REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINSTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université YAHIA FARES de MEDEA

Faculté de technologie

Département de Génie Mécanique

Projet de Fin d'Etude pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : Energétique

Thème

ETUDE DES TRANSFERTS THERMIQUES À TRAVERS LES MURS D'UNE HABITATION EN UTILISANT DES BRIQUES NON CONVENTIONNELLES

Réalisé *par :*

- *LABBACI AHMED ABD ESSAMED*
- *BOURAHMANI TOUMI*

Proposé et dirigé par :

Dr. ALLICHE MOUNIR

Dr. REBHI REDHA

2021- 2022

Remerciements

On tient à remercier tout d'abord Dieu notre Créateur
Qui nous a accordé les capacités et le courage afin de
terminer et réussir ce modeste travail.
Il nous est agréable de présenter nos profonds respects et
Remerciements à notre promoteur Dr. ALLICHE Mounir
Pour son aide et ses importantes orientations
Durant les différentes étapes de l'élaboration de ce
Travail.
Nous tenons à remercier également l'ensemble des
Enseignants qui ont contribué à notre formation
Universitaire.
Mes remerciements les plus vifs vont tout
Particulièrement à mes parents qui ont joué
Evidemment un très grand rôle en
Me donnant un environnement idéal dans mon enfance
Et en m'enseignant les valeurs d'humilité et d'honnêteté
Avec lesquels j'ai essayé d'aborder mon travail
Scientifique. Merci pour Leur soutien moral et matériel.
Enfin un grand merci à toutes les personnes qui nous ont
Aidé, soutenu et encouragée de prés et de loin pour
L'élaboration de ce travail.

Surtout dans ces circonstances difficiles de l'épidémie de Corona, nous espérons que Dieu nous lèvera cette épidémie dans les plus brefs délais.

آميـــــــــــــــــــــن

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes grandes mères KALTOM et AICHA pour leurs amours.

A ma très chère mère FATIMA ZAHRA, qu'elle reçoit le

Témoignage de ma profonde affection.

A mon très cher père AISSA qui m'aidé, soutenu et

Encouragé durant toutes mes études.

A mes chères frères: MOHAMED. HAMZA.et ma sœur AMINA

A mon trinôme et sa famille.

*A tous ceux qui porte le nom*LABBACI**

A tous mes amis .

LABBACI Ahmed

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes grandes mères BOUKHMIKHEM, MASSOUDA et SULTANA

pour leurs amours.

A ma très chère mère DHAHBIA, qu'elle reçoit le

Témoignage de ma profonde affection.

A mon très cher père SAID qui m'aidé, soutenu et

Encouragé durant toutes mes études.

A mes chères frères : KHAIREDDIN.ABDELAZIZ.

A mes chères sœurs : NESRINE, AMAL, IKRAM.

A mon trinôme et sa famille.

*A tous ceux qui porte le nom*BOURAHMANI**

A tous mes amis.

TOUMI BOURAHMAN

Résumé :

L'étude consiste à analyser l'effet de l'utilisation des briques classiques et celles mélangées avec de la fibre végétale (biomatériau) avec et sans PMC sur les performances des transferts thermique à travers les murs des habitations. On a fait ce travail de simulation numérique en utilisant le code **Ansys CFX**. Une étude de comparaison de deux modèles de briques avec et sans PMC a été présentée.

Mots clés : transferts thermiques, efficacité énergétique, habitation, simulation numérique.

Abstract

The study consists in analyzing the effect of the use of conventional bricks and those mixed with vegetable fiber (biomaterial) with and without PMC on the performance of heat transfers through the walls of buildings. We did this numerical simulation work using the Ansys CFX code. A comparison study of two models of bricks with and without PMC was presented.

Keywords: heat transfer, energy efficiency, housing, numerical simulation.

الملخص :

تهدف هذه الدراسة الى تحليل تأثير استخدام الطوب التقليدي و الطوب الممزوج بالألياف النباتية (المواد الحيوية) مع وبدون PMC على أداء عمليات نقل الحرارة عبر جدران المساكن .قمنا بعمل المحاكاة العددية هذا باستخدام برنامج Ansys CFX. تم تقديم دراسة مقارنة للنموذجين من الطوب مع وبدونPMC .

الكلمات المفتاحية: نقل الحرارة، كفاءة الطاقة، السكن، المحاكاة العددية.

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Sommaire

Introduction générale …….……..2

CHAPITRE 1 :

1.1 Introduction……..……..…..5

1.2 État de l'art…….....5

1.3 CONCLUSION…….....10

CHAPITRE 2 :

2.1. GENERALITES SUR LES TRANSFERTS DE CHALEUR ……...……12

2.1.1 Introduction 12

2.1.2 Définitions 12

2.1.2.1 Champ de température.....12

2.1.2.2 Gradient de température 12

2.1.2.3 Flux de La chaleur 13

2.1.3 Formulation d'un problème de transfert de chaleur 13

2.1.3.1 Bilan d'énergie……..……..…….……..13

2.1.3.2 Expression des flux d'énergie ……14

2.1.3.2.1 Conduction……..……14

2.1.3.2.2 Convection……..……..……15

2.1.3.2.2.1 convection forcée ……...……..……16

2.1.3.2.2.2 Convection naturelle…….…….…….17

2.1.3.2.3 Rayonnement……...……..17

2.2 Conduction unidirectionnelle en régime permanent Mur plan sans génération de chaleur

…….……18

2.3 Matériau à changement de phase……..…..……19

2.4 Propriétés de changement de phase……..…….19

2.4.1 Propriétés thermo-physiques……...……..……..19

2.4.2 Propriétés cinétiques……...…….…….20

2.4.3 Propriétés chimiques……..……..….20

2.5 Utilisation de PMC pur l'amélioration de transfert de chaleur……..……....20

2.6 Différents types de changement de phase……..……21

2.7 Types de MCP……...….22

A. Les composés organiques……...……22

B. Les composés inorganiques ……...……23

C. Les eutectiques……24

3 CONCLUSION ……25

CHAPITRE 3 :

3.1 Modèle physique……..……..27

3.2 Hypothèses de travail……..…….…….27

3.3 Equations gouvernantes…….…….……...27

3.3.1 Equation de quantité de mouvement dans le domaine air…….…….….27

3.3.2 Equation de conservation d'énergie……..…….…….28

3.4 Conditions initiales et aux limites……..……..……..30

3.5 Méthode des volumes finis…….……....30

3.5.1 Maillage ……..……30

3.5.2 Discrétisation…….…….…….31

3.6 Calcul du nombre de Nusselt moyen……...…..……..34

3.7 Température moyenne du matériau…….……...…..……35

3.8 Code de calcul et validation……..……..…….…...……35

4 CONCLUSION……..…….……..36

CHAPITRE 4 :

4.1 Définition de CFD …….……...38

4.2 L'outil CFD…….…….…….38

4.3 Présentation d'ANSYS ……...…….……38

4.4 Principaux produits …….....……..…….39

4.4.1 ANSYS Structural …….…….…….…….…39

4.4.2 ANSYS Mechanical…….…..…….…….39

4.4.3 ANSYS CFX et Fluent…….…….…….…… 39

4.5 LES ETAPES DE TRAVAIL ……..……..…….……40

4.5.1.GEOMETRI……...…..…..…40

4.5.2 MAILLAGE…….……..…….…..42

4.5.3 CONFIGURATION…….……...…….…..…43

4.5.4 SOLUTION……...…….…….……..…51

4.5.5 RESULTAT……..……..…52

4.6 CONCLUSION……54

CHAPITRE 5 :

5.1 Introduction…….……56

5.2 Problème physique étudié ……...…56

5.3 Résultats et discussion…….……57

5.4CONCLUSION ……...…….59

Conclusion Générale ……65

Références Bibliographiques……67

Liste Des Figures

Chapitre 2

Figure 2.1: Isotherme et gradient thermique…….12
Figure 2.2 : Système et bilan énergétique…….13
Figure 2.3 : Schéma du transfert de chaleur conductif……...…….14
Figure (2.4) : Schéma du transfert de chaleur convectif……...15
Figure 2.5 : Schéma du transfert de chaleur radiatif…….17
Figure 2.6 : changement de température dans lmur…….18
Figure 2.7 : Processus de solidification et fusion (Fleischer, A.S., Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials)……..21
Figure 2.8: classification des MCP proposée par Abhat……..22

Chapitre 3

Figure 3.1 : Modèle physique proposé pour cette étude……...27
Figure 3.2 : Profil de vitesse lors d'un écoulement établi……28
Figure 3.4 : Maillage proposé pour notre cas d'étude……..31
Figure 3.5 : Figure représentant le volume de contrôle……31
Figure 3.5 : convection forcée entre deux plaques parallèles avec les deux matériaux comme conducteurs thermiques parfaits……36

Chapitre 4

Figure 4.1 : Dessiner Une esquise…… 40
Figure 4.2 : Definir Les Cotes…..…….…….... 41
Figure 4.3 : Extrusion La Géométrie……...……..……. 41
Figure 4 .4 : Posage 3d (Génère)……. 42
Figure 4.5 : Génère Le Maillage……. 43
Figure 4.6 : Ouvrir La Configuration…….. 43
Figure 4.7 : Configuration (Analysis Type)…… 44
Figure 4.8 : Default Domain……...…… 44
Figure 4.9: Default Domain (Fluid Models)……...…… 45

Figure 4.10 : Default Domain (Initialization)…….…… 45
Figure 4.11: Boundary…… 46
Figure 4.12 : Inlet...…… 47
Figure 4.13: Boundary Details (Inlet)……. 47
Figure 4.14 : Outlet……. 48
Figure 4.15: Boundary Details (Outlet)…….. 48
Figure 4.16 : Wall……... 49
Figure 4.17: Boundary Detail (Wall)…….. 49
Figure 4.18 : Solver Control……...…… 50
Figure 4.19 : Semmetry…….. 50
Figure 4.20 : Solution……. 51
Figure 4.21 : Fin De Calcule……... 51
Figure 4.22 : Resultat…….. 52
Figure 4.23 : Contour…….. 52
Figure 4.24: Contour (Details)……... 53
Figure 4.25 : Pression (Details)…….. 53
Figure 4.26 : Crée Un Line……. 54
Figure 4.27: Chart……... 54

Chapitre 5

Figure 5.1 Structure de la cellule test……. 56
Figure 5.2 Température loin de la paroi en fonction de x (profondeur de la chambre) et à une hauteur de 1.5 m…… 57
Figure 5.3 champ thermique loin de la paroi en fonction de x (profondeur de la chambre) et à une hauteur de 1.5 m…… 58
Figure 5.4. Zones de recirculation dans le volume de la chambre pour les de cas de murs construits avec de la brique sans fibres BC et avec fibres……... 59
Figure 5.5 : conteur de la variation de pression vitesse et température de brique classique avec et son PMC…….…….. 60
Figure 5.6: conteur de la variation de pression vitesse et température de brique fibre avec et son PMC…….. 62
Figure 5.7 : la variation de pression…..…… 63

Figure 5.8 :variation de temperature ……. 63
Figure 5.9variation de flux de chaleur… ……. 63

Liste des tableaux

chapitre: 2

Tableau 2.1 : Conductivité thermique de certains matériaux……..……15

Tableau 2.2 : Propriétés thermiques de certains MCP……25

chapitre: 5

TABELE 5.1 TABELE DES MATERIAUX…….……..57

Nomenclature

$\vec{n}$: vecteur unitaire de la normale

φ : Flux de chaleur transmis par convecti (W)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W m^{-2} °C^{-1})

T_P : Température de surface du solide (°C)

$T_{œ}$: Température du fluide loin de la surface du solide (°C)

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2)

T_{fusion} température de fusion(°C)

A Une surface **(m^2)**

C: La chaleur massique $(J.Kg^{-1}.K^{-1})$

g : L'accélération due à la gravité [m/s^2]

h: Le coefficition d'change par convection $(W.m^{-2}.K^{-1})$

λ : La conductivité thermique $(W.m^{-1}.K^{-1})$

m : La masse (Kg)

Nu: Nombre de Nusselt

Nu_{moy}: Nombre de Nusselt moyen

S : Surface d'échange thermique

T : La température (℃) ou (K)

$\boldsymbol{T_s}$: Température de la surface $(\boldsymbol{K})$

Pr : Nombre d e Prandtl

ρ : Masse volumique du fluide **(kg/m ^{3})**

$\boldsymbol{\phi}$: Flux thermique $(\boldsymbol{W})$.

$\boldsymbol{d\phi}$: Flux de chaleur transmis par conduction $(\boldsymbol{W})$

σ : Constante de Stéphan Boltzmann 5.67.10 -8 $(\boldsymbol{W k^{-4} m^{-2}})$.

$\frac{dT}{d\chi}$: Gradient de température en x en $(\boldsymbol{K}.\boldsymbol{m^{-1}})$

ϕ :Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

σ :Constante de Stefan ($5{,}67.10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4})

ε_p :Facteur d'émission de la surface

T_p : Température de la surface (K)

T_∞ :Température du milieu environnant la surface (K)

S :Aire de la surface (m^2)

X :Variable d'espace dans la direction du flux (m)

T_{moy1} : Température moyenne dans le matériau du bas (MCP ou béton).

T_{moy2} : Température moyenne dans le matériau du haut (MCP ou béton).

T_{moy1} et T_{moy2} sont obtenues par une moyenne arithmétique à travers toute la surface des matériaux de stockage.

U_m : vitesse moyenne débitante

Introduction générale

Introduction générale

La consommation de l'énergie élevée et croissante et ses effets polluants sur l'environnement menace la survie de l'espèce humaine. En effet, le monde s'attaque sérieusement aux émissions de gaz à effet de serre et à la réduction progressive des ressources disponibles les sources d'énergie conventionnelles et la gestion d'autres réglementations associées au changement climatique ; c'est l'ère des énergies renouvelables et technologies intelligentes.

Cependant, ces dernières années, diverses formes de demande d'énergie s'imposent en raison de la croissance de l'activité industrielle et la hausse des prix du carburant due aux conflits (comme la guerre russo-ukrainienne) mais à des coûts très élevés. Ceci induit à une réflexion sérieuse et immédiate à l'introduction de systèmes énergétiques optimisés.

L'un des moyens actuels d'optimiser le système énergétique consiste à stocker de l'énergie ; càd stocker de l'énergie pendant les Heures de faible demande, puis la restituer en cas de forte demande. Un tel stockage d'énergie pourrait apporter de nombreux avantages pour la consommation d'énergie et l'économie du pays.

Actuellement, les chercheurs développent pleinement l'axe, qui consiste à Utiliser des matériaux à changement de phase (PCM ou MCP). Notre étude s'inscrit dans ce cadre.

Pour ce faire, cette étude est subdivisée en cinq chapitres :

Dans le 1er chapitre, un état de l'art a été présenté se basant sur des travaux antérieurs. Le 2eme chapitre est consacrée aux généralités sur les modes de transfert de chaleur et traitant des Matériaux à Changement en particulier ceux incorporés dans la construction des bâtiments.

Le 3eme chapitre est dédié à l'étude numérique par la méthode des volumes finis. Cinq couches constituent le modèle physique proposé. Les couches les plus externes sont des isolants thermiques, deux couches de matériaux de stockage (brique ou MCP) et une couche centrale représentant l'écoulement de l'air dans cet espace confiné.

Dans le 4eme chapitre, une présentation du code ANSYS CFX a été donnée montrant Comment utiliser cet outil CFD.

Le 5eme chapitre consiste à présenter la discussion des résultats de la simulation numérique.

Une conclusion générale et des perspectives sont présentées à la fin de ce mémoire.

CHAPITRE 1

Étude bibliographique

1.1 Introduction

L'énorme augmentation des émissions de CO2 et de NOx due à l'exploitation des ressources énergétiques primaires (d'origine fossile en majorité) dans l'industrie et le secteur du bâtiment a stimulé les efforts de recherche visant à réduire la consommation en énergie. En effet, les bâtiments commerciaux et résidentiels sont parmi les plus gros consommateurs d'énergie, atteignant d'un quart à un tiers de l'énergie totale produite dans le monde.

Cependant, le stockage d'énergie thermique (à chaleur latente) est l'une des différentes méthodes utilisables pour réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments. L'incorporation des matériaux à changement de phase (PCM) dans une enveloppe de bâtiment se présente comme une solution intéressante pour stocker la chaleur latente qui conduit à la mise à niveau de l'inertie thermique du bâtiment.

La capacité de ces matériaux à stocker et à libérer de la chaleur pendant le processus de changement de phase a un effet direct sur le contrôle des températures intérieures à des fins de confort thermique.

D'autre part, la chaleur l'infiltration dans le bâtiment peut être significativement retardée ou considérablement réduite par le processus de changement de phase. Le retard dans l'infiltration de la chaleur permet de déplacer la charge maximale de refroidissement des périodes de pointe vers les périodes des heures creuses de consommation d'électricité.

Les PCM normalement utilisés dans les bâtiments peuvent être utilisés comme système de stockage thermique actif intégré dans les systèmes de chauffage/refroidissement conventionnels, ou en tant que système passif (mur, sol, toit, volets, fenêtres). Plusieurs techniques peuvent être adoptées pour incorporer les MCP dans l'enveloppe du bâtiment, telle que l'incorporation directe, l'immersion, la macro-capsulation, la micro-encapsulation. [ ]

Dans ce contexte, plusieurs chercheurs ont considéré l'intégration des PCM dans les murs des bâtiments dans des études théoriques, numériques et expérimentales pour illustrer l'influence des PCM sur la comportement des murs des bâtiments sous les différents climats.

1.2 État de l'art

On présente ici une synthèse de quelques des travaux antérieurs (articles récents) afin de montrer les techniques de base utilisées pour résoudre ce problème de stockage d'énergie en utilisant du MCP et voire les effets de ce matériau.

Zidane Mohamed [1] a étudié un mur avec béton et mur avec PCM en utilisant une approche numérique par la méthode numérique de volumes finis. Il a trouvé que les températures des matériaux de stockage ont passé de 15°C à 28°C et 24°C respectivement pour le MCP et le béton. Soit une augmentation en pourcentage de 87% et 60% respectivement pour le MCP et le béton par rapport à la température initiale de 15°C. Ainsi, le MCP a donc une meilleure capacité d'absorption que le béton, pour deux temps de simulation une heure et deux heures. Pour la température avoisinant 28°C, la poursuite du stockage de chaleur fait passer la température à 35°C pour un une durée de deux heures. L'amélioration du transfert de chaleur global avoisine 8% par utilisation du MCP. Cette augmentation s'explique par le stockage par chaleur latente lors du changement de phase du MCP. Pour le béton l'échange de chaleur s'opère par la seule chaleur sensible. L'auteur conclut que les matériaux à changement de phase sont meilleurs pour le stockage thermique que le béton.

Yahia Abdelhamid Lakhdari [2] traite le Comportement thermique d'un mur de bâtiment avec une couche de revêtement intérieure composé d'un mélange de PCM double et du plâtre. Le mur du bâtiment est soumis à plusieurs conditions climatiques nord-africaines, sud de la Méditerranée et qui sont liées à 4 climats différents :

1) méditerranéen

2) tempéré

3) semi-aride

4) désertique

Un modèle mathématique basé sur la méthode enthalpique qui traite du changement de phase à deux niveaux pour un PCM double est développé, mais en œuvre et testé. Dans la plate-forme de la méthode des volumes finis, la réponse thermique de la paroi est analysée numériquement dans un cadre d'un problème bidimensionnel de transfert de chaleur instable.

L'ensemble des résultats obtenus ont montré que l'utilisation d'un matériau à changement de phase double avec du plâtre améliore le temps de stockage de 57% par rapport au boîtier PCM unique. Le climat affecte l'infiltration de chaleur dans la construction en été, en particulier en climat désertique où le besoin de La climatisation est plus important par rapport aux zones semi-arides et Climats méditerranéens.

Les résultats numériques ont également mis en évidence que l'utilisation de couches de revêtement de plâtre mélangées avec le double PCM à l'intérieur mur de l'enveloppe du bâtiment augmente le décalage temporel du flux de chaleur d'une part et diminue le facteur de décrémentation pour les différentes zones d'autre part. Ces combinaisons de facteurs réduisent la quantité de flux de chaleur dans le bâtiment pendant la journée de plus de 75 %. Parallèlement à cela, il y a une réduction remarquable de la température de la paroi interne de 2 °C et le pic d'infiltration de chaleur de plus de 50 %.

Youssef Hamidi [3] examine dans son travail un mur de bâtiment standard composé d'un double mur de briques creuses avec huit trous séparés par un vide d'air. La géométrie proposée des briques en terre cuite est illustrée aux dimensions sont H = 15 cm de haut et L = 6 cm d'épaisseur, contenant huit trous l × h = 2 cm × 2,5 cm qui peuvent être remplis avec MCP.

a) Brique sans PCM
b) Brique avec PCM dans les quatre emplacements :

-brique avec PCM à l'emplacement 1 (Le premier mur, le premier trou)

-brique avec PCM à l'emplacement 2 (Le premier mur, le deuxième trou)

-brique avec PCM à l'emplacement 3 (le deuxième mur, le premier trou)

-brique avec PCM à l'emplacement 4 (le deuxième mur, le deuxième trou)

Youssef Hamidi a utilisé le code COMSOL Multiphysics, où un modèle de transfert de chaleur dynamique 2D dans le mur est résolu par la méthode des éléments finis. Cinq scénarios sont étudiés dans le quels les trous de briques contiennent soit PCM ou air.

