

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et
Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
جامعة غرداية

Université de Ghardaïa



N° d'enregistrement

/...../...../...../.....

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Automatique et Electromécanique
Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

Modélisation Numérique D'un Écoulement Au Sein D'une Dalle Chauffante

Présenté par :

BORHANE Abdelkader Mohamed Anis et BELLAOUAR Abdessalam

Soutenue publiquement le 04/06/2024

Devant le jury composé de :

AMIEUR Bachir	MAA	Université de Ghardaïa	Président
KHIRENNAS Messaoud	MAB	Université de Ghardaïa	Examineur
BENDAOUI Messaoud	MCB	Université de Ghardaïa	Examineur
BELAGHIT Abdelhakem	MAB	Université de Ghardaïa	Encadrant

Année universitaire 2023/2024

Dédicace

A mes très chers parents qu'ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces années d'études

Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance

A toute ma famille et mes proches

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je leur souhaite plus de réussite et succès.

Je vous dédie ce modeste travail



Remerciements

On remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce travail.

Ce travail n'aurait pas pu aussi vu le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr Belaghit Abdelhakem, on le remercie davantage pour la qualité de son encadrement, pour ses précieux conseils pour sa patience, et pour sa disponibilité durant toute la période de notre travail.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs qui nous ont donné le meilleur de leur savoir durant toutes ces années d'études.

Nous tenons à remercier les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail.

On remercie tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à l'accomplissement de ce modeste travail



Nomenclature

- Notion de thermodynamique :

Symbole	Dénomination	Unité
p	Pression	Pa
F	Force	N
S	Surface	m^2
P_{abs}	Pression absolue	Pa
P_{rel}	Pression relative	Pa
P_{atm}	Pression atmosphérique	Pa
P_i	Pression partielle	Pa
P_t	Pression totale	Pa
X_i	Fraction molaire	
U	Energie interne	J
W	Travail	J
Q	Chaleur	J
∂	Dérivée partielle	
c	Capacité thermique	$J/Kg^\circ K$
m	La masse	g
ΔT	Le changement de température	$^\circ K$
∂W	Travail élémentaire	
P_{ext}	Pression du milieu extérieur	Pa
R	Constante universelle des gaz parfaits	
C_v	Capacité calorifique à volume constante	$J/Kg^\circ K$
C_p	Capacité calorifique à pression constante	$J/Kg^\circ K$
T_f	Température finale	$^\circ K$
T_i	Température initiale	$^\circ K$
n	Nombre de moles	mole
γ	Coefficient adiabatique	
V	Volume	m^3
λ	Conductivité thermique	$W/m^\circ K$
L	Coefficient de Lorenz	
ρ	Masse volumique	Kg/m^3
φ	Flux de chaleur	W
U	Vitesse du fluide	m/s
h_v	Coefficient de transfert thermique convectif	$W/m^2^\circ K$
μ	Viscosité dynamique	$Kg/m s$
T_p	Température de la paroi	$^\circ K$
ν	Viscosité cinématique	m^2/s
S	Surface	m^2
x	Distance	m
U_∞	Vitesse de l'écoulement libre	m/s
q_r	Densité de flux de chaleur par rayonnement	W/m^2
T_c	Température du corps	$^\circ K$
ε	Emissivité du corps	

σ	Constante de Stéfane-Boltzmann	W/m^2K^4
Φ	Densité de flux	W/m^2
t	Temps	s
R_1	La production par unité de volume	
h	l'enthalpie massique	J/Kg
t_h	Température du fluide chauffant	$^{\circ}C^{\circ}$
t_i	Température intérieure	$^{\circ}C$
K	coefficient de transmission calorifique total	kcal/m ² h $^{\circ}C$
q	Puissance thermique	W
q_n	Puissance thermique définie par les normes	W
Δt_n	Différence de température définie par les normes	$^{\circ}C$
φ_c	Flux de chaleur transmis par conduction	W
e	Epaisseur de la paroi	m
h_c	Coefficient de transfert thermique par conduction	$W/m^2^{\circ}C$
φ_v	Flux de chaleur transmis par convection	W
h_v	Coefficient de transfert thermique par convection	$W/m^2^{\circ}C$
T_m	Température de surface du solide	$^{\circ}C$
T_{∞}	Température du fluide loin de la surface du solide	$^{\circ}C$
U_{av}	Pertes thermiques vers l'avant	$W/m^2^{\circ}C$
R_i	Résistance intérieure	$m^2^{\circ}C/W$
R_e	résistance extérieure	$m^2^{\circ}C/W$
h_{vpv}	Coefficient de transfert convectif plaque-verre	$W/m^2^{\circ}C$
h_{rpv}	Coefficient d'échange de rayonnement plaque-verre	$W/m^2^{\circ}C$
h_{vva}	Coefficient de transfert convectif verre-ambient	$W/m^2^{\circ}C$
h_{rvc}	Coefficient d'échange de rayonnement vitre- céleste	$W/m^2^{\circ}C$
U_{arr}	Pertes thermiques vers l'arrière	$W/m^2^{\circ}C$
η	Rendement	%
F_R	Efficacité globale d'échange thermique du capteur	
τ	Coefficient de transmission	
α	Coefficient d'absorption	
I	Eclairement solaire	W/m^2
K	Coefficient de transmission surfacique	$W/m^2^{\circ}C$
n	Nombre de tubes	
P	Pas de tubes	m
l	Largeur	m
v	Débit volumique de fluide dans le tube	m^3/s
L	Longueur	m
M	Débit massique par unité de surface de capteur	kg/s.m ²
m	Débit massique par tube	kg/s
p_f	Puissance fournie au fluide	W/m^2
D_h	Diamètre hydraulique	m
W	Rapport entre la surface et le périmètre de la dalle	m

*** Indices :**

Symbole	Dénomination
a	Ambiant
av	Avant
arr	Arrière
c	Céleste , capteur , corps
cplf	Echange conductif entre le plancher et le fluide
e	extérieur
f	Fluide
fe	Entrée fluide
g	Global
i	Intérieur
lat	Latérale
m	Surface de solide
p	Plaque absorbante
pl	Plancher
plf	Contact plancher-fluide
pv	Contact absorbeur-vitre
rpl	Rayonnement plancher
sup	Supérieure
u	Utile
t	Tube
v	Vitre , verre
va	Contact vitre-ambiance
vc	Contact vitre-céleste
vpla	Echange convectif entre le plancher et l'air
vplf	Echange convectif entre le plancher et le fluide
PSD	Plancher solaire direct

*** Nombres adimensionnels :**

Symbole	Dénomination
Nu	Nusselt
Pr	Prandtl
Ra	Rayleigh
Re	Reynolds
Gr	Graetz

LISTE DES FIGURES :

CHAPITRE I : notion de thermodynamique

Figure 1 Notion de système thermodynamique1.....	2
Figure 2 Le mouvement des particules2.....	3
Figure 3 Thermomètre à mercure4.....	5
Figure 4 Thermomètre à résistance de platine4.....	6
Figure 5 Schéma simplifié d'un thermocouple4.....	6
Figure 6 Les étapes de transfert de chaleur6.....	10
Figure 7 Modes de transfert thermique7.....	11
Figure 8 Conduction thermique8.....	12
Figure 9 Génération de l'équation générale de la chaleur7.....	15
Figure 10 Convection thermique7.....	16
Figure 11 Flux de chaleur échangé par convection7.....	19
Figure 12 Rayonnement thermique9.....	20
Figure 13 Distribution spectrale du rayonnement électromagnétique.....	21
Figure 14 Fiche explicative de rayonnement9.....	23
Figure 15 Distribution directionnelle du rayonnement électromagnétique.....	23
Figure 16 Flux de chaleur échangé par rayonnement9.....	24

Chapitre II : Plancher chauffant

Figure 17 Plancher chauffant12.....	26
Figure 18 Les différents éléments d'un plancher chauffant12.....	27
Figure 19 Réseau de tubes d'un plancher chauffant hydraulique12.....	29
Figure 20 Tube en PEX-Al-PEX12.....	31
Figure 21 Tube en PERT muni d'une barrière anti-oxygène12.....	31
Figure 22 Système géothermique12.....	34
Figure 23 Chauffe-eau solaire12.....	35
Figure 24 3 configurations possibles pour la disposition du réseau de tube12.....	35
Figure 25 Tube en cuivre.....	37
Figure 26 Tube en multicouche15.....	38
Figure 27 Système PSD16.....	39
Figure 28 Capteur solaire thermique16.....	39
Figure 29 Capteur solaire sans vitrage16.....	40
Figure 30 Capteur plan vitré16.....	41
Figure 31 Schéma des éléments de construction d'un capteur plan21.....	41
Figure 32 Capteur à tubes sous vide20.....	45

Chapitre III : Etude mathématique

Figure 33 Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan16.....	49
Figure 34 Les températures des différents éléments intervenant dans la détermination du rendement d'un capteur plan17.....	52
Figure 35 Les différents échanges thermiques dans un plancher31.....	53

Chapitre IV : Résultats et discussion

Figure 36 La géométrie d'un écoulement au sein d'une dalle chauffante (vue de face)	58
Figure 37 La géométrie d'un écoulement au sein d'une dalle chauffante (vue de coté)	58
Figure 38 Maillage d'un serpentin au sein d'une dalle chauffante dans ANSYS Fluent	59
Figure 39 Choix du régime stationnaire pour un écoulement incompressible.....	60
Figure 40 Activation de l'équation de l'énergie	61
Figure 41 choix du modèle de turbulence K-Epsilon standard.....	61
Figure 42 Moniteurs de convergence.....	63
Figure 43 Initialisation des solutions.....	63
Figure 44 Lancement du calcul itératif.....	64
Figure 45 propagation de température de la dalle avec une Vitesse de fluide = 0.1 m/s.....	64
Figure 46 propagation de température de la dalle avec une Vitesse de fluide = 0.2 m/s.....	65
Figure 47 propagation de température de la dalle avec une Vitesse de fluide = 0.3 m/s.....	65
Figure 48 champ de température de serpentin avec une Vitesse de fluide = 0.1 m/s.....	66
Figure 49 champ de température de serpentin avec une Vitesse de fluide = 0.2 m/s.....	66
Figure 50 champ de température de serpentin avec une Vitesse de fluide = 0.3 m/s.....	67
Figure 51 pression statique (v=0.1 m/s).....	67
Figure 52 pression statique (v=0.2 m/s)	68
Figure 53 pression statique (v=0.3m/s).....	68
Figure 54 cisaillement de mur (v=0.1 m/s)	69
Figure 55 zoom sur le virage.....	69
Figure 56 cisaillement de mur (v=0.2m/s)	70
Figure 57 cisaillement de mur (v=0.3m/s)	70
Figure 58 Propagation de la température dans la dalle (55°C,45°C)	71
Figure 59 pression statique (55°C,45°C)	71
Figure 60 cisaillement de mur (55°C,45°C).....	72

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1 Différents types de systèmes thermodynamiques [1]	4
Tableau 2 Résumé des transformations réversibles d'un gaz parfait [5].....	9
Tableau 3 Des unités en Système international (S.I) 4.....	10
Tableau 4 Matériaux solides et leurs conductivités 7.....	12
Tableau 5 Matériaux liquides et leurs conductivités [7]	13
Tableau 6 conductivités des gaz 7.....	14
Tableau 7 Les grandeurs physiques de convection thermique 7	17
Tableau 8 Caractéristiques thermo-physiques de quelques matériaux métalliques 17.....	42
Tableau 9 Caractéristiques thermo-physiques de quelques matériaux isolants [17].....	45
Tableau 10 propriétés thermique de l'eau	62
Tableau 11 Propriétés thermique du béton.....	62

TABLE DES MATIERES :

<i>Dédicace</i>	
<i>Remerciements</i>	
Nomenclature	VI
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES TABLEAUX	X
TABLE DES MATIERES	X
Résumé	VI
Introduction générale	1
Chapitre I	2
Notion de thermodynamique	2
I. Notion de thermodynamique	2
I.1 Introduction	2
I.2 Différents types de systèmes	4
I.3 Notion de température	4
I.4 Notion de la pression	6
I.5 Variation d'énergie interne	7
I.5.1 La chaleur (Q)	8
I.5.2 Travail (W)	8
I.6 Unités	10
I.7 Transfert de chaleur	10
I.7.1.1 Transfert de chaleur par conduction	11
I.7.1.2 Transfert de chaleur par convection 7	16
I.7.1.3 Transfert de chaleur par rayonnement 9	20
Chapitre II.....	25
Plancher chauffant	25
II. Plancher chauffant	25
II.1 Introduction	25
II.2 Définition	25
II.3 Les différents composants d'un plancher chauffant 12	27
II.3.1 Dalle	27
II.3.2 Isolation thermique ou acoustique	27
II.3.3 Eléments chauffants	27
II.3.4 Chape	28
II.3.5 Revêtements de sol	28
II.4 Types de plancher chauffant	28

II.4.1 Plancher chauffant hydraulique12, 11.....	28
II.4.1.1 Principe de fonctionnement.....	28
II.4.1.2 Dimensionnement 1013.....	29
II.4.1.3 Le réseau de tube 12.....	30
II.4.1.4 La dalle12.....	31
II.4.1.5 La chape12.....	32
II.4.1.7 Mode de production de chaleur12.....	33
II.4.1.8 Disposition optimale du réseau de tube.....	35
II.5 Les avantages de plancher chauffant.....	35
II.6 Les inconvénients de plancher chauffant.....	36
II.7 Les caractéristiques des tubes usagées dans plancher chauffant.....	36
II.8 Plancher solaire direct (PSD).....	38
II.9 Capteurs solaires thermiques.....	39
II.9.1 Principe.....	39
II.9.2 Les différentes techniques de captation.....	40
II.9.2.1 Capteur solaire plan.....	40
II.9.2.2 Le capteur à tubes sous vide.....	45
II.9.3 Différences entre les capteurs plans et sous vide24.....	46
II.9.4 Principaux paramètres d'un capteur solaire21.....	46
Chapitre III.....	47
Etude Mathématique.....	47
III. Etude mathématique.....	47
III.1 Introduction.....	47
III.2 Généralité.....	47
III.2.1 Equation de conservation de masse.....	47
III.2.2 Equation de conservation de l'énergie.....	47
III.3 Equation générale.....	48
III.4 Calcul des corps de chauffe.....	48
III.5 Capteur solaire plan.....	49
III.5.1 Les différents échanges thermiques.....	49
III.5.1.1 Echange par conduction.....	49
III.5.1.2 Echange par rayonnement.....	50
III.5.1.3 Echange par convection.....	50
III.5.2 Comportement thermique.....	50
III.5.2.1 Les pertes thermiques.....	50
III.5.3 Le rendement du capteur 17.....	51

III.5.4 Influence de la température	52
III.5.4.1 De l'absorbeur sur le rendement du capteur	52
III.5.4.2 D'entrée de fluide caloporteur ¹⁷	52
III.6 Dalle du plancher chauffant	53
III.6.1 Les différents modes de transfert de chaleur	53
III.6.1.1 Echange par conduction.....	54
III.6.1.2 Echange par convection	54
III.6.1.3 Echange par rayonnement	55
III.6.2 Le rendement d'un plancher chauffant.....	56
Chapitre IV.....	57
Résultats et discussions.....	57
IV.1 Introduction.....	57
IV.2 Définition de modélisation numérique	57
IV.3 Présentation du logiciel ANSYS.....	57
IV.3.1 La géométrie (DesignModeler).....	57
IV.3.2 Etude de maillages	59
IV.3.3 Le solveur Fluent	59
IV.3.3.1 Procédure de simulation sur Fluent.....	60
IV.4. Résultats	64
IV.4.1 Cas N°1: (T=45°C).....	64
IV.4.1.1 Distribution de la température	64
IV.4.1.2 Profil de pression statique.....	67
IV.4.1.3 Profil de cisaillement mural.....	69
IV.4.2 Cas N°2: Comparaison entre (T=45°C) et (T=55°C).....	71
IV.4.2.1 Profil de température statique	71
IV.4.2.2 Profil de pression statique.....	71
IV.4.2.3 Profil de cisaillement mural.....	72
IV.5 Interprétation et commentaire	72
IV.5.1 Cas N°1 (T=45°C)	72
IV.5.1.1 Profil de température	72
IV.5.1.2 Profil de pression statique.....	73
IV.5.1.3 Profil de cisaillement de mur	73
IV.5.2 Cas N°2: Comparaison entre (T=45°C) et (T=55°C).....	73
IV.5.2.1 Profil de température	73
IV.5.2.2 Profil de pression statique.....	73
IV.5.2.3 Profil de cisaillement.....	73

IV.6 Conclusion	74
Conclusion générale	77
Références Bibliographiques	79

Résumé

L'objectif principal de ce travail est de se concentrer sur la modélisation et le dimensionnement d'un système de chauffage solaire par dalle chauffante, visant à concevoir un système efficace et adapté utilisant l'énergie solaire comme principale source de chaleur. À l'aide d'outils de modélisation avancés (Ansys Fluent), nous avons analysé le comportement thermique du plancher solaire afin d'optimiser ses performances. Des simulations numériques ont été réalisées pour déterminer les paramètres clés influençant l'efficacité énergétique et le confort thermique, en mettant particulièrement l'accent sur l'effet de la vitesse du fluide dans le plancher et la température d'entrée du fluide. Les résultats obtenus démontrent que la vitesse du fluide impacte directement l'efficacité du transfert de chaleur à travers le plancher chauffant, soulignant qu'une vitesse optimisée peut améliorer la distribution de chaleur dans l'ensemble du système. De plus, la température du fluide à l'entrée joue un rôle important sur l'efficacité du transfert de chaleur à travers le plancher chauffant.

Mots clés : Plancher chauffant, Capteur solaire, Fluide caloporteur , Vitesse de fluide, Température de fluide , Transfert thermique, Pression statique , Cisaillement mural.

Abstract

The main objective of this work is to focus on the modeling and sizing of a solar heating system using heated slabs, aimed at designing an efficient and suitable system using solar energy as the main heat source. Using advanced modeling tools (Ansys Fluent), we analyzed the thermal behavior of the solar floor in order to optimize its performance. Numerical simulations were carried out to determine the key parameters influencing energy efficiency and thermal comfort, with particular emphasis on the effect of fluid velocity in the floor and fluid inlet temperature. The results obtained demonstrate that the fluid speed directly impacts the efficiency of heat transfer through the underfloor heating, highlighting that an optimized speed can improve heat distribution throughout the system. In addition, the temperature of the fluid at the inlet plays an important role on the efficiency of heat transfer through the heated floor.

Key words : Underfloor heating, Solar collector, Heat transfer fluid, Fluid speed, Fluid temperature, Thermal transfer, Static pressure, Wall shear.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو التركيز على نمذجة وتحديد حجم نظام التدفئة الشمسية باستخدام اللوح الساخن، بهدف تصميم نظام فعال ومناسب باستخدام الطاقة الشمسية كمصدر رئيسي للحرارة. باستخدام أدوات النمذجة المتقدمة قمنا بتحليل السلوك الحراري للأرضية الشمسية من أجل تحسين أدائها. تم إجراء عمليات المحاكاة (Ansys fluent) العددية لتحديد العوامل الرئيسية التي تؤثر على كفاءة الطاقة والراحة الحرارية، مع التركيز بشكل خاص على تأثير سرعة السوائل في الأرضية ودرجة حرارة دخول السائل. وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن سرعة السائل تؤثر بشكل مباشر على كفاءة نقل الحرارة من خلال التدفئة تحت الأرضية، مما يسلط الضوء على أن السرعة المحسنة يمكن أن تحسن توزيع الحرارة في جميع أنحاء النظام. بالإضافة إلى ذلك، تلعب درجة حرارة السائل عند المدخل دوراً مهماً في كفاءة نقل الحرارة عبر الأرضية الساخنة.

الكلمات المفتاحية : أرضية ساخنة ، المجمع الشمسي ، سائل نقل الحرارة ، سرعة الموائع ، درجة حرارة الموائع ، النقل الحراري ، الضغط الساكن ، قص الجدران.

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années, nous avons observé que l'utilisation des sources d'énergies fossiles peut être extrêmement nocive pour notre planète, et que les réserves mondiales, limitées, sont en voie d'épuisement. Nous nous sommes donc tournés vers des sources d'énergie alternatives, propres, sans danger pour l'environnement, et inépuisables.

L'énergie solaire est une énergie gratuite, renouvelable et conservatrice de l'environnement. Cette énergie est généralement utilisée sous forme d'électricité ou de chaleur à l'aide des capteurs plans. Le solaire thermique est une technique qui consiste à transformer l'énergie solaire reçue sous forme de rayonnements en une énergie thermique par l'intermédiaire des capteurs solaires. En effet, les installations solaires sont en générale durables et elles n'impliquent des frais que dans leur réalisation. Donc il est important de maîtriser cette technologie et d'investir dans ce sens pour diminuer la consommation des énergies fossiles (hydrocarbures) d'un côté et réduire aussi le rejet des gaz à effet de serre dans l'environnement d'un autre côté.

Le plancher chauffant joue un rôle significatif sur le plan technologique. Il assure une diffusion efficace de la chaleur à la fois verticalement et horizontalement, ce qui le rend parfaitement adaptable aux sources d'énergie renouvelable. Intégré aux systèmes à basse température, il contribue à réduire la consommation énergétique. On observe une tendance croissante à l'adoption de configurations telles que la combinaison pompe à chaleur-plancher chauffant ou capteur solaire thermique-plancher chauffant.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la modélisation et le dimensionnement d'un système de chauffage solaire par plancher dont l'apport d'énergie est assuré par un capteur solaire.

La stratégie envisagée implique de diviser le système de plancher solaire direct (PSD) en deux sous-systèmes plus simples à résoudre, puis de reconstruire le modèle global en prenant en compte les interactions physiques existantes entre le capteur et le plancher.

Le mémoire présenté est structuré en quatre chapitres, une introduction et une conclusion générale

Dans le premier chapitre on s'est intéressé qu'aux généralités et la notion de thermodynamique et les différentes modes du transfert de chaleur.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude théorique du plancher chauffant et le capteur solaire

Le troisième chapitre définir l'étude mathématique du plancher chauffant et le capteur et les différentes équations des trois modes de transfert thermique (conduction, convection, rayonnement) et les équations de conservation.

Le quatrième et le dernier chapitre présente l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de ce travail, leurs interprétations puis leurs validations

Chapitre I
Notion de thermodynamique

I. Notion de thermodynamique

I.1 Introduction

Le terme « thermodynamique » vient de deux mots grecs : thermos (le feu) et dunamicos (la puissance) .

