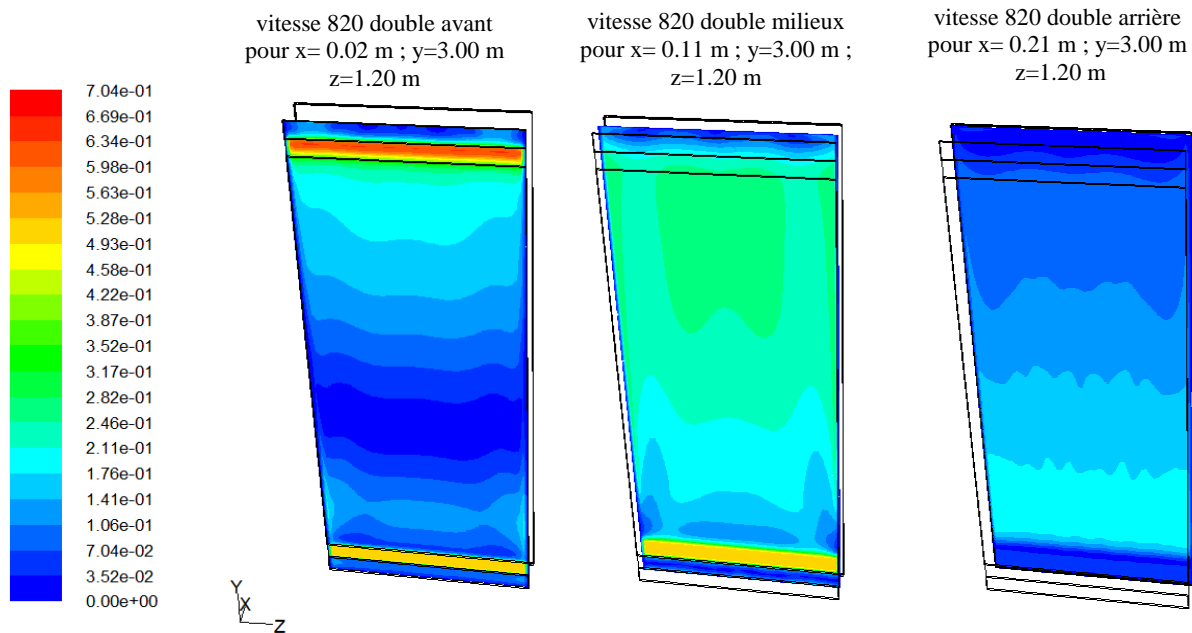
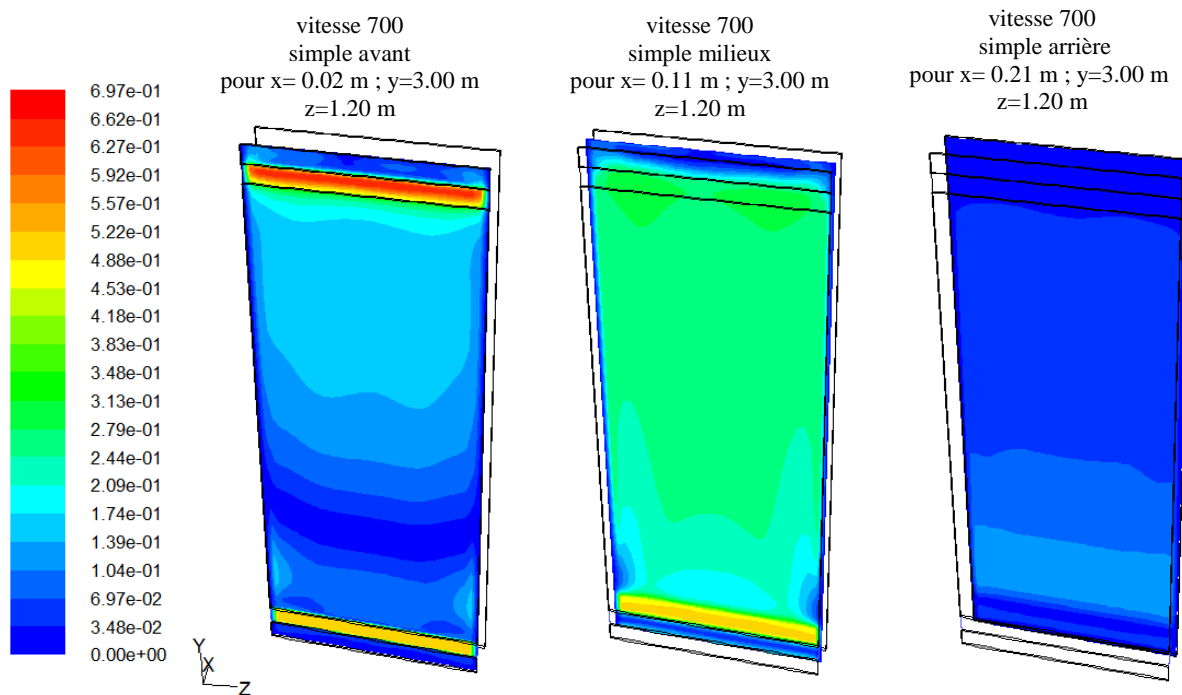


Figure 4.3 : Contour de la vitesse pour les deux modèles de façade double peaux (Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieure pour un flux de 820 w/m²)

Simple vitrage



Double vitrage

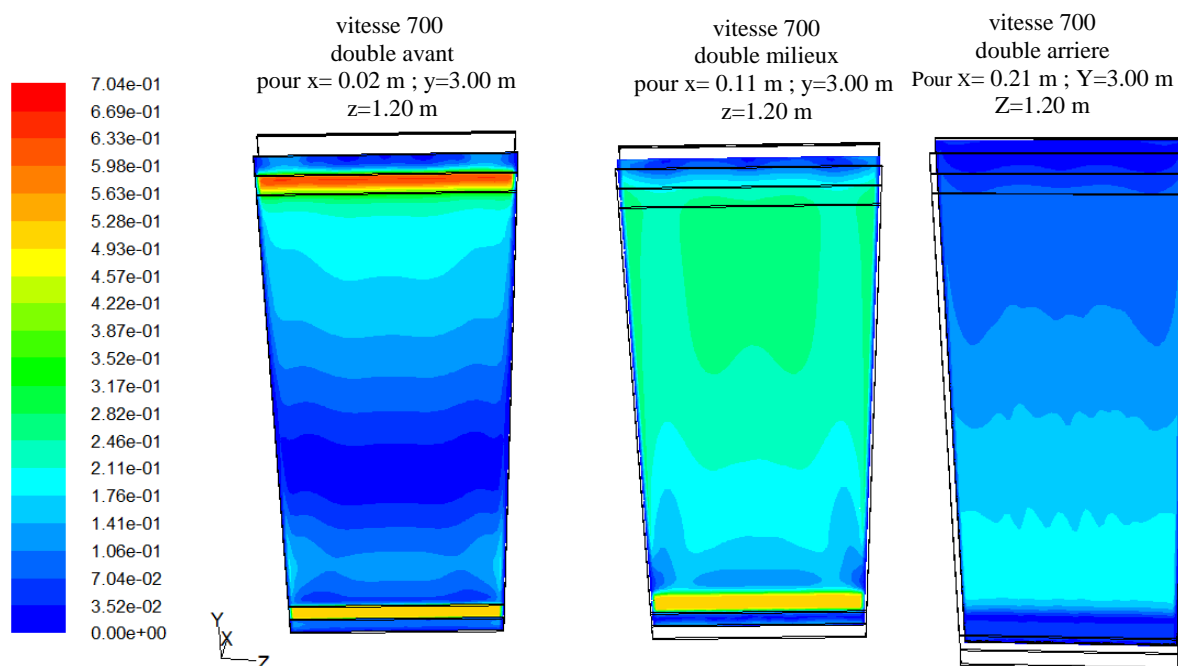
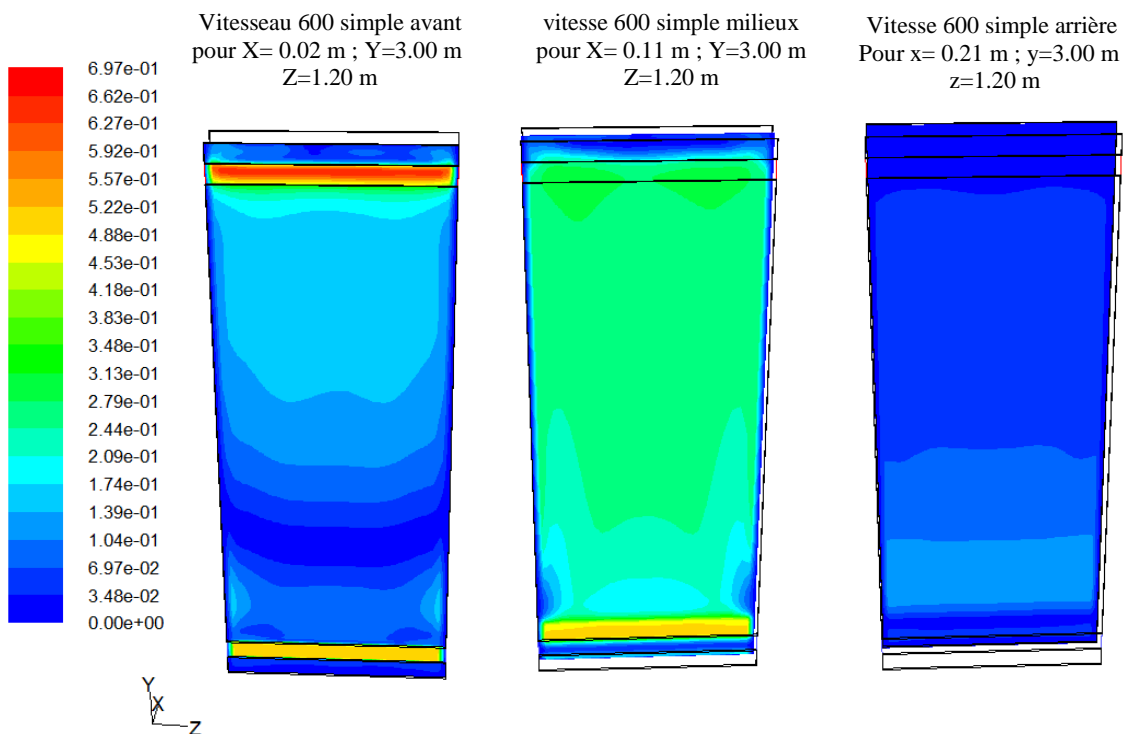


Figure 4.4 : Contour de la vitesse pour les deux modèles de façade double peaux (Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieur pour un flux de 700 w/m^2)