Il a observé que lorsque le matériau à changement de phase est complètement solidifié ou fondu, la densité du flux de chaleur à la surface de la paroi intérieure suit les conditions extérieures. En conséquence, le transfert de chaleur par conduction la direction dans le mur dépend des conditions aux limites intérieures et extérieures. Cependant, lors du changement de phase le matériau est partiellement liquide/solide, la densité du flux de chaleur à la surface de la paroi intérieure est constante et négative/positive. Les résultats ont prouvé que les matériaux à changement de phase aux emplacements 2, 3 et 4 étaient efficaces pour réduire la chaleur pic de flux. En ce qui concerne les économies d'énergie, le matériau à changement de phase dans les emplacements 3 et 4 peut économiser jusqu'à 97 % de l'énergie nécessaire pour maintenir le confort thermique intérieur à une valeur de température de consigne de 26 ◦C.

Par conséquent, l'incorporation de matériau à changement de phase à l'emplacement 4 au lieu d'un remplissage complet en briques est conseillé dans les nouveaux bâtiments pour augmenter = confort et réduire les besoins en énergie de refroidissement.

Khalid H. Almitani [4] a étudié, dans les conditions climatiques de l'Arabie Saoudite, le comportement thermique d'un bâtiment avec différents PCM. La Consommation d'énergie annuelle (TL), charge de refroidissement (CL) et la charge de chauffage (HL) ont été définis comme paramètres de sortie et fusion PCM la température ainsi que la température de consigne ont été définies comme paramètres d'entrée. Quatre MCP avec des caractéristiques thermophysiques presque identiques mais à différentes températures de fusion ont été choisies. Leur point de fusion était de la plage de 27–32 ◦C. La température intérieure était maintenue constante en utilisant AHU dans un point de consigne prédéterminé entre 21 et 31 ◦C.

Les principaux résultats étaient les suivants :

1- Les résultats ont montré que dans cette zone climatique, un PCM spécial ne pouvait être recommandé.
2- L'ajout de PCM a des effets différents sur CL, HL et CT, de sorte que si CL est réduit par l'ajout de PCM, on ne peut pas s'attendre à ce que le HL suive la même tendance.
3- Parce que la consommation d'électricité en été en Arabie Saoudite est très dépendante de la consommation d'énergie dans les climatiseurs, donc CL a été donné plus de poids. Pour une consigne de 21 ◦C, l'ajout de tout PCM est non recommandé.
4- Il a été constaté que les effets positifs de l'ajout de PCM dépendent de la différence entre le point de fusion et la température de consigne ($T_{fusion} - T_{consigne}$). Utilité du PCM à des valeurs inférieures de T_{fusion} - $T_{consigne}$ est supérieure à une valeur élevée de $T_{fusion} - T_{consigne}$.
5- Si la température de fusion du PCM est supérieure à la température de consigne de 2◦C, les performances de PCM seront maximisées. Dans ce cas, la charge de refroidissement connaît la plus grande réduction. À la fonte $-T_{consigne}$ = 2◦ C, chargement PCM A27, A28, A29 et A32 réduit CL de 19 515, 27 538, 25 034 et 33 905 kWh, respectivement.

Arun Prakash SELVARAJU [5] a étudié l'analyse des performances thermiques de l'intégration PCM dans le bâtiment à l'aide du code ANSYS Fluent CFD pour un bâtiment situé à Chennai. La charge thermique solaire sur les surfaces des murs et du toit et la variation de température intérieure pour bâtiment avec et sans intégration PCM ont été étudiés. Une étude expérimentale des performances du PCM sur la température intérieure de la pièce a été réalisée en

mois de septembre pour deux bâtiments de dimensions identiques (un sans PCM intégration et autres avec intégration PCM).

Les résultats obtenus à partir de la simulation ont été validées avec les résultats expérimentaux et se sont révélées varier de 0,1 % pour la construction sans PCM et 0,03% pour bâtiment avec PCM. Le paramètre non dimensionnel PEI introduit dans cette recherche s'est avéré utile dans évaluer la pertinence du PCM pour un lieu, un climat et une période de l'année particuliers. Une valeur plus élevée de PEI indique que le PCM sélectionné est plus adapté à l'emplacement simulé et les conditions climatiques.

F. Rebelo [6] a présenté une recherche expérimentale pour la microstructure, caractérisation des propriétés mécaniques et thermiques de mortiers cimentaires incorporant deux différents microencapsulés MCP, destinés pour les constructions à faible masse thermique situées dans des Climats.

L'analyse a révélé que les principales différences morphologiques entre les deux PCM sont la taille des particules et la distribution des microcapsules. Aucun éclatement ou autre dommage n'a été identifié dans les microcapsules des deux MCP, ni avant ni après le processus de mélange des mortiers contenant du MCP. Une microstructure cohésive et l'absence des macropores ont été observés pour les deux mortiers contenant du PCM.

Les résultats obtenus pour la caractérisation physique et mécanique ont révélé une réduction de la densité durcie ainsi que de la flexion et résistance à la compression pour les deux mortiers contenant du PCM, en comparaison avec le mortier de référence, du fait de l'incorporation des deux MCP, explicable par l'augmentation de la teneur en eau et l'augmentation conséquente de porosité, en plus de la moindre adhérence entre les microcapsules PCM et la matrice de mortier cimentaire.

L'analyse a aussi révélé l'existence d'un phénomène de surfusion de les deux PCM. Changements significatifs de comportement concernant le pic de fusion les températures, les températures de début et les valeurs d'enthalpie ont été observées pour le mortier contenant du MCP avec Micronal DS 5001 X, en comparaison avec le comportement thermique du même MCP à l'état pur. Ces résultats expérimentaux ont montré une bonne corrélation entre la valeur équivalente de conductivité thermique et températures moyennes des éprouvettes, pour les éprouvettes contenant du mortier avec et sans PCM incorporation, pour des températures hors de la zone de transition de changement de phase des MCP. Pendant la transition de changement de

phase PCM, le calcul la conductivité thermique subit des variations importantes, étant simultanément influencée par l'augmentation de la température et le changement de phase de la fraction du PCM.

Les résultats pour les deux solutions constructives avec l'incorporation de PCM a révélé une plus grande sensibilité des calculs thermiques conductivité en fonction de l'augmentation de la température, lorsque les MCP sont totalement à l'état solide, par rapport à l'état liquide.

1.3 CONCLUSION

Finalement, cet aperçue bibliographique montre l'effet de quelques paramètres important, en occurrence :

- ✓ la position d'intégration du PMC dans le mur,
- ✓ les types de PMC
- ✓ les propriétés des matériaux
- ✓ le climat de la zone étudiée

CHAPITRE 2
TRANSFERT DE CHALEUR

2.1. GENERALITES SUR LES TRANSFERTS DE CHALEUR

2.1.1 Introduction

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre. La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final **[7].**

2.1.2 Définitions

2.1.2.1 Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : T = f (x,y,z,t). La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas **[7]** :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.

- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

2.1.2.2 Gradient de température

Si on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température **[7]** :

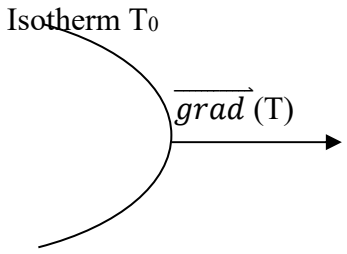


Figure 2.1: Isotherme et gradient thermique

$$\overrightarrow{grad}(T) = \vec{n}\frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.1)$$

Avec : $\underset{n}{\rightarrow}$ vecteur unitaire de la normale

$\frac{\partial T}{\partial n}$ Dérivée de la température le long de la normale.

2.1.2.3 Flux de La chaleur

Le flux de chaleur est la mesure du transfert d'énergie, qui est causée par une différence de température et conduit à l'équilibre de température entre les substances. Dans ce contexte, l'énergie est appelée chaleur. **[8]** :

$$\varphi=\frac{1}{s}\frac{dQ}{dt} \quad (2.2)$$

Où S est l'aire de la surface (m2). On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\varphi_b = \frac{dQ}{dt} \quad (2.3)$$

2.1.3 Formulation d'un problème de transfert de chaleur

2.1.3.1 Bilan d'énergie

Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace puis établir le bilan des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être [8] :

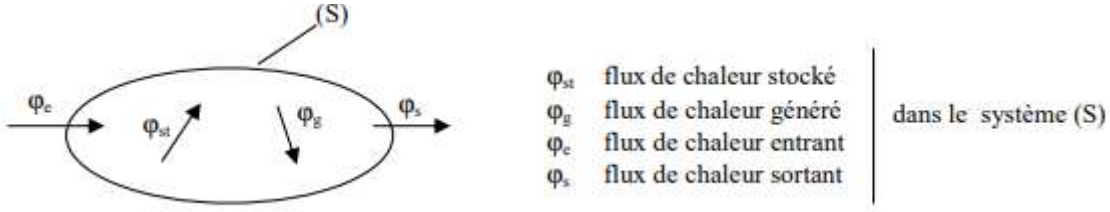


Figure 2.2 : Système et bilan énergétique

On applique alors le 1er principe de la thermodynamique pour établir ce bilan d'énergie du système (S) [8] :

$$\phi_e + \phi_g = \phi_s + \phi_{st} \quad \textbf{(2.4)}$$

2.1.3.2 Expression des flux d'énergie

Il faut ensuite établir les expressions des différents flux d'énergie afin d'obtenir l'équation différentielle dont la résolution permet de connaître l'évolution de la température en chaque point du système. Cependant, trois types de transfert de chaleur peuvent être observés :

2.1.3.2.1 La Conduction

C'est un transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température.

La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres [9].

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température [9] :

$$\phi = -\lambda S \, \text{grad}(t) \qquad (2.5)$$

Ou sous forme algébrique :

$$\phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \qquad (2.6)$$

Avec : ϕ Flux de chaleur transmis par conduction (W)

λ Conductivité thermique du milieu (W m^{-1} °C^{-1})

x Variable d'espace dans la direction du flux (m)

S Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

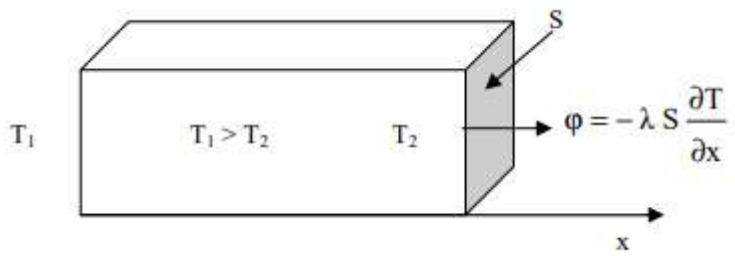


Figure 2.3 : Schéma du transfert de chaleur conductif

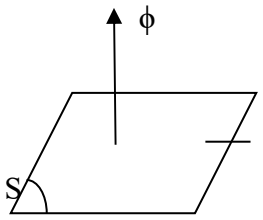
On donne dans le tableau 1.1 les valeurs de la conductivité thermique λ de certains matériaux :

Matériau	λ ($W.m^{-1}$. $°C^{-1}$)	Matériau	λ ($W.m^{-1}$. $°C^{-1}$)
Argent	419	Plâtre	0,48
Cuivre	386	Amiante	0,16
Aluminium	204	Bois (feuillu-résineux)	0,12-0,23
Acier doux	45	Liège	0,044-0,049
Acier inox	15	Laine de roche	0,038-0,041
Glace	1,88	Laine de verre	0,035-0,051
Béton	1,4	Polystyrène expansé	0,036-0,047
Brique terre cuite	1,1	Polyuréthane (mousse)	0,030-0,045
Verre	1,0	Polyuréthane (mousse)	0,030-0,045
Eau	0,60	Air	0,026

Tableau 2.1 : Conductivité thermique de certains matériaux.

2.1.3.2.2 La Convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton **[9]** :



$$\varphi = hS(T_p - T_\infty) \qquad (2.7)$$

Figure (2.4) : Schéma du transfert de chaleur convectif

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par convection (W)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W\ m^{-2}\ °C^{-1}$)

T_P : Température de surface du solide (°C)

T_∞: Température du fluide loin de la surface du solide (°C)

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2)

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection **h** est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

D'autre part, il existe deux types de transfert de chaleur par convection (naturelle ou forcée) :

2.1.3.2.2.1 La convection forcée

En l'absence de convection naturelle, le coefficient d'échange h par convection est indépendant de la différence de température de la paroi et du fluide ($\theta_m - \theta$) mais il dépend des six grandeurs suivantes :

- Um vitesse moyenne du fluide (W m^{-2} K)
- ρ masse volumique du fluide (Kg m^{-3}),
- Cp chaleur spécifique du fluide (J Kg^{-1} K^{-1}),
- μ viscosité dynamique du fluide (Pa s),
- λ conductivité thermique du fluide (W m^{-1} K^{-1}),
- D dimension caractéristique de la surface d'échange (m).

A partir de ces grandeurs, on définit les nombres sans dimension suivants :

Nombre de Nusselt : $N_u = \frac{hD}{\lambda}$ (2.8)

Nombre de Reynolds : $R_e = \frac{\rho U_m D}{\mu}$ (2.9)

Nombre de Prandtl : $Pr = \frac{\mu c_p}{\rho}$ (2.10)

Plusieurs travaux expérimentaux étudiant le transfert de chaleur par convection dans une situation donnée fournissent leurs résultats sous forme de corrélations mathématiques pour les deux modes de convection (naturelle ou forcée) **[10].**

En effet, le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement du fluide.

Si Re < 2000, l'écoulement est laminaire.

Si 2000 < Re < 3000, l'écoulement est intermédiaire.

Si Re > 3000, l'écoulement est turbulent.

Le nombre de Prandtl caractérise les propriétés thermiques du fluide.

Le nombre de Nusselt caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

2.1.3.2.2.2 La Convection naturelle

Le mouvement du fluide est dû aux variations de la masse volumique du fluide provenant des échanges de chaleur entre le fluide et la paroi. Le fluide est mis en mouvement sous l'effet des forces d'Archimède car sa masse volumique est fonction de sa température. La convection forcée est négligeable si : Gr/Pr2 > 100

$$N_u = C(G_r\ P_r)^n \qquad (2.11)$$

Avec

$$G_r = \frac{\beta\ g\ \Delta T\ \rho^2\ L^3}{\mu^2} \qquad (2.12)$$

Si la convection est laminaire Gr Pr < 10^9 et donc n = ¼

Si la convection est turbulente Gr Pr > 10^9 et donc n = 1/3

2.1.3.2.3 Rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant [11] :

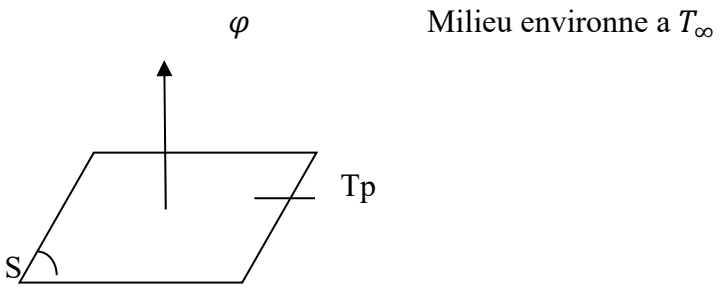


Figure 2.5 : Schéma du transfert de chaleur radiatif

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p S\left(T_p^4 - T_\infty^4\right) \qquad (2.13)$$

Avec :

ϕ Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

σ Constante de Stefan ($5{,}67.10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4})

ε_p Facteur d'émission de la surface

T_p Température de la surface (K)

T_∞ Température du milieu environnant la surface (K)

S Aire de la surface (m^2)

2.2 Conduction 1D en régime permanent- cas d'un Mur plan sans génération de chaleur

Considérons un mur plan d'épaisseur L, de surface A dont les faces sont à des températures connues T_{S1}et T_{S2}

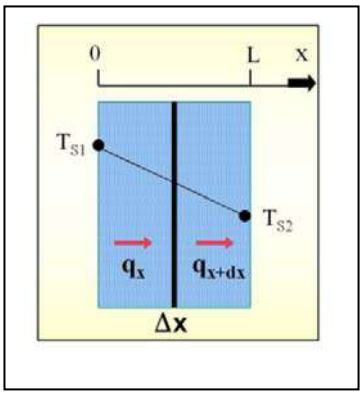


Figure 2.6 : changement de température dans le mur.

Hypothèses :

Pas de génération de chaleur :E_G=0

Régime permanent :$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$

K=constante

Conduction unidirectionnelle : T=T(x)

A.Δx

Bilan de chaleur

$$E_{IN} - E_{OUT} + E_G = E_{ACC} \quad \Rightarrow E_{IN} - E_{OUT} = 0$$

$$Aq_x''|_x - Aq_x''|_{x+\Delta x} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{q_x''|_x - q_x''|_{x+\Delta x}}{\Delta x} = 0$$

$$lim|_{\Delta x \to 0} \frac{q''_{x+\Delta x} - q''_x}{\Delta x} = \frac{\partial q_x''}{\partial x} = 0 \quad \Rightarrow \quad q_x'' = constante = C_1 - k\frac{dT}{dx} \quad \Rightarrow \quad dT = -\frac{C_1}{k}dx$$

$$\Rightarrow \quad T = -\frac{C_1}{k}x + C_2 \qquad (2.14)$$

Il s'agit donc d'un profil linéaire. Pour trouver les constantes d'intégration C1 et C2, on utilise les conditions frontières [11] :

CF1: $x = o \quad T_{x=0} = T_{s_1} \Rightarrow T_{x=0} = -\frac{c_1}{k}(0) + C_2 = T_{S_1} \Rightarrow C_2 = T_{s_1}$

CF: $x = L \quad T_{x=L} = T_{s_2} \Rightarrow T_{x=L} = -\frac{c_1}{k}(L) + c_2 = T_{S_2} \Rightarrow -\frac{c_1}{k}(L) + T_{S_1} = T_{S_2}$

$\Rightarrow C_1 = \left(\frac{-k}{L}\right) \cdot \left(T_{s_2} - Ts_1\right)$

Les constantes C1 et C2 étant déterminées, on les remplace dans (1) pour obtenir l'expression du profil de température :

$$\Rightarrow T(x) = \frac{-\left(\frac{-k}{L}\right)\cdot(T_{S_2} - T_{S_1})}{k} x + T_{S_1} \qquad \Rightarrow T(x) = \frac{(T_{S_2} - T_{S_1})}{L} x + Ts_1 \quad (2.15)$$

2.3 Utilisation du Matériau à changement de phase dans le stockage d'énergie :

Les matériaux à changement de phase (MCP) ont été utilisés pour le stockage thermique dans les bâtiments avant 1980. Des MCP sont mis en œuvre dans les plaques de plâtre, le béton ou autre matériau de revêtement mural.

Ainsi le stockage thermique peut faire partie de la structure du bâtiment même pour les bâtiments légers. Des tests, selon la littérature, ont été effectués sur des prototypes de panneaux muraux MCP et des systèmes de béton MCP où la capacité de stockage d'énergie thermique a été améliorée. Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux de stockage de la chaleur latente. Il est possible de trouver des matériaux avec une chaleur de fusion latente et une température de fusion dans la plage souhaitée.

Le MCP à utiliser dans la conception des systèmes de stockage thermique doit avoir les propriétés thermo physiques, cinétiques et chimiques recherchées [12].

2.4 Propriétés de changement de phase

2.4.1 Propriétés thermo-physiques

Température de transition de phase adaptée à l'application spécifique.

- Chaleur de transition de phase latente élevée afin d'occuper le volume minimal possible.
- Température de fusion dans la plage de température de fonctionnement souhaitée.
- Chaleur spécifique élevée pour permettre un stockage supplémentaire important de la chaleur sensible.

- Haute conductivité thermique afin de minimiser le gradient de température et d'aider au chargement et au déchargement de l'énergie des systèmes de stockage.
- Des changements mineurs de volume lors de la transformation de phase et une faible pression de vapeur aux températures de fonctionnement réduisent le problème de confinement [12].

2.4.2 Propriétés cinétiques

- Vitesse de nucléation élevée pour éviter la surfusion de la phase liquide.
- Taux élevé de croissance des cristaux, de sorte que le système puisse répondre aux demandes de récupération de chaleur du système de stockage [12].

2.4.3 Propriétés chimiques

- Matériaux non toxiques, ininflammables et non explosifs pour des raisons de sécurité.
- Stabilité chimique à long terme et cycle de fusion / congélation réversible complet.
- Aucune dégradation après un grand nombre de cycles de congélation / fusion.
- Faible corrosivité.

Enfin, le matériel doit être abondant, disponible et bon marché pour faciliter la faisabilité de l'utilisation du système de stockage.

Il existe un grand nombre de PCM, ils peuvent être divisés en trois groupes [12] :

- PCM organiques
- PCM inorganiques
- PCM eutectiques

2.5 Utilisation de PMC pur l'amélioration de transfert de chaleur

Les matériaux à changement de phase (PCM) peuvent stocker de la chaleur dans leur masse sous forme de chaleur latente. Les PCM sont largement utilisés dans les applications solaires ainsi que dans les matériaux de construction, comme le plâtre, pour absorber l'excès de chaleur dans les bâtiments. Les PCM microencapsulés sont développés commercialement et sont disponibles à une taille de particule comprise entre 17 et 20 µm. Les microparticules comprennent un ingrédient à changement de phase, généralement des

paraffines, dans leur noyau et un polymère ou un plastique dans la coque extérieure. La température de fusion peut varier en fonction des besoins spécifiques [13].

2.6 Différents types de changement de phase

Les MCP peuvent subir trois types de changement de phase [14] :

- Solide-solide (peu utilisé pour le stockage d'énergie), ce changement de phase se traduit par une transformation structurelle liée à une variation du volume molaire donc à une variation des distances inter atomiques du matériau.
- Liquide-gaz (chaleur à conversion élevée, mais un changement de volume s'ensuit, il est donc rarement utilisé).
- Liquide-solide (Petite taille, petite plage de température, grande capacité de stockage, donc le plus couramment utilisé).
- Solide-gaz (généralement développé dans le cas des systèmes d'air conditionné et de réfrigération).