Est en effet une science fondamentale qui a vu le jour à la fin du 17^{ème} siècle, principalement pour répondre aux besoins industriels de l'époque. Denis Papin (Physicien français, 1647-1714) a joué un rôle important dans l'avancement de cette science en conceptualisant l'utilisation de la vapeur d'eau pour produire du travail, ce qui a jeté les bases de ce que nous connaissons aujourd'hui sous le nom de thermodynamique.

Les trois mots fondateurs de la thermodynamique sont chaleur, force et travail. C'est en cherchant à optimiser la transformation de la chaleur en travail que cette science a pris forme. Le terme "thermodynamique" lui-même provient du Grec, signifiant respectivement chaleur et force, ce qui reflète bien le domaine d'étude de cette science.

La thermodynamique peut être décrite de deux manières ou selon deux aspects différents, ce qui montre sa complexité et sa richesse en tant que domaine scientifique essentiel dans de nombreux domaines de l'ingénierie et des sciences physiques.

La thermodynamique apparaît donc comme « la science des transformations de l'énergie, de la matière et des états d'équilibre »

La notion de système thermodynamique étudie les échanges de matière et d'énergie qui ont lieu entre un milieu matériel appelé système et son environnement appelé extérieur. Il n'est pas possible de résoudre un problème de thermodynamique tant que l'on n'a pas défini avec précision ces deux entités [1]

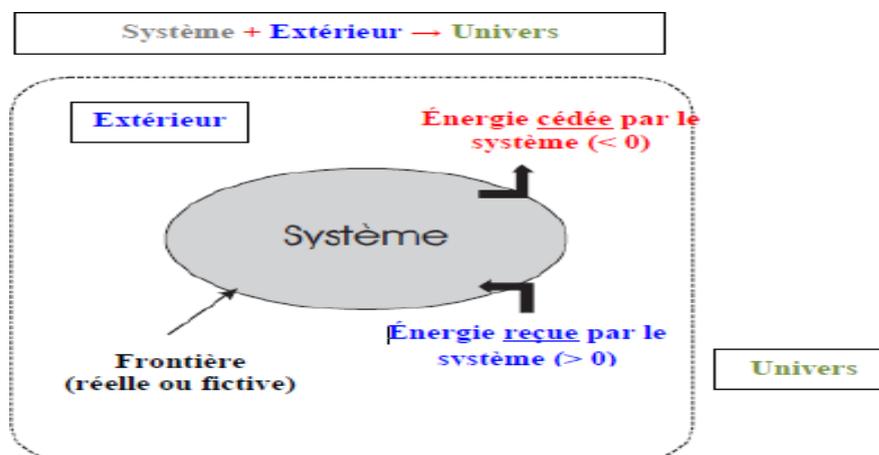


Figure 1 Notion de système thermodynamique[1]

- L'aspect macroscopique

On s'intéresse aux propriétés de la matière de la manière où le système à l'échelle globale ou macroscopique, alors les propriétés sont décrites par des variables d'état macroscopiques (P , V , T , m , ...).

- L'aspect microscopique

On s'intéresse aux propriétés de la matière à l'échelle microscopique ou atomique en utilisant comme variables les grandeurs cinétiques individuelles des molécules ou des atomes (P_i , V_i , E_i ,...)

Selon que l'on considère l'un ou l'autre de ces deux aspects, on distingue alors entre la thermodynamique classique ou statique [1]

a. Thermodynamique classique

La thermodynamique classique est une branche essentielle de la thermodynamique qui se concentre sur l'explication du comportement de la matière ou des systèmes en fonction de leurs variations d'énergie et d'entropie. Elle se caractérise par sa capacité à décrire les états initiaux et finaux des systèmes en évolution, tout en établissant un bilan énergétique du système. Dans la thermodynamique classique, le chemin suivi par la transformation du système peut jouer un rôle crucial. Par exemple, la notion de réversibilité ou d'irréversibilité des transformations est essentielle pour comprendre comment l'énergie et l'entropie évoluent au sein du système. Cela permet d'analyser comment les processus physiques se déroulent et comment les systèmes interagissent avec leur environnement d'un point de vue énergétique[2]

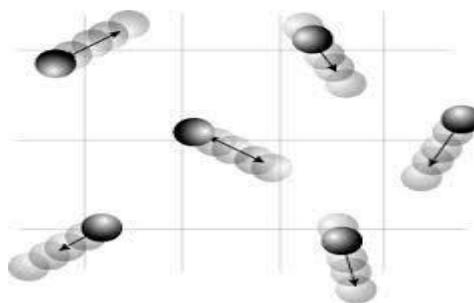


Figure 2 Le mouvement des particules[2]

b. Thermodynamique statique

La thermodynamique classique vise effectivement à expliquer l'origine et la signification des variables macroscopiques telles que la pression (P) et la température (T), ainsi que les concepts clés tels que la chaleur, le travail et l'entropie en les reliant directement au mécanisme de l'agitation moléculaire. En reliant ces grandeurs macroscopiques aux mouvements et interactions des particules au niveau moléculaire, on parvient à mieux comprendre les phénomènes observés à grande échelle.

Grâce à cette approche, on peut distinguer clairement les notions de température, de pression et de chaleur en les reliant à la manière dont les particules individuelles interagissent et échangent de l'énergie au sein d'un système. Cette liaison entre les phénomènes macroscopiques et microscopiques est au cœur de la compréhension de la thermodynamique et permet d'expliquer de façon plus complète les comportements des systèmes thermodynamiques[2].

I.2 Différents types de systèmes

Lors des échanges entre un système et l'extérieur, on distingue les transferts de matière et les transferts d'énergie. Par convention, celle dite du banquier, tout ce que le système reçoit de l'extérieur est compté positivement, tandis que tout ce qu'il cède à l'extérieur est compté négativement.

Ces considérations permettent de définir les trois types de systèmes rencontrés en thermodynamique macroscopique [1]

Tableau 1 Différents types de systèmes thermodynamiques [1]

Nature du système	Fermé	Ouvert	Isolé
Échange de matière	Non	Oui	Non
Échange d'énergie	Oui	Oui	Non
Exemple	Piles électriques	Être vivant	Calorimètre

I.3 Notion de température

La température est une sensation physiologique qui permet de percevoir le chaud et le froid. Il est vrai que les températures ne sont pas des grandeurs directement mesurables, mais sont évaluées à travers des grandeurs thermométriques qui varient en fonction de la température.

Ces grandeurs, telles que la pression d'un gaz, le volume d'un gaz ou d'un liquide, la résistance électrique, la (f.é.m.) d'un thermocouple, servent de base pour mesurer la température. On peut définir plusieurs échelles de température, telles que l'échelle Celsius qui précède toute autre échelle. Toutes les échelles de température sont basées sur des états facilement reproductibles, tels que les points de congélation et d'ébullition de l'eau, qui sont également appelés point de glace (0°C) et point de vapeur (100°C) respectivement[3]

- **Échelles des températures :**

$$\text{Celsius} \quad T(^{\circ}\text{C}) = T(^{\circ}\text{K}) - 273.15 \quad (\text{I-1})$$

$$\text{Fahrenheit} \quad T(^{\circ}\text{F}) = 9/5 T(^{\circ}\text{C}) + 32 = 9/5 T(^{\circ}\text{K}) - 459.67 \quad (\text{I-2})$$

$$\text{Rankine} \quad T(^{\circ}\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459.67 \quad (\text{I-3})$$

La température est mesurée à l'aide d'un thermomètre qui suit une échelle préétablie. Il existe différents types de thermomètres couramment utilisés en pratique, parmi lesquels :

- Les thermomètres à mercure



Figure 3 Thermomètre à mercure[4]

- Les résistances de platine, utilisées dans la plage de température de 200 à 630°C.

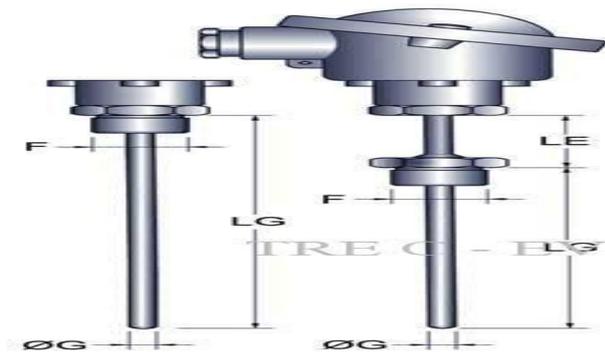


Figure 4 Thermomètre à résistance de platine[4]

- Les thermocouples, qui se basent sur l'effet Seebeck et sont utilisés dans la plage de température de 600 à 1300°C.

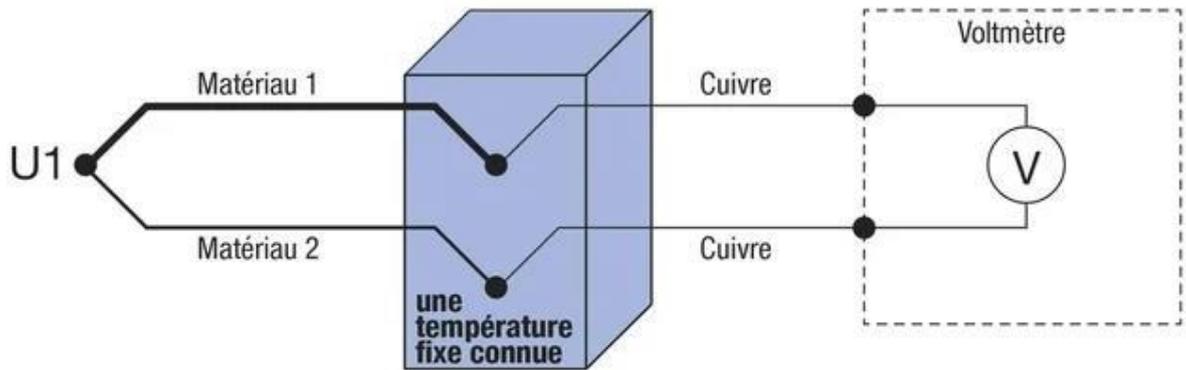


Figure 5 Schéma simplifié d'un thermocouple[4]

- Les résistances à semi-conducteurs en Germanium (Ge), adaptées pour des températures inférieures à 77 K.

Chaque type de thermomètre a ses propres caractéristiques et plages de mesure spécifiques, permettant de mesurer la température dans différentes conditions et gammes de température.

I.4 Notion de la pression

La pression peut être définie comme le rapport entre la force exercée par un fluide sur une surface et la surface sur laquelle cette force agit. On peut également la définir comme le rapport entre l'énergie de pression et le volume concerné.

$$P(\text{pression}) = \frac{F(\text{force exercée})}{S(\text{surface})} \tag{I-4}$$

La force de pression agit de manière perpendiculaire et uniforme sur toute la surface en contact avec le fluide. Cela signifie que la pression exercée par un fluide est répartie de manière égale sur la surface, ce qui peut avoir des implications importantes en physique et en ingénierie, notamment dans le domaine des fluides[3]

$$P_{abs} = P_{rel} + P_{atm} \quad (I-5)$$

P_{abs} : Pression absolue.

P_{rel} : Pression relative.

P_{atm} : Pression atmosphérique.

$$P_i = X_i P_t \quad (I-6)$$

P_i : Pression partielle.

X_i : Fraction molaire.

P_t : Pression totale.

I.5 Variation d'énergie interne

Les échanges d'énergie de la matière peuvent se produire sous deux formes principales : la chaleur (Q) et le travail (W). Ces deux formes d'énergie sont des manifestations de l'agitation des particules constituant la matière, mais elles se distinguent par leur nature et leur organisation.

A tout système fermé est associée une fonction d'état U appelée énergie interne. Au cours d'une transformation d'un état initial à un état final, la variation d'énergie interne est donnée par :

$$\Delta U = W + Q \quad (I-7)$$

Pour une transformation élémentaire dans laquelle les états, initial et final, sont très proches :

$$dU = \partial W + \partial Q \quad (I-8)$$

Pour un système isolé, il n'y a pas d'échange d'énergie avec le milieu extérieur (ni travail mécanique ni chaleur). Par conséquent, l'énergie interne d'un système isolé est conservée :

$$dU = 0 \quad (I-9)$$

Pour le cas d'un système ouvert, il faut prendre en considération le transfert de matière avec le

milieu extérieur dans le bilan d'énergie [2]

$$dU = \partial W + \partial Q + dU_{\text{matière}} \quad (\text{I-10})$$

I.5.1 La chaleur (Q)

La chaleur est une forme d'énergie associée au mouvement désordonné des molécules et des atomes dans une substance. Lorsque les particules d'une substance sont agitées, elles transfèrent de l'énergie thermique aux particules environnantes, augmentant ainsi la température de la substance. Ce transfert d'énergie thermique se produit spontanément du corps à plus haute température vers le corps à plus basse température jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit atteint [2]

$$Q = m c \Delta T \quad (\text{I-11})$$

Q : La chaleur ajoutée (Joule, J)

c : La capacité thermique (Joule/Kg°K)

m : La masse (Kg)

ΔT : Le changement de température (°K)

I.5.2 Travail (W)

Le travail est une forme d'énergie associée à un mouvement ordonné ou à une force appliquée sur un système. Lorsqu'une force est appliquée à un objet et que cet objet se déplace dans la direction de la force, un travail est effectué. Le travail peut être utilisé pour déplacer des objets, soulever des poids, comprimer des ressorts, etc. Le travail peut également être converti en d'autres formes d'énergie, telles que l'énergie cinétique (mouvement) ou l'énergie potentielle (stockée dans un objet en raison de sa position ou de sa configuration).

En thermodynamique, la première loi de la thermodynamique énonce que l'énergie totale d'un système isolé reste constante, et elle peut être convertie d'une forme à une autre (principe de conservation de l'énergie). Ainsi, les échanges d'énergie sous forme de chaleur (Q) et de travail (W) sont des aspects fondamentaux de nombreux processus thermodynamiques et sont souvent utilisés pour analyser et comprendre le comportement des systèmes physiques[4].

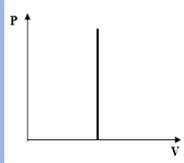
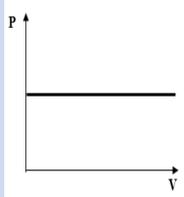
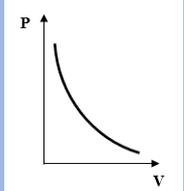
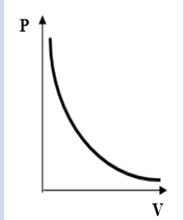
Le calcul du travail (W) échangé entre le système et le milieu extérieur s'effectue par la relation suivante :

$$\partial W = - P_{\text{ext}} dV \quad (\text{I-12})$$

∂W : Le travail élémentaire.

P_{ext} : La pression du milieu extérieur.

Tableau 2 Résumé des transformations réversibles d'un gaz parfait [5]

Transforma-tion	$P = P(V)$	Equation caractéristique	W	Q	ΔU
Isochore $V = \text{Cte}$		$\frac{P}{T} = \text{cte}$	$W = 0$	$Q = C_v(T_f - T_i)$ $C_v = \frac{nR}{\gamma - 1}$	$\Delta U = C_v(T_f - T_i)$
Isobare $P = \text{Cte}$		$\frac{V}{T} = \text{cte}$	$W = -P(V_f - V_i)$	$Q = C_p(T_f - T_i)$ $C_p = \frac{n\gamma R}{\gamma - 1}$	$\Delta U = Q + W$
Isotherme $T = \text{Cte}$		$PV = \text{cte}$	$W = -nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$	$Q = nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$	$\Delta U = 0$
Adiabatique $Q = 0$		$PV^\gamma = \text{cte}$ $TV^{\gamma-1} = \text{cte}$ $TP^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{cte}$	$W_{adiabatique réversible} = \int_{V_i}^{V_f} P dV = \frac{P_0 V_0^\gamma}{\gamma - 1} [V_f^{1-\gamma} - V_i^{1-\gamma}]$	$Q = 0$	$\Delta U = W$

I.6 Unités

La majorité des unités en Système international [S.I] utilisés dans ce cours sont les suivants :

Tableau 3 Des unités en Système international (S.I) [4]

Système	Unité
Temps	Secondes [s]
Température	Kelvin [K]
Pression	Pascal [Pa] ou [N/m ²]
Energie	Joule [J]
Puissance	Watt [W]

I.7 Transfert de chaleur

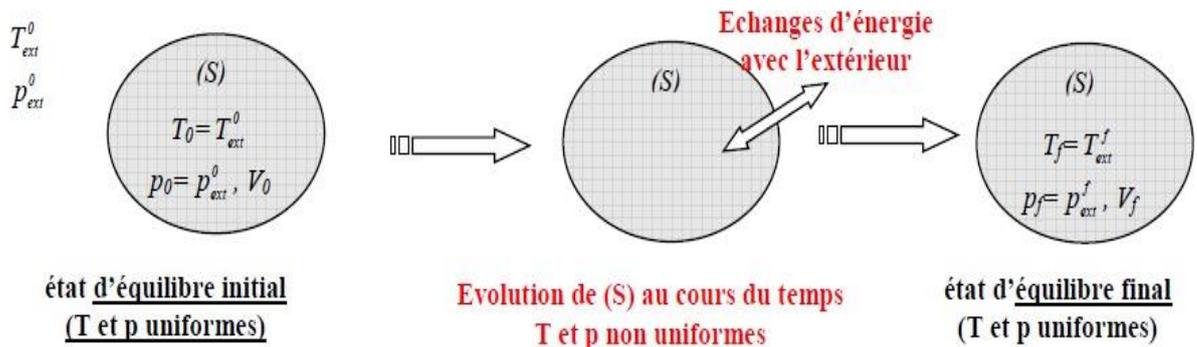


Figure 6 Les étapes de transfert de chaleur[6]

La thermodynamique nous apprend que l'énergie peut être transférée à partir d'interactions entre le système et son environnement, sous forme de chaleur et de travail. Cependant, la thermodynamique ne se préoccupe que de l'état initial et de l'état final du système à l'équilibre, et ne fournit aucune information sur la nature des interactions mises en jeu et sur l'évolution temporelle du système entre les deux états d'équilibre. Un transfert de chaleur au sein d'un système ne se produit que s'il existe des gradients de température entre les différentes parties du système, ce qui implique que celui-ci n'est alors pas à l'équilibre thermodynamique (la température n'est pas uniforme dans tout le système). Au cours de la

transformation du système vers un état d'équilibre final, la température va évoluer à la fois en temps et en espace. Le but de l'analyse des transferts de chaleur est d'identifier quels sont les modes de transfert mis en jeu au cours de la transformation et de déterminer quantitativement comment varie la température en chaque point du système au cours du temps [6]

I.7.1 Les modes de transfert de chaleur

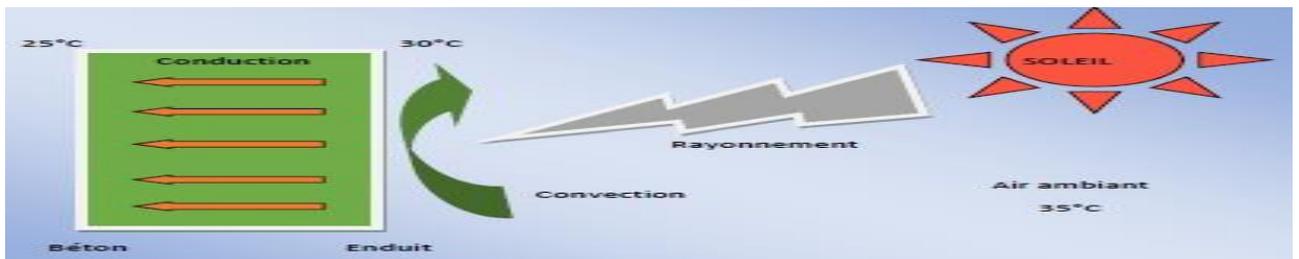


Figure 7 Modes de transfert thermique[7]

I.7.1.1 Transfert de chaleur par conduction

- Définition

Ce processus repose sur des phénomènes microscopiques, tels que l'agitation thermique des particules (atomes ou molécules) ou le mouvement des électrons libres dans le cas des conducteurs électriques. Dans le cas de la conduction thermique, les particules les plus énergétiques, c'est-à-dire celles ayant une énergie cinétique plus élevée en raison d'une température plus élevée, transfèrent leur énergie aux particules moins énergétiques lors de collisions. Cela crée un flux net d'énergie thermique du matériau le plus chaud vers le matériau le plus froid, jusqu'à ce que les températures des deux matériaux se stabilisent à l'équilibre thermique. Dans les solides, en plus de la conduction due à l'agitation thermique des particules, le transfert d'énergie peut également se produire à travers le déplacement des électrons libres à travers le réseau cristallin. Cette conduction électronique contribue à la conductivité thermique des métaux et explique pourquoi les bons conducteurs d'électricité sont généralement de bons conducteurs de chaleur. En résumé, la conduction thermique est un processus fondamental de transfert d'énergie qui repose sur les mouvements microscopiques des particules constitutives d'un matériau et qui joue un rôle crucial dans de nombreux phénomènes thermiques observés dans la nature et dans les applications technologique [8]

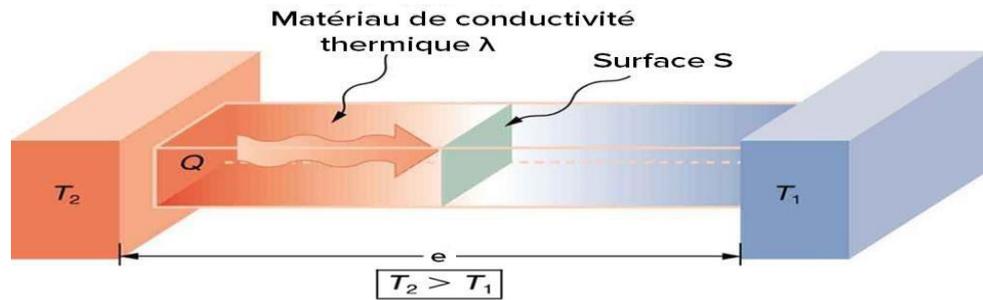


Figure 8 Conduction thermique[8]

- Conductivité thermique des solides

L'expression de la conductivité thermique λ pour les métaux peut être décrite par différentes modèles, mais une des expressions couramment utilisées est l'approximation de Wiedemann-Franz, qui relie la conductivité thermique à la conductivité électrique σ et à la température (T)

$$\lambda = L \sigma T \tag{I-13}$$

Où (L) est le coefficient de Lorenz, une constante universelle. Pour les métaux purs, la conductivité thermique tend à diminuer avec la température. Cela est souvent attribué à une augmentation de la résistance à la diffusion des phonons à des températures plus élevées.