Simple vitrage



Double vitrage

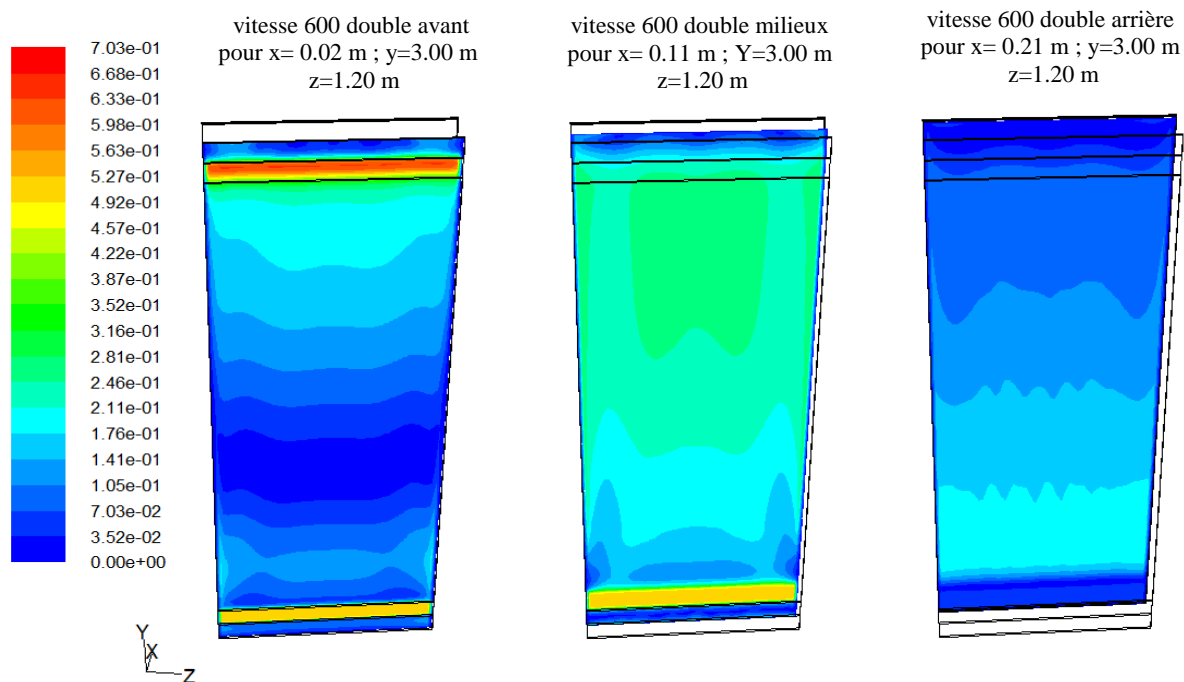


Figure 4.5 : Contour de la vitesse pour les deux modèles de façade double peaux (Modèle simple vitrage intérieure modèle double vitrage intérieure pour un flux de 600 w/m^2)

Façade double peaux simple vitrage intérieure

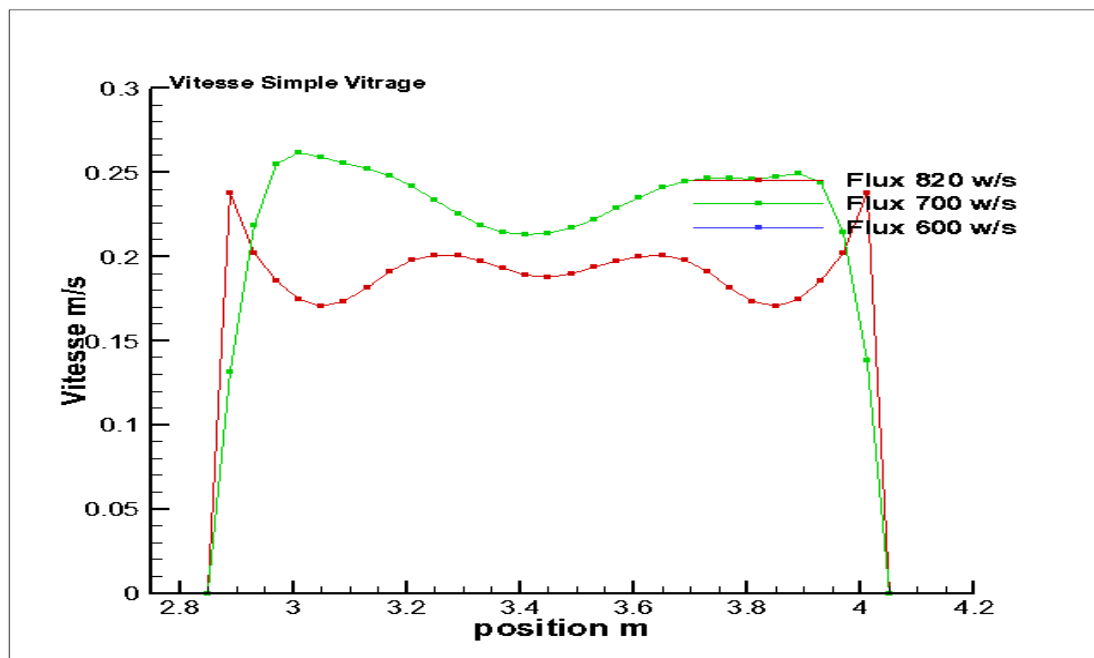


Figure 4.6 : Profil de la vitesse à la position $y=2.85\text{ m}$ de $z=0\text{ m}$ à $z=1.20\text{ m}$ pour $x=0.12\text{ m}$ Pour simple vitrage

Façade double peaux double vitrage intérieure

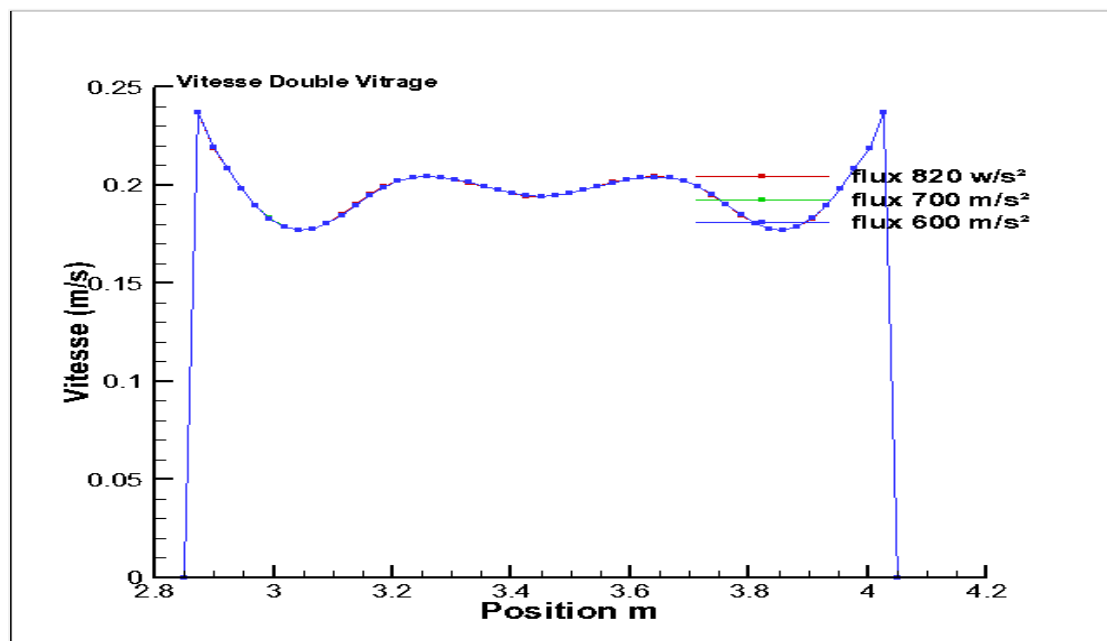


Figure 4.7 : Profil de la vitesse à la position $y=2.85$ m de $z=0$ m à $z=1.20$ m pour $x=0.12$ m Pour double vitrage

4.4 Distribution de l'énergie cinétique turbulente

Les figures ci-dessous (4.8), (4.9) et (4.10) illustrent la distribution de l'énergie cinétique turbulente dans les cavités des deux façades ventilées à double peaux ; simple vitrage intérieure et double vitrage intérieure.

L'énergie cinétique turbulente est fortement développée à la sortie pour les deux modèles de façade, pour les flux étudiés (820 W/m^2 , 700 W/m^2 et 600 W/m^2).

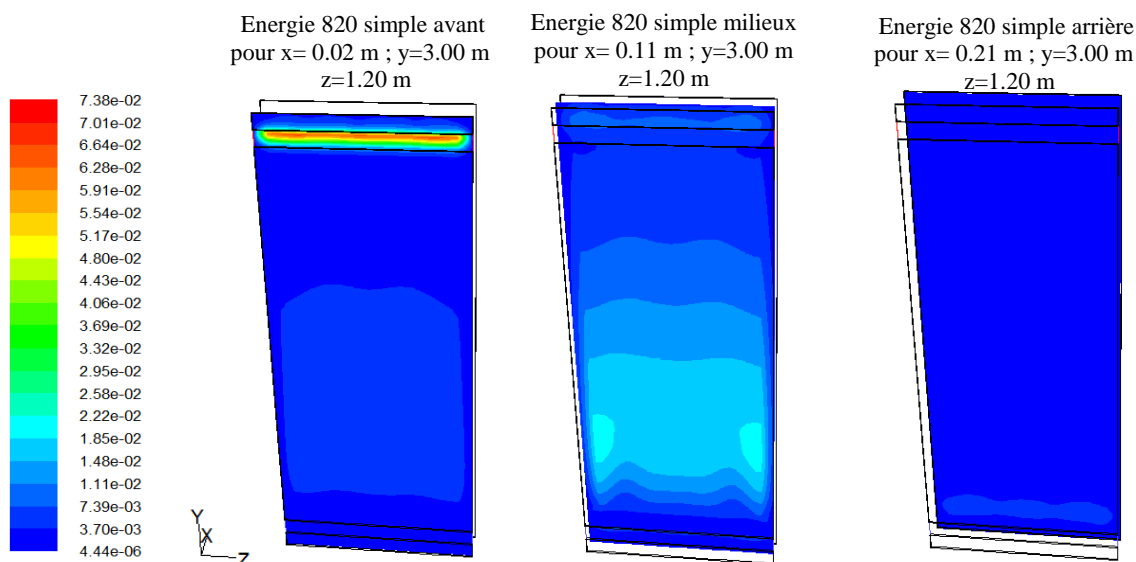
Les profils des figure (4.11) et (4.12) montrent l'évolution de l'énergie cinétique à la sortie $y=3.00$ m de $z=0$ m à $z=1.20$ m pour $x=0.12$ m.

On observe un changement dans la distribution de L'énergie cinétique turbulente à la sortie pour la façade à double peau avec simple vitrage, notamment pour les flux de 600 w/m^2 et 700 w/m^2 par rapport au flux de 820 w/m^2 . Une accélération de l'énergie cinétique turbulente est constatée pour les flux de 600 w/m^2 et 700 w/m^2 , comparativement au flux de 820 w/m^2 . En revanche, aucun changement significatif n'est observé entre les flux de 600 w/m^2 et 700 w/m^2 , leurs profils de l'énergie cinétique turbulente étant pratiquement superposables (Figure 4.11).

Pour la façade ventilée à double peau avec double vitrage intérieur, la distribution de l'énergie cinétique turbulente reste inchangée pour les trois flux de 600 w/m², 700 w/m² et 820 w/m². Les profils de l'énergie cinétique turbulente sont identiques (Figure 4.12).

Les deux modèles de façade à double peau présentent des résultats similaires en termes d'énergie cinétique turbulente, en accord avec les profils de distribution de vitesse observés.