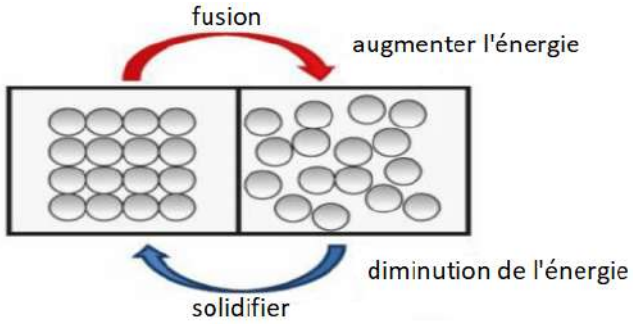


Figure 2.7 : Processus de solidification et fusion (Fleischer, A.S., Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials)

2.7 Types de MCP

En 1983, Abhat [15] a donné une classification générale des matériaux, utilisée par la communauté scientifique du stockage latent. Cette classification est illustrée par la figure 2.8

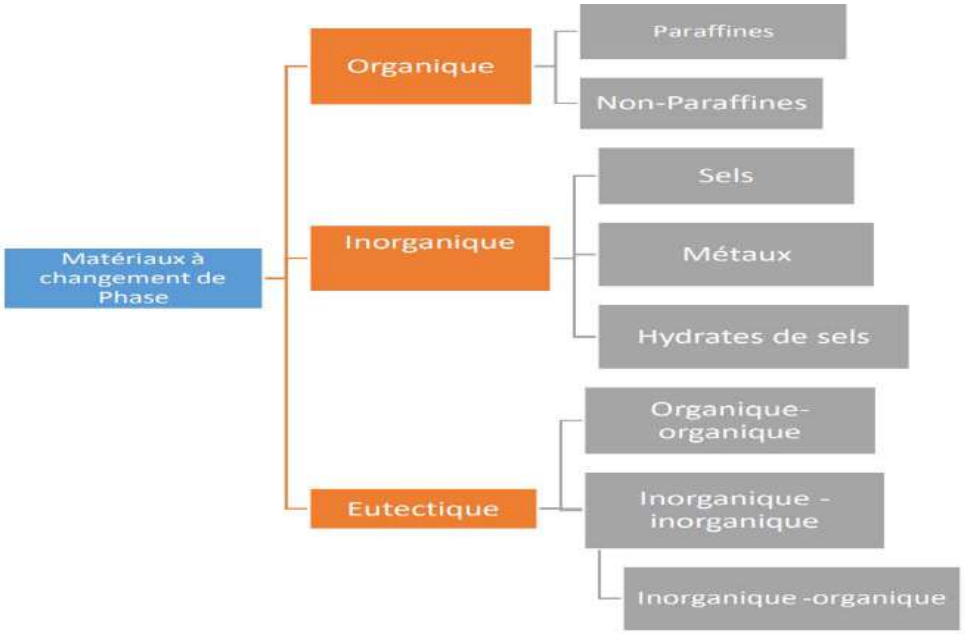


Figure 2.8: classification des MCP proposée par Abhat

On peut classer les MCP selon trois catégories :

- Les composés organiques : paraffines, corps non–paraffiniques.
- Les composés inorganiques : hydrates de sels, sels et métaux.
- Les eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques

A. Les composés organiques

On trouve dans les composés organiques principalement les paraffines, les alcools de sucre, les acides gras et d'autres composés moins utilisés comme les cétones ou les esters.

• Paraffines

Les paraffines sont une famille d'hydrocarbures saturés de formule brute C_nH_{2n+2}, aux propriétés très similaires. Parmi les MCP solide-liquide, elles sont les plus utilisées, surtout pour les applications à basse température (de -10 à 100 °C) car elles offrent l'avantage d'avoir une chaleur latente qui dépend de la masse molaire et des températures de changement de hase variables, donnant de la flexibilité pour choisir le MCP approprié à chaque application.

Dans cette catégorie, on peut citer notamment les paraffines n-Hexadécane (T_{fusion} = 22 °C), n-Nonacosane (T_{fusion} = 63,4 °C) ou encore le n-Triacontane (T_{fusion}= 65,4 °C).

- **Acides gras**

Les acides gras sont caractérisés par la formule chimique $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$ et ont à peu près les mêmes propriétés thermophysiques que les paraffines. L'intérêt d'utiliser les acides gras comme MCP est de couvrir une gamme de température allant de 40 à 150 °C selon la longueur de la chaîne carbonée. Les acides gras les plus connus pour leur utilisation comme MCP sont l'acide stéarique (T_{fusion} = 57.5 °C), l'acide sébacique (T_{fusion} = 132 °C), l'acide palmitique (T_{fusion} =61-63 °C) et l'acide myristique (T_{fusion} = 51.5-53.6 °C).

- **Alcools de sucre**

Les alcools de sucre sont des composés organiques appartenant à la famille des polyols.

Les plus connus sont le sorbitol, le mannitol, le xylitol, le lactitol, le malitiol et l'érythritol.

Ces produits sont extraits des plantes et peuvent être qualifiés de biosourcés. Par exemple, le mannitol provient des algues alors que le sorbitol est extrait du sirop de maïs.

B. Les composés inorganiques

Les matériaux inorganiques sont classés en trois catégories : les sels, les hydrates de sels et les métaux.

Hydrates de sels

Les hydrates de sel sont des sels inorganiques qui contiennent de l'eau et dont la formule générale est $AB.nH_2O$. Pendant la charge, la déshydratation du sel a lieu. Le produit de cette déshydratation peut être un hydrate de sel avec moins molécules d'eau selon la formule : $AB.nH_2O \rightarrow AB.mH_2O + (n-m)H_2O$

Ou bien le même sel sous sa forme anhydre :

$AB.nH_2O \rightarrow AB + nH_2O$

Le sel hydraté le plus utilisé par son faible coût est le $CaCl_2.6H_2O$ (T_{fusion} = 28-30 °C). On peut citer aussi le $Mn(NO_3)2.6H_2O$ pour les applications de climatisation, et un nouveau

matériau obtenu à partir de $Al_2(SO_4)3.18H_20$ utilisé avec des additifs pour des applications industrielles autour de 100°C. On peut aussi citer la bischofite comme exemple d'un mélange d'hydrates de sels composée à 95 % massique de $MgCl_2.6H_2O$ et à 5 % massique de $KMgCl_3.6H_2O$, $Li_2SO_4.H_2O$ et autres sels ioniques tels que NaCl et KCl et ayant une température de fusion autour de 98.9 °C.

- Sels

Les sels sont des composés ioniques neutres formés à partir de cations et d'anions. Les sels purs et les mélanges de sels non eutectiques présentent généralement un large spectre de températures de fusion et une chaleur latente variante selon leur type. Les fluorures et les chlorures présentent ainsi une chaleur latente plus élevée que les nitrates ou les sulfates. Les sels les plus connus sont les nitrates comme le $NaNO_3$ (T_{fusion} = 307 °C), le KNO_3 (T_{fusion} = 333 °C) ou encore le $LiNO_3$ (T_{fusion} = 250°C).

- Métaux

On peut citer notamment le Potassium (T_{fusion} = 63.2 °C), le Bi58Sn42 (T_{fusion} = 138 °C) ou encore le Lithium (T_{fusion} = 186 °C).

C. Les eutectiques

Les MCP eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs substances qui se comportent comme un corps pur, c'est-à-dire que leur température de changement d'état est unique. En général, les eutectiques sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques. On peut citer notamment les eutectiques de nitrates tel que $LiNO_3$-NH_4NO_3-$NaNO_3$ avec une composition massique de 25%-65%-10% (T_{fusion} = 80.5 °C) ou encore les eutectiques d'organiques tel que CH_3CONH_2-$C17H35COOH$ avec une composition massique de 50%-50% (T_{fusion} = 65 °C), les eutectiques d'hydrates de sels comme le mélange iso massique $Mg(NO_3)_3.6H_2O$-$MgCl_2.6H_2O$ (T_{fusion} = 59.1 °C) [24] et enfin les eutectiques de polyols comme le mélange à 25 % molaire d'érythritol et 75% de xylitol, (T_{fusion} = 85 °C)

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion ($kJ.kg^{-1}$)
MCP Organiques	Tétradécane	5.5	226
	Hexadétécane	16.7	237
	Stérate de butyle	19	140
MCP Inorganiques	$KF.4H_2O$	18.5	231
	$Mn(No_3)_2.6H_2O$	25.8	125.9
	$Na_2 SO_4 .10H_2O$	32	251
MCP Eutectiques	66,6%$CaCl_2.6H_2O$+33,3% $Mgcl_2.6H_2O$	25	127
	48%$CaCl_2$+4,3%NaCl+ 47,3%H_2O	26.8	188
	47%$Ca(N0_3)24H_2O$+53% $Mg(N0_3)2\ 6H_2O$	30	136

Tableau 2.2 : Propriétés thermiques de certains MCP

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons vu à travers cette étude bibliographique, les différents modes de transfert de chaleur et les matériaux de changement de phase ainsi que leurs principales caractéristiques appliquées dans le stockage d'énergie.

Chapitre 3

Modélisation Mathématique

3.1 Modèle physique

Dans la présente étude, on propose la configuration physique de la figure 3.1. Cinq couches constituent le modèle physique proposé. Les couches les plus externes sont des isolants thermiques, deux couches de matériaux de stockage (brique ou MCP) et une couche centrale représentant l'écoulement de l'air dans cet espace confiné.

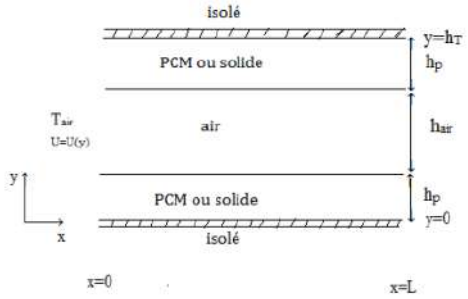


Figure 3.1 : Modèle physique proposé pour cette étude

3.2 Hypothèses de travail

Pour la modélisation de l'écoulement de l'air entre deux parois appliquée dans cette configuration, on adopte les hypothèses suivantes :

- Ecoulement établi en régime laminaire (figure 3.1)

- Fluide incompressible et newtonien (air) - Dissipation visqueuse négligée

- Convection forcée pure

- Transfert de chaleur bidimensionnel et instationnaire - Diffusion axiale dans l'équation d'énergie négligée ($\partial^2 T / \partial x^2 = 0$)

- Le MCP est considéré pur (changement de phase à Température constante)

3.3 Equations gouvernantes

3.3.1 Equation de quantité de mouvement dans le domaine air

L'équation de quantité de mouvement est présentée par la relation suivante :

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial U}{\partial y}\right) = 0 \qquad (3.1)$$

On pose $\frac{\partial P}{\partial x} = -a$ et $e = h_{air}$

Une Solution de cette equation peut etre exprimée par :

$$U(y') = \frac{-a}{2\mu} y'^2 + \frac{ae}{2\mu} y' \tag{3.2}$$

On définit que : $$Re = \frac{\rho U_m e}{\mu} \tag{3.3}$$

Avec U_m : vitesse moyenne débitante

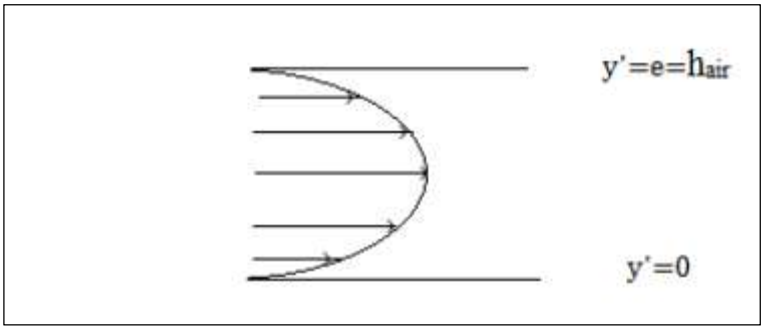


Figure 3.2 : Profil de vitesse lors d'un écoulement établi

Détermination de l'expression de « a » en fonction de la vitesse moyenne débitante :

On se donne Re → calcule $Um = \frac{Re\,\mu}{\rho e}$ puis on détermine a : $a = \frac{12\mu u_m}{e^2}$

Le débit volumique par unité de longueur q_v est donné par :

$$q_v = \int_0^e U\, dy' = \int \left(-\frac{a}{2\mu} y'^2 - \frac{ae}{2\mu} y'\right) dy'$$

$$q_v = -\frac{a}{2\mu} \cdot \frac{y'^3}{3}\Big|_0^e + \frac{ae}{2\mu} \cdot \frac{y'^2}{2}\Big|_0^e = \frac{-ae^3}{6\mu} + \frac{ae^3}{4\mu}$$

$$q_v = \frac{ae^3}{12\mu} a = \frac{12\mu U_m}{e^2}$$

Or : $$q_v = U_m \cdot S = U_m \cdot e \cdot 1$$

En égalisant : $\frac{ae^3}{12\mu} = U_n \cdot e \cdot 1 \rightarrow$ on obtient

$$q_v = \frac{ae^3}{12\mu} a = \frac{12\mu U_m}{e^2}$$

3.3.2 Equation de conservation d'énergie

Selon les hypothèses adoptées, la conduction suivant la direction x peut être négligée $\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0\right)$, donc l'équation s'écrit comme suit :

• Dans le domaine air ou solide :

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho c_p T\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho c_p U T\right) = \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) \tag{3.4}$$

Avec U=0 dans le solide et U=U(y) dans l'air

• Dans le domaine MCP :

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\ c_p T\right) = \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) - L_H\ \rho_{Mcp}\ \frac{\partial f}{\partial t} \tag{3.5}$$

Avec $0 \leq f \leq 1$

$$f(t)=\begin{cases} 1 & \text{si} \quad T>T_m \quad (\text{liquide}) \\ f(t) & \text{si} \quad T = T_m \quad (\text{liquide} + \text{solide}) \\ 0 & \text{si} \quad T<T_m \quad (\text{solide}) \end{cases} \tag{3.6}$$

Avec T_m : Température de fusion du MCP

Et L : chaleur latente de fusion du MCP

On peut écrire les équations d'énergie précédentes sous une forme généralisée comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\ c_P T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\ c_P U T) = \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) - \gamma L_H \rho_{MCP} \frac{\partial f}{\partial t} \tag{3.7}$$

$$T = \begin{cases} T_a & d\text{ans l}'\text{air} \\ T_S & d\text{ans le solide} \\ T_{pmc} & d\text{ans le PCM} \end{cases} \tag{3.8}$$

$$\rho\ c_P = \begin{cases} \left(\rho\ c_p\right)_{air} & \text{dans l}'\text{air} \\ \left(\rho c_p\right)_s & d\text{ans le solide} \\ \left(\rho c_p\right)_{PCM} & d\text{ans le PCM} \end{cases} \tag{3.9}$$

Avec :

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{dans l}'\text{air ou dans le solide} \\ 1 & \text{dans le PC}M \end{cases} \tag{3.10}$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_{air} & \text{dans l'air} \\ \lambda_S & \text{dans le solide} \\ \lambda_{PCM} & \text{dans le PCM} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$U = \begin{cases} 0 & \text{dans le PCM ou dans le solide} \\ U(y) & \text{dans l'air} \end{cases} \quad (3.12)$$

3.4 Conditions initiales et aux limites

à $t = 0 \quad \forall x, y \qquad T(0, x, y) = T_0$ (3.13)

à $t > 0$

- A l'entrée $T(0, y, t) = T_{air}$ (3.14)
- Paroi du bas $\left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=0} = 0$ (3.15)
- Paroi du haut $\left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=h_T} = 0$ (3.16)
- Aux interfaces : conditions de continuité

Solide – air :

$$y = h_P \qquad \begin{cases} T_a = T_s \\ \lambda_s \left.\frac{\partial T_s}{\partial y}\right|_{y=h_p} = \lambda_a \left.\frac{\partial T_a}{\partial y}\right|_{y=h_p} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$y = (h_p + h_{air}) \qquad \begin{cases} T_a = T_s \\ \lambda_s \left.\frac{\partial T_s}{\partial y}\right|_{y=h_p+h_{air}} = \lambda_a \left.\frac{\partial T_a}{\partial y}\right|_{y=h_p+h_{air}} \end{cases} \quad (3.18)$$

MCP- air :

$$y = h_P \qquad \begin{cases} T_a = T_{MCP} \\ \lambda_{MCP} \left.\frac{\partial T_{MCP}}{\partial y}\right|_{y=h_p} = \lambda_a \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{y=h_p} \end{cases} \quad (3.19)$$

$$y = (h_p + h_{air}) \qquad \begin{cases} T_a = T_{MCP} \\ \lambda_{MCP} \left.\frac{\partial T_{MCP}}{\partial y}\right|_{y=h_p+h_{air}} = \lambda_a \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{y=h_p+h_{air}} \end{cases} \quad (3.20)$$

3.5 Méthode des volumes finis

Pour résoudre numériquement le problème proposé, on applique la méthode des volumes finis.

3.5.1 Maillage

Le maillage dans la figure ci-dessous est un maillage non uniforme (les faces des volumes de contrôles sont placées avant les nœuds qui sont positionnés à mi-distance entre les faces). La figure 3.4 illustre le type de maillage utilisé avec repérage de certains nœuds.

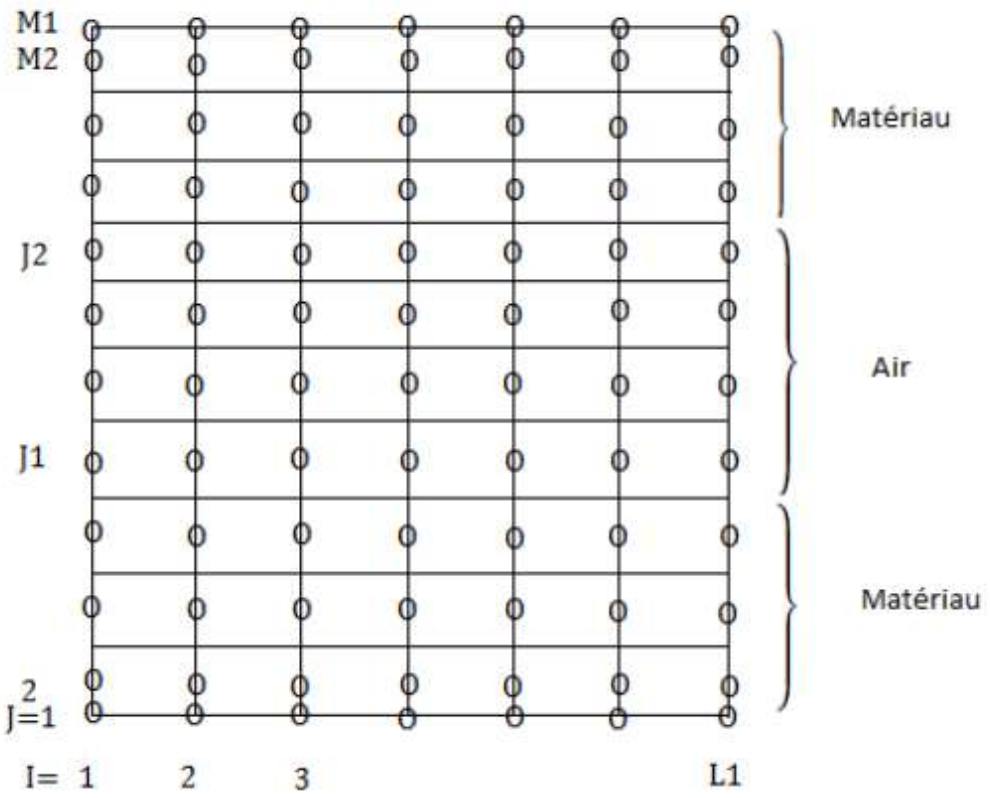


Figure 3.4 : Maillage proposé pour notre cas d'étude

3.5.2 Discrétisation

Nous considérons le volume de contrôle de la figure 3.5, afin de discrétiser l'équation d'énergie.