Pour les alliages métalliques, la situation peut être plus complexe en raison des différentes interactions entre les éléments constitutifs de l'alliage. Dans certains cas, la conductivité thermique peut augmenter avec la température en raison de phénomènes tels que l'augmentation de la mobilité des désordres cristallins. Voici quelques matériaux solides et leurs conductivités :[7]

Tableau 4 Matériaux solides et leurs conductivités [7]

Matériaux	Conductivité (W/m/°k)
Granite	3.49
Brique	1.16
Béton	0.8 – 1.28
Fer	78.2
Verre	1
Bois	0.12 – 0.23
Aluminium	205

Il convient de noter que ces expressions sont des approximations et que le comportement réel peut varier en fonction de nombreux facteurs, y compris la composition spécifique de l'alliage ou du métal, la présence d'impuretés, la structure cristalline, etc.

Dans le cas des matériaux non homogènes, tels que les matériaux composites ou poreux, le coefficient de conduction thermique (λ) peut dépendre de la masse volumique de référence (ρ), qui prend en compte la masse totale du matériau ainsi que le volume des vides ou des pores présents à l'intérieur du matériau. L'augmentation du coefficient de conduction avec la température (T) et la masse volumique (ρ) peut être attribuée à plusieurs facteurs :

- Effet de la densification
- Effet des propriétés des composants
- Effet de la convection thermique

- Conductivité thermique des liquides

La conductivité thermique des liquides est en effet influencée par la température, mais en général, elle ne dépend pas significativement de la pression dans des conditions normales de pression atmosphérique. Cependant, il convient de noter que des pressions extrêmes peuvent avoir un impact sur les propriétés thermiques des liquides, mais cela est souvent négligeable dans la plupart des applications courantes.

Tableau 5 Matériaux liquides et leurs conductivités [7]

Matériaux	Conductivité (W/m ^{°k})
L'eau	0.6
Huile	0.1
Ethanol	0.16
Solvant (Toluène)	0.13

Quant à l'eau, sa conductivité thermique présente un comportement particulier par rapport à d'autres liquides. En général, la conductivité thermique des liquides diminue avec l'augmentation de la température, ce qui est principalement attribuable à l'augmentation de l'agitation thermique des molécules, qui perturbe le transfert de chaleur. Cependant, pour l'eau, la conductivité thermique augmente avec la température jusqu'à environ 150°C, puis diminue pour des températures supérieures. Ce comportement inhabituel est dû à des effets

complexes, y compris des changements dans la structure moléculaire de l'eau avec la température.

- Conductivité thermique des gaz

La conductivité thermique des gaz augmente généralement avec la température, en raison de l'augmentation de la vitesse des molécules et donc de la capacité de transmission de la chaleur. Cependant, près de la pression atmosphérique, la conductivité thermique des gaz n'est pas très sensible à la pression. Cela signifie que dans des conditions normales, les variations de pression n'ont pas un effet significatif sur la conductivité thermique des gaz.

À des pressions extrêmement élevées, cet effet peut devenir important. À de telles pressions, les interactions intermoléculaires deviennent plus significatives et peuvent modifier les propriétés thermiques des gaz.

En ce qui concerne la vapeur d'eau, sa conductivité thermique dépend fortement de la pression. Cela est dû à plusieurs facteurs, notamment la densité de la vapeur d'eau et les interactions entre les molécules d'eau à différentes pressions. À des pressions plus élevées, les molécules d'eau sont plus proches les unes des autres, ce qui peut influencer leur capacité à transférer la chaleur[7]. Et dans ce tableau on a quelques conductivités des gaz :

Tableau 6 conductivités des gaz [7]

Gaz	Conductivité(W/m/°k)
Air	0.026
Argon	0.016
Hélium	0.15
Hydrogène	0.18
Méthane	0.03
Nitrogène	0.024

Pour les gaz, la conductivité thermique augmente avec la température et n'est généralement pas très sensible à la pression près de la pression atmosphérique, mais cet effet peut devenir important à des pressions très élevées. Pour la vapeur d'eau, la conductivité thermique est fortement influencée par la pression en raison des interactions entre les molécules d'eau.

- Equation générale de la chaleur

L'énergie thermique est conservée dans un élément de volume dV

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \tag{I-14}$$

Q_1 : Energie qui entre dans le volume élémentaire dV par conduction

Q_2 : Energie produite par le volume élémentaire dV

Q_3 : Energie nécessaire à l'augmentation de la température c'est-à-dire l'augmentation de l'énergie interne du volume élémentaire dV .

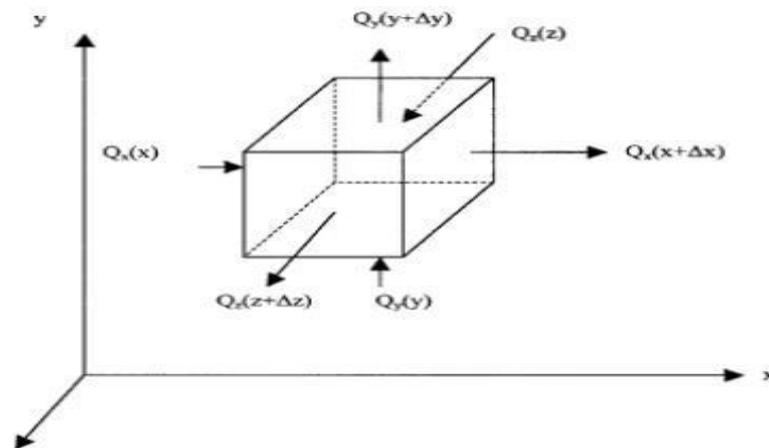


Figure 9 Génération de l'équation générale de la chaleur[7]

- Flux de chaleur échangé par conduction – loi de Fourier

La loi de Fourier, établie par Joseph Fourier en 1822, est fondamentale en thermodynamique et en transfert de chaleur. Elle stipule que la densité de flux de chaleur échangée par conduction à travers un matériau est directement proportionnelle au gradient de température, et inversement proportionnelle à la distance dans la direction normale au gradient. En d'autres termes, elle exprime la relation entre le transfert de chaleur et le gradient de température à travers un matériau. Cette loi est cruciale pour comprendre et modéliser les processus de transfert de chaleur dans diverses applications, allant de la conception des systèmes de refroidissement à la géothermie. Cette loi, s'écrit :

$$\vec{\phi} = -\lambda \vec{g} \vec{r} \vec{a} \vec{d} \vec{T} \tag{I-15}$$

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

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. Ainsi, pour un gradient de température donné, le flux de chaleur sera d’autant plus important que la conductivité sera grande. Pour les matériaux conducteurs de la chaleur, λ sera élevée et inversement sera faible pour les isolants.

Par ailleurs, pour un flux de chaleur donné, le gradient de température sera d’autant plus faible que λ est grand. Pour des flux modérés, on pourra ainsi dans certains cas considérer que la distribution de température à l’intérieur d’un corps de grande conductivité thermique est quasi uniforme [8]

I.7.1.2 Transfert de chaleur par convection [7]

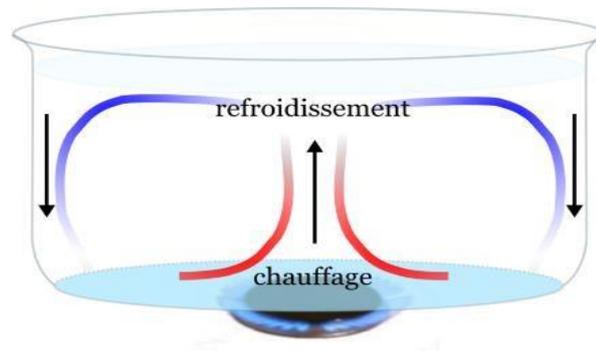


Figure 10 Convection thermique[7]

- Définition

La convection est un mode de transfert de chaleur qui met en jeu, en plus de la conduction, le mouvement macroscopique de la matière. Ce phénomène se produit au sein des milieux fluides en écoulement ou entre une paroi solide et un fluide en mouvement.

Convection naturelle

Les mouvements sont dus aux variations de masse volumique dans un fluide soumis au champ de pesanteur. Les variations de masse volumique peuvent être générées par des gradients de température (l’air chaud est plus léger que l’air froid) et/ou par des gradients de composition.

Convection forcée

Le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur...).

Convection mixte

On parlera de convection mixte lorsque les deux types de convection existent dans un système.

- Paramètres de la convection (couche limite et nombre de Reynolds)

La couche limite thermique se forme près de la surface solide en contact avec le fluide et est directement influencée par la température du solide. Dans cette zone, le fluide acquiert la température de la surface solide à mesure qu'il s'éloigne de celle-ci. Cette couche limite thermique joue un rôle crucial dans le transfert de chaleur par convection, car c'est là que se produit l'échange de chaleur entre la surface solide et le fluide environnant. La couche limite hydrodynamique se forme également près de la surface solide, mais elle est influencée par la vitesse du fluide plutôt que par sa température. Cette couche limite est le résultat de la transition de la vitesse du fluide de celle de la paroi solide à la vitesse libre de l'écoulement loin de l'obstacle. Dans cette zone, les effets de viscosité du fluide sont importants et peuvent influencer la distribution de la vitesse du fluide autour de l'obstacle solide. Dans un problème de convection thermique les grandeurs physiques mises en jeu, dans un problème de convection thermique sont regroupées dans le tableau :

Tableau 7 Les grandeurs physiques de convection thermique [7]

Grandeur	Symbole	Unité S.I	Equation aux dimension
Ecart de température	ΔT	k	θ
Dimension caractéristiques	D	m	L
Vitesse de fluide	U	m/s	$L T^{-1}$
Conductivités thermique	λ	W/m.°k	$M L T^{-3}$
Capacité thermique massique	C	j/kg.°K	$L^2 T^{-2} \theta^{-1}$
Coefficient de transfert thermique convectif	h_v	W/m ² . °k	$M T^{-3} \theta^{-1}$
Masse volumique de fluide	ρ	Kg/m ³	$M L^{-3}$
Viscosité dynamique de fluide	μ	Kg/m.s	$M L^{-1} T^{-1}$

L'épaisseur de cette couche limite va de la paroi verticalement jusqu'aux points où :

$$u = 99 \% U_{\infty} = 0,99 U_{\infty} \quad (\text{I-16})$$

Ainsi, le fluide est divisé en deux zones : la couche limite et l'écoulement libre. La couche limite thermique est définie comme la zone dans laquelle la température passe de celle de la paroi à la valeur suivante :

$$\frac{T_p - T}{T_p - T_{\infty}} = 0,99 \quad (\text{I-17})$$

Il existe une relation entre le coefficient de transfert de chaleur par convection h_v et la conductivité thermique du solide car la couche limite thermique est affectée par la conduction.

Donc, la couche limite thermique et hydrodynamique assurent la transition entre le fluide et le solide. La vitesse de l'écoulement libre ainsi que son régime laminaire ou turbulent sont déterminant dans le calcul de h . Plus l'écoulement est turbulent, mieux le mélange se fait et meilleur est le transfert de chaleur.

La transition entre le régime laminaire et turbulent peut être connue en calculant le nombre de Reynolds critique. Dans le cas d'une paroi plane : [7]

$$Re_c = \frac{U_{\infty} x}{\nu} \quad (\text{I-18})$$

U_{∞} est la vitesse de l'écoulement libre loin de l'obstacle solide et ν est la viscosité cinématique en m^2/s :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{I-19})$$

ρ : est la masse volumique

μ : est la viscosité dynamique.

Dans le cas d'un écoulement dans un tube cylindrique ou sphérique de diamètre D , le nombre de Reynolds est :

$$Re_c = \frac{U_{\infty} D}{\nu} = \frac{\rho U_{\infty} D}{\mu} \quad (\text{I-20})$$

Le nombre de Reynolds représente le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité. Le nombre de Reynolds critique dépend de la rugosité de la surface et du niveau de turbulence de l'écoulement libre. Il est en général de l'ordre de 10^5 à 3.10^6 . Dans les cylindres il est en général égal à 2300. Il caractérise le passage du régime laminaire au régime turbulent, c'est-à-dire que :

Si $Re < Re_c$ le régime est laminaire

Si $Re > Re_c$ le régime est turbulent

En général, la valeur représentative du nombre de Reynolds critique est :

$Re_c = 5.10^5$ pour les plaques planes

$Re_c = 2300$ pour les cylindres et sphères

- Méthodes de résolution d'un problème de convection[7]

Il existe plusieurs méthodes de résolution des problèmes de convection

Méthode analytique

Basée sur les équations différentielles, est un outil mathématique puissant pour valider les résultats expérimentaux et obtenir une compréhension précise de la couche limite. Elle offre la possibilité d'obtenir des solutions exactes. Alternativement, on peut utiliser une approche intégrale avec des profils de vitesse et de température donnés pour résoudre les équations, offrant une autre méthode pour étudier les phénomènes de convection.

Méthode dimensionnelle

Elle permet de diriger les expériences en donnant des tendances et des relations entre les différentes grandeurs.

Méthode analogique

Elle permet l'extension des solutions d'un mode de transfert à un autre.

Méthode empirique ou expérimentale

Des relations sont déduites et vérifiées à partir des mesures expérimentales. Ces relations sont guidées par les méthodes analytique et dimensionnelle

- Flux de chaleur échangé par convection – loi de Newton

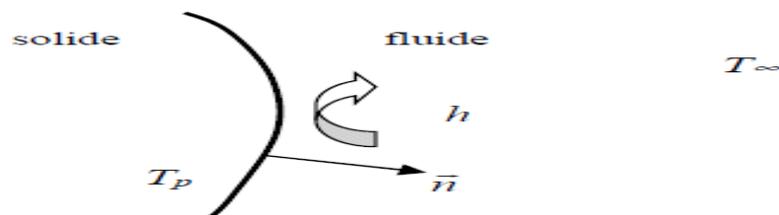


Figure 11 Flux de chaleur échangé par convection[7]

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 ($T_p > T_\infty$) :

$$\varphi = h_v S (T_p - T_\infty) \quad (\text{I-21})$$

h_v est une grandeur positive appelée coefficient d'échange convectif. Ce coefficient dépend de nombreux paramètres (fluide, type d'écoulement, état de surface...) et est donc extrêmement difficile à quantifier précisément

I.7.1.3 Transfert de chaleur par rayonnement[9]

- Définition

Le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps séparés par du vide ou un milieu semi-transparent se produit par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques, donc sans support matériel. Le phénomène d'émission d'un corps correspond à la conversion d'énergie matérielle (agitation des électrons constituant la matière dont l'intensité dépend de la température) en énergie radiative. Le phénomène d'absorption est la conversion inverse. Ces affirmations traitent des principes fondamentaux de la thermodynamique et de la physique des rayonnements.

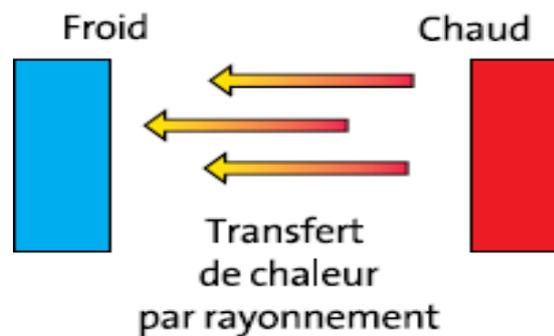


Figure 12 Rayonnement thermique[9]

- Émission et absorption d'énergie par rayonnement électromagnétique

Tout corps matériel émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique, et il peut également absorber de l'énergie de cette manière. Cela signifie que lorsque les particules dans un objet sont excitées (par exemple, par la chaleur), elles émettent de l'énergie sous forme de photons, qui constituent le rayonnement électromagnétique.

- Émission et absorption comme conversion d'énergie

Lorsqu' un corps émet du rayonnement électromagnétique, cela correspond à la conversion d'énergie matérielle, généralement sous forme d'agitation thermique des particules (comme les électrons), en énergie radiative. Plus la température du corps est élevée, plus l'intensité de l'émission est grande. À l'inverse, lorsqu'un corps absorbe du rayonnement électromagnétique, il convertit cette énergie radiative en énergie interne, augmentant ainsi sa température. En résumé, ces affirmations mettent en évidence le lien entre l'agitation thermique des particules dans un corps matériel, l'émission et l'absorption de rayonnement électromagnétique, ainsi que le transfert de chaleur par rayonnement, qui sont des concepts clés en thermodynamique et en physique des rayonnements.

- Distribution spectrale du rayonnement électromagnétique

Le champ électromagnétique peut être décomposé en une série de rayonnements élémentaires monochromatiques, chacun caractérisé par une longueur d'onde λ . Le flux surfacique radiatif φ représente la somme, sur l'ensemble du spectre de longueurs d'onde ($\lambda \in [0, \infty[$) du flux surfacique monochromatique $d\varphi_\lambda$ définis sur des intervalles infiniment petits $[\lambda, \lambda + d\lambda]$:

$$\varphi = \int_{\lambda=0}^{\lambda \rightarrow \infty} d\varphi_\lambda \tag{I-22}$$

Dans la description corpusculaire de la lumière, l'émission ou l'absorption d'un photon est associée à un changement d'état énergétique d'un système quantique. Au cours de ce processus, le système perd ou gagne une quantité d'énergie égale à celle du photon.

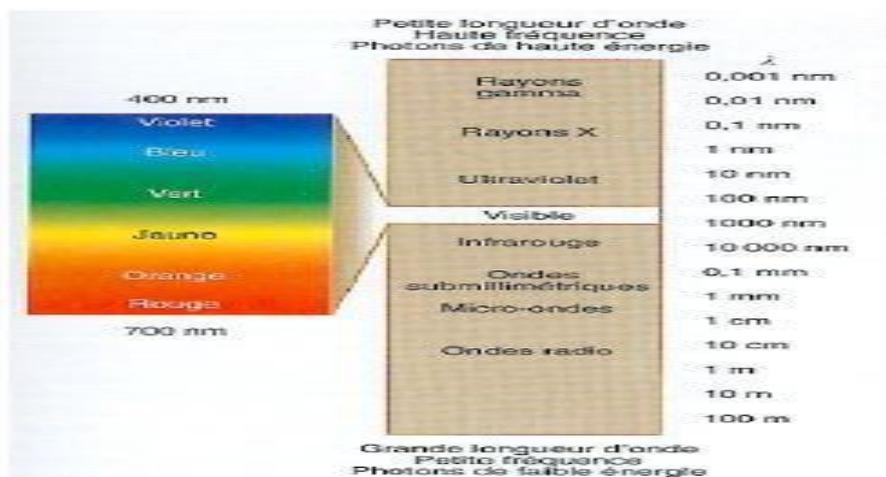


Figure 13 Distribution spectrale du rayonnement électromagnétique

A chaque domaine de fréquence est associé un type de transition de l'état énergétique de la matière :

Rayonnement Hertzien

De longueur d'onde 10^3 m à 10^{-3} m (basses fréquences ou grandes longueurs d'onde, faible énergie) : produit par la circulation de courants alternatifs dans un conducteur (ondes radio...)

Rayonnement Infrarouge

De longueur d'onde $100 \mu\text{m}$ à $0.8 \mu\text{m}$: principalement lié aux mouvements des atomes dans les molécules excitées par l'agitation thermique. Le rayonnement IR est ainsi essentiellement un rayonnement thermique (application courante : caméras IR). Nous verrons que lors du phénomène d'émission pour un corps noir (corps qui absorbe intégralement le rayonnement qu'il reçoit) à la température T en équilibre thermodynamique, la longueur d'onde la plus représentée vérifie la loi de Wien :
 $\lambda_m(T) \cdot T = 2898 \mu\text{m K}$ (I-23)

Ainsi, pour des températures de quelques centaines de degrés Kelvin, la longueur d'onde caractéristique se situe dans l'infrarouge

Rayonnement visible

De longueur d'onde 400 à 750 nm

Un corps noir porté à 5000 K (le soleil) émet de la lumière visible dans toutes les longueurs d'onde et apparaît blanc, avec une longueur d'onde caractéristique $\lambda_m \sim 0,6$ qui se situe dans le visible (jaune).

- Rayonnement Ultra-Violet (haute énergie).
- Rayons X : collision d'électrons accélérés (très haute énergie).
- Rayons gamma : produits lors des réactions nucléaires (très haute énergie)

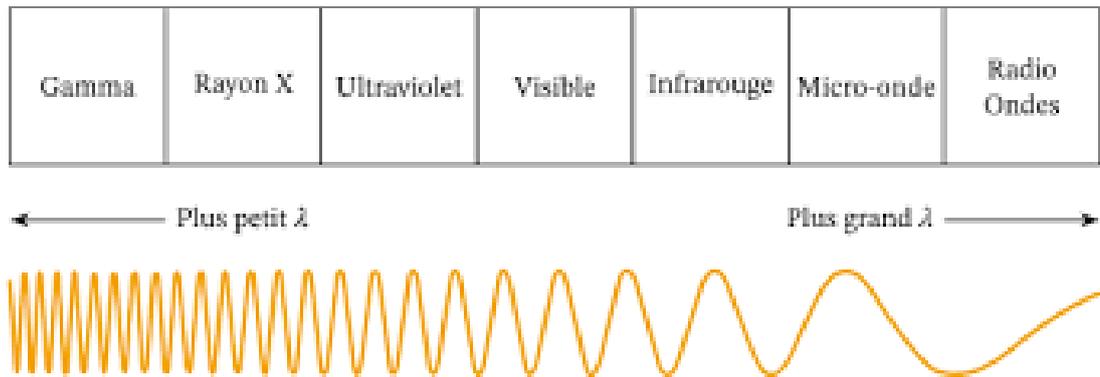


Figure 14 Fiche explicative de rayonnement[9]

- **Distribution directionnelle du rayonnement électromagnétique**

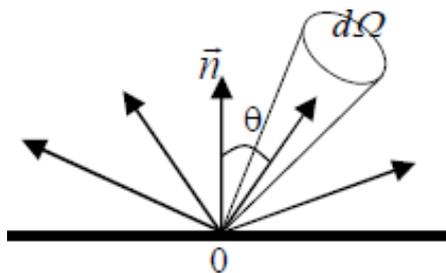


Figure 15 Distribution directionnelle du rayonnement électromagnétique

Outre la distribution spectrale du rayonnement électromagnétique, il existe également une distribution directionnelle, à laquelle est attachée la notion d'angle solide.

- Dans le cas où l'émission est indépendante de θ : le rayonnement isotrope
- Dans le cas où l'émission est indépendante de O: le rayonnement homogène

- **Flux de chaleur échangé par rayonnement – loi de Stéfane Boltzmann**

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 Stéfane.