Simple vitrage



Double vitrage

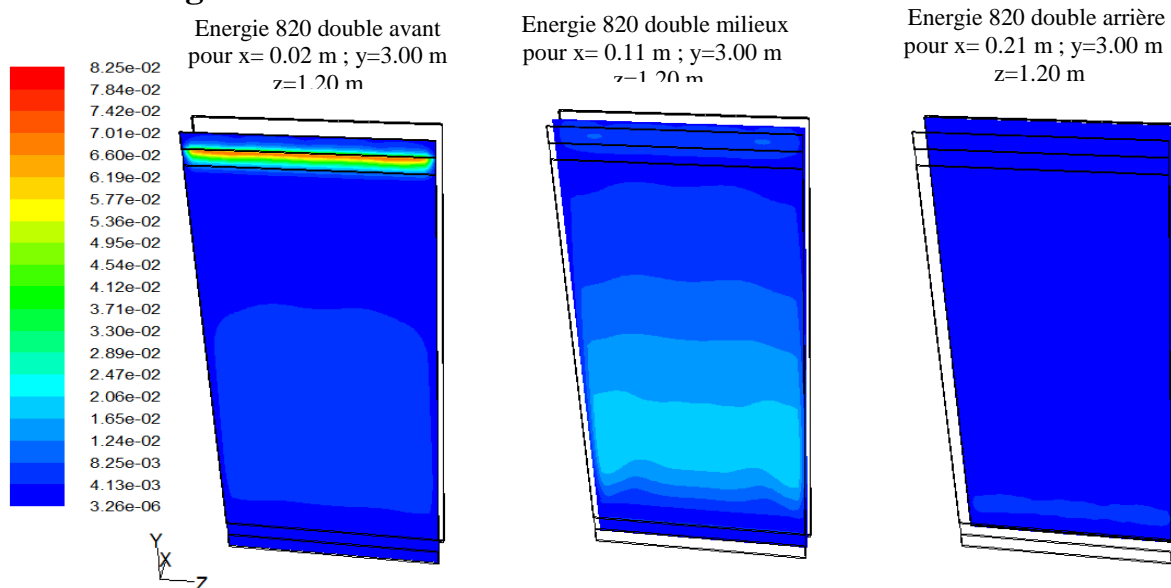
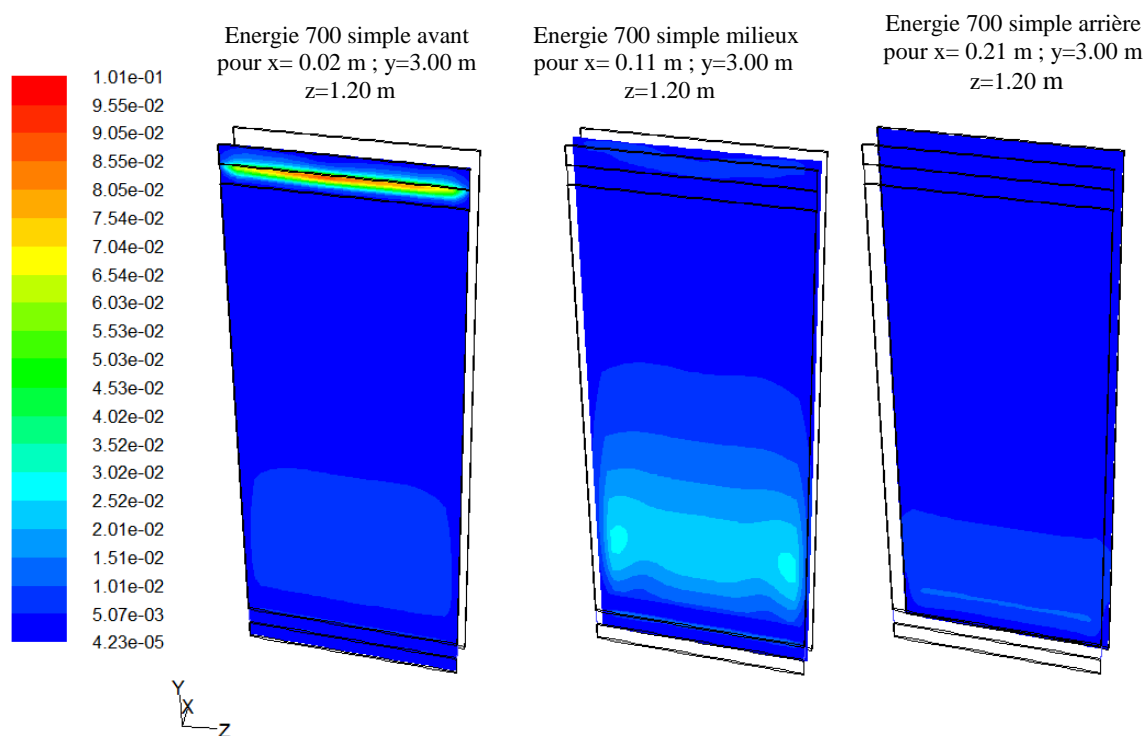


Figure 4.8 : Contour de l'énergie cinétique turbulente pour les deux modèles de façade double peaux (Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieur pour un flux de 820 w/m²)

Simple vitrage



Double vitrage

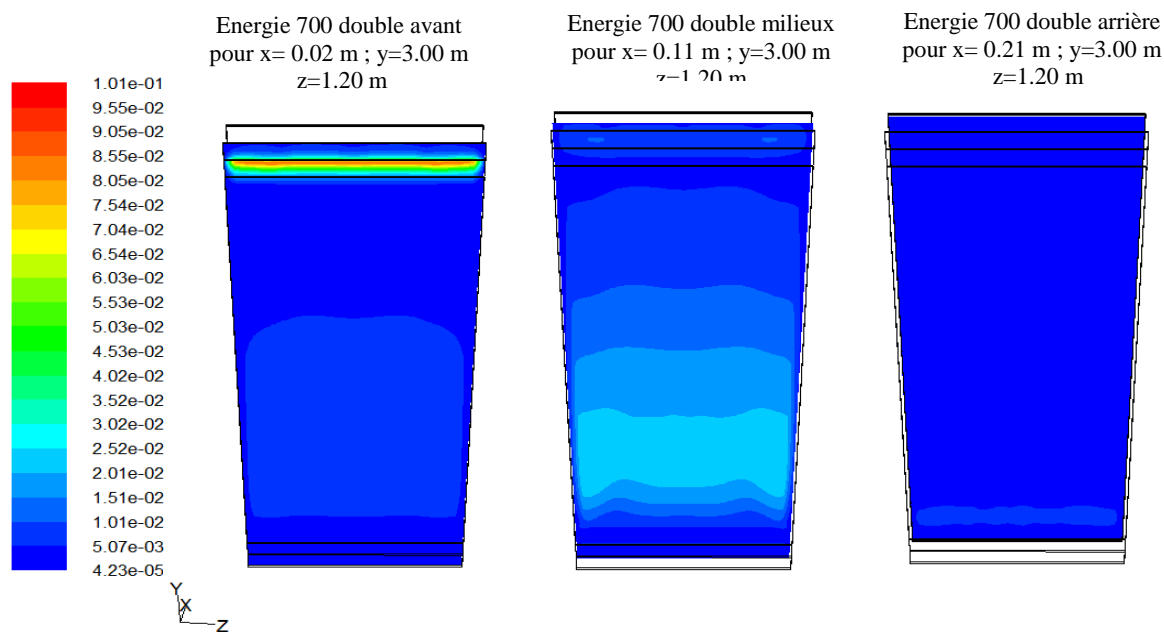
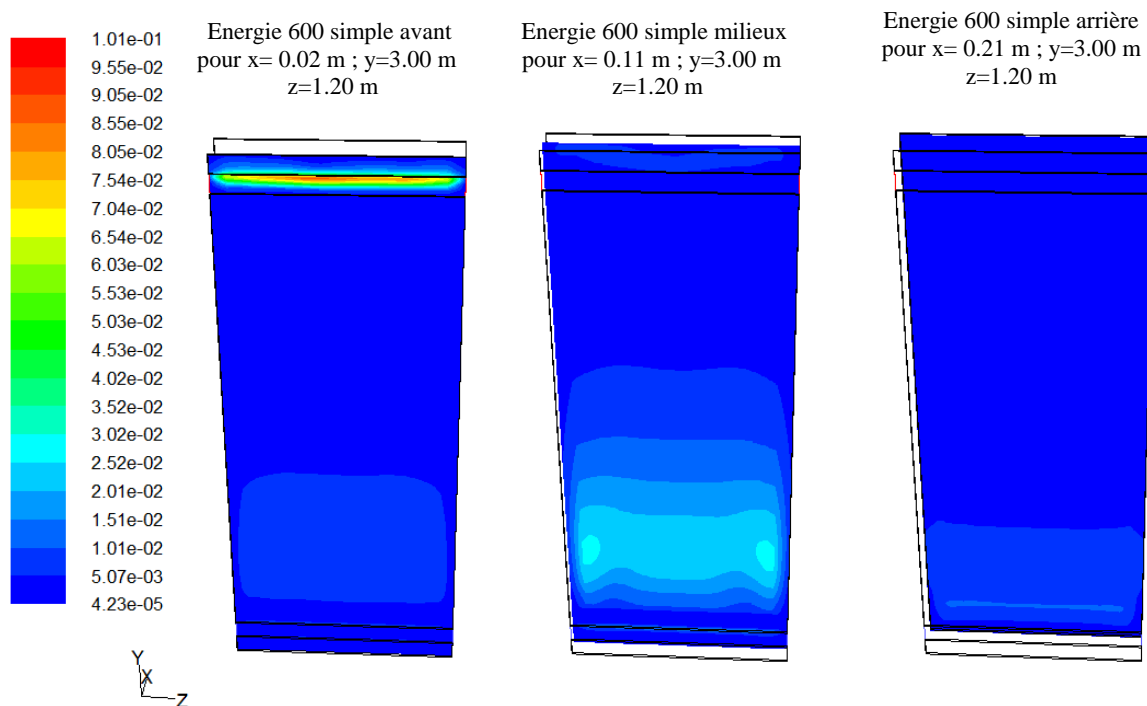


Figure 4.9 : Contour de l'énergie cinétique turbulente pour les deux modèles de façade double peaux (Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieur pour un flux de 700 w/m^2)