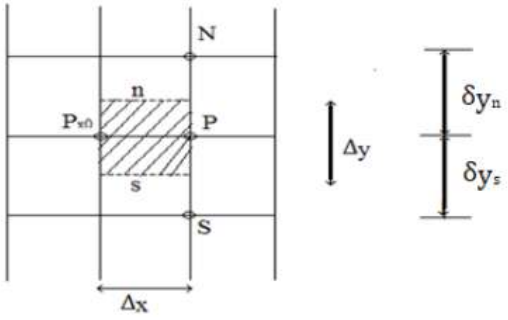


Figure 3.5 : Figure représentant le volume de contrôle

$$\int_s^n \int_{Px0}^p \int_0^1 \frac{\partial}{\partial t}\left(\rho c_p T\right) dt\, dx\, dy + \int_0^1 \int_s^n \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho c_p U T\right) dt\, dx\, dy =$$

$$\int_0^1 \int_{p\times 0}^p \int_S^n \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) dy\, dx\, dT - \gamma L_H \rho_{PCM} \int_S^n \int_{px0}^p \int_0^1 \frac{\partial f}{\partial t} dt\, dx\, dy \qquad (3.21)$$

Pour un schéma totalement implicite

$$\rho c_p \Delta x \Delta y (T_P - T_P°) + \rho c_P U_P \Delta y (T_P - T_{Px0}) = \left[\frac{\lambda_n}{\delta y_n}\left(T_N - T_p\right) - \frac{\lambda_s}{\delta y_s}\left(T_p - T_s\right)\right] \Delta x \Delta t$$

$$-\gamma L_H \rho_{MCP} \Delta x \Delta y (f - f°) \qquad (3.22)$$

En devisant par Δt , on obtient alors :

$$\rho c_P \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t}(T_P - T_P°) + \rho c_P U_P \Delta y (T_P - T_{Px0}) =$$

$$\frac{\lambda_n \Delta x}{\delta y_n}(T_N - T_P) - \frac{\lambda_s}{\delta y_s}(T_P - T_s) - \gamma L_H \rho_{MCP} \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t}(f - f°) \qquad (3.23)$$

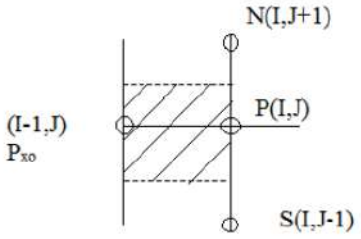
Apres arrangement, on aboutit à :

$$a_P T_P = a_N T_N + a_s T_s + a_{Px0} - a_F (f - f) + a_{P0} T_P \qquad (3.24)$$

Avec :

$$\begin{cases} a_{P0} = \rho c_p \dfrac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} \qquad a_{Px0} = \rho c_p U_P \Delta y & (3.25) \\ a_N = \dfrac{\lambda_n \Delta x}{\delta y_n} \qquad a_S = \lambda_S \dfrac{\Delta x}{\delta y_s} & (3.26) \\ a_1 == \gamma L_H \rho_{MCP} \dfrac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} & (3.27) \\ a_P = a_N + a_S + a_{P0} + a_{Px0} & (3.28) \end{cases}$$

En notation indicielle :



AP(I,J) * T(I,J) =AN(I,J) * T(I,J + 1) + AS(I,J) * T(I,J-1) + APX0(I,J) *T(I-1,J) + AP0(I,J) * TP0(I,J) - AF(J) * (F(I,J) - F0(I,J)) (3.29)

On pose :

BS(J)=APX0(J) * T(I-1,J) + AP0(J) * TP0(I,J) – AF(J) * (F(I,J) – F0(I,J)) (3.30)

Sachant que Δ_x est pris uniforme, on peut écrire :

$$\begin{cases} \mathrm{AN(I,J)} = \mathrm{AN(J)} & \mathrm{AS(I,J)} = \mathrm{A(J)} \\ \mathrm{APX0(I,J)} = \mathrm{APX0(J)} & \mathrm{AP0(I,J)} = \mathrm{AP0(J)} \\ \mathrm{AP(I,J)} = \mathrm{AP(J)} & \end{cases} \quad (3.31)$$

Ainsi l'équation discrétisée s'écrira :

$$AP(J) * T(I,J) = AN(J) * T(I,J+1) + AS(J) * T(I,J-1) + BS(J) \quad (3.32)$$

Quand le changement de phase a lieu

$T_p = T_p° = T_m$ (MCP pur : changement de phase à Température constante)

$$a_p T_m = a_N T_N + a_S T_S + a_{Px0} T_{Px0} - a_F (f - f°) + a_{P0} T_m \quad (3.33)$$

Ou encore :

$$a_F (f - f°) = a_N T_N + a_S T_S + a_{Px0} TPx0 + a_{P0} T_m - aPT_m$$

$$a_F * f = a_N T_N + a_S T_S + a_{Px0} T_{Px0} + a_{P0} T_m - aPTm - aF * f°$$

$$f = \frac{a_N T_N + a_s T_s + a_{Px0} T_{Px0} + a_{P0} T_m - a_P T_m - a_F * f^\circ}{a_F} \quad (3.34)$$

Le système d'équations algébriques obtenu est résolu itérativement par l'algorithme de Thomas.

Les calculs itératifs pour un pas de temps fixé sont arrêtés lorsque le critère de convergence ci-après est satisfait.

$$\left|\frac{\phi^{k+1} - \phi^k}{\phi^k}\right| < 10^{-3} \quad (3.35)$$

Avec ϕ variable dépendante pouvant correspondre soit à la température T ou à la fonction f donnée par l'équation (3.14), k étant une itération donnée.

3.6 Calcul du nombre de Nusselt moyen

Pour des besoins de comparaison, on doit calculer les nombres Nusselt local et moyen.

Calcul du nombre de Nusselt local pour un temps t donné :

$Nu_x = Nu_x (x,t)$

$q_{conv} = q_{cond}$ (interface matériau-air)

$$h(T_{int} - T_b) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=int} \quad (3.36)$$

T_{int} : Température à l'interface matériaux-air

T_b : Température moyenne de l'air sur une section droite

De l'équation précédente, on peut écrire :

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{-\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=int}}{(T_{int} - T_b)} \quad (3.36b)$$

On multiplie par h_{air} :

$$\frac{h}{\lambda} * h_{air} = \frac{-\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=int}}{(T_{int} - T_b)} * h_{air} = Nu_x \quad (3.37)$$

$$Nu_x = \frac{-\left(\frac{T_f - T_{int}}{\delta y}\right)}{(T_{int} - T_b)} * h_{air} \quad (3.37b)$$

$$Nu_x = \frac{-\left(\frac{T_{int} - T_f}{\delta y}\right)}{(T_{int} - T_b)} * h_{air} \quad \text{Tb} \quad (3.37c)$$

Pour la partie inferieure y < h_{air}

$$Nu_x = \frac{-(\text{T(I,J1+1)} - \text{T(I,J1)}) * h_{air}}{\text{yDIF(J1)}(\text{T(I,J1}-1) - T_b)} \quad (3.38)$$

Pour la partie supérieure y > (h_p + h_{air})

$$Nu_x = \frac{-(\text{T(I,J2+1)} - \text{T(I,J2)}) * h_{air}}{\text{yDIF(J2+1)}(\text{T(I,J2+1)} - T_b)} \quad (3.39)$$

Calcul de nombre de Nusselt moyen sur tout le domaine : (pour un temps t)

$$Num = Num_{PB} + Num_{PH}$$

$Num_{PB} = \frac{1}{L}\int_0^L Nu_x dx = \frac{1}{L}\sum Nu_x \Delta x$ Partie inferieure

$Num_{PH} = \frac{1}{L}\int_0^L Nu_x dx = \frac{1}{L}\sum Nu_x \Delta x$ Partie inferieure

3.7 Température moyenne du matériau

La température moyenne dans le matériau (béton ou solide) pour un temps t de simulation est calculée par :

$$T_{moy} = (T_{moy1} + T_{moy2})/2 \quad (3.40)$$

T_{moy1} : Température moyenne dans le matériau du bas (MCP ou béton).

T_{moy2} : Température moyenne dans le matériau du haut (MCP ou béton).

T_{moy1} et T_{moy2} sont obtenues par une moyenne arithmétique à travers toute la surface des matériaux de stockage.

3.8 Programme de calcul et validation

Sur la base de cette discrétisation, on a essayé de développer un programme de calcul en Fortran ou sous environnement Matlab. On a prévu la validation du code de calcul par rapport à un cas limite.

Ce cas limite considéré est une convection forcée entre deux plaques parallèles en régime dynamique établi avec les mêmes conditions aux limites que celles de la présente étude. Le cas du chauffage a été considéré.

Afin d'adapter le modèle physique choisi, au cas du transfert de chaleur entre deux plaques parallèles, nous avons considéré le matériau comme un conducteur parfait, c'est-à-dire sa conductivité thermique comme étant infinie (figure (3.5)).

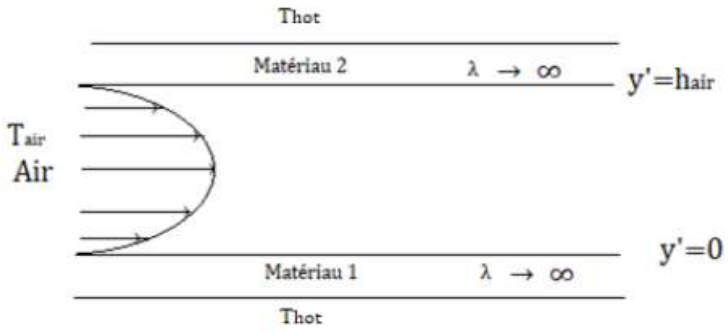


Figure 3.5 : convection forcée entre deux plaques parallèles avec les deux matériaux comme conducteurs thermiques parfaits.

CONCLUSION

Afin de surmonter les difficultés de programmation rencontrés, on a fait recours au code Ansys CFX comme outil de calcul du problème physique traité.

Chapitre 4

Présentation du Code CFD Ansys CFX

4.1 Définition de CFD

Le CFD (Computational Fluide Dynamics), également appelé « soufflerie numérique », est un outil informatique de modélisation des mouvements de fluides (liquides, gaz), des propriétés de ces écoulements (température, vitesse …) et des interactions avec leur environnement (échange thermique, réactions chimiques, forces aérodynamiques, aéroacoustique).

Afin de simuler des conditions de fonctionnement réel, l'approche CFD est un complément aux techniques expérimentales et autres modélisations pour obtenir une description précise des problèmes d'écoulements de fluides. Le CFD permet de construire un prototype virtuel d'un produit ou d'un processus.

Aujourd'hui, les coûts, les temps de calcul se sont considérablement réduits et la CFD est devenue un outil performant au service de toutes les industries qui manipulent des fluides ou rencontrent des mouvements de fluide dans leurs projets ou process. [16]

Cependant, pour manipuler l'outil CFD, il est impératif de maîtriser la dynamique des fluides. Cette science s'intéresse aux mouvements des gaz et des liquides, regroupant l'aérodynamique, l'hydraulique ou encore l'aéraulique. Maîtriser la dynamique des fluides signifie maîtriser les équations mathématiques associées (Navier-Stokes...), les modélisations (turbulence...) et les méthodes numériques (discrétisation, schémas numériques...). [16]

4.2 Présentation d'ANSYS

ANSYS, Inc. est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles, préalablement discrétisés. La société possède de nombreuses filiales à travers le monde, notamment en Europe et en Asie.

4.3 Principaux produits d'Ansys

4.3.1 ANSYS Structural

Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structure. Ses principales capacités sont :

- L'analyse statique
- L'analyse modale
- L'analyse harmonique (réponse forcée)
- L'analyse temporelle

4.3.2 ANSYS Mechanical

Ce module dispose des mêmes capacités qu'ANSYS structural, en y ajoutant notamment un solveur thermique, avec modélisation du rayonnement.

4.3.3 ANSYS CFX et Fluent

Ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides.

Fluent ou CFX sont des solveurs très utilisés dans l'industrie et la R&D à travers le monde. Ils sont souvent considérés comme une référence dans le domaine de la modélisation fluide. Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul.

L'un des intérêts de ces logiciels de simulation, est qu'ils disposent d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides: écoulement diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (LES, KE, KW, SA, Reynolds stress …), combustion (pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence.

Fluent est parallélisé et permet de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule machine qu'en réseau (cluster, plateforme multi-CPU).

4.4 LES ETAPES DE TRAVAIL

Afin de mener à bien une simulation type CFD en utilisant Ansys CFX, il faut suivre un certain protocole logique représenté par les étapes suivantes : (on donne dans ce chapitre un exemple comme guide)

4.4.1. Création de la GEOMETRIE

- **Dessin**

Creer un plan xy et ouvrir une esquisse puis choisir rectangle puis desiner un rectangle.

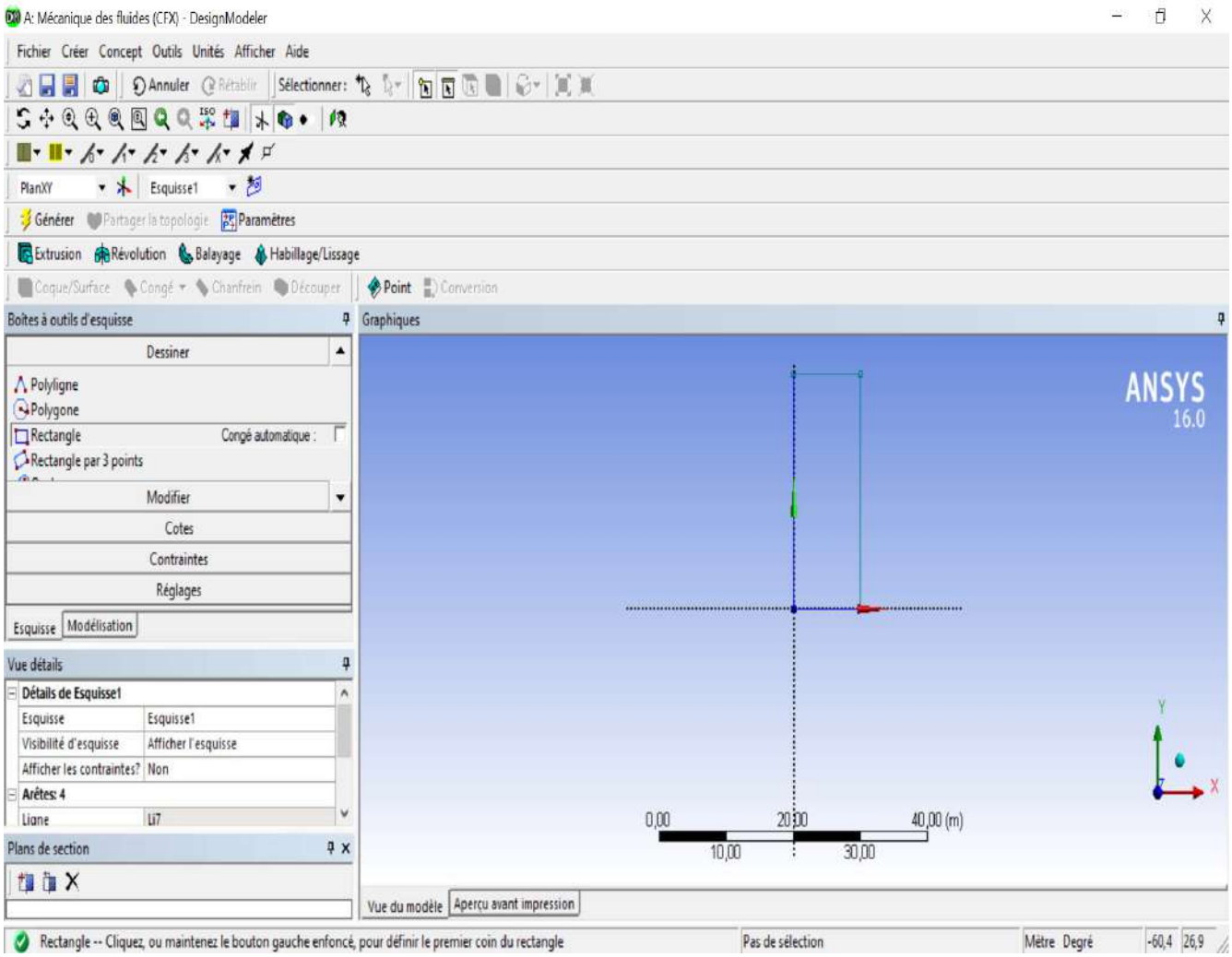


Figure 4.1 : Dessiner Une esquise

- **Cotes**

Ouvrir la cote et sélectionner les ligne de rectangle et déclare ses dimensions.

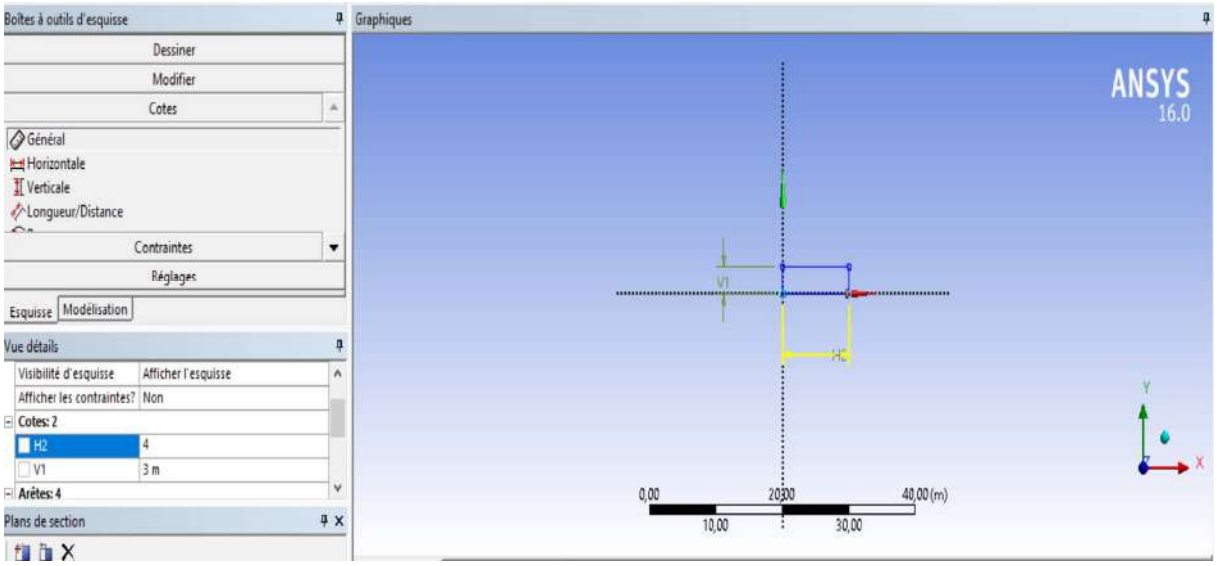


Figure 4.2 : Definir Les Cotes.

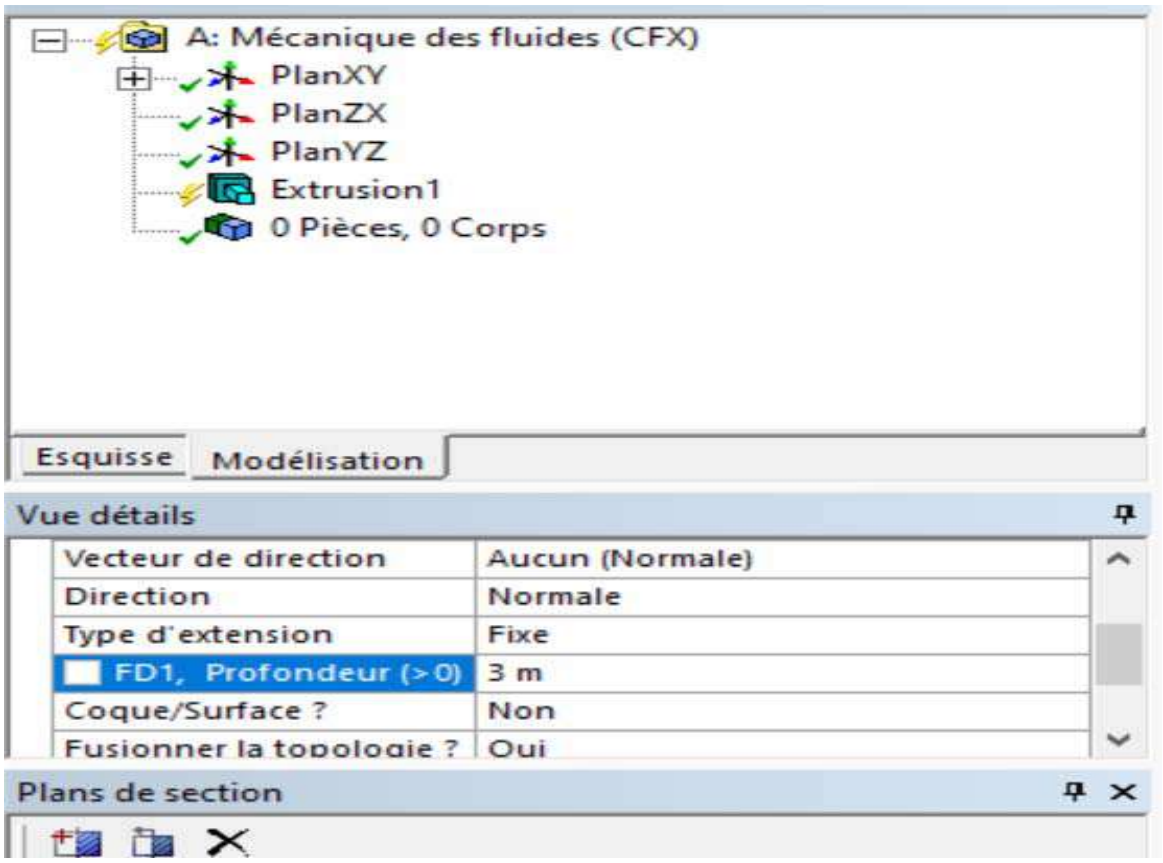


Figure 4.3 : Extrusion La Géométrie.

- Extrusions.