Ex :

Corps de petite dimension placé dans une enceinte fermée

$$q_r = \epsilon \sigma (T_p - T_c)^4 \tag{I-24}$$

ε : Emissivité du corps ($0 < \varepsilon \leq 1$)

σ : Constante de Stéfane ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

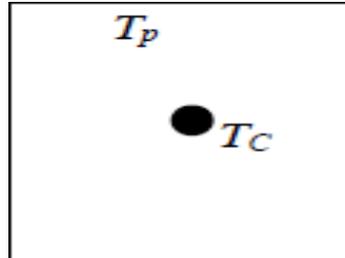


Figure 16 Flux de chaleur échangé par rayonnement[9]

Chapitre II
Plancher chauffant

II. Plancher chauffant

II.1 Introduction

Le chauffage par les planchers est un procédé ancien qui utilisait majoritairement un tube acier sous forme de grilles chauffantes noyées dans l'épaisseur de la dalle pleine[10].

Sur le plan historique, Trois époques ont particulièrement marqué l'histoire du revêtement de sol d'un point de vue historique. Périodes de forte activité, telles que l'époque de l'Empire romain, les années 1960-1980 et la période après 1980. Plancher chauffant moderne a commencé à être utilisé dans les années 1980. Le concept de chauffage par le sol existe depuis plus de 2000 ans (III-II siècles av. J.-C. Qui signifie "Jesus Christ" . En Europe, les Romains furent les pionniers de l'utilisation des hypocaustes. un dispositif de chauffage au sol qui utilise de l'air chaud se déplaçant à travers des tubes. À peu près à la même époque, les premiers saunas coréens font leur apparition en Asie. Ces systèmes ils montrent un exemple initial de l'utilisation d'un tiers pour Conduire un chauffage central pour un bâtiment, en plus d'installer un système de chauffage central.

La période entre 1960 et 1980 est marquée par la redécouverte d'un plancher chauffant en train de se transformer en un réseau de tubes métalliques à ce stade immergés dans le revêtement plein contenant de l'eau chaude qui chauffe le sol à une température plus de 35°C. (A haute consommation énergétique et peu performant, problèmes lors de l'installation et de l'entretien) et difficile à ajuster.

La promulgation de l'Arrêté du 23 juin 1978, marque le début d'une nouvelle phase. L'apparition d'un plancher chauffant basse température.

Ce procédé permet d'obtenir un niveau requis de confort et de ne pas excéder 28°C de température au sol. Il a mis un terme à suggèrent l'utilisation de tubes en métal pour résoudre les problèmes liés à la pose d'un tube métallique. matériaux artificiels et fournissent des premières opportunités de contrôle .[11]

II.2 Définition

Le plancher chauffant est un système de chauffage des bâtiments par le sol qui permet de réguler la température intérieure de l'espace à chauffer en utilisant des systèmes de contrôle basés sur les équations qui régissent les différents phénomènes de transfert de chaleur (convection, conduction et radiation). Cette méthode vise à garantir un confort thermique pour les occupants.

Les planchers chauffants, souvent appelés "underfloor radiant heating" en anglais, fonctionnent en grande partie par rayonnement thermique. Cela signifie que la chaleur est émise par le plancher chauffant et rayonne vers le haut, chauffant ainsi l'air et les objets environnants dans la pièce. Ce mode de transfert de chaleur est différent de la convection, où la chaleur est transférée par le déplacement de l'air, et de la conduction, où la chaleur est transférée directement à travers un matériau.

Le principal avantage des planchers chauffants radiants est qu'ils peuvent fournir une chaleur uniforme et confortable dans toute la pièce, sans les courants d'air parfois associés aux systèmes de chauffage par convection.

Pour concevoir et contrôler efficacement un système de plancher chauffant, il est essentiel de comprendre les principes de transfert de chaleur, notamment la convection, la conduction et la radiation, et d'utiliser des systèmes de contrôle appropriés pour maintenir une température confortable dans l'espace chauffé[11]

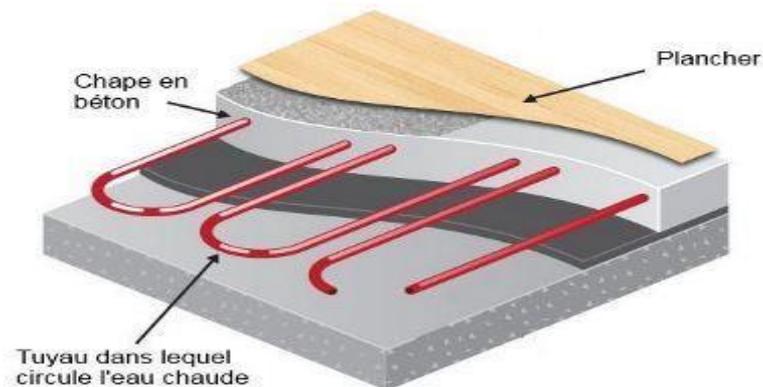


Figure 17 Plancher chauffant[12]

C'est fascinant de voir comment les principes du chauffage par le sol remontent à une époque aussi ancienne que le Néolithique. Les premières méthodes utilisaient effectivement le rayonnement de la chaleur à partir de pierres chauffées par le feu. Cette technique simple mais efficace permettait de maintenir une certaine chaleur dans les habitations malgré les températures extérieures froides.

De nos jours, bien sûr, les techniques de chauffage par le sol se sont considérablement développées et sont devenues plus sophistiquées. Les tuyaux à travers lesquels circule un fluide chaud sont un exemple courant de système de chauffage par le sol. Ce fluide chaud peut être de l'eau chaude ou un liquide caloporteur, et il transmet la chaleur au sol, qui à son tour rayonne la chaleur dans la pièce. Les résistances électriques placées sous la chape sont

une autre méthode, où l'électricité est utilisée pour chauffer directement le sol. Ces systèmes modernes offrent un contrôle plus précis de la température et peuvent être plus économes en énergie que les méthodes traditionnelles. Cependant, l'idée fondamentale de chauffer l'espace à partir du sol, en exploitant le rayonnement thermique, reste la même qu'il y a des milliers d'années.

II.3 Les différents composants d'un plancher chauffant[12]



Figure 18 Les différents éléments d'un plancher chauffant[12]

C'est une description complète des composants d'un système de plancher chauffant. Voici un résumé de chaque élément :

II.3.1 Dalle

La dalle est la base structurelle du plancher chauffant. Généralement en béton armé, elle est coulée directement sur le sol ou sur une surface de support pour stabiliser le plancher bas de la construction. Elle sert également de base pour le déploiement des autres composants du système de chauffage et des réseaux d'électricité, d'eau et de chauffage.

II.3.2 Isolation thermique ou acoustique

Cette couche d'isolation est placée entre la dalle et les éléments chauffants pour réduire les pertes de chaleur vers le sol. Elle peut également contribuer à réduire la transmission du bruit entre les étages[12]

II.3.3 Eléments chauffants

Il s'agit du cœur du système de plancher chauffant. Ce peut être un réseau de tubes à travers lesquels circule de l'eau chaude, reliés à un système de chauffage central, ou des résistances électriques placées sous la chape.

II.3.4 Chape

La chape est une couche de mortier appliquée sur la dalle pour aplanir, niveler ou surfacer la surface du plancher. Elle permet également de protéger les éléments chauffants et de fournir une surface de support pour les revêtements de sol.

II.3.5 Revêtements de sol

Enfin, les revêtements de sol tels que le carrelage, le parquet, l'ardoise, le granito, la moquette, etc., sont installés sur la chape pour compléter le système de plancher chauffant et fournir la surface de marche et de décoration de la pièce.

Ensemble, ces composants créent un système de chauffage efficace et confortable qui offre une chaleur uniforme et agréable dans les espaces habitables[12]

II.4 Types de plancher chauffant

Il existe deux types de plancher chauffant :

- Plancher chauffant hydraulique.
- Plancher chauffant électrique.

II.4.1 Plancher chauffant hydraulique[12], [11]

II.4.1.1 Principe de fonctionnement

Dans les systèmes de plancher chauffant hydraulique, un fluide caloporteur circule à travers un réseau de tubes installés sous la chape. Ce fluide peut être de l'eau seule ou un mélange d'eau et d'antigel comme le propylène glycol pour éviter le gel dans les régions où les températures peuvent descendre en dessous de zéro.

Les boucles de tuyaux de chauffage sont généralement disposées en serpentins sur un isolant thermique pour limiter les pertes de chaleur vers le sol. Ensuite, la chape, qu'elle soit humide ou sèche, est appliquée au-dessus des tubes pour fournir une surface de finition et pour transférer la chaleur émise par les tubes vers l'environnement de la pièce.

Le transfert de chaleur se produit principalement par conduction à travers les parois des tubes vers la chape environnante. Une fois que la chape est chauffée, elle transfère ensuite la chaleur à l'air ambiant par convection et par rayonnement, assurant ainsi un chauffage uniforme et confortable de la pièce.

Ce système de plancher chauffant hydraulique offre plusieurs avantages, notamment une distribution uniforme de la chaleur, un confort accru et une efficacité énergétique, car l'eau peut être chauffée à des températures relativement basses pour maintenir une température confortable dans la pièce.



Figure 19 Réseau de tubes d'un plancher chauffant hydraulique[12]

II.4.1.2 Dimensionnement [10][13]

Température ambiante du local

Le plancher chauffant fonctionne de manière similaire à un radiateur de grande taille placé au sol. La chaleur, diffusée par rayonnement, Elle se propage de manière uniforme dans l'ensemble de la pièce. Avec l'élimination des zones froides, ce système de chauffage garantit le même confort à 18°C qu'à une autre forme de système de chauffage à 20°C (protection thermique).

Température superficielle du plancher

Un décret fixe la température maximale du sol à 28°C en toutes zones.

L'emplacement idéal pour maintenir une température intérieure de 19°C (DTU 65.8).

La norme européenne indique des températures légèrement plus élevées, 29°C et jusqu'à 35°C.

Pour les régions périphériques ayant une température intérieure de 20°C.

Température du fluide chauffant

Le choix de la température de départ du fluide est relativement délicat. La température de départ va influencer :

- La température superficielle du sol

- Les émissions de chaleur provenant du plancher chauffant sont élevées, ce qui affecte la longueur de la boucle et donc la marche.

En toutes circonstances, la température maximale du fluide ne doit pas dépasser 50°C(DTU 65.8) Si la température de surface du sol dépasse 28°C, il est conseillé d'abaisser la température initiale du fluide ou d'augmenter la chute de température du fluide.

Inertie

Le chauffage par le sol est bénéfique (à la fois en termes de confort et de consommation d'énergie) dans les espaces situés au-dessus des zones chauffées, non soumis à des apports de chaleur importants et variables (tels que les occupants, la lumière du soleil, etc.), et utilisés en continu (tels que les logements).

Pas de pose

Le " Pas " désigne la distance en centimètres entre deux tubes du panneau, généralement comprise entre 10 et 30 cm. Il peut toutefois varier au sein d'une même grille si les différentes zones de la pièce requièrent des quantités de chaleur différentes.

II.4.1.3 Le réseau de tube [12]

Dans les systèmes de plancher chauffant hydraulique modernes, les tubes à travers lesquels circule le fluide caloporteur sont généralement fabriqués à partir de dérivés de polyéthylène. Voici quelques-uns des types de tubes couramment utilisés :

PEX (polyéthylène réticulé)

Le PEX est un matériau flexible et durable qui est largement utilisé dans les installations de chauffage par le sol en raison de sa résistance à la corrosion et de sa capacité à supporter des températures élevées.

PEX-AI-PEX

Ce tube composite est constitué d'une couche de PEX, d'une couche d'aluminium et d'une autre couche de PEX. Cette construction renforcée offre une meilleure résistance à la pression et une meilleure conductivité thermique



Figure 20 Tube en PEX-Al-PEX[12]

PERT (Polyethylene Raised Temperature)

Le PERT est spécialement conçu pour le transport d'eau à haute température et haute pression. Il offre une excellente résistance à la chaleur et une bonne flexibilité.

Pour limiter la formation de boues dans les réseaux de tubes de plancher chauffant hydraulique, la plupart des installations sont équipées d'une barrière anti-oxygène (BAO) intégrée dans les tubes. Cette barrière empêche l'oxygène de pénétrer dans le système, ce qui réduit les réactions d'oxydation et la formation de boues causées par la corrosion des différents éléments de l'installation. La présence d'oxygène dans l'eau est en effet l'une des principales causes de corrosion, et les tubes en polyéthylène sans barrière anti-oxygène laissent souvent pénétrer de petites quantités d'oxygène. Cette corrosion peut entraîner la formation de boues qui peuvent obstruer les conduites et réduire l'efficacité du système de chauffage. En utilisant des tubes avec une barrière anti-oxygène, on peut considérablement réduire ce problème et prolonger la durée de vie du système de chauffage.

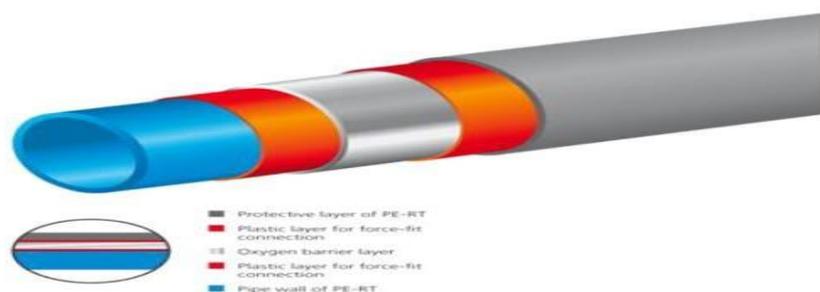


Figure 21 Tube en PERT muni d'une barrière anti-oxygène[12]

II.4.1.4 La dalle[12]

La dalle est un élément essentiel dans la construction des planchers chauffants, car elle fournit une base solide pour les autres composants du système. Voici quelques points clés à retenir sur la dalle :

Matériau

La dalle est généralement en béton armé, un matériau robuste et durable qui offre une bonne résistance aux charges et aux contraintes.

Coulée

La dalle est coulée directement sur le sol ou sur une surface de support, comme des poutres ou des fondations, selon la conception de la construction. Elle est souvent coulée en une seule pièce pour assurer une continuité structurelle.

Épaisseur

La dalle est généralement assez épaisse pour fournir une stabilité structurelle adéquate. L'épaisseur peut varier en fonction des exigences de charge et des spécifications du projet, mais elle est souvent de plusieurs centimètres.

Base pour les autres composants

La dalle sert de base au déploiement d'isolants et des réseaux d'électricité, d'eau et de chauffage. Ces composants sont installés sur la dalle avant la pose du revêtement de sol final dans les pièces habitables de la construction

La dalle constitue la fondation sur laquelle repose l'ensemble du système de plancher chauffant, fournissant une base solide et stable pour les autres composants du système. Elle joue un rôle crucial dans la création d'un environnement confortable et fonctionnel dans les espaces habitables de la construction.

II.4.1.5 La chape[12]

La chape est une couche de mortier appliquée sur la dalle pour aplanir, niveler ou surfacer la surface du plancher. Selon la technique utilisée pour la couler et les spécifications du projet, la chape peut prendre différentes appellations. Voici quelques-uns des types de chape courants :

Chape traditionnelle

Aussi appelée chape maigre ou chape traditionnelle, elle est composée de ciment, de sable et d'eau. Cette chape est souvent utilisée dans les constructions neuves ou lors de rénovations où une surface plane et durable est nécessaire.

Chape fluide

Aussi connue sous le nom de chape liquide ou chape autonivelante, elle est composée d'un mélange de ciment, de sable, d'eau et d'additifs spéciaux qui lui confèrent une fluidité élevée.

Cette chape est coulée sous forme liquide et s'auto-nivelle pour former une surface plane et lisse.

Chape anhydrite

Également appelée chape à base de sulfate de calcium, elle est composée de sulfate de calcium anhydre, de sable, d'eau et d'additifs. Cette chape offre une excellente conductivité thermique et est souvent utilisée dans les systèmes de chauffage par le sol.

Chape isolante

Cette chape est spécialement conçue pour offrir une isolation thermique supplémentaire. Elle est généralement composée de matériaux légers tels que des granulats d'argile expansée ou de la vermiculite, mélangés à du ciment et de l'eau.

Chape fibrée

Cette chape contient des fibres de renforcement, telles que des fibres de polypropylène, qui améliorent la résistance et la durabilité de la chape. Elle est souvent utilisée dans les zones soumises à des contraintes mécaniques élevées.

Chaque type de chape a ses propres avantages et inconvénients, et le choix du type de chape dépend souvent des exigences spécifiques du projet, y compris le type de revêtement de sol ultérieur, la présence de réseaux à noyer sous la chape et les conditions environnementales.

II.4.1.6 Isolation thermique entre l'élément chauffant et la dalle[12]

Les matériaux les plus courants pour l'isolation thermique dans un plancher chauffant sont les plastiques alvéolaires :

- polystyrène expansé haute densité (PSE)
- polystyrène extrudé (XPS)
- mousse de polyuréthane rigide (PUR)

Sont également utilisés :

- les panneaux de laine minérale conformes aux normes NF B 20-001 et 20-109 (revêtement de sol en pose collé)
- les panneaux plastifiés (solutions sols secs ou humides)

II.4.1.7 Mode de production de chaleur[12]

Il existe plusieurs méthodes pour chauffer de l'eau, et chacune a ses propres avantages et inconvénients. Voici quelques-unes des méthodes couramment utilisées :

Chaudière

Les chaudières sont des appareils qui chauffent l'eau à l'aide de combustibles tels que le gaz naturel, le fioul ou le bois. L'eau chauffée peut être utilisée pour le chauffage central, la production d'eau chaude sanitaire ou d'autres applications.

Pompe à chaleur (PAC)

Les pompes à chaleur utilisent l'énergie présente dans l'air, le sol ou l'eau pour chauffer l'eau. Elles sont plus efficaces que les chaudières traditionnelles car elles utilisent principalement de l'énergie renouvelable et produisent moins d'émissions de CO₂.

Géothermie

Les systèmes géothermiques utilisent la chaleur emmagasinée dans le sol pour chauffer l'eau. Ils peuvent utiliser des pompes à chaleur géothermiques pour extraire la chaleur du sol ou des systèmes de chauffage direct par géothermie pour chauffer l'eau à l'aide de l'eau souterraine



Figure 22 Système géothermique[12]

Chauffe-eau solaire

Les chauffe-eau solaires utilisent des panneaux solaires pour chauffer l'eau à l'aide de l'énergie solaire. L'eau chauffée peut être stockée dans un réservoir pour une utilisation ultérieure.

Chacune de ces méthodes présente des avantages en termes d'efficacité énergétique, de coûts d'exploitation et d'impact environnemental, et le choix de la méthode dépend

souvent des besoins spécifiques du projet, de la disponibilité des ressources locales et des préférences individuelles[12]



Figure 23 Chauffe-eau solaire[12]

II.4.1.8 Disposition optimale du réseau de tube :

En 2010, un scientifique nommé Robert Bean a mené une étude comparative de trois configurations possibles d'un système de chauffage hydraulique par le sol. Les configurations en question sont illustrées dans la figure ci-dessous :

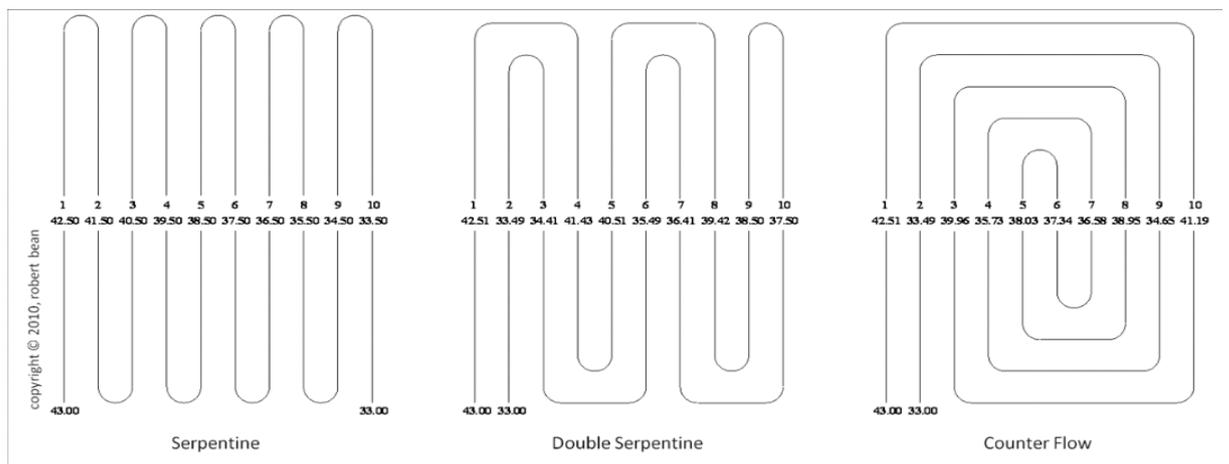


Figure 24 3 configurations possibles pour la disposition du réseau de tube[12]

II.5 Les avantages de plancher chauffant

- . Débarrasse les pièces des radiateurs muraux inefficaces, peu pratiques et inesthétiques.
- . Permet d'économiser de 15 à 50 % sur les factures de chauffage
- . N'entraîne pratiquement aucun coût d'entretien
- . Empêche la poussière de s'accumuler derrière les radiateurs et de circuler dans la pièce - idéal pour les personnes souffrant d'asthme ou d'autres problèmes respiratoires.
- . Élimine les acariens des moquettes.

- . Le chauffage par le sol fournit une chaleur rayonnante à 70 %, offrant un climat plus confortable que les radiateurs.
- . La masse thermique d'un système de chauffage par le sol fournit de la chaleur plus longtemps après l'arrêt que les radiateurs traditionnels.
- . Évapore rapidement les éclaboussures d'eau dangereuses sur les carreaux de la salle de bains et de la cuisine.
- . Le chauffage par le sol fonctionne silencieusement, sans les grincements et les gémissements des vieux tuyaux en cuivre[14]

II.6 Les inconvénients de plancher chauffant

- . Le chauffage par le sol peut prendre plus de temps à chauffer que les radiateurs traditionnels.
- . Il faut faire attention à certains meubles avec le chauffage par le sol, il est recommandé de placer les pianos sur l'isolation.
- . L'installation ultérieure d'un chauffage par le sol peut s'avérer coûteuse et peu pratique.
- . Le chauffage par le sol doit être bien conçu, il est difficile de modifier ou d'adapter le système une fois qu'il est installé[14].