Simple vitrage



Double vitrage

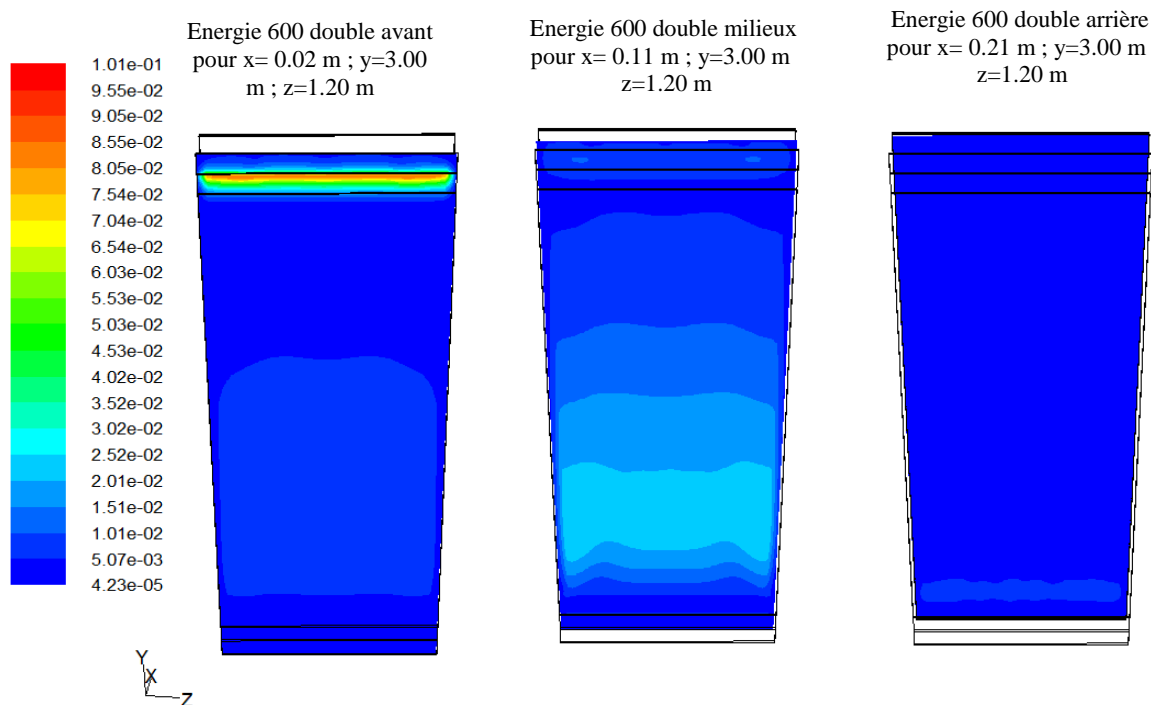


Figure 4.10 : Contour de l'énergie cinétique turbulente pour les deux modèles de façade double peaux (Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieur pour un flux de 600 w/m^2)

Façade double peaux simple vitrage intérieure

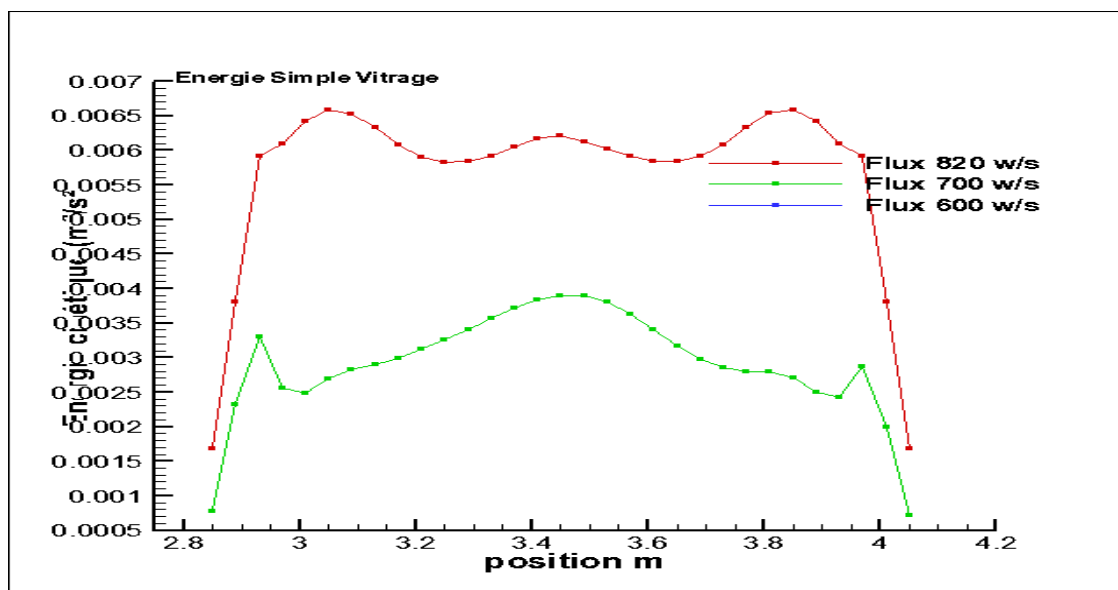


Figure 4.11 : Profil de l'énergie cinétique turbulente à la position $y=2.85$ m de $z=0$ m à $z=1.20$ m pour $x=0.12$ m pour simple vitrage

Façade double peaux double vitrage intérieure

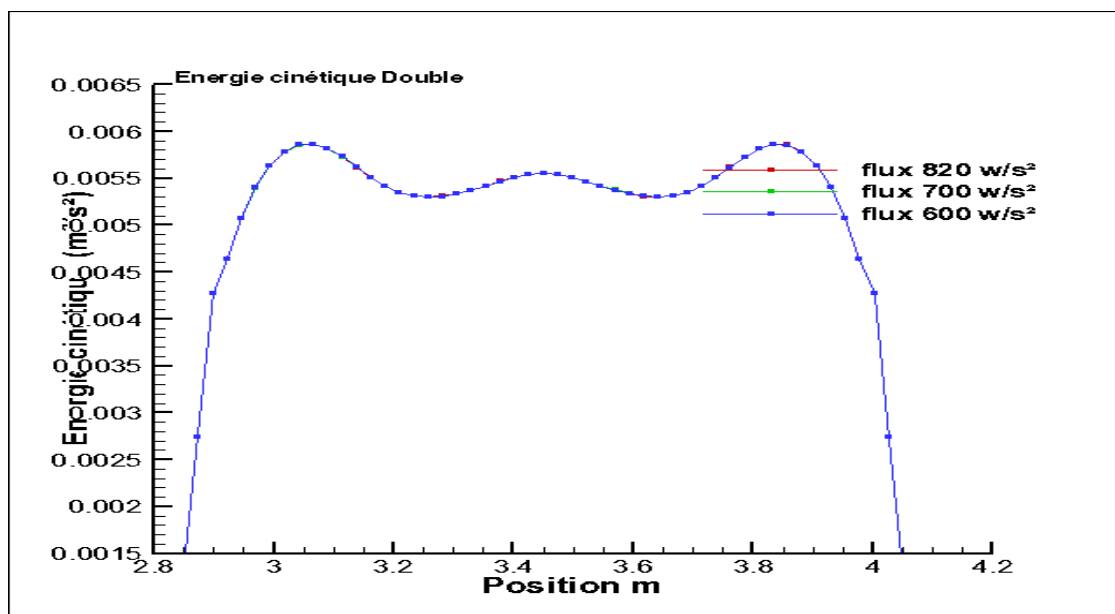


Figure 4.12 : Profil de l'énergie cinétique turbulente à la position $y=2.85$ m de $z=0$ m à $z=1.20$ m pour $x=0.12$ m pour double vitrage

4.5 Distribution du coefficient de pression sur la façade

Les figures ci-dessous Figure IV .13 ; Figure IV .14 et Figure IV .15 illustres la distribution du coefficient de pression sur la façade dans les cavités des deux façades ventilées à double peaux ; façade ventilée simple vitrage et façade ventilées double vitrage

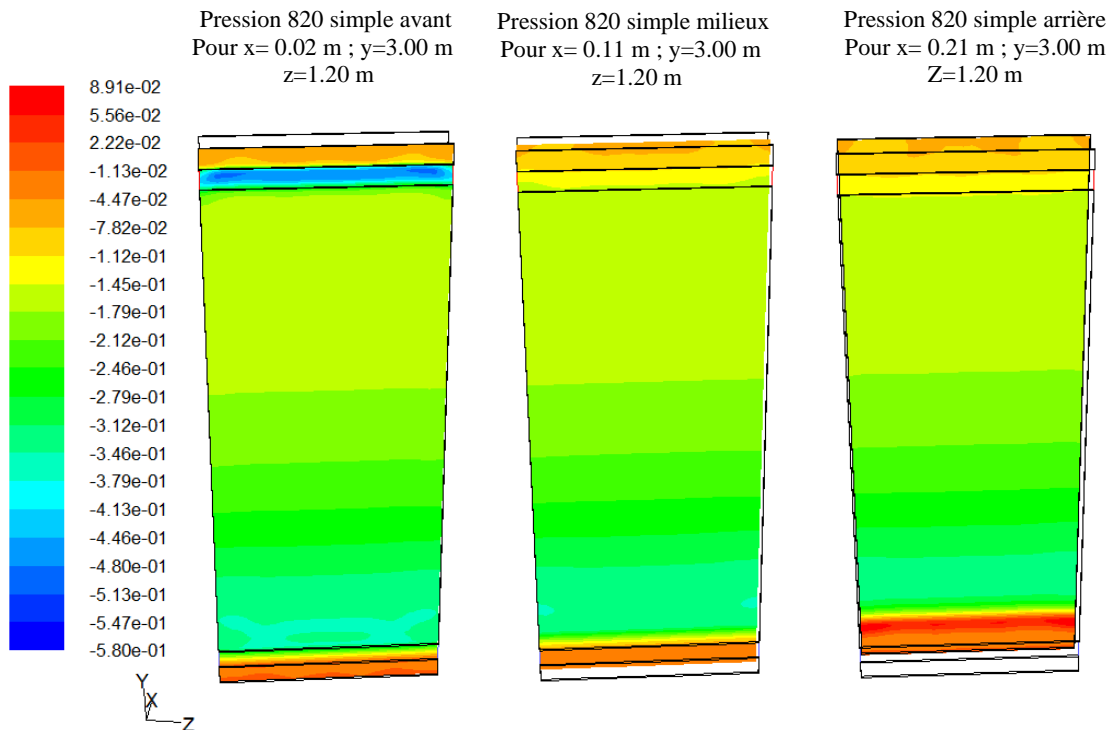
Les profils dans les figures 4.13, 4.14 et 4.15 montrent l'évolution du coefficient de pression à la sortie $y=3.00$ m de $z=0$ m à $z=1.20$ m pour $x=0.12$ m.

Les valeurs de coefficient de pression pour les trois flux 820 w/s, 700 w/s et 600 w/s sont constantes à la sortie pour simple vitrage. Alors que pour la façade double peaux pour un double vitrage intérieur la distribution du coefficient de pression, les valeurs sont plus proches pour les trois flux considérés (Figures 4.16 et 4.17).

Les coefficients de pression sont plus négatifs pour la façade ventilée à double vitrage que pour la façade ventilée à simple vitrage, ce qui indique une dépression plus marquée dans le cas du double vitrage.

Par conséquent, le renouvellement d'air est plus important pour la façade à double vitrage que pour celle à simple vitrage.