Ouvrir le bouton d'extrusion et déclarer la valeur de l'épaisseur afin de générer la géomètre 3D

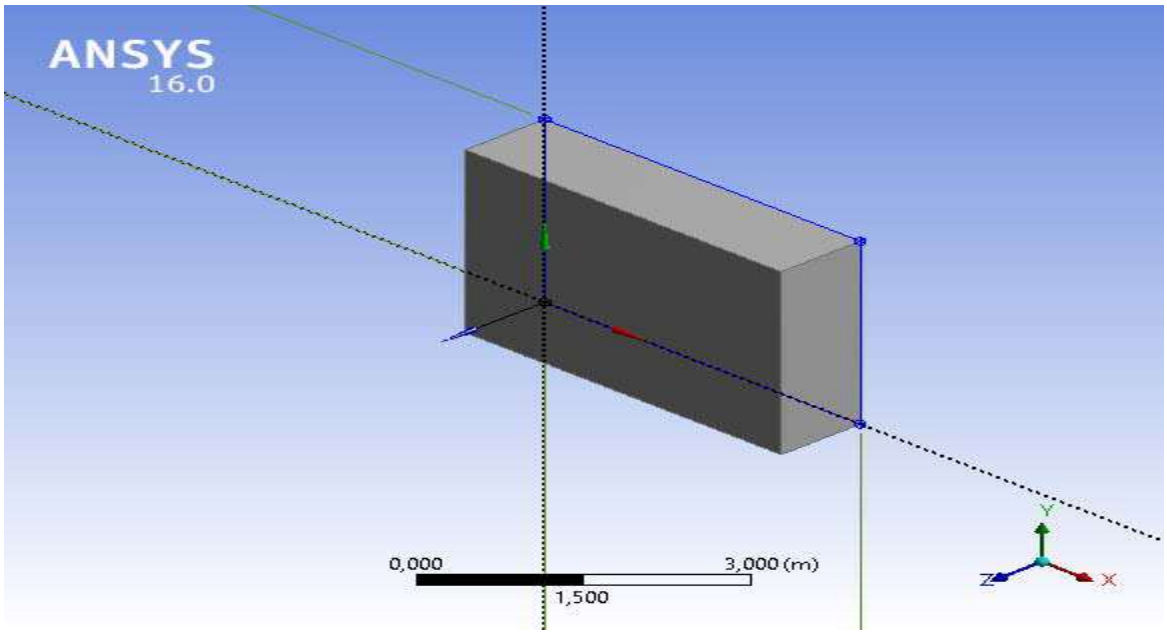


Figure 4 .4 : Posage 3d (Génère).

4.4.2 MAILLAGE

Génère le maillage

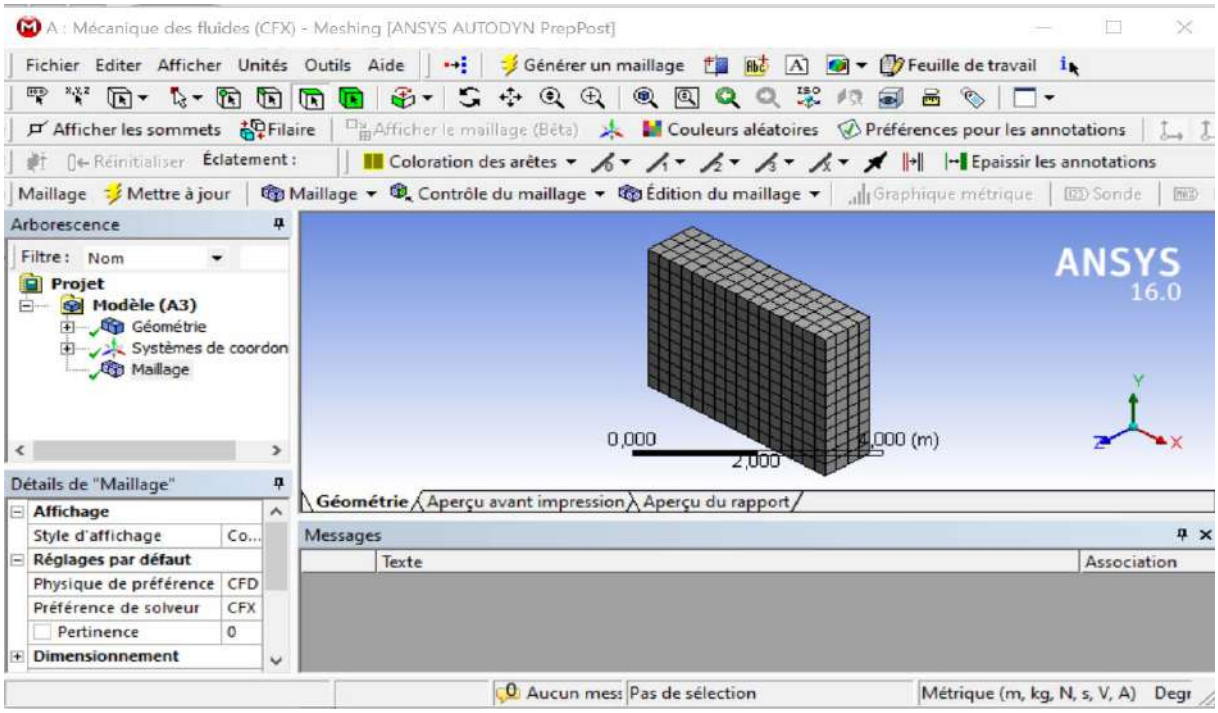


Figure 4.5 : Génère Le Maillage.

4.4.3 CONFIGURATION

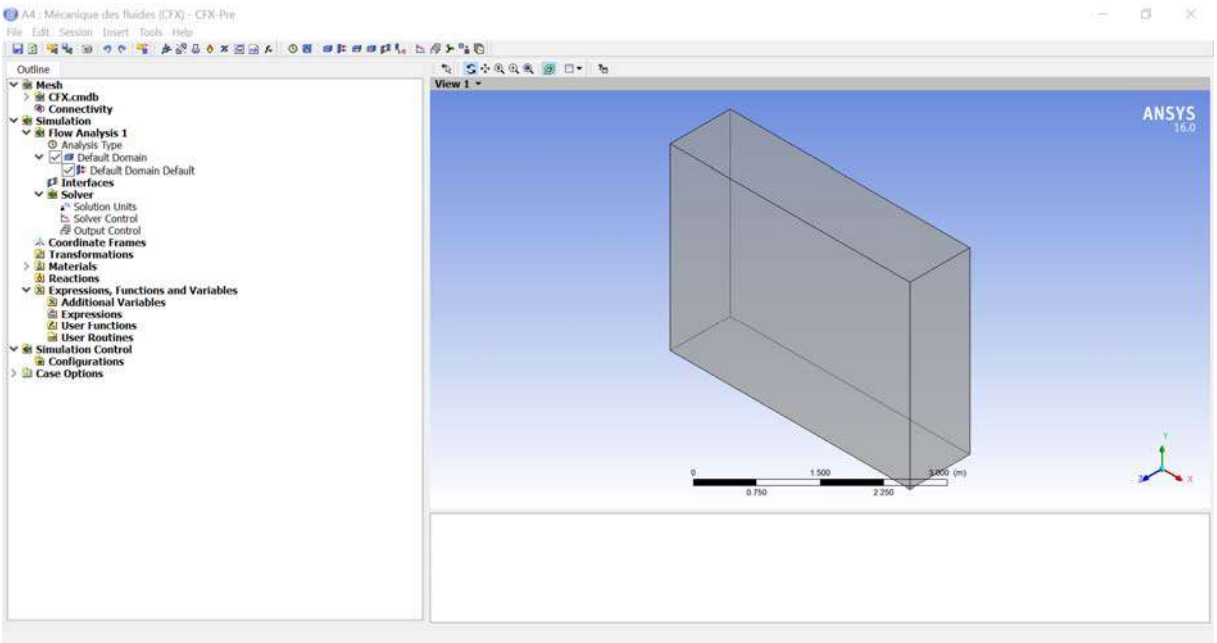


Figure 4.6 : Ouvrir La Configuration.

Le modèle physique sera défini dans cette partie. Ouvrir « analysis type » puis « basic settings ». On définit :

- La nature de l'écoulement vs temps (permanent ou transitoire)
- Le matériau et type de fluide (simple ou mélange)
- Type d'écoulement (laminaire ou turbulent, réactionnel ou non)
- Nature de l'écoulement vs température (avec équation d'énergie ou non)
- Couplage avec d'autres phénomènes (rayonnement, gravité, …)
-

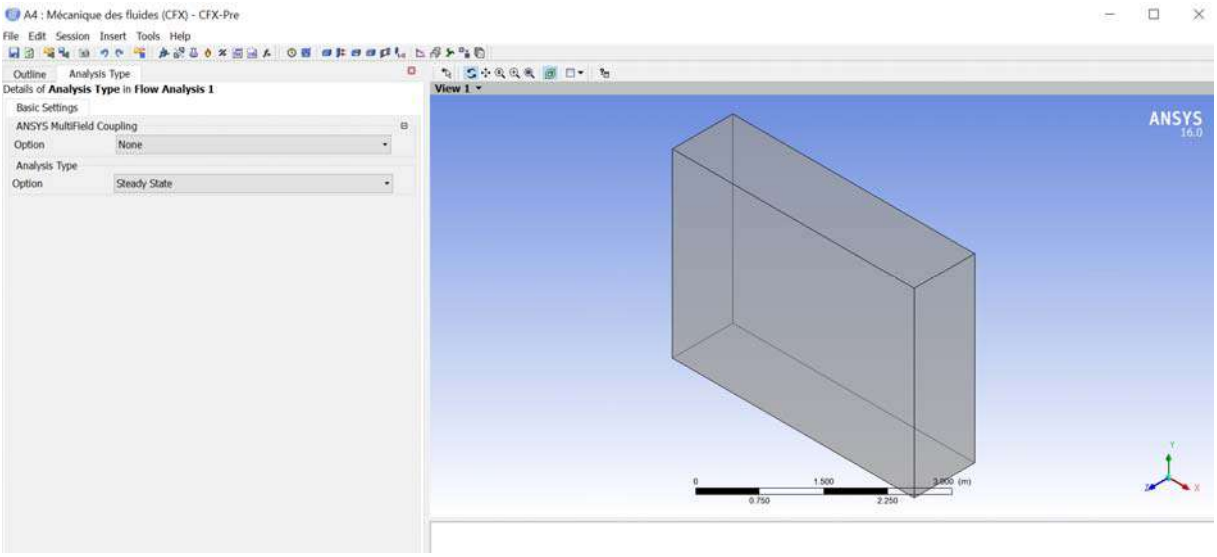


Figure 4.7 : Configuration (Analysis Type).

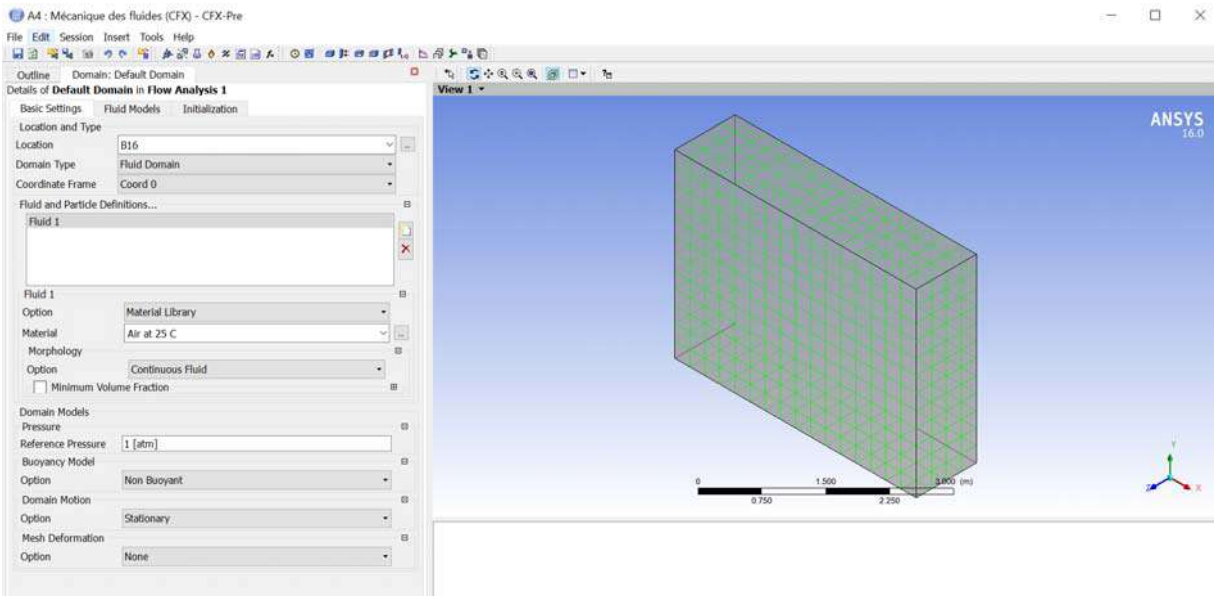


Figure 4.8 : Default Domain.

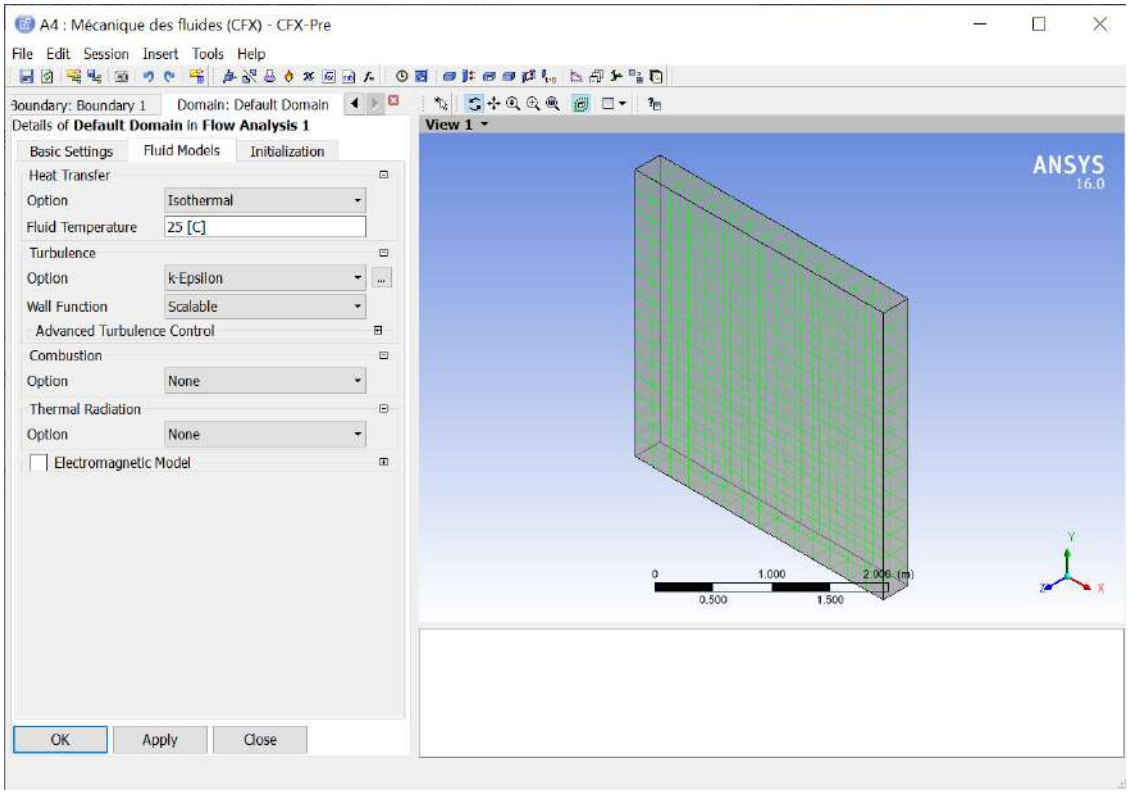


Figure 4.9: Default Domain (Fluid Models).

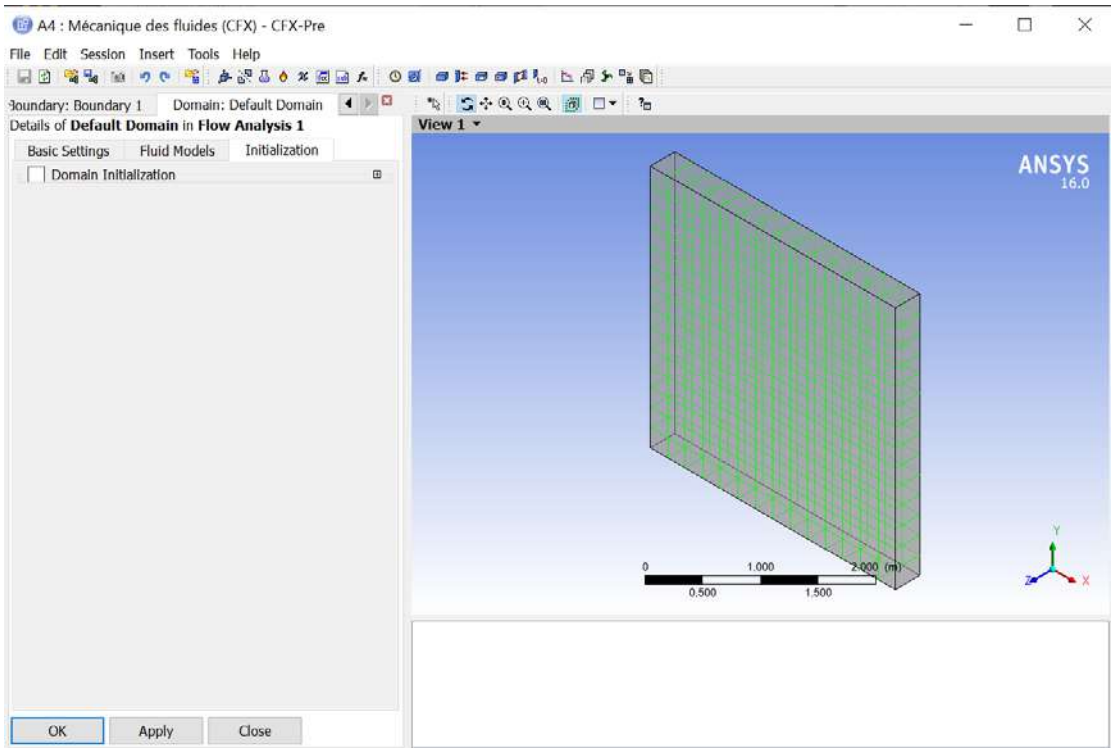


Figure 4.10 : Default Domain (Initialization).

À l'inscription des différentes conditions aux limites avec Create a Boundary Condition :

On a cinq cas possibles de conditions aux limites:

- Wall
- Opening
- Inlet
- Outlet
- Symmetry
-

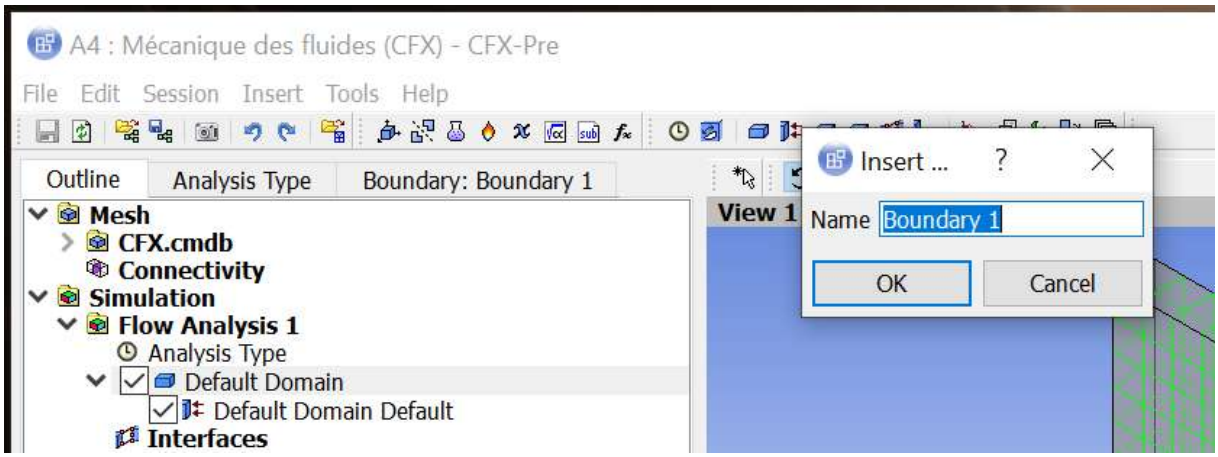


Figure 4.11: Boundary.

La première que l'on nomme Inlet permet de définir les propriétés aux surfaces d'entrée, apparaît alors les détails sur Inlet en différent onglet suivant le type de frontière.

Ici on sélectionne dans Basic Settings Type : Inlet.

Puis il faut choisir la localisation dans location : il suffit de sélectionner l'ensemble de la face Inlet.

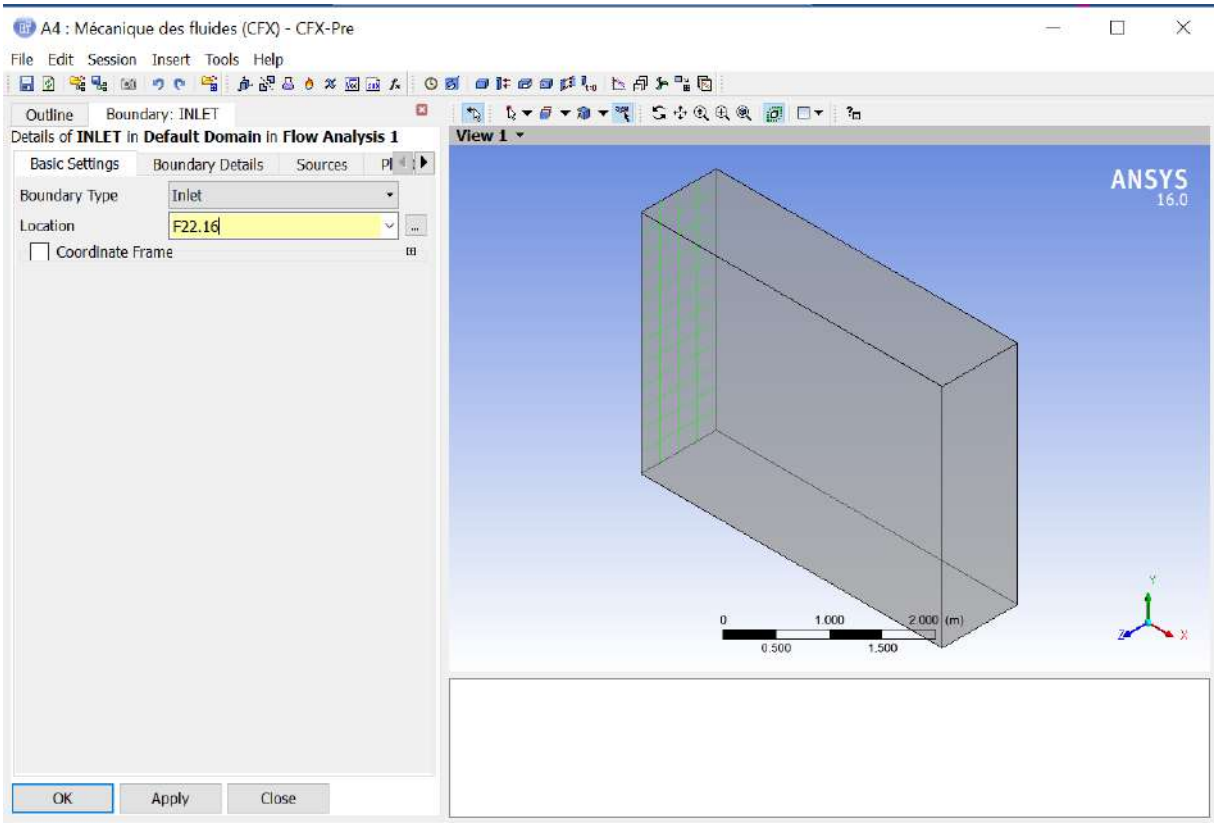


Figure 4.12 : Inlet.