II.7 Les caractéristiques des tubes usagés dans plancher chauffant

Tubes en cuivre

La principale caractéristique du cuivre utilisé dans les réseaux de canalisations réside dans sa résistance et sa durabilité exceptionnelles. Ce matériau sert également de substitut au plomb, aujourd'hui strictement interdit en raison des risques pour la santé. Les tuyaux en cuivre garantissent également la sécurité incendie. IL existe deux type de tuyau en cuivre:

Les tubes en cuivre recuit sont fournis sous forme de bobines et peut être facilement plié à froid, Il est disponible en couronnes annulaires permettant des longueurs allant de 2 à 50 mètres. Ce type est généralement préféré pour les systèmes de tuyauterie dissimulés et peut être enterré, enveloppé dans une couche de protection contre l'eau ou placé sous une chape de béton.

Mais les tubes en cuivre durci sont fournis sous forme de barres. Leur aspect esthétique permet des installations visibles qui seront fixées à l'aide de colliers. Ce type de cuivre nécessite un cintrage à chaud pour assouplir la zone où le pliage doit être effectué. Il est commercialisé sous forme de barres rigides permettant des longueurs allant de 1 à 5 mètres.



Figure 25 Tube en cuivre

Tube en PER

Un tube en polyéthylène réticulé de haute densité (PER), connu internationalement sous le nom de PEX, a de multiples fonctions. Il peut être utilisé pour l'alimentation en eau chaude et en eau froide, ce qui en fait un matériau qui peut facilement remplacer le cuivre en raison de son coût nettement inférieur. Sa grande résistance à la corrosion et à l'entartrage sont des avantages majeurs des tubes PER. Ils sont disponibles dans une large gamme de diamètres et de couleurs, ce qui permet d'identifier rapidement les conduites d'eau chaude et d'eau froide. Ce matériau semi-rigide convient aussi bien aux installations sanitaires qu'aux systèmes de chauffage. Cependant, le PER est un matériau semi-rigide qui convient aux installations sanitaires et aux systèmes de chauffage. En revanche, Contrairement au cuivre, le tube PER ne permet pas de montage en surface et n'offre que des angles de courbure limités[13]

Tube en multicouche

Un tube multicouche combine les avantages d'un matériau métallique et du PER. Comme son nom l'indique, il se compose de trois couches successives. La couche la plus interne est en PEX, ce qui permet d'éviter la formation de tartre et la corrosion. La deuxième couche est en aluminium, ce qui assure la résistance et la flexibilité de la flexion. La troisième et dernière couche recouvre cette partie métallique d'un matériau PER traité pour résister aux rayons UV. Ainsi, le tube multicouche offre un compromis parfait entre les tubes en PVC et les tubes en cuivre.[15]



Figure 26 Tube en multicouche[15]

II.8 Plancher solaire direct (PSD)

Le terme "plancher solaire direct" fait référence à un système de chauffage utilisant des panneaux solaires thermiques intégrés dans un plancher pour capter l'énergie solaire et la convertir en chaleur. Contrairement aux systèmes de chauffage solaire plus traditionnels qui chauffent un fluide caloporteur circulant dans des tuyaux, le plancher solaire direct utilise directement le plancher comme élément de stockage thermique et de distribution de la chaleur. Ce système peut être utilisé pour chauffer des espaces résidentiels ou commerciaux de manière efficace et écologique en exploitant l'énergie renouvelable du soleil.

La conception du chauffage par plancher vise à fournir à l'intérieur des locaux la puissance calorifique requise pour compenser les pertes de chaleur et maintenir une température souhaitée. Cela se fait grâce à une ou plusieurs grilles en tube de cuivre ou à l'eau qui circule dans chaque local. Dans l'industrie du chauffage, les radiateurs sont fabriqués de manière standardisée selon les normes, ce qui se manifeste par des catalogues de choix en fonction de la puissance nécessaire. Il est nécessaire de concevoir et de dimensionner les grilles chauffantes pour un plancher en prenant en compte les caractéristiques des locaux, les données thermiques et hydrauliques de l'installation projetée, tout en respectant la réglementation de ne pas dépasser la température maximale de surface de 28°C en tout point du plancher, dans le cas contraire l'expérience à montrer que la plante des pieds ne pouvait plus évacuer une quantité de chaleur physiologiquement nécessaire au bon équilibre de l'organisme[16]

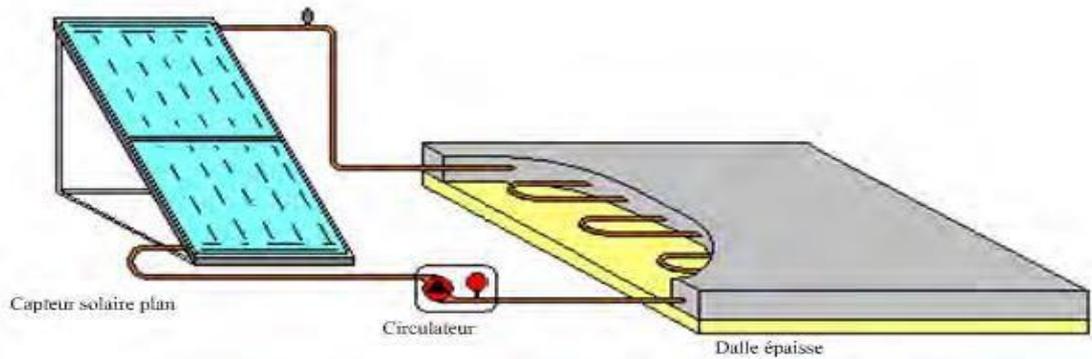


Figure 27 Système PSD[16]

II.9 Capteurs solaires thermiques

Un capteur solaire thermique qu'on appelle aussi le panneau solaire est un dispositif conçu pour convertir la lumière du soleil en chaleur utilisable. Il est composé de plusieurs éléments, notamment un absorbeur, un système de circulation de fluide caloporteur et une couverture transparente pour minimiser les pertes de chaleur. L'absorbeur, généralement fabriqué en métal ou en matériau composite, absorbe la lumière solaire et la transforme en chaleur, qui est ensuite transférée au fluide caloporteur circulant à travers le capteur. Ce fluide chaud peut ensuite être utilisé pour chauffer de l'eau domestique, alimenter un système de chauffage central ou fournir de la chaleur à d'autres applications résidentielles, commerciales ou industrielles[17]

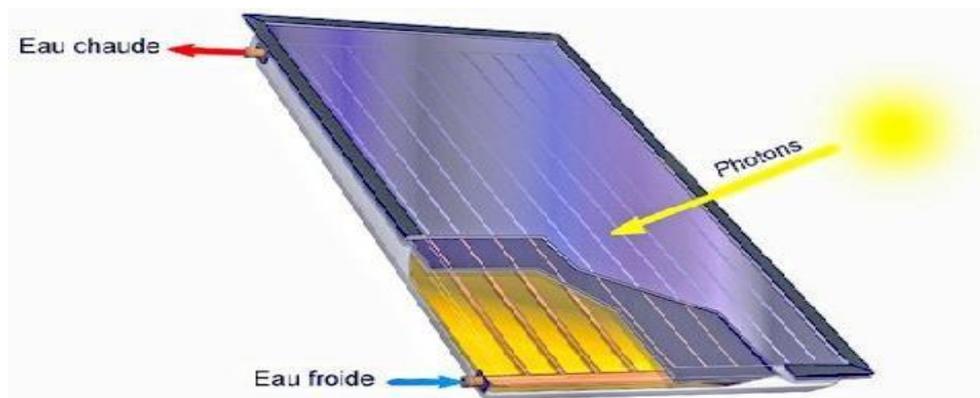


Figure 28 Capteur solaire thermique[16]

II.9.1 Principe

Les capteurs thermosolaires ont pour fonction de transformer, avec le meilleur rendement possible, l'énergie électromagnétique du rayonnement solaire en énergie thermique, à un niveau de température convenable pour l'utilisateur, et à transmettre cette chaleur au fluide

caloporteur. Dans ce but, l'énergie solaire est absorbée par un corps, l'absorbeur, dans lequel circule le fluide caloporteur.

Autour de l'absorbeur, divers dispositifs sont placés pour diminuer les pertes de chaleur qui ne seraient pas transmises au fluide et pour augmenter le niveau de température [18]

II.9.2 Les différentes techniques de captation

La captation directe du rayonnement solaire peut être réalisée à l'aide de panneaux solaires plans réceptifs, équipés de manière adéquate et appelés insolateurs, ou à l'aide de miroirs ou de lentilles, qui modifient la direction des rayons solaires et généralement les concentrent avant d'être converti en énergie utilisable, (captation indirecte)[19]

II.9.2.1 Capteur solaire plan

Il existe différents types de capteurs solaires plans pour chauffer les liquides. Leur choix dépend généralement de la température désirée, et des conditions climatiques pendant la période d'utilisation du système. Les technologies les plus courantes sont : les capteurs à liquide plans sans vitrage et les capteurs à liquide plans vitrés.[20]

a - Capteur solaire plan sans vitrage

Ils sont généralement fabriqués à partir de plastique polymère, sans revêtement sélectif, sans cadre ni isolation au fond. Ils sont installés sur un toit ou sur un support en bois.

Cependant, ces capteurs abordables entraînent des pertes de chaleur vers l'environnement qui augmentent rapidement avec la température de l'eau, notamment dans les zones ventées. Les capteurs sans vitrage sont fréquemment employés dans des domaines nécessitant une alimentation énergétique à basse température.[20]

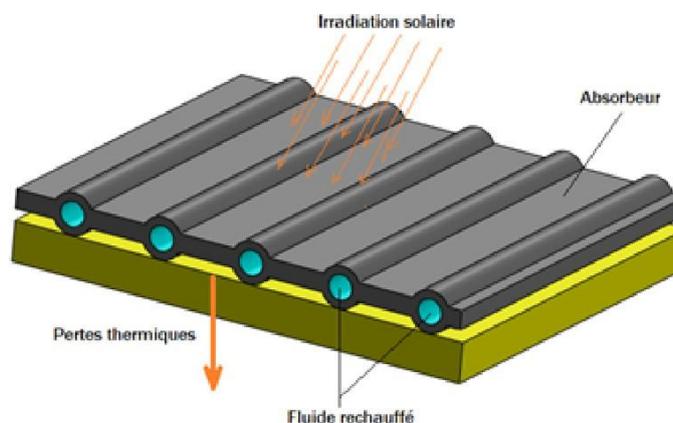


Figure 29 Capteur solaire sans vitrage[16]

b - Capteur solaire plan vitré

C'est le modèle le plus courant. Il se compose d'une boîte isolée couverte par un vitrage. À l'intérieur, est placé l'absorbeur, qui est un serpentin (tuyau ondulé) contenant le fluide à chauffer.

Dans ce type de modèle, l'absorbeur est protégé des pertes thermiques par un matériau isolant (le plus souvent, de la laine de roche).

Le verre, quant à lui, est en verre trempé très résistant (intempéries, grêle), très transparent, et spécialement conçu pour avoir un faible niveau de réflexion afin d'emmagasiner un maximum de chaleur.[20]

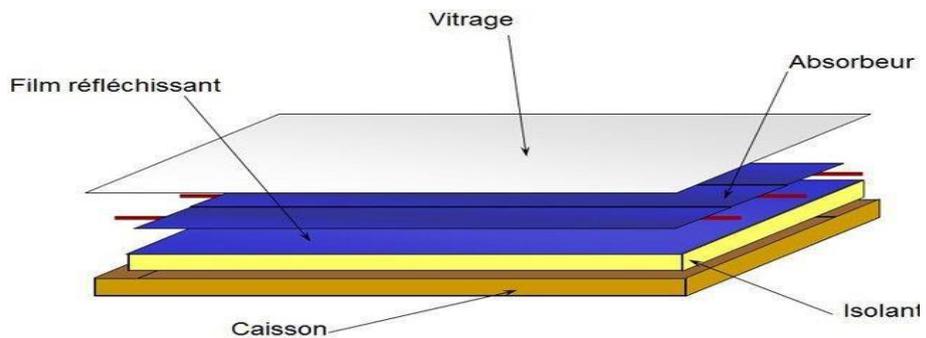


Figure 30 Capteur plan vitré[16]

- Les éléments de construction

Le capteur plan est constitué d'une surface absorbante, protégée à l'avant par une couverture transparente et à l'arrière par une bande isolante. Sous l'absorbeur, circule le fluide caloporteur dans des conduites soudées à la plaque absorbante

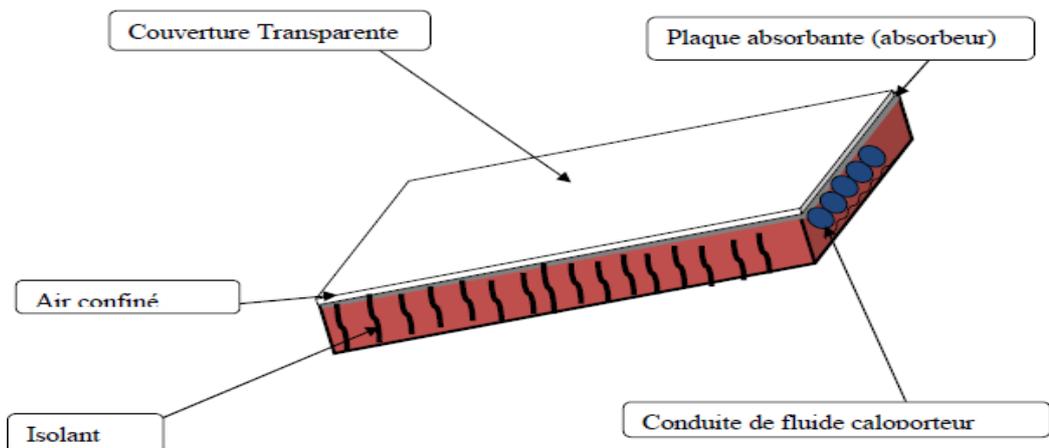


Figure 31 Schéma des éléments de construction d'un capteur plan[21]

Surface absorbante

L'absorbeur est le composant qui permet de transformer le rayonnement solaire en chaleur et de transférer l'énergie thermique ainsi produite à un fluide caloporteur.

Son rôle consiste à capter le rayonnement solaire incident, à le transformer en chaleur et à la transmettre à un fluide caloporteur, tout en réduisant les pertes. En règle générale, l'absorbeur consiste en une plaque en métal plane dont la couche superficielle qui s'ouvre sur le soleil doit présenter un coefficient d'absorption maximal (environ 0,95). Seules les teintes sombres sont capables d'atteindre des valeurs aussi élevées, le noir étant l'idéal[22]

Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique, soit plastique.

Pour les métaux, on emploie généralement du cuivre, de l'aluminium ou de l'acier inoxydable. L'utilisation de matériaux plastiques offre quelques bénéfices (le coût, la mise en place...) importants, mais il a des inconvénients énormes (déformabilité, conductivité médiocre...)[17]

Tableau 8 Caractéristiques thermo-physiques de quelques matériaux métalliques [17]

Métal	Conductivité Thermique (W /m.°K)	Chaleur Massique (J/Kg.°K)	Masse Volumique (Kg/m ³)	Diffusivité (10 ⁻⁶ m ² /s)
cuivre	384	398	8900	108
Acier inoxydable	14	460	7800	4
Aluminium	204	879	2700	86

En pratique, on emploie généralement une feuille de cuivre ou d'aluminium de 0.2 mm d'épaisseur avec des variantes de 0.15 à 0.3 mm.

Les canaux contenant le fluide caloporteur ne doivent pas être trop espacés ; ainsi, la transmission de la chaleur de l'absorbeur vers le fluide caloporteur se fait plus efficacement. Dans la pratique, on choisit généralement un intervalle de 100 à 120 mm entre les tubes. Cela représente un compromis entre une évacuation optimale de la chaleur, une faible inertie thermique et une utilisation réduite des métaux tout en préservant des coûts de fabrication bas. Il est fortement nécessaire d'assurer un bon contact entre les feuilles de l'absorbeur et les tubes du fluide caloporteur afin de réduire le plus possible la résistance thermique de contact[9]

Le fluide caloporteur[17]

Le fluide caloporteur a pour mission de transporter la chaleur de la source à l'utilisation. Le fluide idéal devrait avoir les propriétés suivantes :

- Etre assez fluide pour diminuer les pertes de charge
- Avoir d'une capacité thermique élevée par unité de volume afin de transporter la chaleur avec un débit minimal possible
- Ne pas être corrosif pour les différentes parties du circuit
- Ne pas porter atteinte à l'environnement en cas de fuites

Le fluide le plus utilisé dans les installations de chauffage est l'eau. Ce fluide, à une grande capacité thermique, est à bon marché et ne nuit pas à l'environnement.

Néanmoins, l'eau peut être corrosive pour certains matériaux (fer, aluminium, par exemple), gèle à 0°C et bout à 100°C à la pression d'un bar et à 140°C à 4 bars.

Par rapport à l'eau, l'air a les avantages suivants [23] :

- Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été
- Pas de problème de corrosion (l'air sec)
- Toute fuite est sans conséquence
- Le système à mettre en oeuvre est plus simple et plus fiable

Mais son utilisation entraîne les inconvénients suivants :

- L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux
- Le produit masse volumique - capacité calorifique, est faible ($\rho \cdot C_p = 1225 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$) pour l'air, contre $4,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ pour l'eau.
- Les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau

La couverture transparente

La couverture est la surface à travers laquelle le rayonnement solaire non concentré est admis dans le capteur.

Elle permet de réduire sensiblement les fuites thermiques convectives et radiatives par les faces du capteur.

Son utilisation s'impose lorsque la température de fonctionnement est élevée par rapport à la température ambiante.

L'intérêt d'une couverture transparente habituelle pour le rayonnement solaire est d'autant plus grand que la température de fonctionnement du convertisseur est élevée. C'est donc pour des températures dépassant 70°C qu'on peut envisager d'installer un double vitrage afin d'accroître le rendement. Les couvertures transparentes habituelles sont pour la plupart en verre en simple ou double vitrage, trempé ou non, armé ou non, mais on peut trouver aussi des produits plastiques de synthèse ayant la propriété de réaliser l'effet de serre tel que le polycarbonate, le polyméthacrylate ou bien le polyester armé [17],[21]

Tableau II.2 : Propriété de surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaque au rayonnement infrarouge[17]

Matériau	Facteur de transmission solaire (%)	Masse volumique (Kg /m ³)	Chaleur massique (J/Kg°k)	Conductivité thermique (W/m°K)	Dilatation thermique (K ⁻¹)
Verre	85-92	2700	840	0,93	0,9.10 ⁻⁵
Polycarbonate	82-89	1200	1260	0,2	6,6.10 ⁻⁵
Polyméthacrylate	89-92	1200	1460	0,2	7.10 ⁻⁵
Polyester armé	77-90	1400	1050	0,21	3,5.10 ⁻⁵

L'isolant thermique

Il est essentiel de réduire les pertes liées à la transmission vers l'extérieur du capteur afin d'optimiser ses performances. Afin de réduire ces pertes de chaleur du système, il est nécessaire d'isoler ses parois. Vers l'avant c'est le plus souvent une lame d'air qui fait office d'isolant, Il n'est pas nécessaire que son épaisseur soit trop importante pour limiter les par convection. On choisira une distance comprise entre 2 et 3 cm.

Il existe une multitude des produits isolants qui peuvent être adaptés à l'isolation arrière et latérale. On place une ou plusieurs couches d'isolant du type, laine de verre, polystyrène, mousse de polyuréthane ,etc [17]

Tableau 9 Caractéristiques thermo-physiques de quelques matériaux isolants [17]

Métal	Conductivité thermique (W/m. K)	Chaleur massique (J/Kg. K)	Masse volumique (Kg/m ³)	Diffusivité (10 ⁻⁷ m ² /s)
Mousse de polyuréthane	0,029	1600	30	6
Laine de verre	0,036	840	20	10,7
Polystyrène expansé	0,040	1500	40	13,3
Laine de roche	0,040	840	40	11,9

Le coffre

Le coffre fabriqué couramment en aluminium ou en bois, enferme l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques.

II.9.2.2 Le capteur à tubes sous vide

Il se compose d'une série de tubes à vide qui isolent l'absorbeur. Le rôle du vide dans ces tubes est de réduire les pertes de chaleur par convection et conduction thermique. L'intensité du vide est cruciale pour interrompre le mécanisme de transfert de chaleur.

Ils chauffent plus rapidement, ce qui permet une meilleure utilisation des courtes périodes d'ensoleillement, et ils permettent une meilleure utilisation de la lumière du matin et du soir. Les capteurs à tubes sous vide pouvant atteindre des températures extrêmes de plus de 150°C, le fluide caloporteur est spécialement développé pour ce type d'installation [20]

**Figure 32** Capteur à tubes sous vide[20]

II.9.3 Différences entre les capteurs plans et sous vide[24]

Le capteur sous vide, de par le vide qui entoure l'absorbeur, sera moins influencé par la température extérieure par rapport au capteur plan qui lui sera en contact au travers de la vitre et du caisson avec la température extérieure. Les capteurs sous vide ont un rendement optique certes, inférieur aux capteurs plans.

II.9.4 Principaux paramètres d'un capteur solaire[21]

Le fonctionnement d'un capteur solaire est caractérisé par de nombreux paramètres dont les plus importants sont :

- Le rendement

L'efficacité d'un capteur correspond à la proportion entre l'énergie extraite par le fluide caloporteur pendant une période donnée et le produit de l'irradiation solaire pendant la même période, sur sa surface, dans les conditions de l'état stationnaire.

- La superficie

La superficie d'entrée est l'aire maximale de la section droite du rayonnement pouvant atteindre le volume contenant l'absorbeur, directement ou par réflexion

- La stagnation

La stagnation correspond à l'état d'un capteur ou d'un système où le fluide caloporteur ne circule pas. En général, on parle de température de stagnation lorsque le fluide caloporteur est inerte et que les déperditions thermiques sont équivalentes au flux du rayonnement solaire incident.

- Orientation et inclinaison

Les capteurs solaires sont orientés et inclinés suivant l'utilité que l'on désire donner au système. En général, Il est nécessaire que les capteurs soient orientés vers le sud dans l'hémisphère nord, car le soleil suit une trajectoire apparente Est-sud-ouest chaque jour. En revanche, dans l'hémisphère sud, il est nécessaire de les orienter vers le nord [21]

Chapitre III
Etude Mathématique

III. Etude mathématique

III.1 Introduction

La simulation du n'importe quel phénomène physique nécessite le passage par les lois mathématiques, pour un problème thermique on se trouve face aux équations fondamentales de conservation de masse (équation de continuité), de quantité de mouvement (2ème loi de Newton) et de l'énergie (1er principe de la thermodynamique).