Simple vitrage



Double vitrage

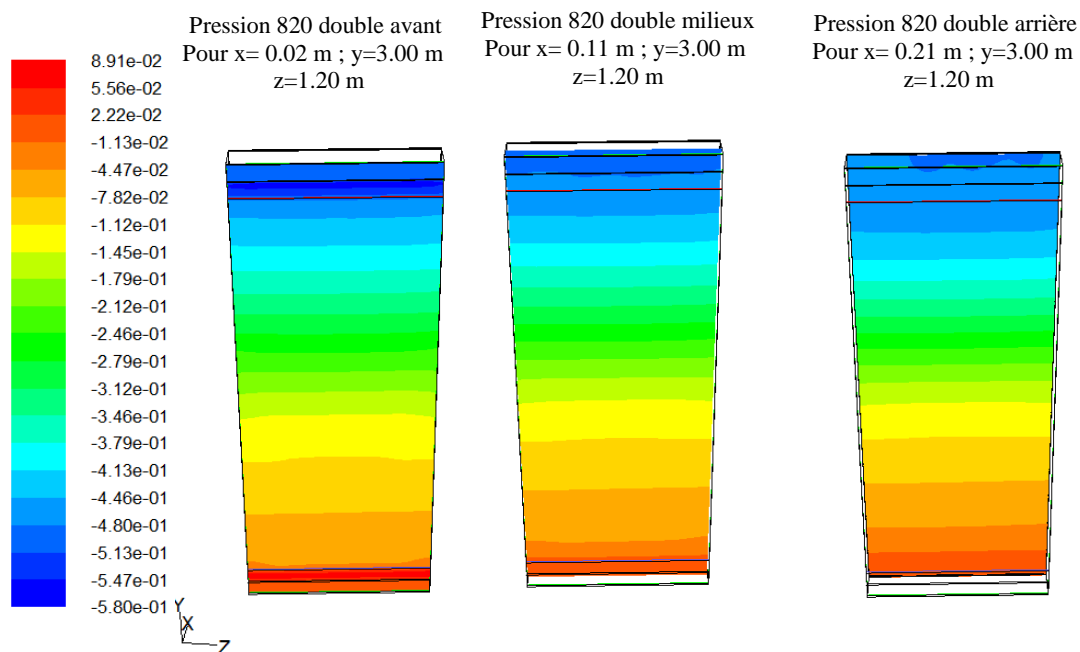
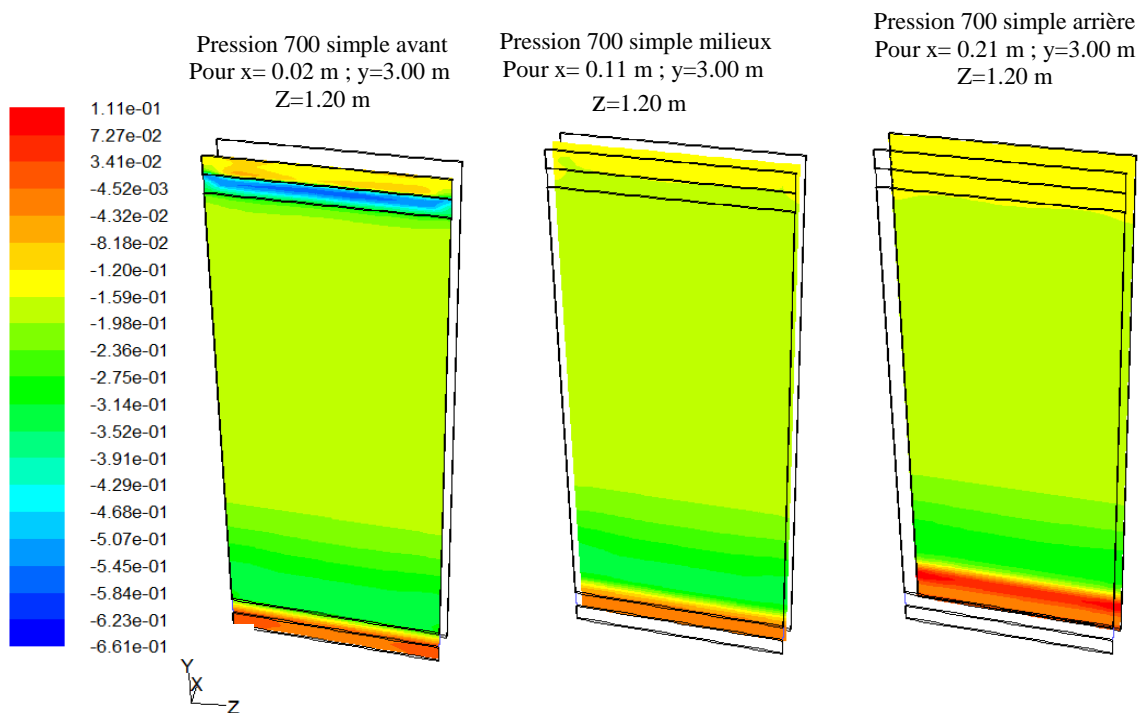


Figure 4.13 : Contour de coefficient de pression pour les deux modèles de façade double peaux (Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieur pour un flux de 820 w/m²)

Simple vitrage



Double vitrage

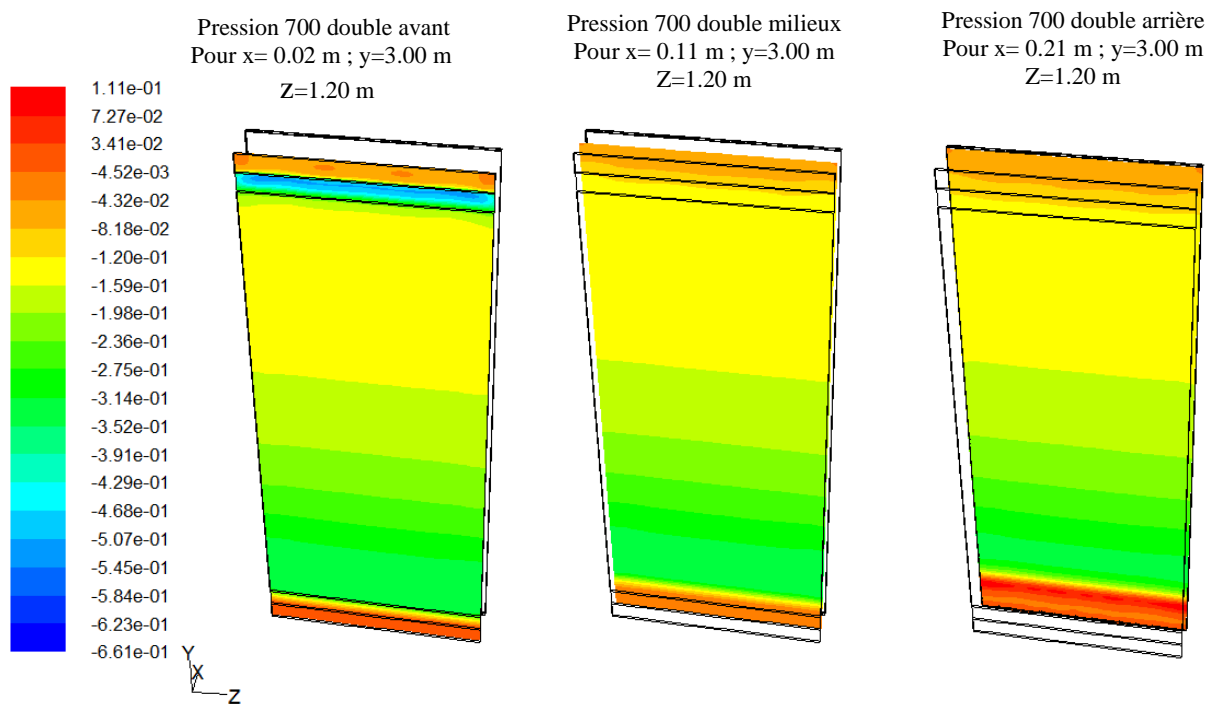
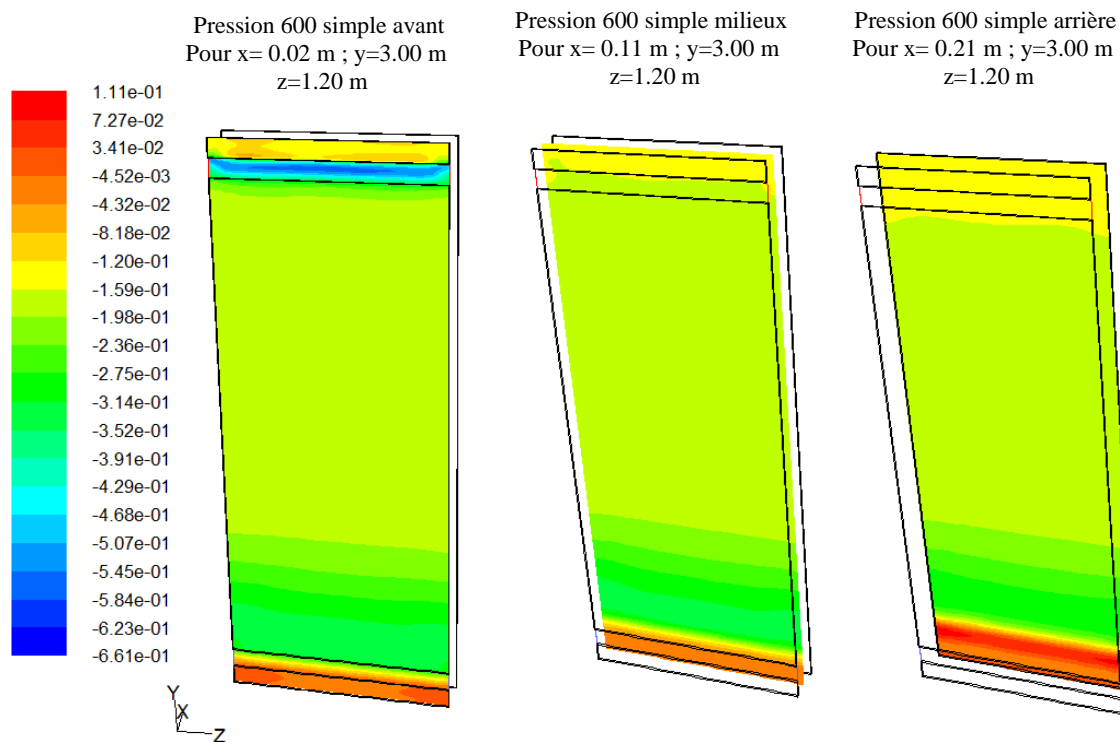


Figure 4.14 : Contour de coefficient de pression pour les deux modèles de façade double peaux (Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieure pour un flux de 700 w/m²)

Simple vitrage



Double vitrage

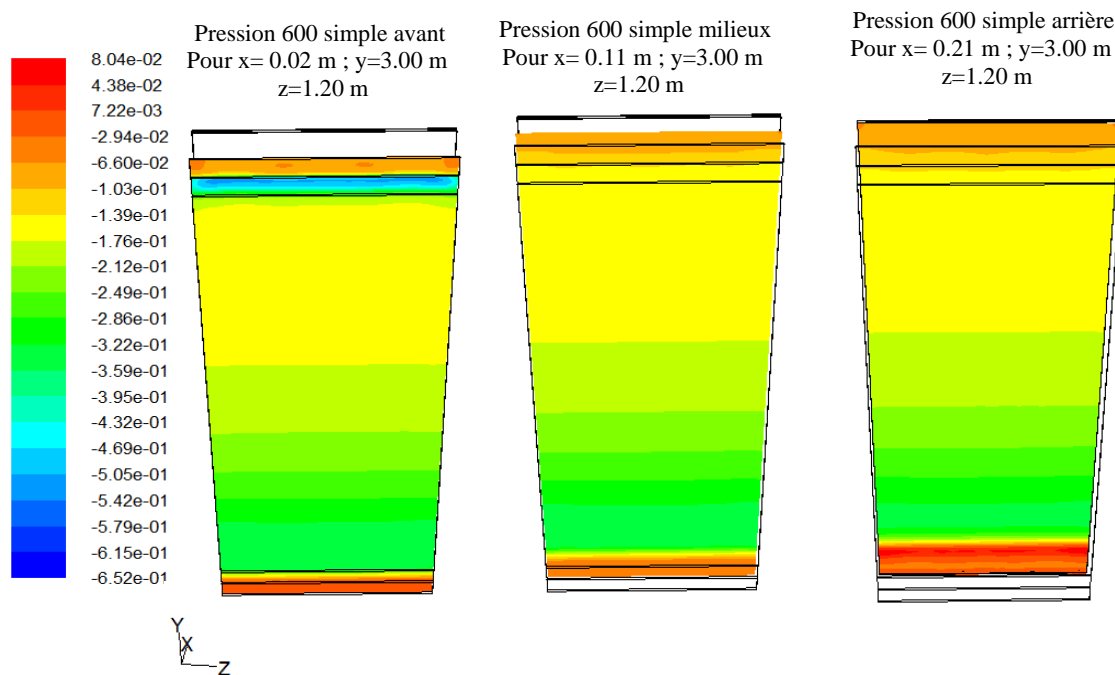


Figure 4.15 : Contour de coefficient de pression pour les deux modèles de façade double peaux (Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieure pour un flux de 600 w/m²)