Dans le volet Baundary Détail, on définit le régime du fluide dans Flow Régime, ici nous sommes en Subsonic. On définit aussi la vitesse d'entée dans Mass and Momentum avec l'option Normal Speed. On entre alors la valeur.

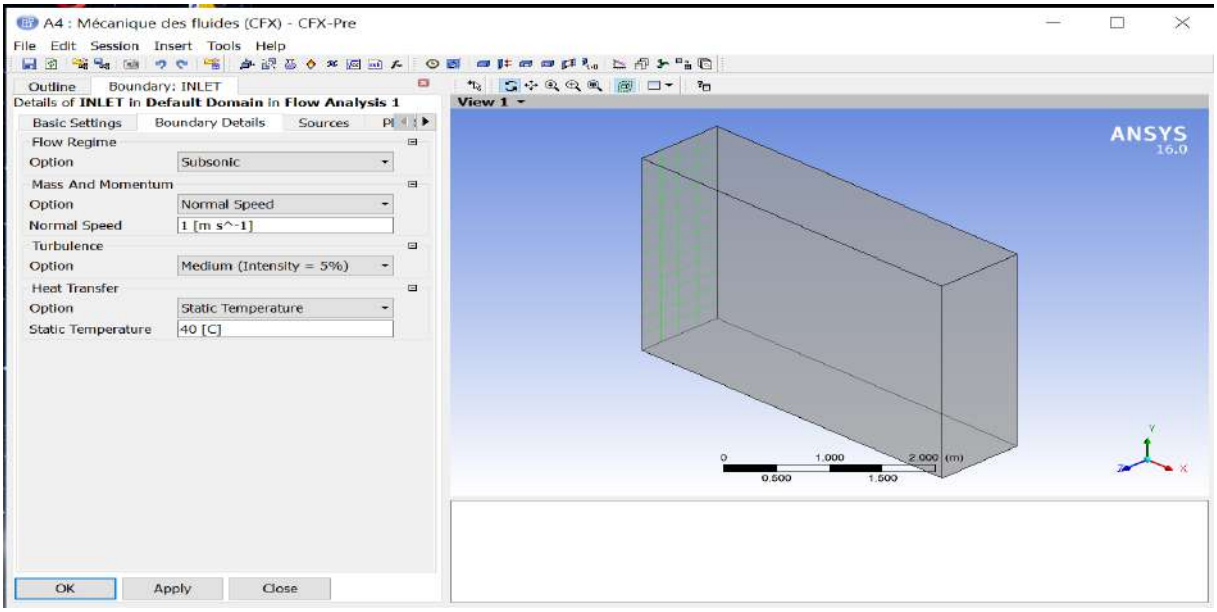


Figure 4.13: Boundary Details (Inlet).

La seconde condition limite que l'on nomme Outlet correspondra à la surface de sortie. On sélectionne donc la surface comme l'on a fait avec Inlet.

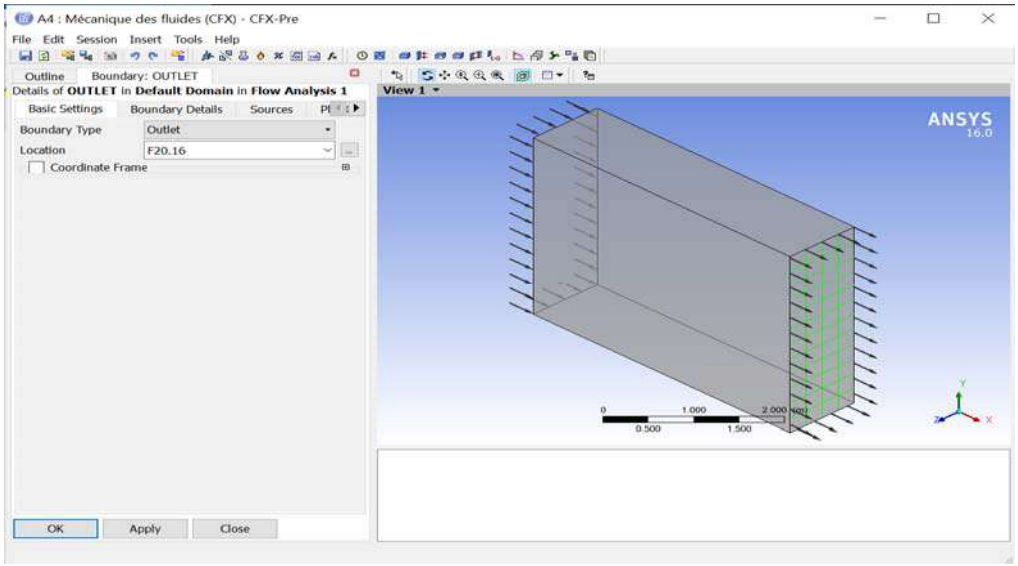


Figure 4.14 : Outlet.

Dans l'onglet Boundary Details, on définit la pression de la sortie dans Mass and Momentum avec l'option AverageStatic Pressure, que l'on n'impose nulle Pression Relative.

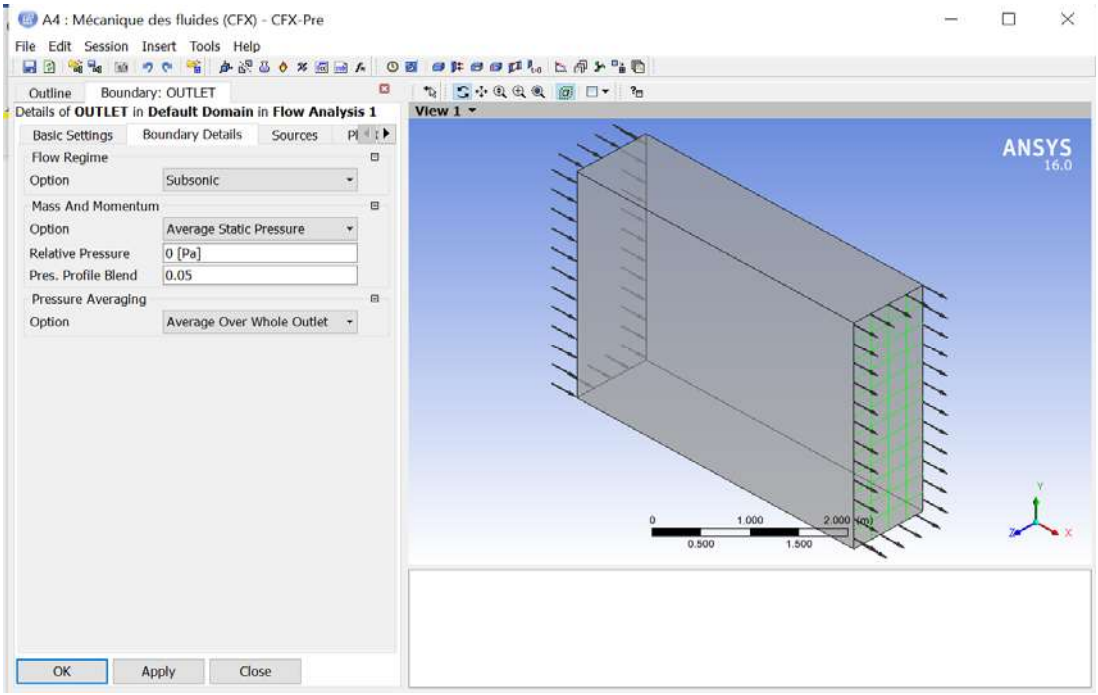


Figure 4.15: Boundary Details (Outlet).

Dans Basic Settings, Boundary Type on choisit Wall, et dans “location” on choisit “Profil”.

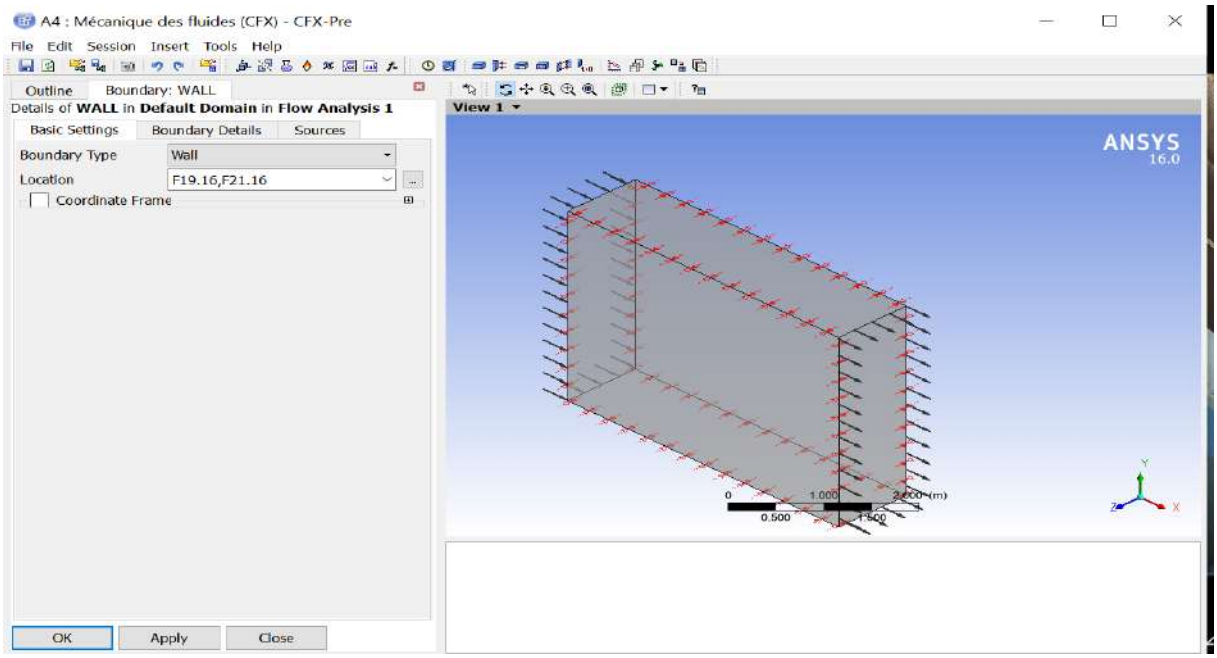


Figure 4.16 : Wall.

Dans l’onglet Boundary Details, on définit dans Wall supérieure à avec l’option No Slip Wall Et option adiabatique aussi avec l’option SmoothWall.

L’autre paroi on définit Wall infrieriéure l’option No Slip Wall avec température de cette paroi.

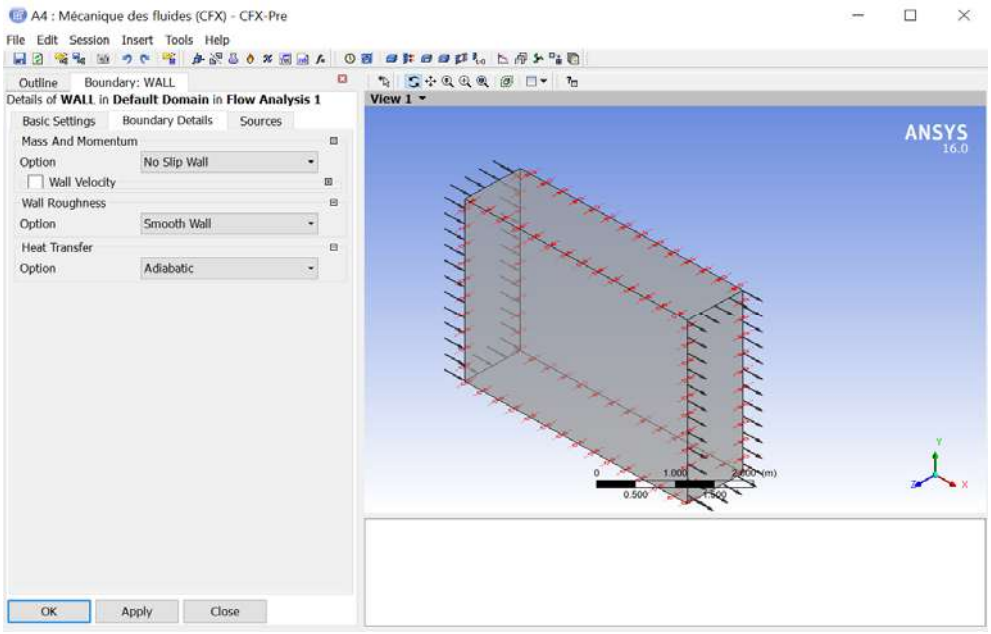


Figure 4.17: Boundary Detail (Wall).

Et les autres onglets sont laissés intacts Sources et Plot options.

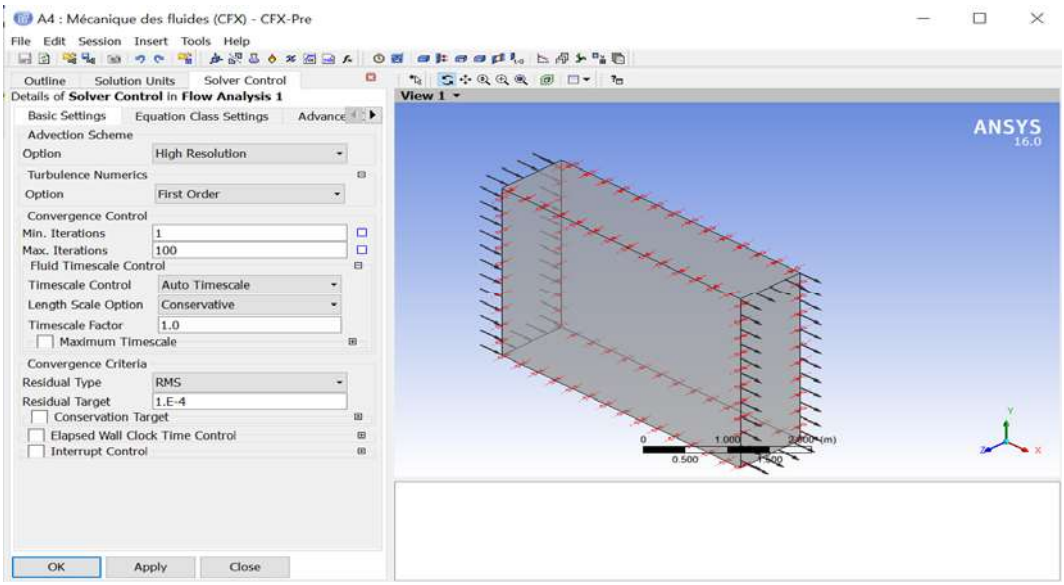


Figure 4.18 : Solver Control.

La dernière condition limite inclut deux conditions et sont les conditions de symétrie.

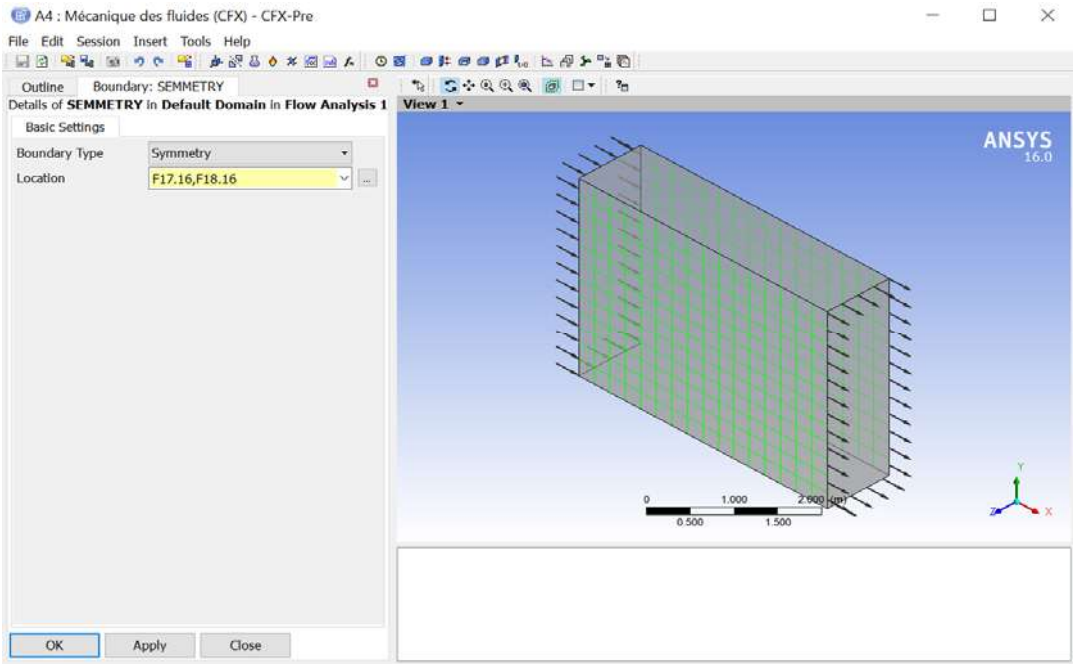


Figure 4.19 : Semmetry.

4.4.4 SOLUTION

On lance le calcul en cliquant sur l'icône Start Run.

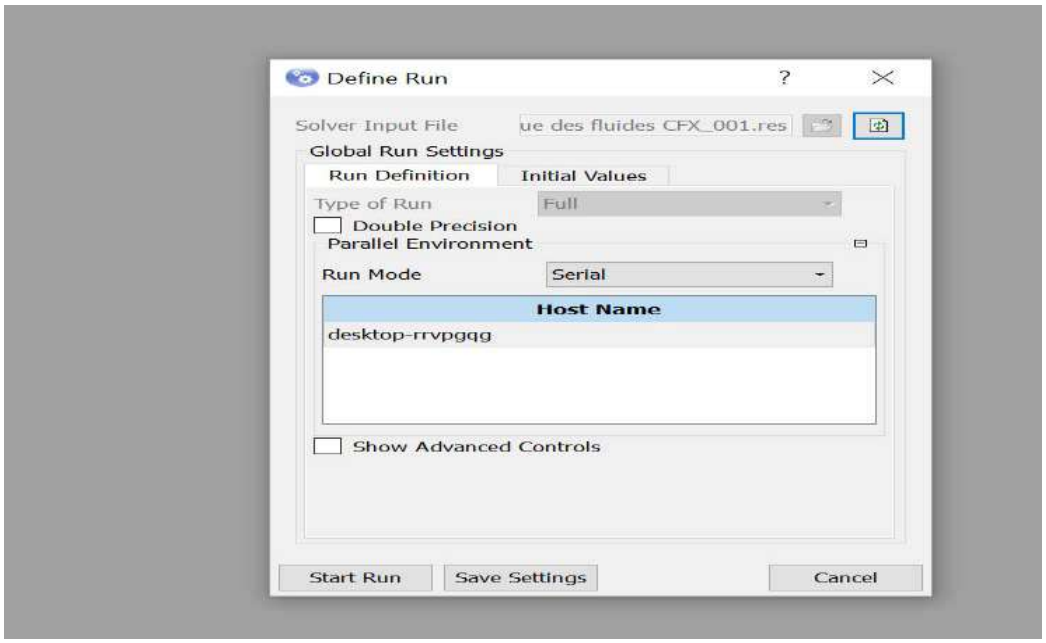


Figure 4.20 : Solution.

Apparaissent alors différents Onglets dont Mass and Momentum et Turbulence permettant de voir l'évolution des résidus de ces quantités, Wall Scale permettant de voir l'évolution du Wall Scale, et User Points qui nous permet de voir l'évolution des Monitor Points choisis.