III.2 Généralité

Soit un volume de contrôle V traversé par quantité physique Φ . On désigne par $J \rightarrow$ la densité de flux de Φ , par diffusion. Pour établir le bilan Φ dans V, il est nécessaire de déterminer les différents flux entrants et sortants ainsi que la variation temporelle de Φ dans V [25]

III.2.1 Equation de conservation de masse

Si R_1 est la production par unité de volume et $\frac{\partial}{\partial t}(\rho)$ dx dy dz la variation par unité de volume et de temps, alors le bilan de matière de l s'écrit en tenant compte du flux net de diffusion :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) = R_1 - \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho Ux) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho Uy) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho Uz) \right] - \left[\frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} \right] \quad (III-25)$$

Ainsi :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) = R_1 - \text{div}(\rho \vec{U}) - \text{div}(J \rightarrow) \quad (III-26)$$

Cette équation devient :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \text{div}(\rho \vec{U}) = R_1 + \text{div}(j) \quad (III-27)$$

Cette dernière équation traduit la conservation de masse.

III.2.2 Equation de conservation de l'énergie

Soit h l'enthalpie massique et R la production d'énergie par unité de temps et de volume. En se référant à l'équation (III-3), l'équation de l'énergie s'écrit comme : [26]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = R - \text{div}(J \rightarrow) - \text{div}(\rho \vec{U} h) \quad (III-28)$$

Ou encore :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \text{div}(\rho \vec{U} h) = R - \text{div}(J \rightarrow) \quad (III-29)$$

Où $h = C_p T$

D'après la loi de FOURIER[8], la densité de flux J est donné par :

$$J \rightarrow = - \lambda \overrightarrow{\text{grad}} T$$

L'équation (III-5) devient alors :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) + \text{div} (\rho \vec{U} C_p T) = R + \text{div} (\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T) \tag{III-30}$$

L'équation (III-6) traduit la conservation de l'énergie.

III.3 Equation générale

Les équations (III-3) et (III-6) présentent la même forme ; il devient alors intéressant de donner une équation qui permet de s'adapter aux différents bilans cités ci-dessus.

En effet, si Φ est une quantité physique quelconque, alors l'équation de conservation de Φ s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \Phi) + \text{div} (\rho \vec{U} \Phi) = \text{div} (\tau \overrightarrow{\text{grad}} \Phi) + S \tag{III-31}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} (\rho \vec{U}) = 0 \text{ qui représente l'équation de la continuité}$$

III.4 Calcul des corps de chauffe

La puissance d'un élément chauffant non revêtu dépend principalement de sa forme, de ses dimensions et de la différence de température entre le fluide chauffant et l'air ambiant. Cette relation peut être représentée par l'équation générale du transfert de chaleur.

$$Q = K S (t_h - t_i) \tag{III-32}$$

Q : cession de chaleur horaire [kcal/h]

S : surface du corps de chauffe [m²]

t_h: Température du fluide chauffant [°C]

t_i : Température intérieure [°C]

K : coefficient de transmission calorifique total [kcal/m²h°C]

La relation entre la puissance du corps de chauffe et la différence de température (t_h – t_i) , (on parle de la courbe caractéristique du radiateur dite pente de la puissance) se traduit de la façon la plus simple par l'équation :

$$q = q_n \left(\frac{\Delta t}{\Delta t_n} \right)^m \tag{III-33}$$

q_n: Puissance thermique définie par les normes

Δt_n: Différence de température (t_h– t_i) correspondant aux conditions définies dans les normes.

Δt : Différence de température (t_h– t_i) quelconque différente de Δt_n

D'après les essais effectués, l'exposant m, pour des valeurs moyennes de température d'eau chaude comprise entre 40 et 100°C, prend les valeurs suivantes :

- Radiateur (corps de chauffe à éléments) et corps de chauffe plats : m = 4/3
- Corps de chauffe tubulaire de tous genre (y compris tuyaux à ailettes): m = 1,25

- Convecteurs suivant construction et habillage : $m = 1,25$ à $1,45$

Pour les corps de chauffe à éléments, l'exposant $4/3$ avait déjà été déterminé par des essais systématiques de puissance effectués sur des modèles en fonte.

Cette relation entre la puissance et la température est également valable par les nouveaux modèles [27].

III.5 Capteur solaire plan

III.5.1 Les différents échanges thermiques

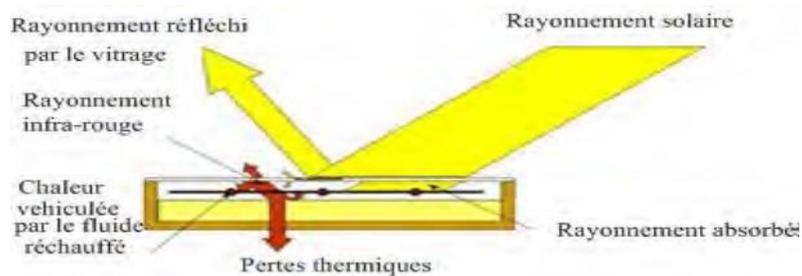


Figure 33 Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan[16]

III.5.1.1 Echange par conduction

C'est un phénomène naturel grâce auquel la chaleur traverse la matière par excitation thermique des molécules.

La densité du flux thermique à travers une surface élémentaire « ds », est liée au gradient de température, (loi de Fourier) [8]

$$\varphi_c = -\lambda \text{ grad}(T) \tag{III-34}$$

φ_c : Flux de chaleur transmis par conduction

λ : Conductivité thermique du milieu.

Le signe négatif dans l'équation de Fourier reflète le deuxième principe de la thermodynamique : le flux de chaleur va dans le sens inverse du gradient de température, c'est-à-dire que le flux se déplace de la température la plus haute vers la plus basse. Donc, ce signe indique qu'un gradient négatif de température (diminution de la température dans la direction positive de x) multiplié par le signe(-) donne un flux de chaleur positif dans la direction positive de x.

La puissance qui traverse une surface "S" est alors donnée par :

$$\varphi_c(w) = \frac{\lambda S(T_1 - T_2)}{e} = h_c S(T_1 - T_2) \tag{III-35}$$

$$h_c = \frac{\lambda}{e} \tag{III-36}$$

e : épaisseur de la paroi

h_c : Coefficient de transfert thermique par conduction.

III.5.1.2 Echange par rayonnement

Le rayonnement ne nécessite pas l'existence d'un support matériel. Il se propage dans l'espace, comme dans tout type de milieu.

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stephan-Boltzmann [8], [9]

$$q_r = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{III-37})$$

q_r : Densité de flux de chaleur émis par le corps.

ε : Emissivité thermique du matériau.

T : Température absolue du corps.

σ : Constante de Stéfane-Boltzmann évaluée à $5,6.10^{-8} \text{ W/m}^2.\text{k}^4$

III.5.1.3 Echange par 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 [7]

$$\varphi_v = h_v S(T_m - T_\infty) \quad (\text{III-38})$$

φ_v : Flux de chaleur transmis par convection.

h_v : Coefficient de transfert de chaleur par convection.

S : Aire de la surface de contact solide/fluide.

T_m : Température de surface du solide.

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide.

III.5.2 Comportement thermique

Le bilan thermique par unité de surface d'un capteur s'écrit :

$$p_p = p_u + p_a + p_s \quad (\text{III-39})$$

p_p : Puissance absorbée à la surface de l'absorbeur.

p_u : Puissance utile.

p_a : Puissance perdue par convection et conduction et rayonnement vers l'arrière du capteur et par convection, conduction et rayonnement vers la face avant du capteur.

p_s : Puissance stockée sous forme de chaleur ; vive dans les différents éléments du capteur.

Pour un capteur à inertie thermique négligeable ou dans le cas d'un régime thermique permanent, $p_s = 0$.

III.5.2.1 Les pertes thermiques

Les pertes thermiques résultent de la différence de température entre l'absorbeur et le milieu environnant. Elles se produisent à travers les trois modes de transfert de chaleur et peuvent être classées en trois catégories : les pertes vers l'avant, les pertes vers l'arrière et les pertes latérales[28][29].

- Les pertes vers l'avant sont dues à la convection et aux échanges radiatifs entre les différentes parties du capteur.

Le coefficient des pertes vers l'avant est défini comme suit :

$$U_{av} = \frac{1}{R_i + R_e} \tag{III-40}$$

La résistance intérieure R_i s'opposant aux transferts entre la surface de captation (la surface de l'absorbeur) et la surface intérieure du verre est :

$$R_i = \frac{1}{h_{vpv} + h_{rpv}} \tag{III-41}$$

La résistance extérieure R_e s'opposant aux transferts convectif et radiatif entre la surface extérieure du verre et l'environnement est :

$$R_e = \frac{1}{h_{vva} + h_{rvw}} \tag{III-42}$$

Il en résulte que :

$$U_{av} = \left[\frac{1}{h_{vva} + h_{rvw}} + \frac{1}{h_{vpv} + h_{rpv}} \right]^{-1} \tag{III-43}$$

- Les pertes par l'arrière (par le fond) du capteur sont dues à la conduction par l'isolation arrière

Le coefficient des pertes par l'arrière est moins important que celui des pertes par l'avant, le capteur étant bien isolé à l'arrière.

L'expression évaluant ce coefficient est :

$$U_{arr} = \frac{\lambda_i}{e_i} \tag{III-44}$$

λ_i et e_i étant respectivement la conductivité thermique et l'épaisseur de l'isolant.

- Le coefficient des pertes thermiques latérales est inférieure que celui des pertes arrière, (la surface latérale du capteur étant peu importante

$$U_{lat} = \frac{\lambda_i S_{lat}}{e_i S_w} \tag{III-45}$$

S_{lat} : Surface latérale du capteur.

S_c : Surface du capteur.

- Le coefficient de pertes thermiques global vers l'extérieur est la somme des trois coefficients

$$U_g = U_{av} + U_{arr} + U_{lat} \tag{III-46}$$

III.5.3 Le rendement du capteur [17]

Le rendement d'un capteur solaire dépend de :

- la température d'entrée et de sortie du fluide caloporteur,
- le flux solaire incident,

- les données climatiques propres au site (température et vitesse du vent),
- les caractéristiques géométriques et les propriétés physiques des éléments le constituant.

Est défini comme étant le quotient de la puissance utile sur la puissance incidente.

$$\eta = \frac{P_u}{P_g S_w} \tag{III-47}$$

$$\eta = \frac{F_R ((\tau\alpha)_{eff} P_g - U_g (T_{fe} - T_a))}{P_g} \tag{III-48}$$

III.5.4 Influence de la température

III.5.4.1 De l'absorbeur sur le rendement du capteur

Le ciel rayonne à l à température T_∞ donnée par la formule empirique suivante :[17]

$$T_\infty = 0,0552 T_a^{1.5} \tag{III-49}$$

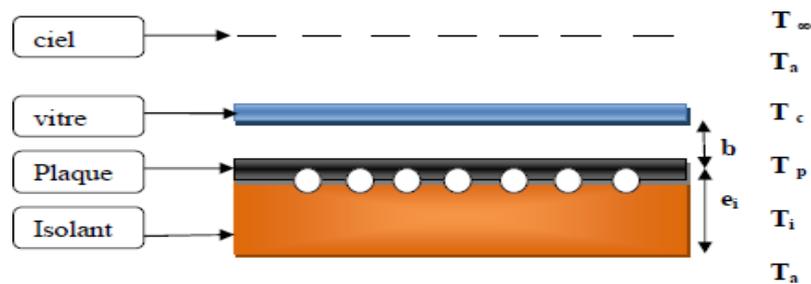


Figure 34 Les températures des différents éléments intervenant dans la détermination du rendement d'un capteur plan[17]

En première approximation on écrit l'expression de la puissance solaire absorbée par le capteur :

$$P_{cap} = S_c I F_R \tag{III-50}$$

III.5.4.2 D'entrée de fluide caloporteur[17]

Il semble raisonnable de chercher à déterminer l'efficacité du capteur non pas en fonction de la température de l'absorbeur T_p , mais plutôt en fonction de la température du fluide T_{fe} à l'entrée du capteur. Dans le paragraphe précédent, nous avons supposé que la surface absorbante est isotherme à la température T_p . En réalité, la plaque est soumise à un champ de température non uniforme, qui reste constant en régime permanent.

En tenant compte de la variation de la température de la plaque dans la direction transversale du flux, les calculs basés sur le profil de température de la plaque conduisent à établir l'efficacité en fonction de la température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur. Cette relation s'écrit :

$$\eta = F_T \left[F_R - \frac{K}{I} (T_{fe} - T_a) \right] \tag{III-51}$$

F_T est le coefficient de transfert thermique, qui est une caractéristique du capteur.
 On définit le nombre de tubes n_t comme suit :

$$n = \frac{l}{P} \tag{III-52}$$

l : largeur de la surface absorbante (m).
 P : le pas de tubes (m).

On définit le débit massique par tube m (kg/s) comme suit :

$$m = \frac{\rho v}{n_t} \tag{III-53}$$

ρ : masse volumique du fluide caloporteur (kg/m³).
 v : débit volumique de fluide dans le tube (m³/s).

On définit le débit massique par unité de surface de capteur M (kg/s.m²) :

$$M = \frac{m}{PL} \tag{III-54}$$

L : est la longueur de la surface absorbante (m).

D'où la puissance fournie au fluide par mètre carré s'écrit :

$$p_f = M C_p (T_{fs} - T_{fe}) = \eta I \tag{III-55}$$

C_p : est la chaleur massique de fluide caloporteur (j/kg.K).

T_{fe} et T_{fs} : température d'entrée et de sortie de fluide dans le capteur.

Cette relation permet le calcul de la température de sortie.

III.6 Dalle du plancher chauffant

III.6.1 Les différents modes de transfert de chaleur

Une surface chauffante ou un corps de chauffe transmet la chaleur fournie par le fluide caloporteur à l'air ambiant des locaux à chauffer, soit par convection, soit par rayonnement. Lorsque le plancher est parfaitement isolé côté sol, on s'attache à étudier uniquement les échanges thermiques de la partie supérieure du serpent[30][31]



Figure 35 Les différents échanges thermiques dans un plancher[31]

III.6.1.1 Echange par conduction

La chaleur est échangée par conduction par le fluide caloporteur avec la surface du sol. Cette transaction est régie par l'équation suivante :

$$\varphi_{cplf} = h_{cplf} S_{pl} (T_f - T_{pl}) \tag{III-56}$$

φ_{cplf} : Flux de chaleur entre le fluide et la surface du plancher.

h_{cplf} : Coefficient global d'échange par conduction entre le fluide et la surface du plancher

S_{pl} : Surface du plancher

T_{pl} , T_f : Températures respectives du plancher et du fluide caloporteur (l'eau).

$$h_{cplf} = \frac{\lambda_{bét}}{E_{sup}} \tag{III-57}$$

$\lambda_{bét}$: Conductivité thermique du béton

E_{sup} : Epaisseur du béton entre le serpentinet la face supérieure du plancher

III.6.1.2 Echange par convection

Les échanges par convection existent principalement entre :

- Le plancher et le fluide caloporteur (eau). (Apport de chaleur pour le plancher).
- Le plancher et le milieu ambiant. (Pertes de chaleur pour le plancher).

- L'échange entre le fluide caloporteur et le plancher

$$\varphi_{vplf} = h_{vplf} S_{plf} (T_f - T_{pl}) \tag{III-58}$$

φ_{vplf} : Flux de chaleur d'échange convectif entre le fluide et la surface du plancher.

h_{vplf} : Coefficient de transfert de chaleur convectif entre le fluide et le plancher.

S_{plf} : Surface d'échange entre le fluide et le plancher, rapportée à la longueur du plancher

$$S_{plf} = \frac{\pi dl/l}{n} ; \text{(On prend la surface d'un noeud)} \tag{III-59}$$

n : le nombre de passages du serpentinet dans le plancher

h_{vplf} est calculé avec les nombres adimensionnels

$$h_{vplf} = \frac{\lambda_f N_u}{L} \tag{III-60}$$

λ_f : Conductivité thermique du fluide.

N_u : Nombre de Nusselt

L : Longueur caractéristique.

$L = D_h$ (diamètre hydraulique).

Pour un régime turbulent, et le serpentin assimilé à une conduite comme hypothèse, on prend pour le calcul du Nusselt la corrélation [30][31] :

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.33} \quad (III-61)$$

Pour un écoulement laminaire dans la conduite [17]:

La couche limite est supposée développée

* Si la paroi du tube est soumise à un flux d'énergie constant :

$$h_{vplf} = 4.36 \frac{\lambda F}{L} \quad (III-62)$$

* Si la paroi du tube est à température constante :

$$h_{vplf} = 3.66 \frac{\lambda F}{L} \quad (III-63)$$

- L'échange entre le plancher et l'air

$$\varphi_{vpla} = h_{vpla} \cdot S_{pl} \cdot T_{pl} - T_{air} \quad (III-64)$$

φ_{vpla} : Flux de chaleur échangé par convection entre la surface du plancher et l'air.

h_{vpla} : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le plancher et l'air.

S_{pl} : Surface du plancher

T_{air} : Température de l'air.

Le coefficient naturel de convection entre le béton et l'air h_{vpla} est évalué en se basant sur la corrélation [33][32], Il s'applique également à une plaque horizontale chauffée en bas :

$$Nu = 0.54 Ra^{1/4} \quad (III-65)$$

$$Nu = \frac{h_{vpla} W}{\lambda_{air}} \quad (III-66)$$

h_{vpla} : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le plancher et l'air.

W : Rapport entre la surface et le périmètre de la dalle.

λ_{air} : Conductivité thermique de l'air.

Ra : Nombre de Rayleigh.

III.6.1.3 Echange par rayonnement

L'expression utilisée est :

$$\varphi_{rpl} = h_{rpl} S_{pl} (T_{pl} - T_c) \quad (III-67)$$

Par ailleurs, le coefficient d'échange radiatif h_{rpl} est obtenu en utilisant la relation :

$$h_{rpl} = \sigma \varepsilon_{pl} (T_c + T_{pl}) (T_c^2 + T_{pl}^2) \quad (III-68)$$

$$T_c = 0.552 (T_a)^{1.5} \quad (III-69)$$

σ : Constante de Stéphane-Boltzmann.

ε_{pl} : Emissivité du plancher

T_a : Température ambiante.

T_c : Température du ciel

III.6.2 Le rendement d'un plancher chauffant

Le rendement d'un plancher chauffant est décrit par la formule générale [25], [26] :

$$\eta_p = p_0 - \frac{A}{P_g^n} \quad (\text{III-70})$$

Pour les dalles épaisses équipées de capteur solaire noir [33], on a :

$$p_0 = 0.574 + 0.0025\Delta T - 0.045R \quad (\text{III-71})$$

$$A = (0.0398\Delta T + 0.0273) (0.6 - R)^{0.25} \quad (\text{III-72})$$

$$n = 0.6$$

ΔT , étant l'écart entre les températures moyennes intérieure et extérieure

R : Ratio de captation (rapport entre la surface de capteur et la surface de plancher).

Chapitre IV
Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons exposé tous les résultats obtenus au cours de ce travail ainsi que leurs interprétations, nous avons donné un aperçu d'ANSYS Fluent, que nous utiliserons dans notre modélisation numérique. Il est divisé en trois sous-packages logiciels : DesignModeler pour la schématisation de la géométrie, le deuxième pour le maillage, et le troisième le solveur Fluent, qui réalise la simulation. Ensuite, nous définirons les modèles de modélisation utilisés pour fermer le système (K-Epsilon), ainsi que les algorithmes de calcul des pressions, des vitesses et des températures.