Façade double peaux simple vitrage intérieure

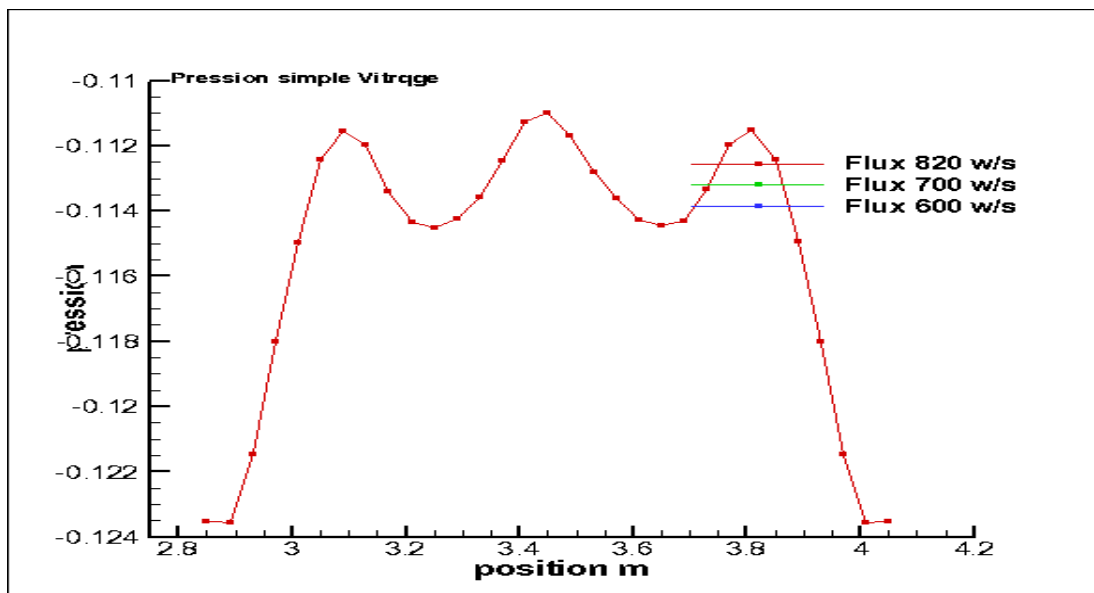


Figure 4.16 : Profil de coefficient de pression à la position $y=2.85\text{ m}$ de $z=0\text{ m}$ à $z=1.20\text{ m}$ pour $x=0.12\text{ m}$ pour simple vitrage

Façade double peaux double vitrage intérieure

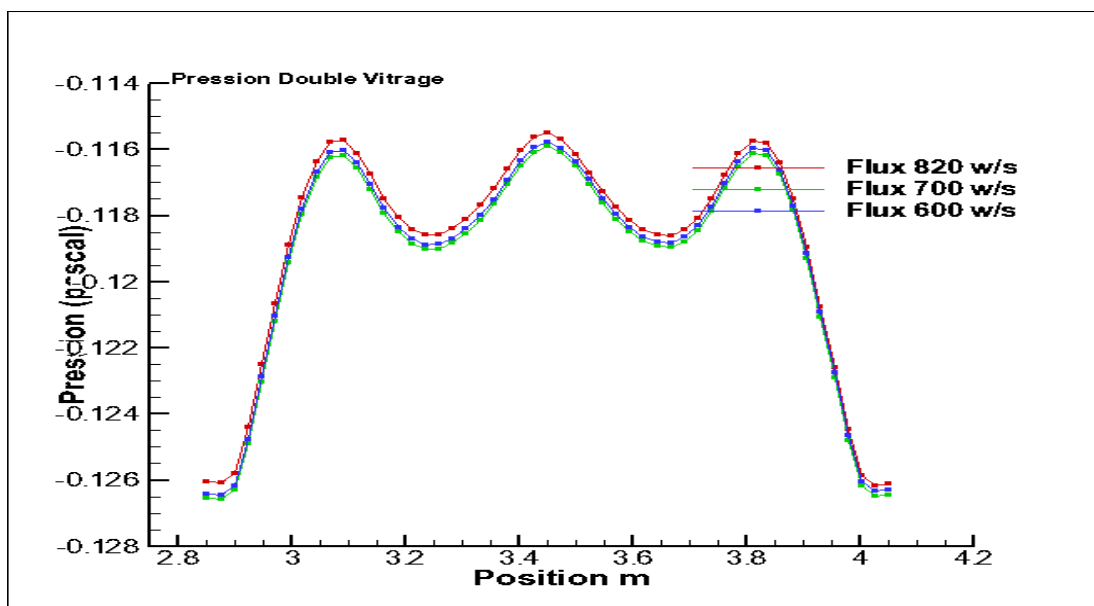
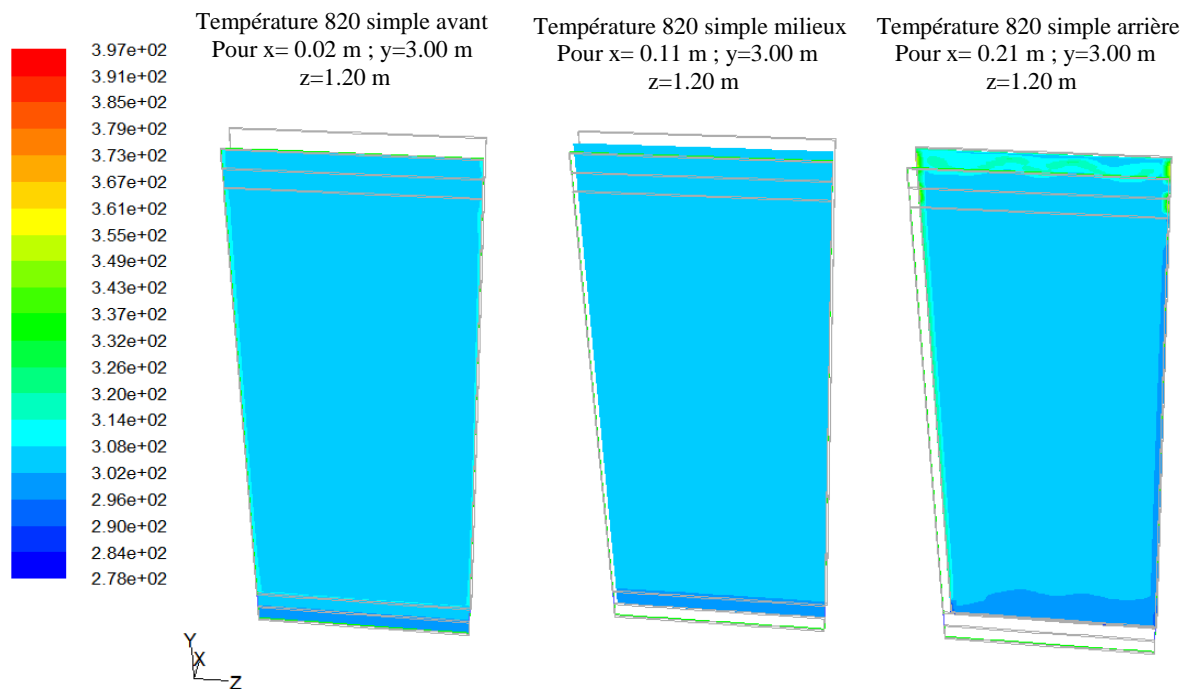


Figure 4.17 : Profil de coefficient de pression à la position :
 $y=2.85$ m de $z=0$ m à $z=1.20$ m pour $x=0.12$ m pour double vitrage

4.6 Distribution de la température

Les figures 4.18 , 4.19 et 4.20 illustrent la distribution de la température dans les cavités des deux façades ventilées à double peaux ; façade ventilée simple vitrage et façade ventilées double vitrage ; les valeurs des températures sont supérieures pour la double façade vitrage intérieur simple par rapport à la double façade vitrage intérieur double conséquence des perte thermique au niveaux du vitrage intérieur de la face double peaux à simple vitrage intérieur. Les profils dans les figures 4.21 et 4.22 montrent l'évolution de la température à la sortie $y=3.00$ m de $z=0$ m à $z=1.20$ m pour $x=0.12$ m. Les valeurs de température pour les trois flux 820 w/s ; 700 w/s et 600 w/s sont constantes à la sortie pour simple vitrage. En revanche, pour la façade double peau avec un double vitrage intérieur, la distribution de température présente des valeurs différentes selon les trois flux considérés (voir figures 4.21 et 4.22).