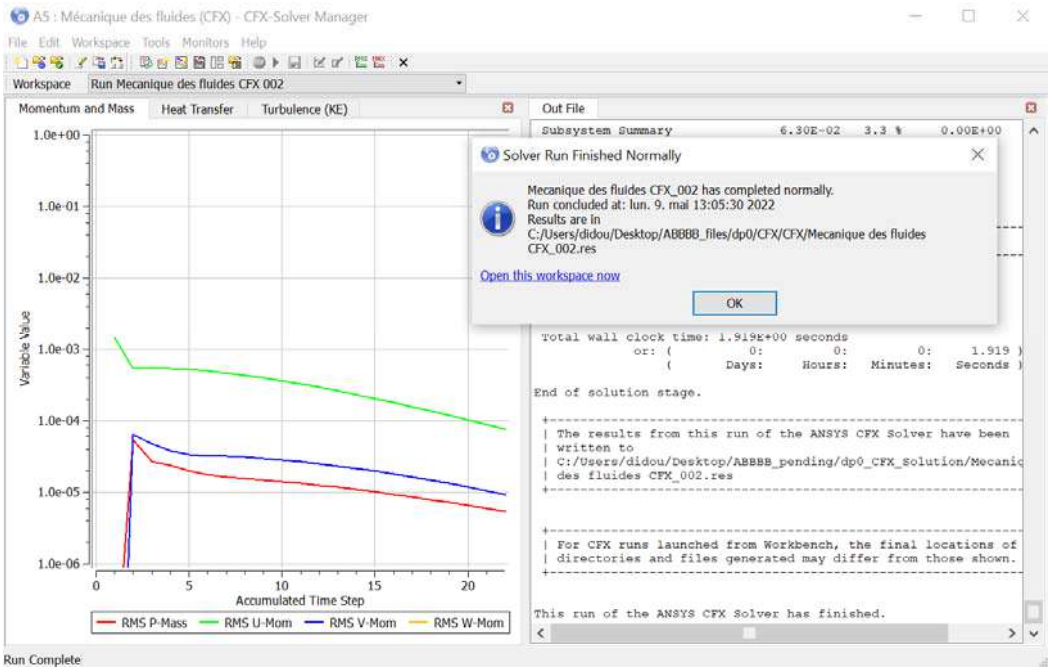


Figure 4.21 : Fin De Calcul.

4.4.5 RESULTATS

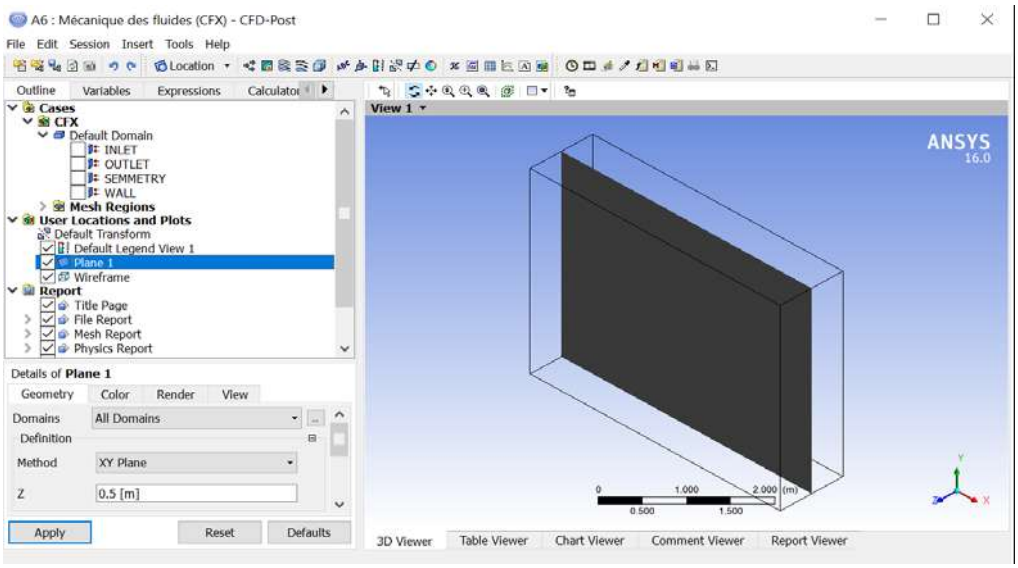


Figure 4.22 : Resultat.

On peut afficher les « lignes de courant » de vitesse à l'aide de l'icône « contour ».

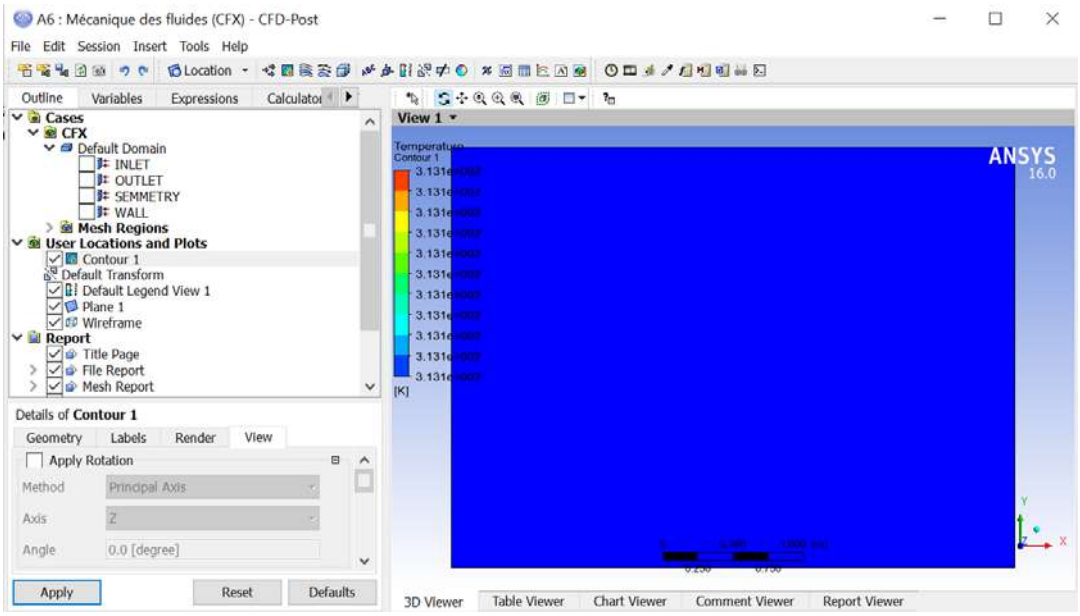


Figure 4.23 : Contour.

Les choix importants se font dans l'onglet Geometry, dans type on choisit surface contour, dans Start form on choisit plan dont on souhaite voir.

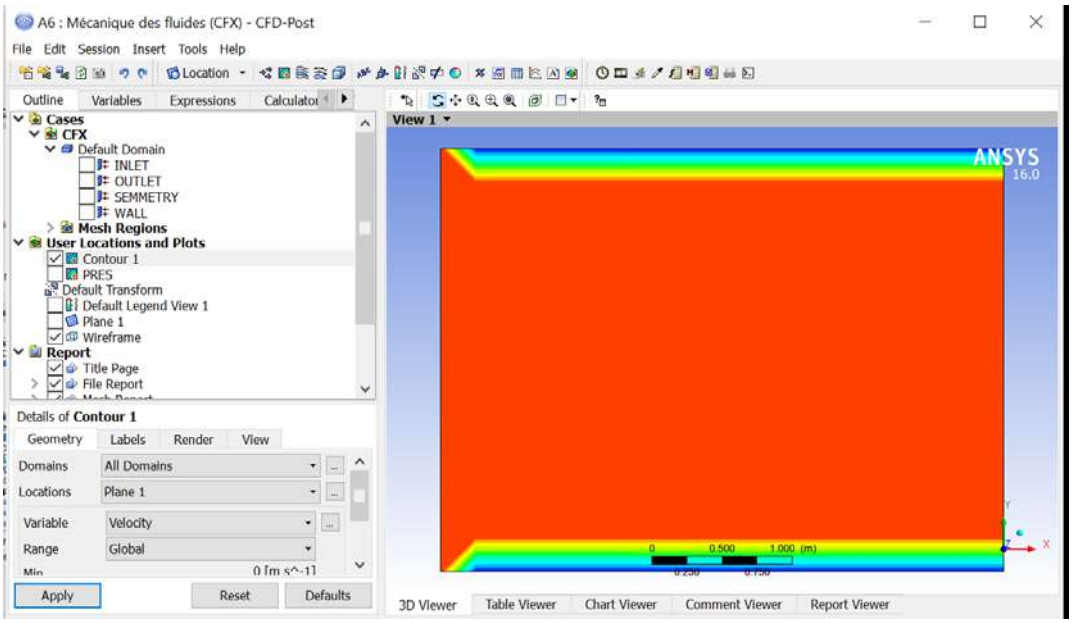


Figure 4.24: Contour (Details).

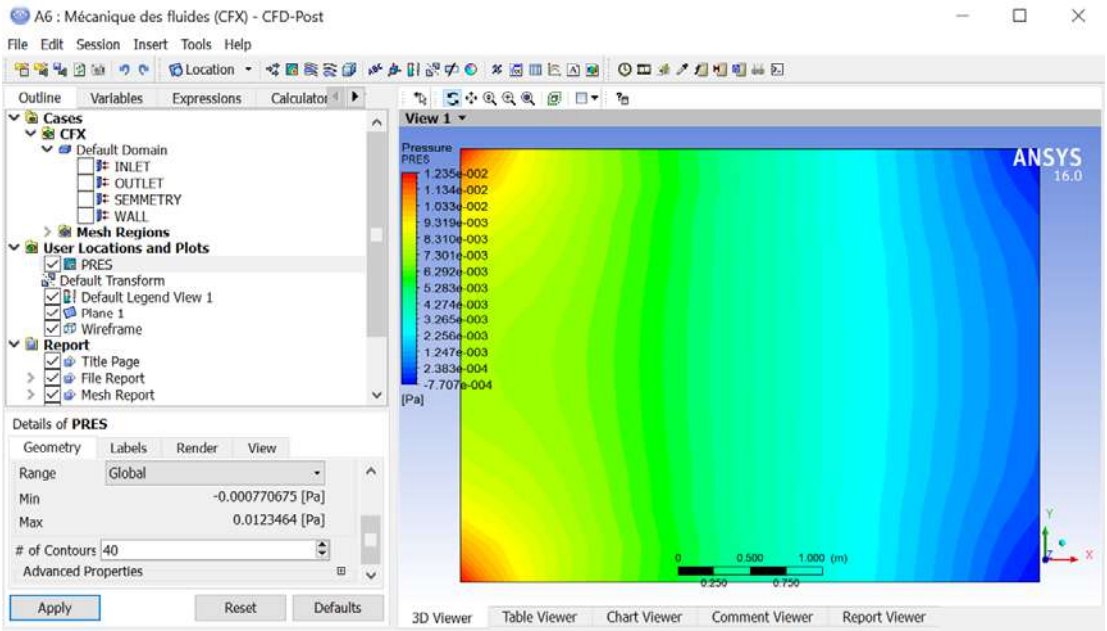


Figure 4.25 : Pression (Details).

Dans l'onglet Chart, on choisit le Type XY, dans l'onglet Chart line1, on choisit dans location la polyline que l'on a créé. Dans Y Axis on sélectionne la variable de vitesse, la pression, la dissipation de turbulence ou énergie cinétique de turbulence, et dans Y Axis on sélectionne la variable X relative. En cliquant sur Apply. On exporte le graphique au format*.csv, afin de pouvoir le retraiter par Excell ou autre utilitaire de graphisme.

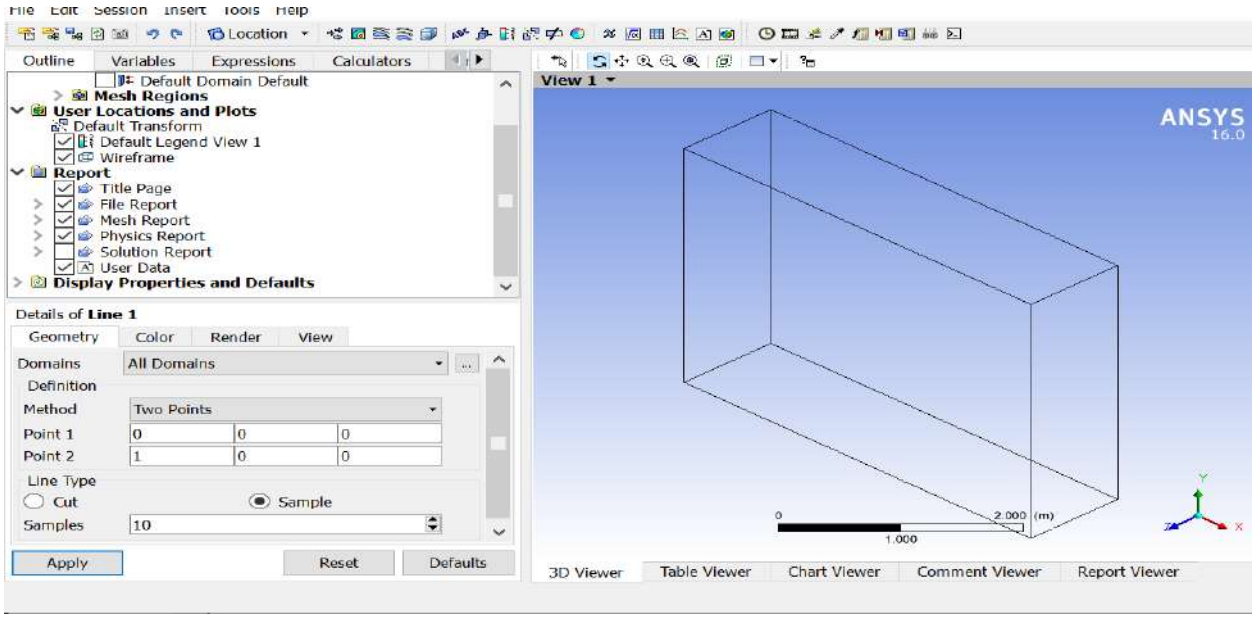


Figure 4.26 : Crée Un Line.

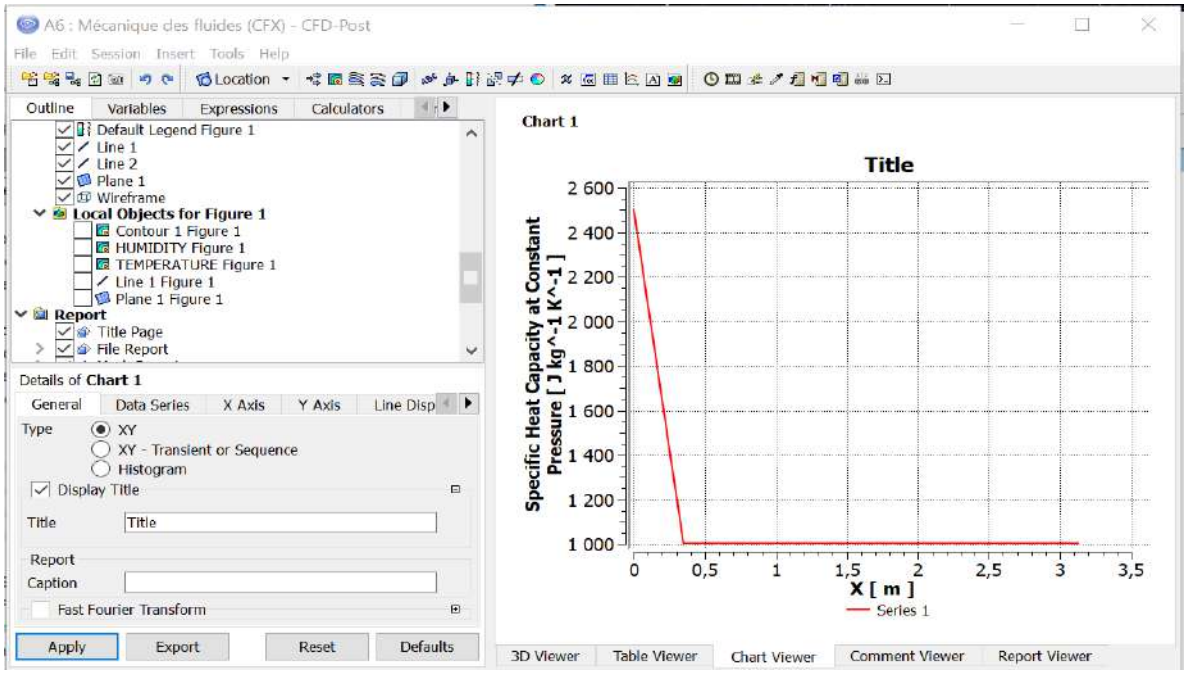


Figure 4.27: Chart.

4.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les étapes à suivre pour effectuer une simulation avec le code ANSYS CFX.

CHAPITRE 5

Résultats et discussion

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente la simulation numérique sur le stockage d'énergie solaire par chaleur latente avec un matériau à changement de phase MCP. La simulation numérique est exécutée à l'aide du code Ansys CFX 16.0.

Dans cette étude, on considère deux types de briques : une brique classique et une brique à fibre avec et sans PMC afin de voir l'impact du matériau sur le transfert thermique à travers les murs (changement de température).

5.2 Problème physique étudié

On propose l'analyse du cas simple d'une cellule test composée de parois de faible inertie thermique représentant une structure d'une maison.

Cette structure est formée d'un mur de 10 cm en brique classique et brique à fibre et 10 mm crépissage 1et 2 et 3 m la longueur et largeur de la chambre, voir figure 4.1.

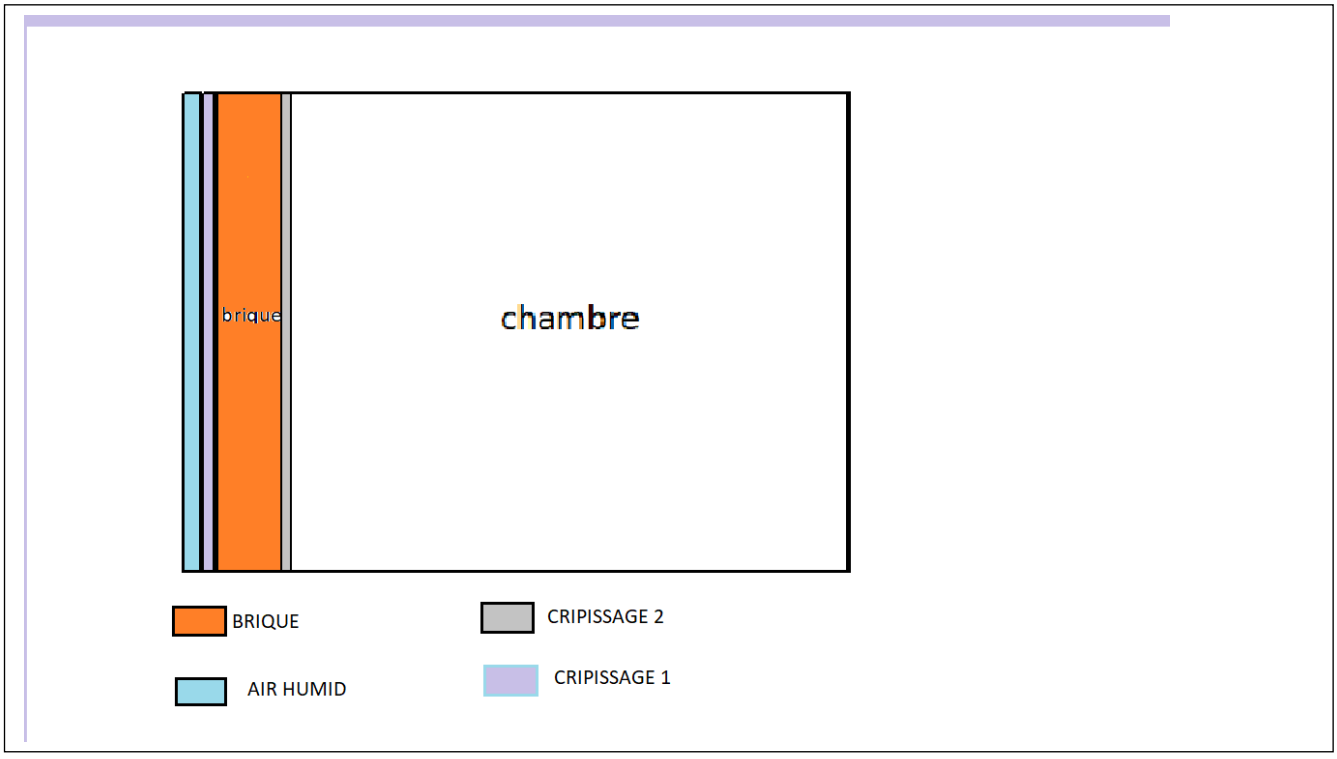


Figure 5.1 Structure de la cellule test.

TABELE 5.1 TABELE DES MATERIAUX

MATERIAUX	**ρ** kg/m3	**Cp** J/kg. K	**λ**
Brique classique	**1769.92**	**1785.87**	**0.8365**
Brique fibr	**2349.6**	**1865**	**0.8363**
PMC	**900**	**20**	**0.18**
MAT1	**1860**	**1865**	**0.8363**
MAT2	**1800**	**2500**	**1.1**

On donne dans l**e tableau (5.1)** les propriétés des différents matériaux utilisés dans la présente étude.

5.3. **Résultats et discussion**

En comparant les températures loin de la paroi en profondeur de la chambre (variable x) et à une hauteur de 1.5 m en supposant une température externe de 30°C et celle à l'intérieure de 20°C, le profil de température de la paroi de forme linéaire est presque identique pour les deux cas de matériau BC et BF avec laquelle est construite la paroi figure 5.2.