IV.2 Définition de modélisation numérique

La modélisation est la représentation d'un système par un modèle. C'est aussi la construction du modèle. Le but de la « simulation » est de donner vie à un système. C'est une méthode qui consiste à utiliser un modèle comme substitut de la réalité (Ouillon, 1993). Un modèle mathématique ou numérique est un algorithme, et un modèle de simulation peut être désigné comme un programme informatique. Le terme modèle est souvent complété par un mot spécifique. Par exemple, un modèle d'une dalle chauffante peut signifier la schématisation d'une vraie dalle chauffante.[34]

IV.3 Présentation du logiciel ANSYS

Ansys est un ensemble de logiciels de simulation numérique utilisant des éléments finis, des volumes finis et des méthodes de particules. Les éléments finis, les volumes finis et les méthodes de particules sont utilisés pour simuler des modèles informatiques de composants électroniques ou de machines afin d'analyser la résistance, la ténacité, l'élasticité, la distribution de la température, l'électromagnétisme, l'écoulement des fluides et d'autres problèmes d'ingénierie. Ce logiciel est utilisé pour déterminer comment un produit se comportera sous différentes spécifications, sans avoir à construire des produits de test ou à réaliser des crash tests. Ils couvrent toutes les étapes nécessaires à une simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement des résultats et l'optimisation. Ansys est le leader mondial dans le domaine de l'analyse par éléments finis (FEA). Ses solutions logicielles permettent de résoudre efficacement les problèmes de validation de produit et d'optimiser le processus de conception. La plateforme de travail ANSYS encapsule les différentes applications de simulation : Mécanique, Fluent, ACP (Composite), DesignXplorer (Optimisation), SpaceClaim Modelling, etc. Cette plateforme est basée sur une vue schématique du projet de simulation pour permettre aux utilisateurs d'organiser et de lier facilement leurs différents calculs. Pour notre modélisation, nous utilisons ANSYS. [35]

IV.3.1 La géométrie (DesignModeler)

La géométrie comprend les positions physiques des points caractéristiques qui définissent la zone à mailler. La zone à mailler comprend les coordonnées spatiales des quatre sommets d'un carré ; les points de départ et d'arrivée d'une ligne ; le centre et l'ouverture angulaire d'un arc circulaire. Il doit être possible de représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples.[36]

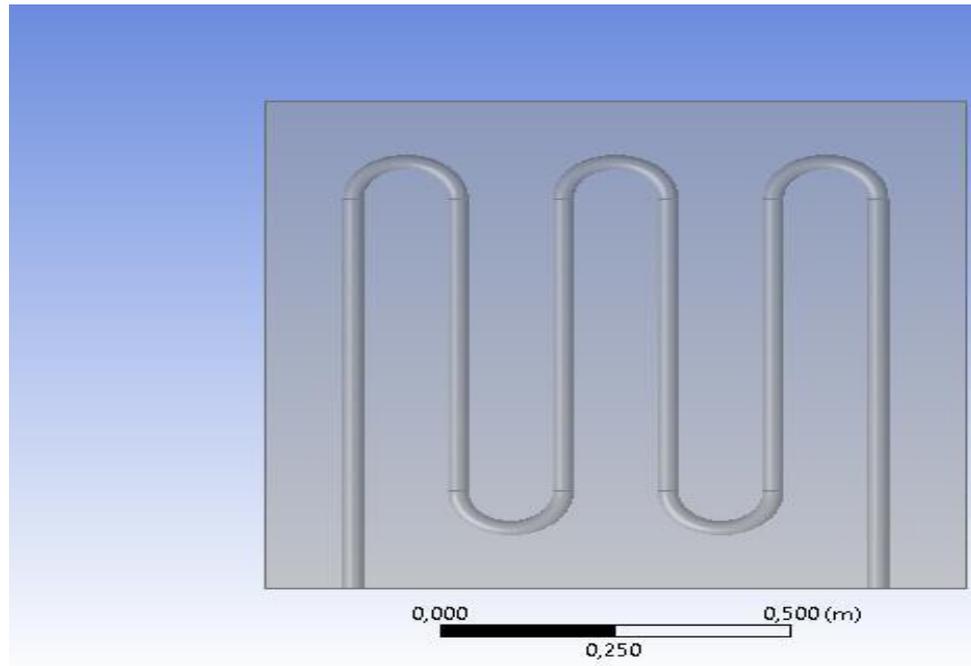


Figure 36 La géométrie d'un écoulement au sein d'une dalle chauffante (vue de face)

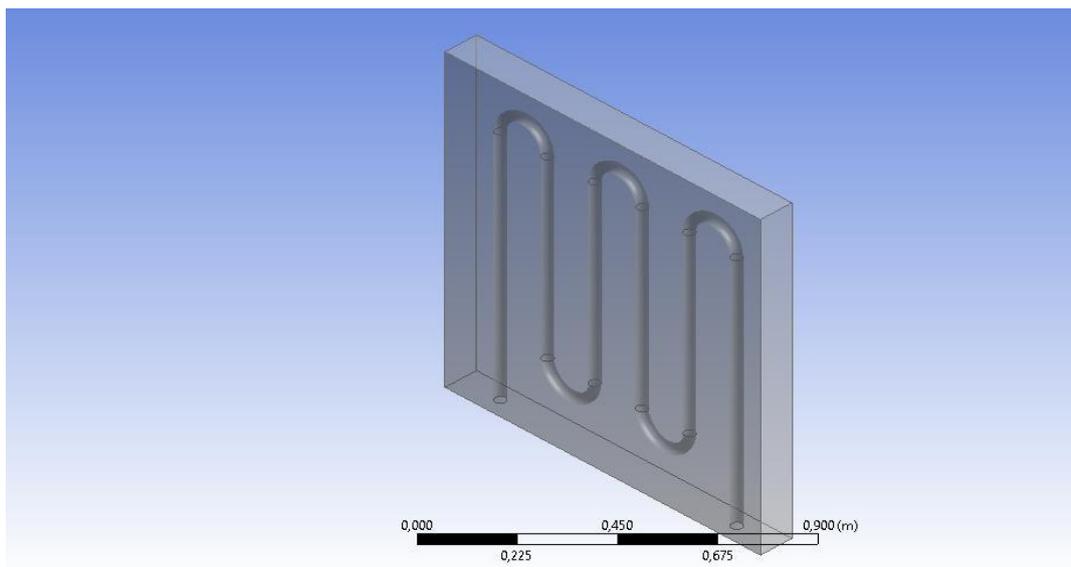


Figure 37 La géométrie d'un écoulement au sein d'une dalle chauffante (vue de coté)

La géométrie de la dalle est construite, nous avons dessiné un cube avec les dimensions :

$H = 1 \text{ m}$, $L = 1 \text{ m}$, $e = 0.1 \text{ m}$, et concernant le serpentin on a :

$H_s = 0.8 \text{ m}$, $e = 0.015 \text{ m}$ et $r = 0.075 \text{ m}$, puis, créé un corps surfacique qui sera maillé à

l'étape suivante

IV.3.2 Etude de maillages

Le processus de maillage divise le domaine physique en de petites cellules interconnectées, permettant ainsi de décrire la géométrie à l'aide d'un nombre et d'une taille spécifiés d'éléments. Ces éléments peuvent adopter différentes formes. Nous avons choisis le maillage triangulaire qui contient 234748 des nœuds et 924758 des éléments.

Il est à noter que les mailles proches de l'entrée et la sortie du tube sont beaucoup plus petites que celles sur les frontières du domaine. Il s'agit donc d'un maillage progressif comme le montre la Figure 39

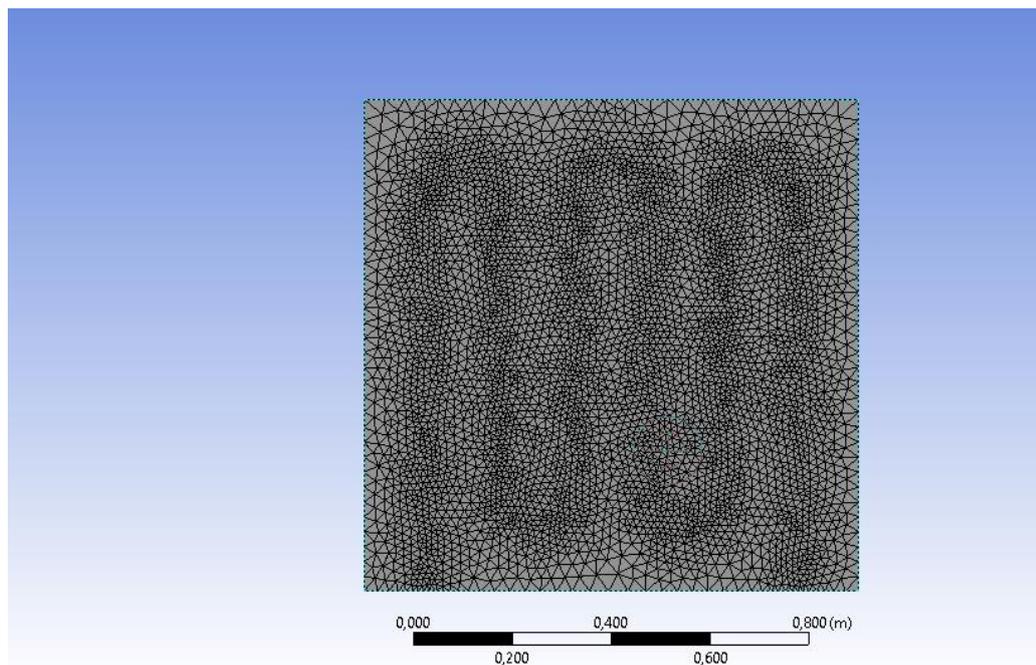


Figure 38 Maillage d'un serpentín au sein d'une dalle chauffante dans ANSYS Fluent

IV.3.3 Le solveur Fluent

FLUENT, une société leader dans le domaine de la mécanique des fluides numériques, commercialise le logiciel de simulation Fluent. Leur expertise se concentre sur le développement et la fourniture de solutions logicielles complètes en dynamique des fluides numérique (CFD), permettant de modéliser divers types d'écoulements fluides, qu'ils soient compressibles ou incompressibles. Leurs simulations prennent en compte des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques et les écoulements multiphasiques, ce qui les rend applicables à une multitude d'industries. Les produits et services de FLUENT aident les ingénieurs à développer leurs produits, à optimiser leur conception et à minimiser les risques.[37]

Dans ANSYS Fluent, on utilise la méthode des volumes finis pour découper la géométrie en de petits volumes élémentaires, pouvant être des quadrilatères, des triangles, ou une combinaison des deux. Les équations de Navier-Stokes sont alors transformées en systèmes

algébriques, que le code de calcul applique à chaque cellule. Cette étape revêt une importance cruciale pour la simulation

IV.3.3.1 Procédure de simulation sur Fluent

Une fois que le fichier de géométrie et de maillage a été importé dans le logiciel de calcul ANSYS FLUENT, on sélectionne le type de solveur "Pressure-Based", indiquant ainsi que l'écoulement est incompressible. Ensuite, on choisit le régime stationnaire en accédant à l'onglet "Time" et en sélectionnant "Steady". Et on met gravité = 9.81 m/s^2

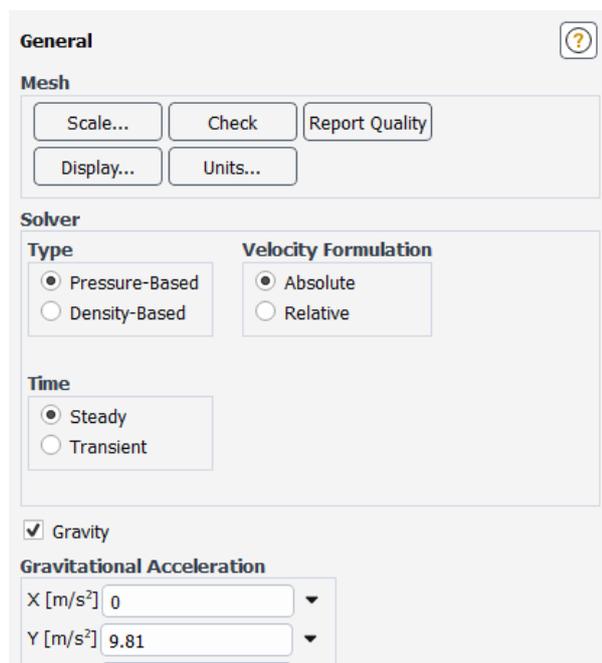


Figure 39 Choix du régime stationnaire pour un écoulement incompressible

Activation de l'équation de l'énergie. Afin de tenir compte de l'effet thermique dans la résolution du problème étudié, on doit activer l'équation de l'énergie comme il est présenté dans la figure 9

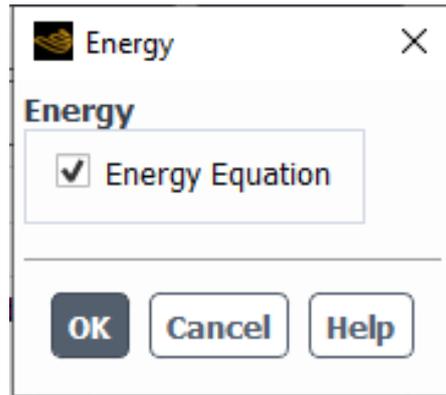


Figure 40 Activation de l'équation de l'énergie

- **Définition du modèle de turbulence :**

Pour considérer la turbulence dans le problème étudié, on choisit sous l'onglet « viscous Model » le modèle de turbulence « K-Epsilon standard ».

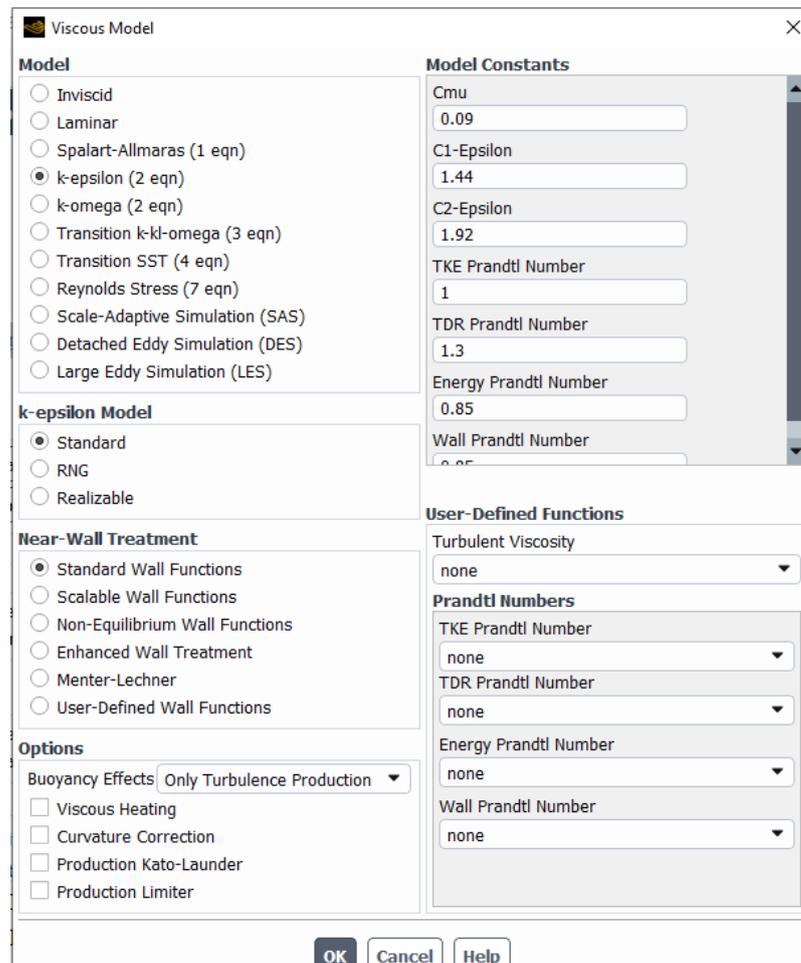


Figure 41 choix du modèle de turbulence K-Epsilon standard

- **Définition des propriétés du fluide et solide :**

Nous avons choisi l'eau comme fluide pour chauffer la dalle et le béton comme solide, et voici leurs propriétés :

Pour l'eau on a choisi deux différentes températures ($T_1= 45^\circ\text{C}$, $T_2= 55^\circ\text{C}$), et trois valeurs de vitesse ($v_1 = 0.1\text{m/s}$, $v_2 = 0.2 \text{ m/s}$, $v_3 = 0.3\text{m/s}$)

Tableau 10 propriétés thermique de l'eau

Cp : Chaleur spécifique	4182 j/ (kg.k)
ρ : Masse volumique	1000 kg/m³
μ : Vitesse moyen de fluide en m/s	0.001 kg/ (m.s)
λ : Conductivité thermique	0.597 w/ (m².k)

Et pour le béton on a choisi une température constante de $T_b = 10^\circ\text{C}$

Tableau 11 Propriétés thermique du béton

Cp : Chaleur spécifique	1000 j/ (kg.k)
ρ : Masse volumique	2400 kg/m³
λ : Conductivité thermique	1.75 w/ (m².k)

- **Le moniteur de convergence :**

Afin de trouver une bonne précision des résultats de calcul numérique, nous avons choisi un petit moniteur de convergence pour toutes les équations de transports. On peut définir cela en cliquant sur l'onglet « Residual Monitors »

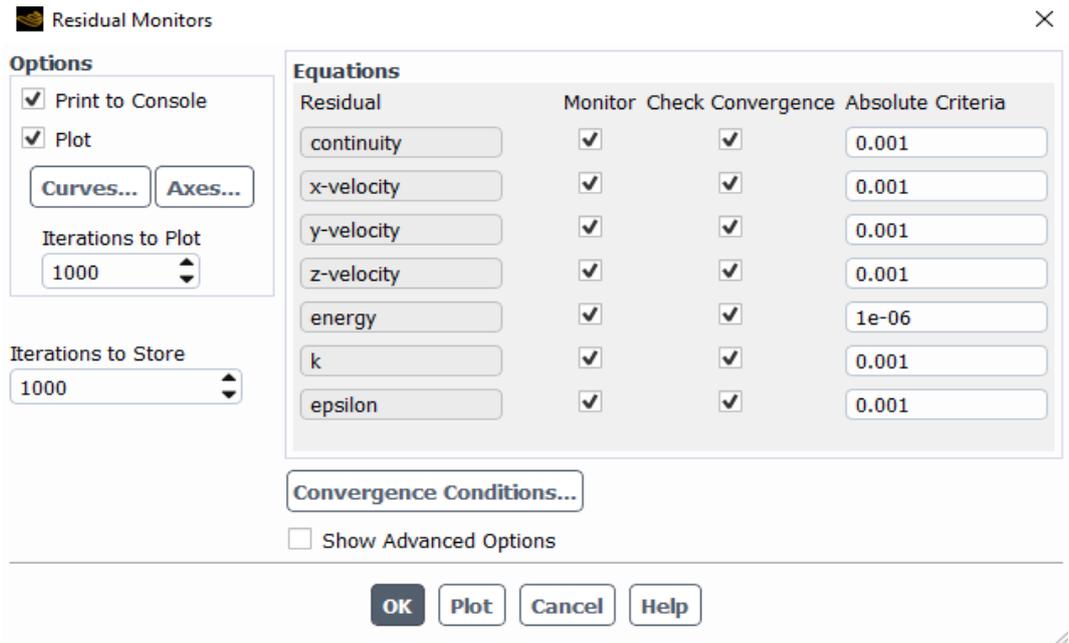


Figure 42 Moniteurs de convergence

- **Initialisation des solutions :**

Avant d'entamer les calculs, il est nécessaire de définir une valeur initiale pour chaque variable du problème, incluant la vitesse, la pression, la température et les équations de turbulence. Dans le cadre de cette étude, nous avons opté pour une initialisation hybride. Ce choix implique que le logiciel initialise les solutions en prenant en compte toutes les limites du domaine. Pour accéder à cette fonctionnalité, il suffit de cliquer sur l'onglet "Solution Initialization", comme illustré dans la figure ci-dessous :



Figure 43 Initialisation des solutions

- **Lancement du calcul :**

Une fois toutes les étapes précédentes achevées, on procède au lancement du calcul itératif jusqu'à ce que les solutions convergent. Pour cela, il suffit de cliquer sur l'onglet "Calculation" et de spécifier un nombre d'itérations adéquat, comme illustré dans la figure ci-dessous :

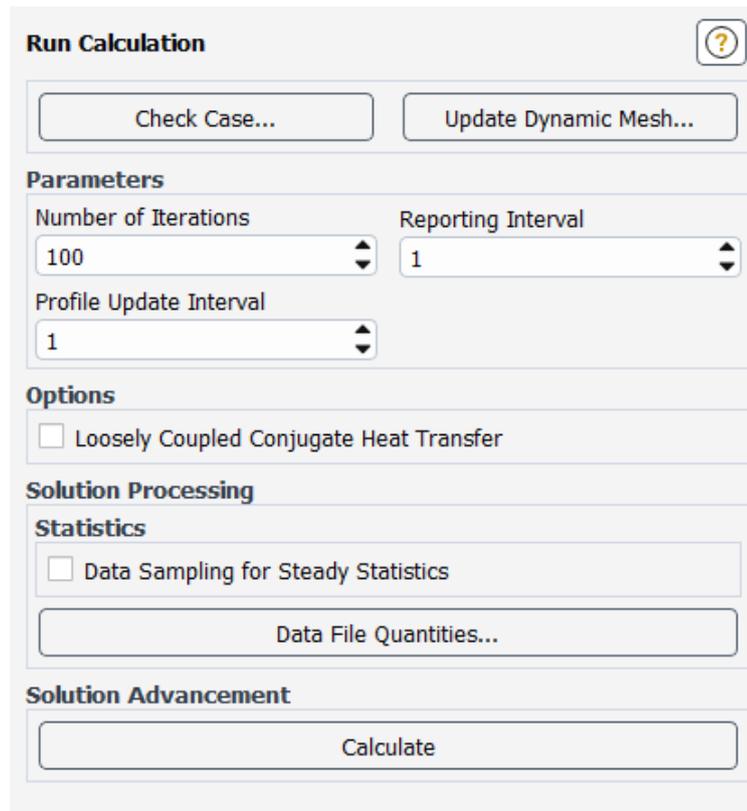


Figure 44 Lancement du calcul itératif

IV.4. Résultats :

IV.4.1 Cas N°1: (T=45°C)

IV.4.1.1 Distribution de la température:

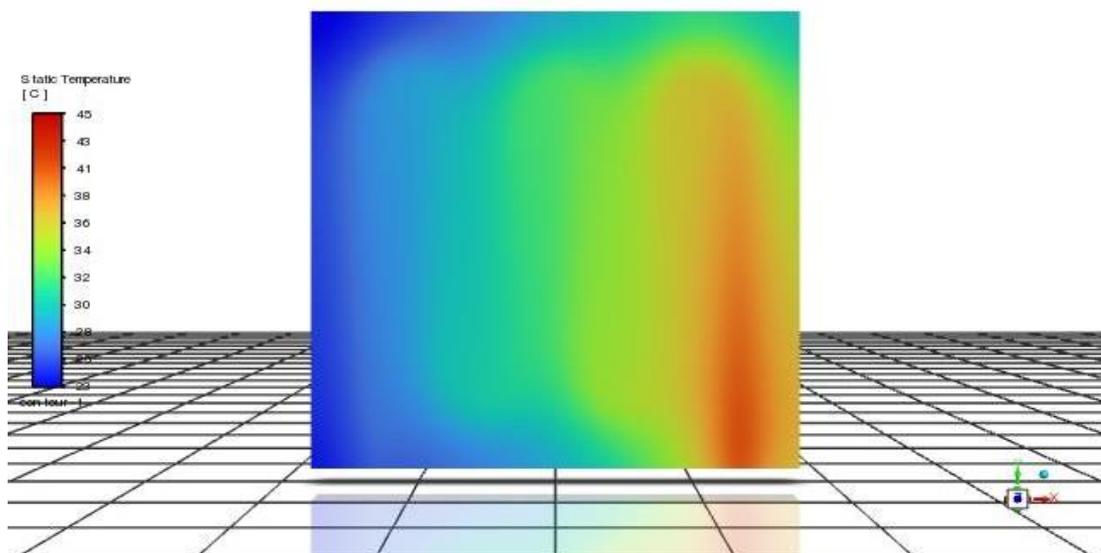


Figure 45 propagation de température de la dalle avec une Vitesse de fluide = 0.1m/s

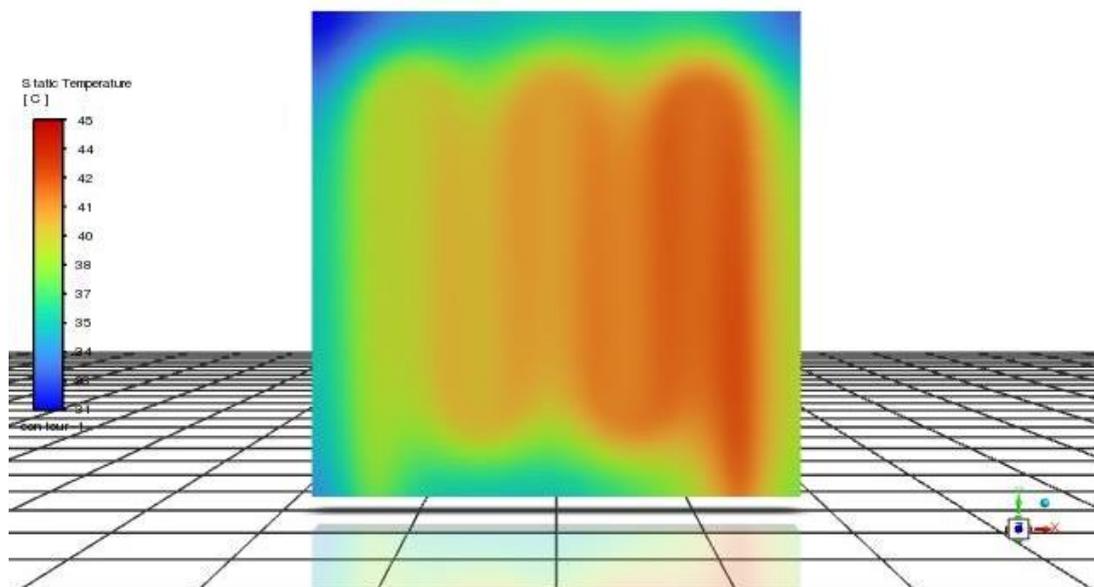


Figure 46 propagation de température de la dalle avec une Vitesse de fluide = 0.2 m/s