Simple vitrage



Double vitrage

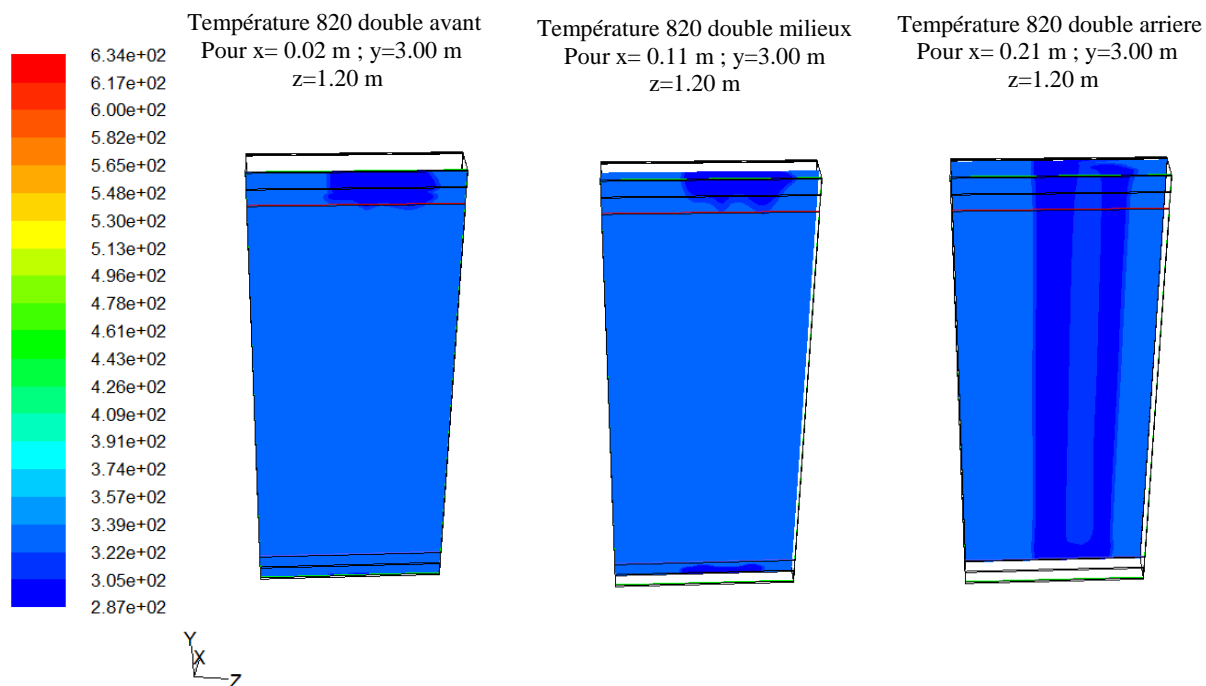
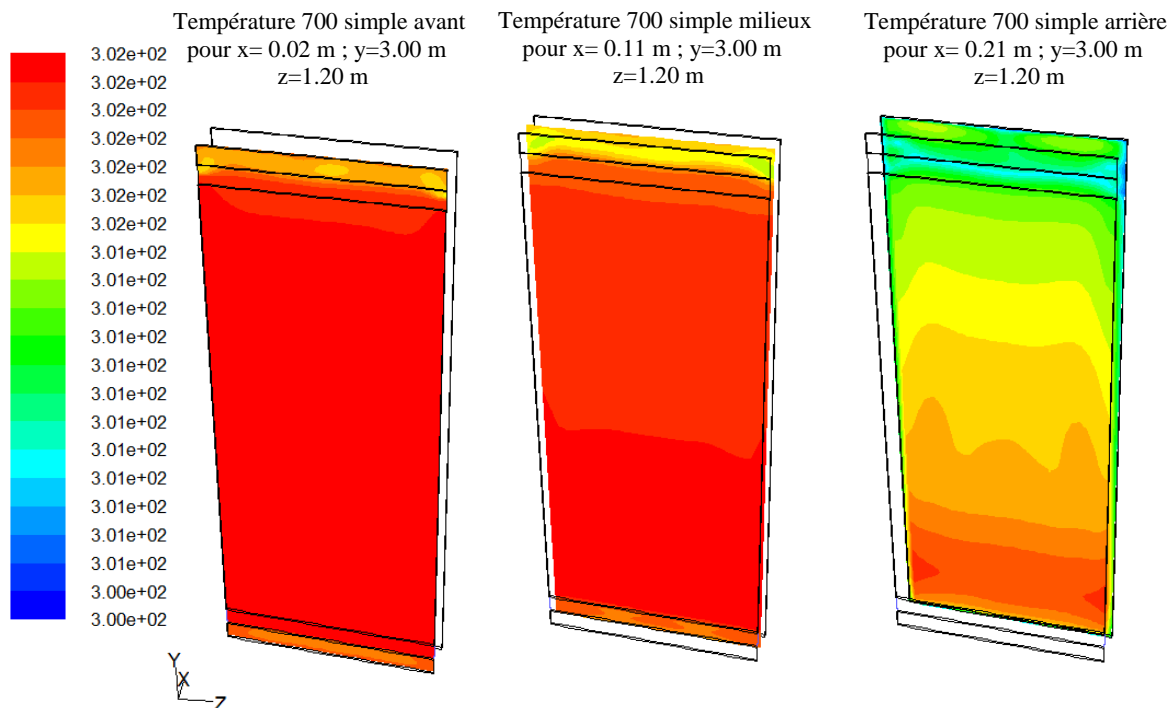


Figure 4.18 : Contour de la température pour les deux modèles de façade double peaux (Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieur pour un flux de 820 w/m²)

Simple vitrage



Double vitrage

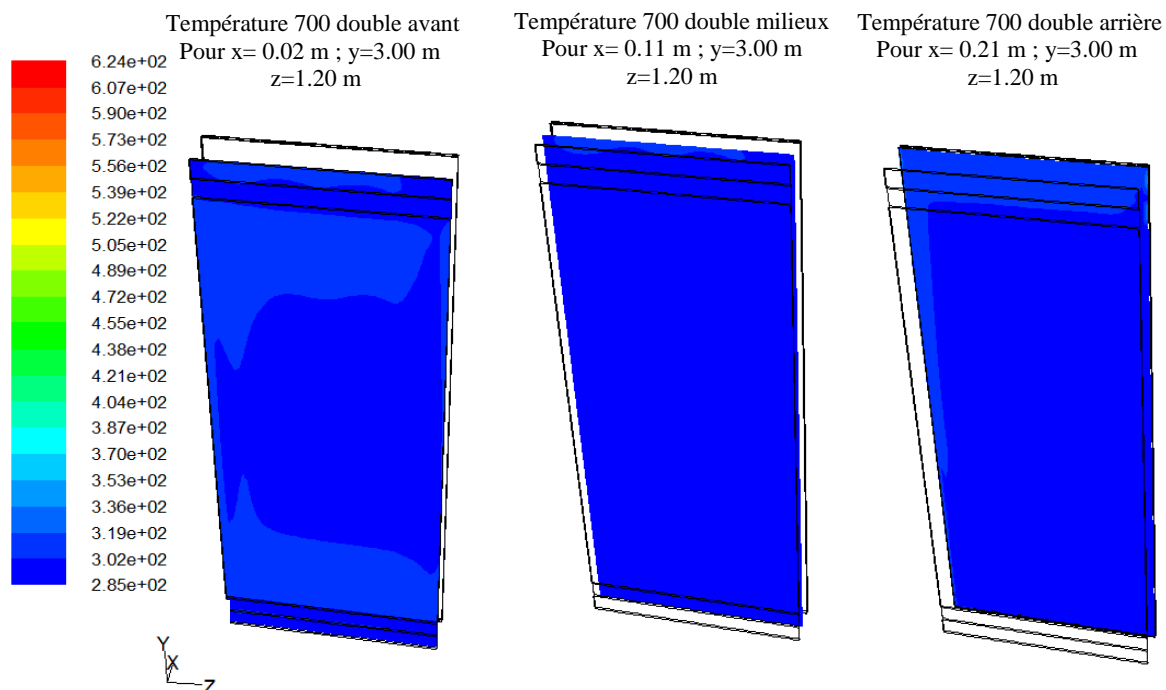


Figure 4.19 : Contour de la température pour les deux modèles de façade double peaux (Modèle simple vitrage intérieur & modèle double vitrage intérieur pour un flux de 700 w/m²)

Façade double peaux simple vitrage intérieure

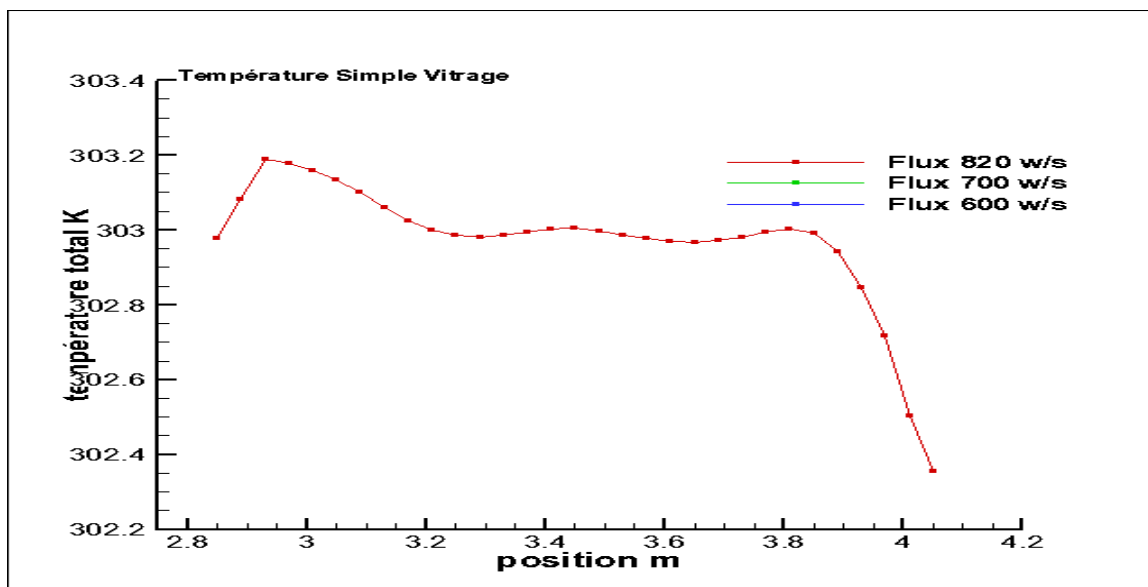


Figure 4.21 : Profil de la température à la position $y=2.85$ m de $z=0$ m à $z=1.20$ m pour $x=0.12$ m pour simple vitrage

Façade double peaux double vitrage intérieure

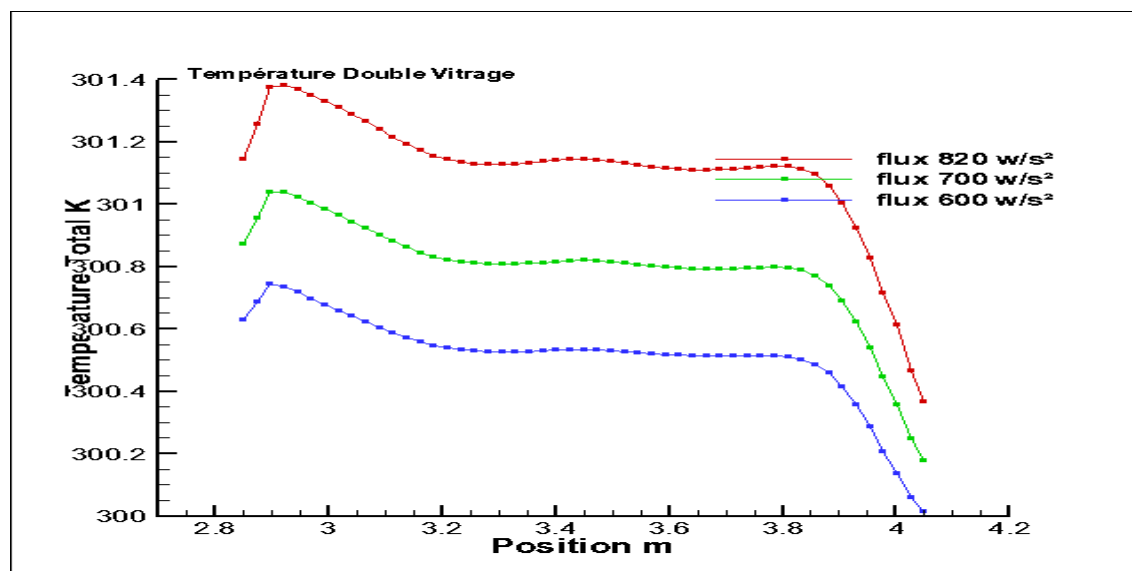


Figure 4.22 : Profil de la température à la position $y=2.85$ m de $z=0$ m à $z=1.20$ m pour $x=0.12$ m pour double vitrage

Nous présentons dans le tableau 4.1 les valeurs moyennes de la vitesse, de l'énergie cinétique turbulente, de la pression et de la température dans la cavité de la façade double-peau, pour deux configurations : avec simple vitrage intérieur et avec double vitrage intérieur. Trois flux de chaleur ont été considérés : 820, 700 et 600 w /m².

Les résultats montrent que la vitesse moyenne de l'air reste pratiquement inchangée entre les deux configurations, ce qui suggère que le type de vitrage intérieur n'a pas d'impact significatif sur la dynamique générale de l'écoulement.