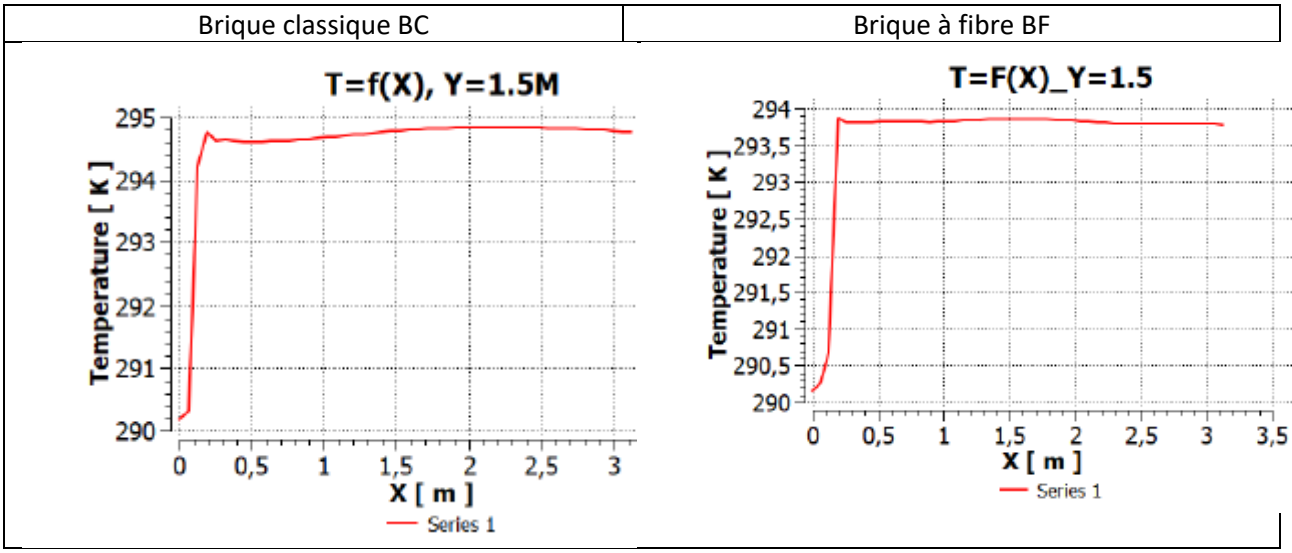


Figure 5.2 Température loin de la paroi en fonction de x (profondeur de la chambre) et à une hauteur de 1.5 m

La différence commence à se sentir à 30 cm pour la brique classique BC où la température fluctue autour de 294.7 K jusqu'à 1.5m puis se stabilise à 294.9 K.

Pour la brique à fibre BF on note déjà une stabilité à 20 cm autour de 293.9 K figure(5.1).

D'autre part, l'examen des courbes de contours de température en fonction de la distance loin de la paroi permet de montrer l'apport bénéfique en stabilité thermique du volume étudie (chambre) quand on utilise une brique à fibre BF et cela pour la hauteur jusqu'à 1m et en profondeur loin de la paroi allant jusqu'à 3m, alors que pour une brique classique BC, la température change notablement en s'éloignant de la paroi figure (5.3).

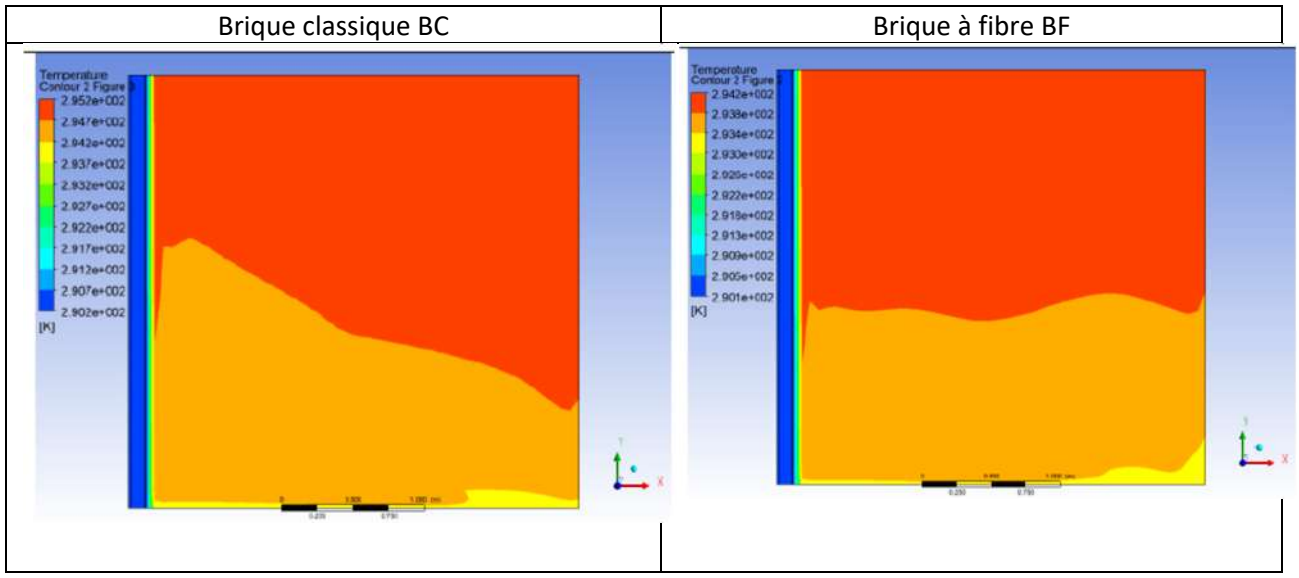
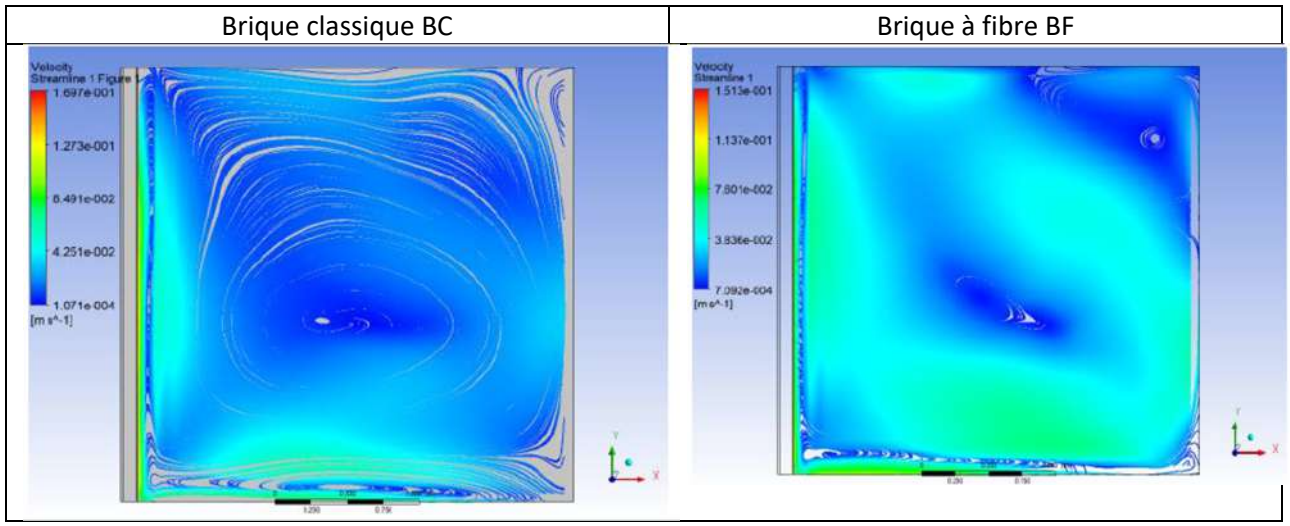


Figure 5.3 champ thermique loin de la paroi en fonction de x (profondeur de la chambre) et à une hauteur de 1.5 m

Ce changement de température en allant en profondeur de la chambre (x) a créé une recirculation de l'air causée par une turbulence comme le témoigne le graphe de la figure 5.4 exprimant la vitesse en fonction de x.

Par conséquence, en comparant avec le cas BC, la brique à fibre BF est moins intense et la vitesse est relativement homogène dans le volume étudié.



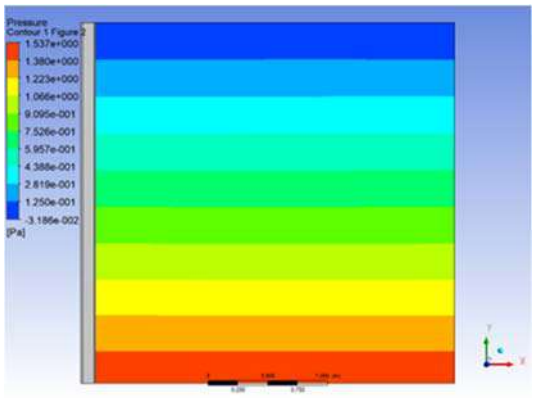
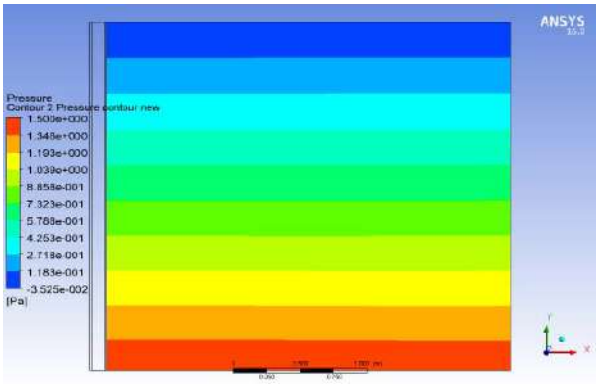
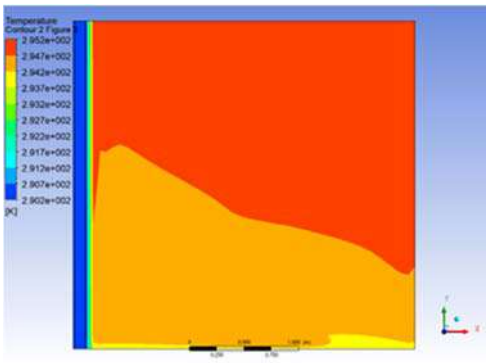
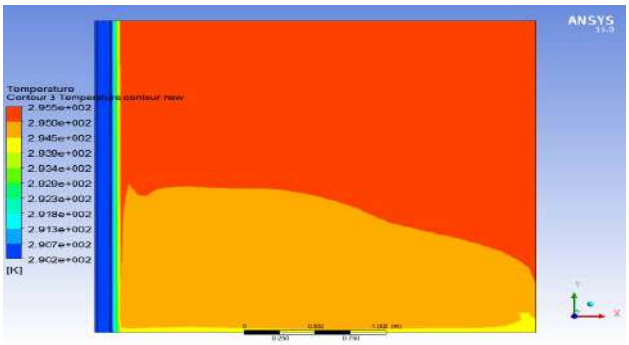
.

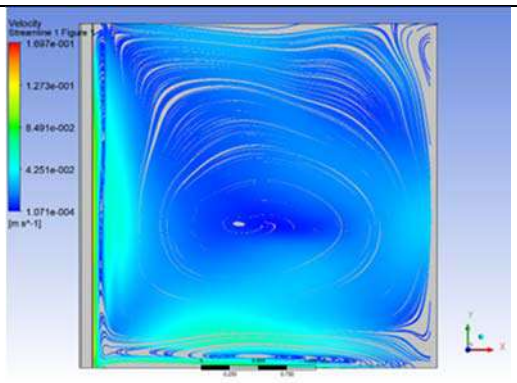
Figure 5.4. Zones de recirculation dans le volume de la chambre pour les de cas de murs construits avec de la brique sans fibres BC et avec fibres BF

Par comparaison avec le cas de BC, la turbulence est moins importante et la vitesse est relativement homogène dans le volume étudié.

5.4. Conclusion

Pour cette partie de l'étude, une tentative de simulation du comportement du matériau élaboré est présenté pour un cas simple d'étude où il est montré que la brique avec 12 % de fibres joue bien le rôle d'isolant en participant à garder une ambiance plus ou moins homogène dans la chambre prise comme modèle de simulation.

Brique classique Rho=2448.40 kg/m3 Cp=1865 J/kg.K	Brique classique Rho=2448.40 kg/m3 Cp=1865 J/kg.K avec PMC
	
	



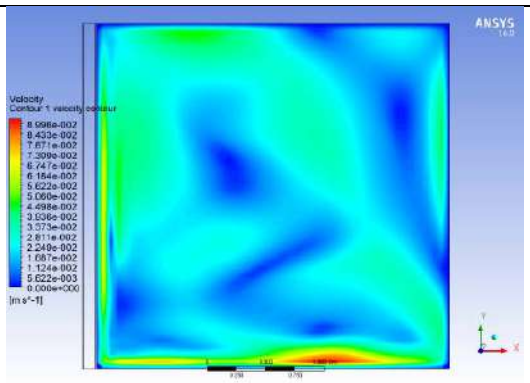


Figure 5.5 : contour de la variation de pression, vitesse et température de brique classique (avec et sans PMC)

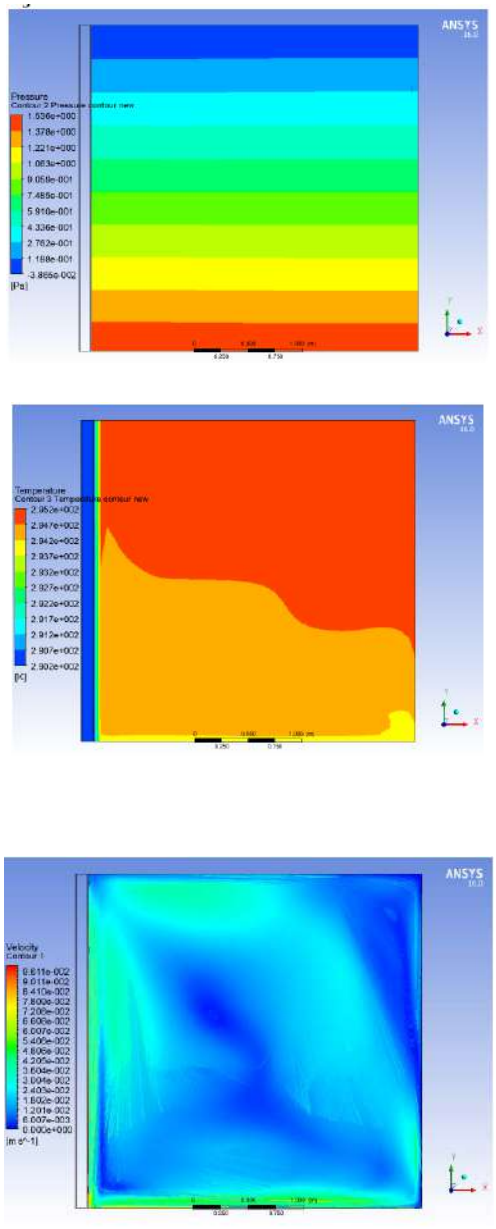
Brique à fibre Rho=2349.00 kg/m3 Cp=1865 J/kg.K	Brique à fibre Rho=2349.00 kg/m3 Cp=1865 J/kg.K avec pmc
	

Figure 5.6: contour de la variation de pression, vitesse et température de brique fibre

(avec et sans PMC)

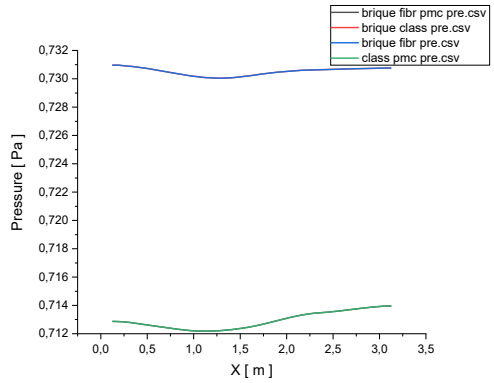


Figure 5.7 : variation de pression

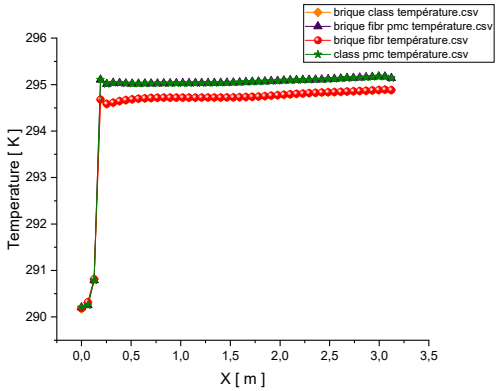


Figure 5.8 : variation de temperature

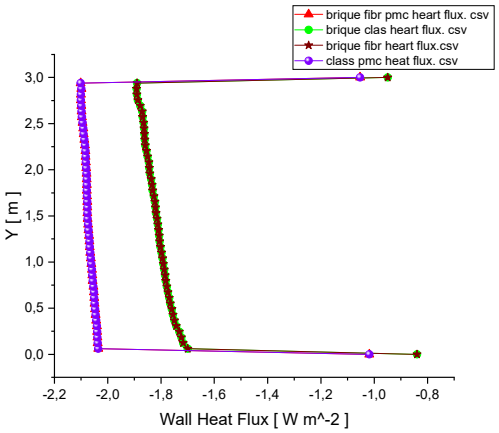


Figure 5.9 variation du flux de chaleur

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude consiste à analyser l'effet de l'utilisation des briques classiques et celles à mélangées avec de fibre végétale (biomatériau) avec et sans PMC sur les performances des transferts thermique à travers les murs des habitations.

On a fait ce travail de simulation numérique en utilisant le code **Ansys CFX**. Une étude de comparaison de deux modèles de briques avec et sans PMC a été présentée.

Le travail entrepris dans cette étude consiste en trois parties essentielles :

- Une première partie présente des généralités de transfert de chaleur, des généralités sur les MCP et les études précédentes sur ce sujet.
- La seconde partie présente une modélisation numérique pour étudier le stockage d'énergie thermique par chaleur latente dans un matériau à changement de phase incorporé dans la brique.
- La troisième partie donne les résultats de l'étude numérique du transfert thermique qui est effectué par le code «Ansys CFX ».

Cette étude a montré l'importance des nouveaux matériaux dans le secteur du bâtiment, où on a pris deux modèles : une brique classique et la deuxième brique à fibre avec et son MCP et on a comparé l'évolution de la température entre ces deux cas.

Les résultats obtenus peuvent être résumées par les points suivants :

- L'utilisation des matériaux à changement de phase pour le stockage de l'énergie thermique présente un grand intérêt au regard du contexte énergétique actuel.
- Les résultats obtenus montrent que l'utilisation des fibres végétales (biomatériaux) incorporé dans la terre cuite construisant la brique a un effet sensible sur la qualité des transferts thermiques à travers les murs.
-

Références Bibliographiques

REFERENCES Bibliographiques

[1] Zidane Mohamed Yassine, Ould Amer Yacine, Alliche Mounir, Rebhi Redha, " Etude comparative du stockage de froid (et du chaud) par utilisation de matériaux à changement de phase", 1er Séminaire national sur le Génie climatique, Énergie renouvelables & Efficacité énergétique (**GÉCLEREE2021**), December 4-5, **2021**, Médéa, Algérie.

[2] Yahia Abdelhamid Lakhdaria, Salah Chikha, Antonio Campob, "Analysis of the thermal response of a dual phase change material embedded in a multi-layered building envelope", **Applied Thermal Engineering**, Volume 179, October 2020, 115502.

[3] Youssef Hamidi, Mustapha Malha, Abdellah Bah Mohammed, "Analysis of the thermal behavior of hollow bricks walls filled with PCM: Effect of PCM location", **ENERGY REPORTS (NOV 2021),** Vol. 7, pp. 105 – 115.

[4] Khalid H. Almitani, Mashhour A. Alazwari, Muhammad Basha, Ahmed Khoshaim, Nidal H. Abu-Hamdeh, Arash Karimipour , "Examining the effects of interior setpoint temperature on phase change materials usefulness through a performing annual analysis in the air handling units: A building energy management study", **Journal of Energy Storage**, Volume 48, April 2022, 103991.

[5] Arun Prakash SELVARAJU, Arivazhagan RANGANATHAN, Antony Aroul Raj VINCENT, Pappu ARUMUGAM, Velraj RAMALINGAM, "THERMAL MANAGEMENT ANALYSIS OF PCM INTEGRATION IN BUILDING USING A NOVEL PERFORMANCE PARAMETER – PCM EFFECTIVENESS INDEX", **THERMAL SCIENCE**: Year 2022, Vol. 26, No. 2A, pp. 883-895.

[6] F. Rebelo, A. Figueiredo, R. Vicente, V.M. Ferreira, "Study of a thermally enhanced mortar incorporating phase change materials for overheating reduction in buildings", Journal of Energy Storage, Volume 46, February 2022, 103876.

[7] Yves. JANNOT, TRANSFERTS THERMIQUES, Ecole des Mines Nancy, 2012

[8] www.linseis.com/fr/grandeurs-mesurees/flux-de-chaleur/

[9] ABDEDDAIM Amel," Gestion des échanges thermiques des éléments électroniques" Université Mohamed Khider de Biskra lundi 8 juillet 2019

[10] Mohamed GACEM, Comparaison Entre l'Isolation Thermique Extérieure et Intérieure d'une pièce D'un Habitat Situé Dans Le Site De Ghardaïa. 2010-2011.

[11] Leçons commentées en ligne sur http://www.grandjean-bpa.com/therm/

[12] http://www.PCM – Définition 2019-10-07 par Nick Connor.com

[13] D. Kolokotsa, T. Karlessi, dans Énergie renouvelable globale, 2012

[14] HACENE Skander, ZIDANE Mohamed Yacine, “ETUDE COMPARATIVE DU STOCKAGE DE FROID (ET DU CHAUD) PAR UTILISATION DE MATERIAUX A CHAMNGEMENT DE PHASE », Mémoire de Master 2019 2020, USTHB, Alger.

[15] A. Abhat, "Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials", Sol. Energy, vol. 30, no. 4, pp. 313-332, 1983.

[16] Boussalem Samira, Kheirat Mohamed, « étude numérique et expérimentale d’un écoulement de l’air autour d’un obstacle de section carré », Mémoire de PFE, Université Yahia FARES de MEDEA 2013/2014.