En revanche, l'énergie cinétique turbulente est légèrement plus élevée dans le cas du simple vitrage, traduisant une turbulence plus marquée, probablement liée à une interaction thermique plus importante avec l'environnement.

Les valeurs de coefficient de pression sont plus négatives pour la façade double peau avec double vitrage intérieur, comme attendu dans une configuration de convection forcée. On note cependant une meilleure stabilité de l'écoulement avec le double vitrage.

Enfin, la différence la plus marquante concerne la température moyenne dans la cavité : celle-ci est systématiquement plus faible avec le double vitrage. Par exemple, à 820 w /m², la température passe de 302,94 K (simple vitrage) à 301,11 K (double vitrage).

Ce comportement confirme que le double vitrage améliore l'isolation thermique de la façade en réduisant les pertes de chaleur, ce qui constitue un avantage important en termes de performance énergétique.

Tableau 4.1 : valeurs moyennes de la vitesse, l'énergie cinétique turbulente, coefficient pression et la température

Simple vitrage

SIMPLE VITRAGE	820 (w /m²)	700 (w /m²)	600 (w /m²)
VITESSE (m/s)	0,2546584300	0,2519048400	0.25190484
ENERGIE CINETIQUE (m²/s²)	0,0071869318	0,0067295256	0.0067295256
COEFFICIENT DE PRESSION	-0,2016790000	-0,1822745000	-0.1822745
TEMPERATURE (K)	302,9422800000	301,8787600000	301.87641

Double vitrage

DOUBLE VITRAGE	820 (w /m ²)	700 (w /m ²)	600 (w /m ²)
VITESSE (m/s)	0,2534433600	0,2534476900	0,2534467300
ENERGIE CINETIQUE (m ² /s ²)	0,0071402156	0,0071405068	0,0071405314
COEFFICIENT DE PRESSION	-0,2007607200	-0,2011513600	-0,2010113700
TEMPERATURE (K)	301,1066300000	300,8492000000	300,6217200000

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et analysé les résultats issus de la simulation numérique tridimensionnelle réalisée avec le logiciel Fluent. L'étude a porté sur le comportement thermo-aéraulique d'une façade double-peau ventilée, comparant deux configurations : l'une avec un simple vitrage intérieur, l'autre avec un double vitrage intérieur.

Les principaux paramètres évalués ont été la vitesse de l'air, l'énergie cinétique turbulente, le coefficient de pression et la température dans la cavité.

L'analyse comparative des résultats met clairement en évidence les avantages du double vitrage intérieur par rapport au simple vitrage, notamment :

- Une meilleure stabilité de l'écoulement dans la cavité, traduisant un fonctionnement plus régulier et contrôlé du système.
- Une isolation thermique renforcée, grâce à une réduction notable des pertes de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur du bâtiment en hiver, due à la présence d'une lame d'air ou d'un gaz isolant entre les deux vitres du double vitrage.
- Une réduction des gains thermiques indésirables en été, limitant la transmission de chaleur vers l'intérieur.
- Un renouvellement d'air efficace à travers la cavité, contribuant à la qualité de l'environnement intérieur.

- Une stabilité accrue de la température intérieure, offrant un meilleur confort thermique pour les occupants.
- L'utilisation d'une façade double peau avec un double vitrage intérieur permet de réduire les besoins en chauffage et en climatisation.

En résumé, le double vitrage intérieur s'impose comme une solution plus performante pour les façades double-peau ventilées, en optimisant à la fois le confort thermique, l'efficacité énergétique et la qualité de l'air. Ces résultats confirment l'intérêt de cette configuration dans le contexte du bâtiment durable et à haute performance énergétique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire de master s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments à travers l'étude du comportement dynamique et thermique de l'air dans une façade à double peau. Il a été structuré en deux grandes parties : une partie bibliographique, qui pose le cadre théorique et contextuel de l'étude, et une partie numérique, qui développe la démarche de simulation.

Les simulations numériques en trois dimensions de modèles de façades à double peau ont été réalisées à l'aide du logiciel Fluent 6.3. La modélisation et le maillage de la géométrie ont été effectués avec le logiciel Gambit.

Une comparaison a été effectuée entre une façade à double peau avec simple vitrage intérieur et une façade à double peau avec double vitrage intérieur. L'efficacité du double vitrage intérieur a permis d'assurer une stabilité de l'écoulement à l'intérieur de la cavité de la façade. De plus, le double vitrage intérieur a contribué à limiter les pertes thermiques, ce qui a un impact positif sur le rafraîchissement de l'intérieur du bâtiment.

Ainsi, il apparaît que la façade à double peau avec double vitrage intérieur permet, en été, de limiter le gain de chaleur, tout en évitant les pertes thermiques en hiver.

Malgré l'efficacité de la façade à double peau avec double vitrage intérieur, son coût reste plus élevé que celui d'une façade à double peau avec simple vitrage intérieur. Il serait donc très intéressant d'utiliser des façades à double peau avec double vitrage intérieur pour les bâtiments résidentiels, tandis que des façades à double peau avec simple vitrage intérieur pourraient être privilégiées pour les bâtiments administratifs.

En perspective, ce travail pourrait être approfondi par :

1. Des études numériques et expérimentales ont été menées sur différents modèles de façades à double peau, en tenant compte de diverses épaisseurs de vitrage ainsi que de l'intégration de protections solaires variées, afin d'analyser l'impact de ces éléments sur l'écoulement en trois dimensions, à la fois par simulation numérique et par expérimentation.
2. Des études sur l'impact des différentes positions des façades ventilées par rapport à l'orientation du bâtiment.

Bibliographie

Bibliographies

- [1] Adjibode, Olatoundé Roméo Steeven, et al, Etude de stratégies architecturales de conception bioclimatique de bâtiments en région tropicale sèche. Mémoire de master. Université d'abomey calavi, 2016.
- [2] FERRADJI, Kenza, Evaluation des performances énergétiques et du confort thermique dans l'habitat. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider Biskra, 2017.
- [3] DIDA, Mustapha, Contribution à l'étude de l'effet d'isolation thermique sur la consommation énergétique des bâtiments. Mémoire de master. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2016.
- [4] Hakkoum, Soumia, Etude des caractéristiques thermiques et mécaniques des briques en terre cuite traditionnelles dans les régions de la wilaya d'Ouargla. Mémoire de magister. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.
- [5] IZARD, Jean-Louis, L'inertie thermique dans le bâtiment, Juillet 2006.
- [6] H. Simmler, B. Binder, Experimental and numerical determination of the total solar energy transmittance of glazing with venetian blind shading, *Build. Environ.* 43 (2) 197-204, 2008.
- [7] Stec, W.J.; Paassen, A.H.C.; Maziarz, A. Modelling the double skin façade with plants. *Energy Build*, 37, 419–427, 2005. [Google Scholar] [CrossRef]
- [8] AATTACHE, Amel, Nouveau matériaux le verre dans le bâtiment. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran MOHAMED BOUDIAF U.S.T.O, 2017- 2018.
- [9] Transferts thermiques, Taine.J et Petit.J.P, cours et données de base, Dunod, 1995.
- [10] Ahmed, M., Abdel-Rahman, A. K., Ali, A. H. H., & Suzuki, M. Double Skin Façade: The state of art on Building Energy efficiency. Hokkaido University, (2015).
- [11] Lopes, M., & Mendes, N. Double Skin Facades: A Review of Their Application in Sustainable Building Design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 94-107, (2019).
- [12] Denis BRUNEAU. Caractérisation et valorisation de protections solaires pour la conception de bâtiments : analyse expérimentale et propositions de modélisations, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, 2013.

- [13] Harrison, K., & Meyer-Boake, T. The tectonics of the environmental skin. University of Waterloo, School of Architecture, 2, 2003.
- [14] Poirazis H. Double skin façades for office buildings. Lund (Sweden): Department of Construction and architecture, 2004.
- [15] Poirazis H. Double skin façades for office buildings. Lund (Sweden): Department of Construction and architecture, 2004.
- [16] Arons, D.M.M., Glicksman, L.R. Double Skin, Airflow Facades: will the Popular European Model work in the USA?, Proceedings of ICBEST 2001, International Conference on Building Envelope Systems and Technologies, Ottawa, Canada, vol. 1, 203-207, 2001.
- [17] Saelens. D., Energy Performance Assessment of Single Storey Multiple-Skin Façades. Ph. D. thesis, K. U. Leuven, Leuven, Belgium, 2002.
- [18] Bhamjee, M.; Nurick, A.; Madyira, D.M. An experimentally validated mathematical and CFD model of a supply air window: Forced and natural flow. *Energy Build*, 57, 289–301, 2013.
- [19] Oesterle. E., Leib, R.D., Lutz, G., Heusler, B. Double skin facades: integrated planning: building physics, construction, aerophysics, air-conditioning, economic viability, Prestel, Munich, 2001.
- [20] Chou, S.K.; Chua, K.J.; Ho, J.C. A study on the effects of double skin façades on the energy management in buildings. *Energy Convers. Manag*, 50, 2275–2281, 2009.
- [21] White, F. M. *Fluid Mechanics* (7th ed.). McGraw-Hill Education, (2011).
- [22] Harrison, K., & Meyer-Boake, T. The tectonics of the environmental skin. University of Waterloo, School of Architecture, 2, 2003.
- [23] Cheol-Soo Park. Occupant responsive optimal control of smart façade systems. Thesis of Georgia Institute of Technology: May 2003.
- [24] Fuliotta, R.; Cambulia, F.; Mandasa, N.; Bacchin, N.; Manarab, G.; Chen, Q. Experimental and numerical analysis of heat transfer and airflow on an interactive building façade. *Energy Build*, 42, 23–28, 2010. [Google Scholar] [CrossRef]
- [25] Gavan, V.; Woloszyn, M.; Kuznik, F.; Roux, J.J. Experimental study of a mechanically ventilated double-skin façade with Venetian sun-shading device: A full-scale investigation in controlled environment. *Sol. Energy*, 84, 183–195, 2010.

- [26] EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF NATURAL CONVECTION IN A DOUBLE SKIN FAÇADE, 2016.
- [27] Guardo, A.; Coussirat, M.; Valero, C.; Egusquiza, E.; Alavedra, P. CFD assessment of the performance of lateral ventilation in Double Glazed Façades in Mediterranean climates. *Energy Build.* , 43, 2539–2547, 2011. [Google Scholar] [CrossRef]
- [28] Bejan, A.; Kraus, A.D. *Heat Transfer Handbook*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2003.
- [29] Kakaç, S.; Shah, R.K.; Aung, W. *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 1987.
- [30] Ahmed, H., Gadi, M. B., & Hassan, A. S. (2016). *A CFD simulation of the thermal performance of double skin façade in hot and humid climate*. *Building Simulation*, 9(3), 309–323, 2016.
- [31] Saelens, D. *Energy Performance Assessment of Single Storey Multiple-Skin Facades*; Katholieke Universiteit Leuven: Leuven, Belgium, 2002.
- [32] M. Fossaa, C.Menezes, E. Leonardi. Experimental natural convection on vertical surfaces for building integrated photovoltaic (BIPV) applications. *Experimental Thermal and Fluid Science*; 32: 980-990,2008.
- [33] Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. *The Feynman Lectures on Physics, Vol. 2: Mainly Mechanics, Radiation, and Heat*. Addison-Wesley, (2011).
- [34] Oubay, M. IV. *Transfert de chaleur par rayonnement*. Academia.edu, (2018).