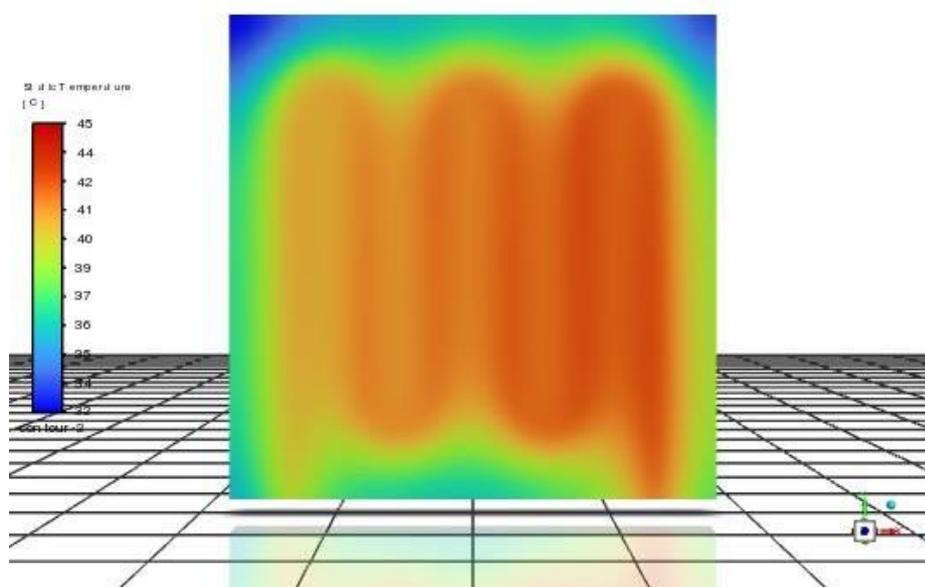


Figure 47 propagation de température de la dalle avec une Vitesse de fluide = 0.3 m/s

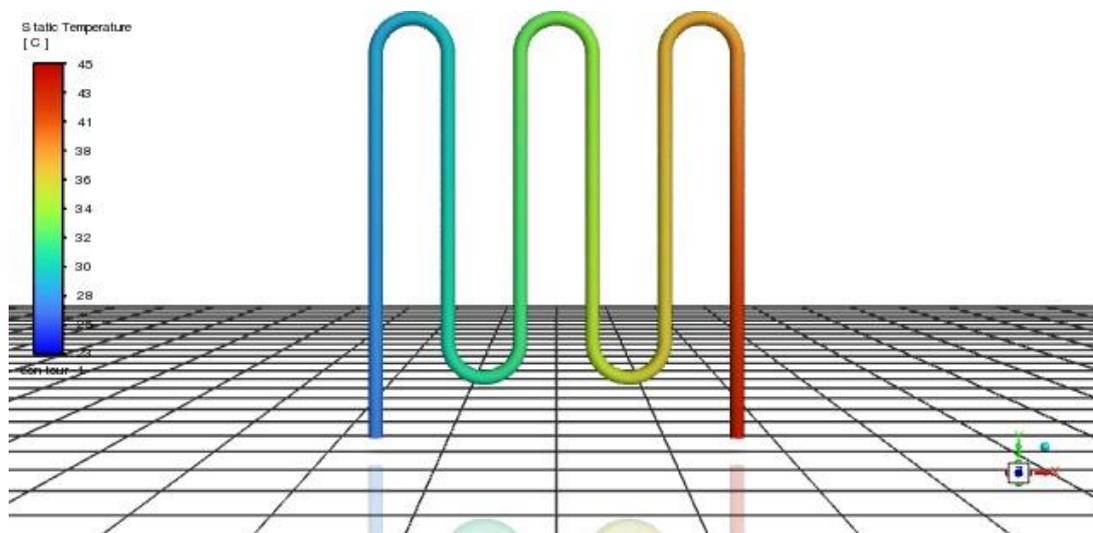


Figure 48 champ de température de serpentin avec une Vitesse de fluide = 0.1 m/s

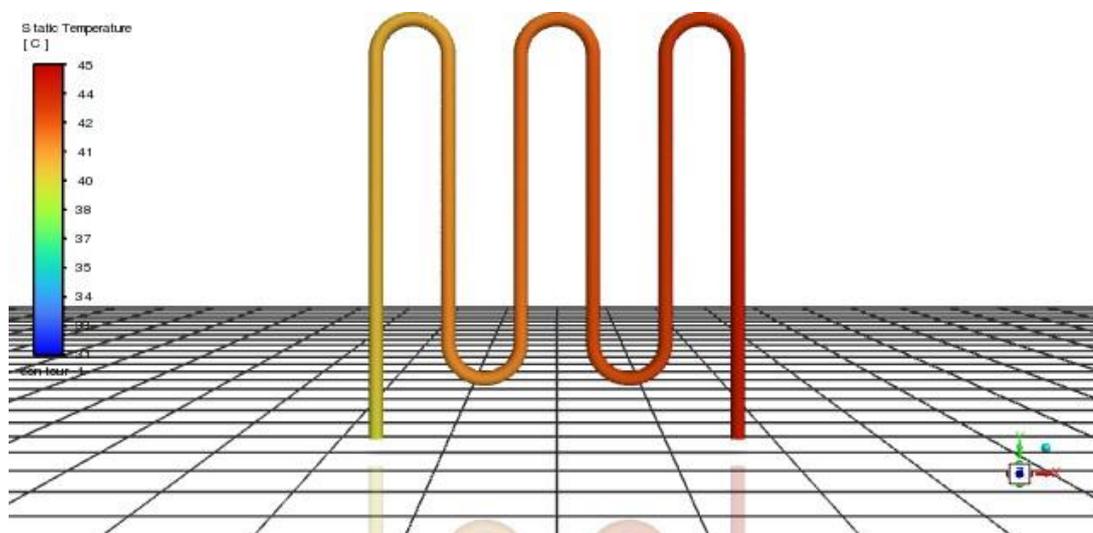


Figure 49 champ de température de serpentin avec une Vitesse de fluide = 0.2 m/s

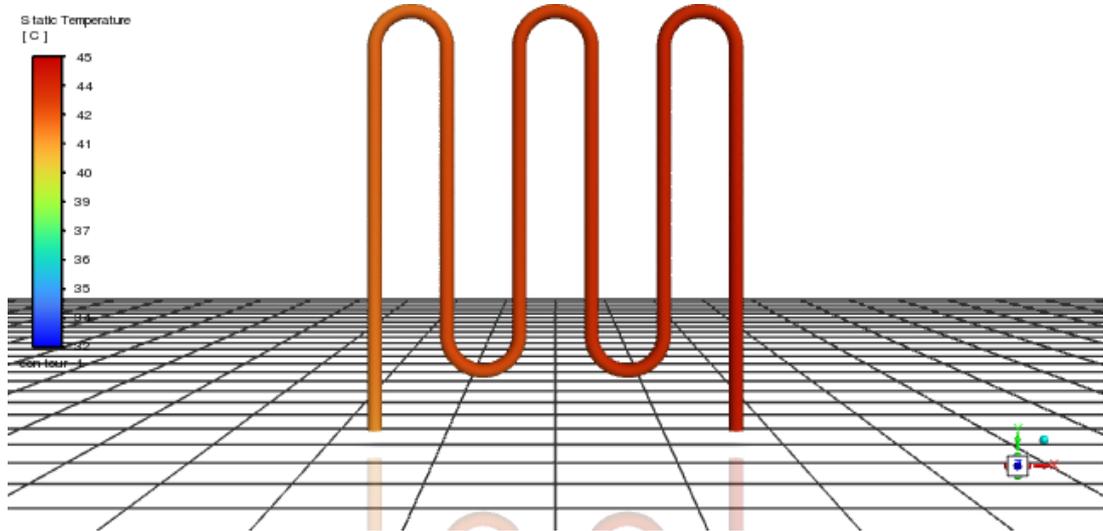


Figure 50 champ de température de serpentin avec une Vitesse de fluide = 0.3 m/s

IV.4.1.2 Profil de pression statique :

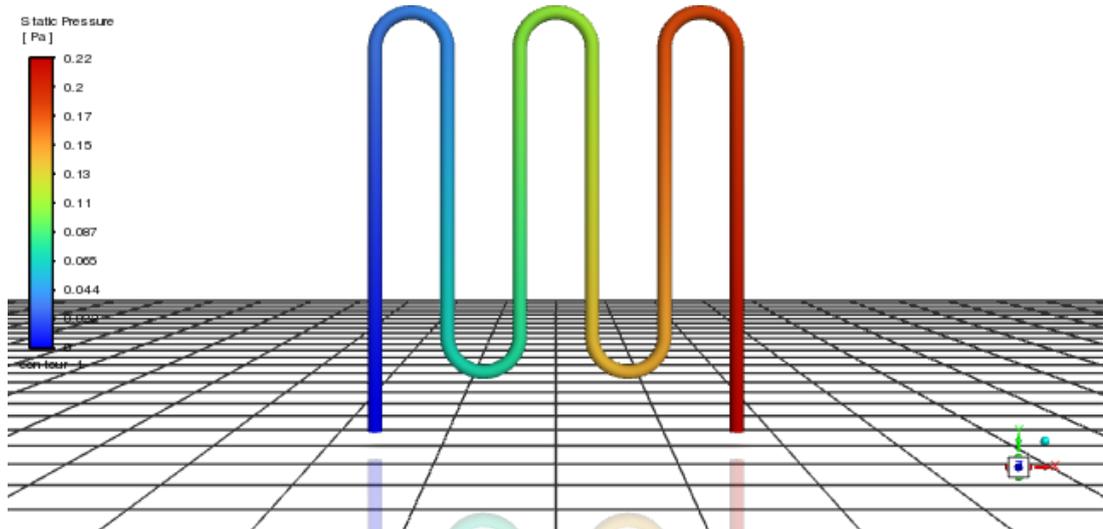


Figure 51 pression statique (v=0.1m/s)

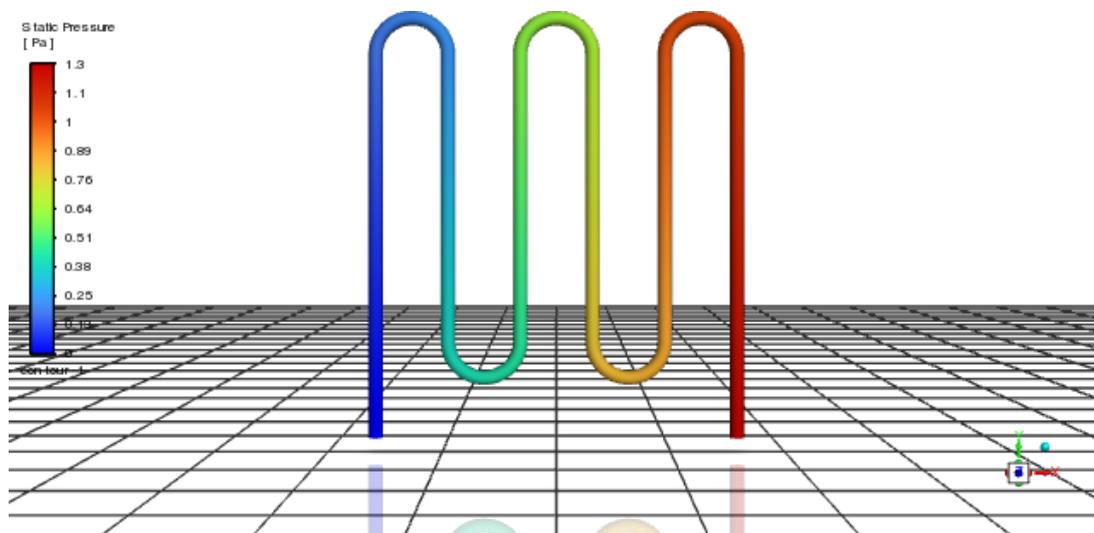


Figure 52 pression statique (v=0.2 m/s)

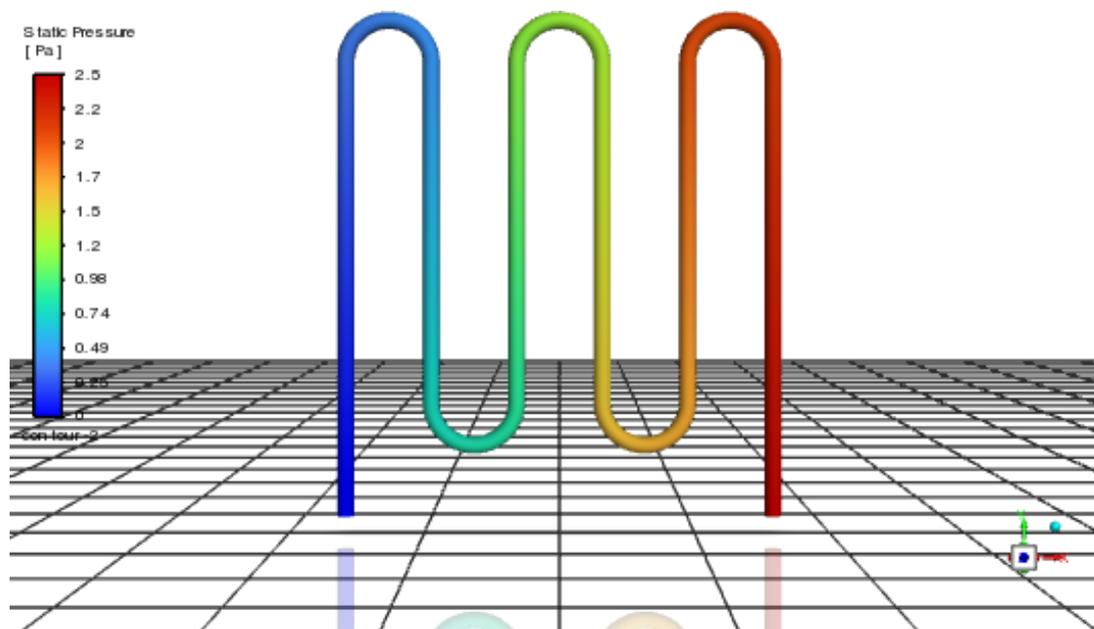


Figure 53 pression statique (v=0.3m/s)

IV.4.1.3 Profil de cisailment mural :

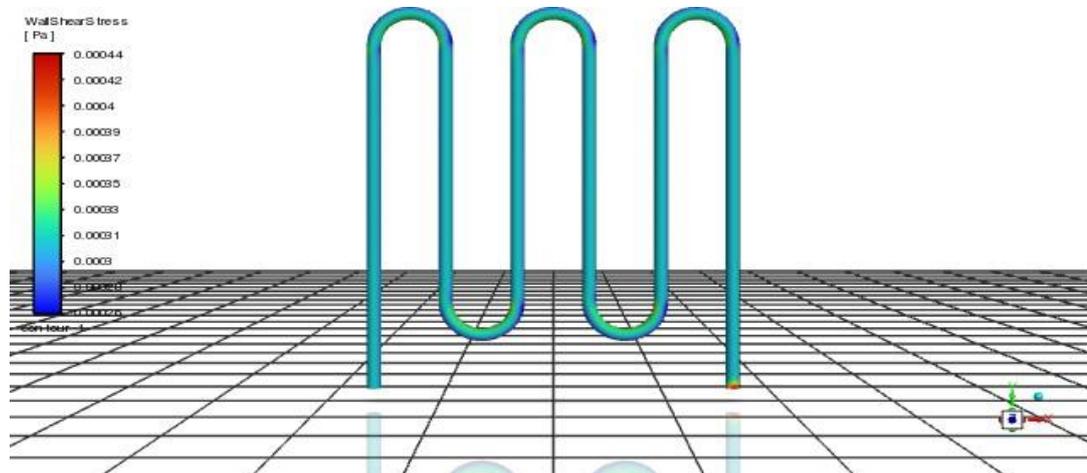


Figure 54 cisailment de mur ($v=0.1\text{m/s}$)

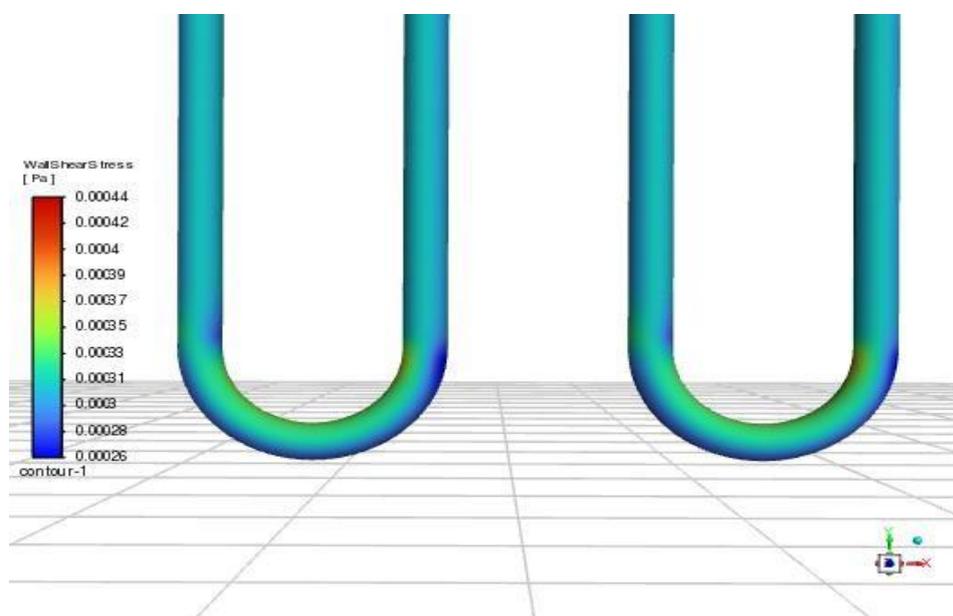


Figure 55 zoom sur le virage

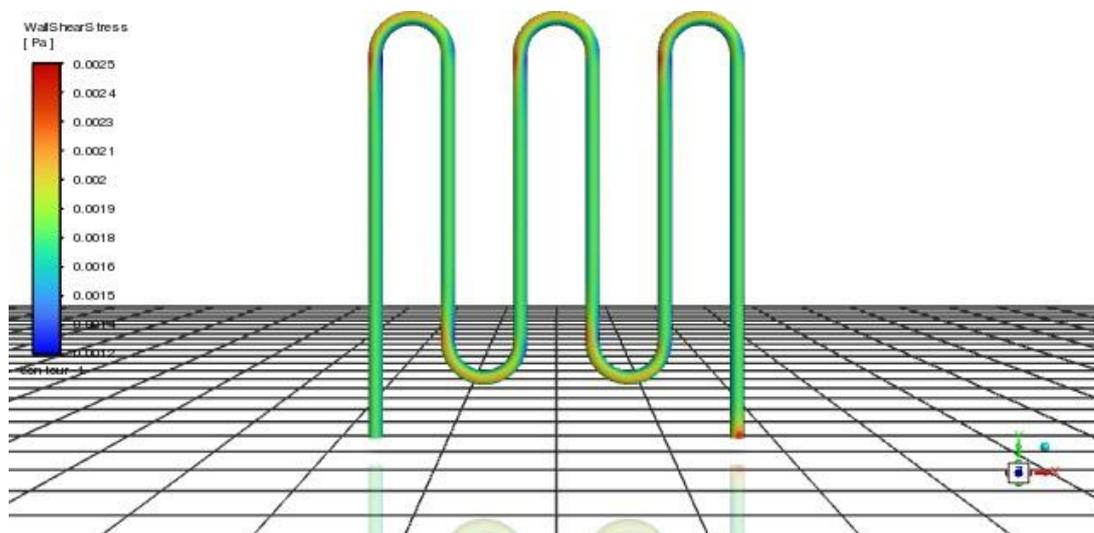


Figure 56 cisaillement de mur ($v=0.2\text{m/s}$)

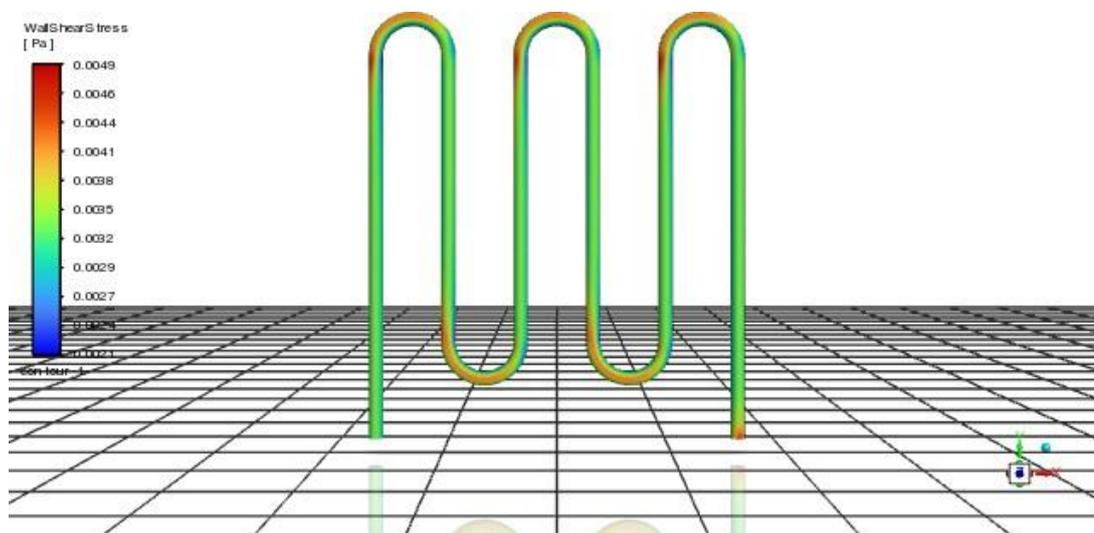


Figure 57 cisaillement de mur ($v=0.3\text{m/s}$)

IV.4.2 Cas N°2: Comparaison entre (T=45°C) et (T=55°C)

IV.4.2.1 Profil de température statique :

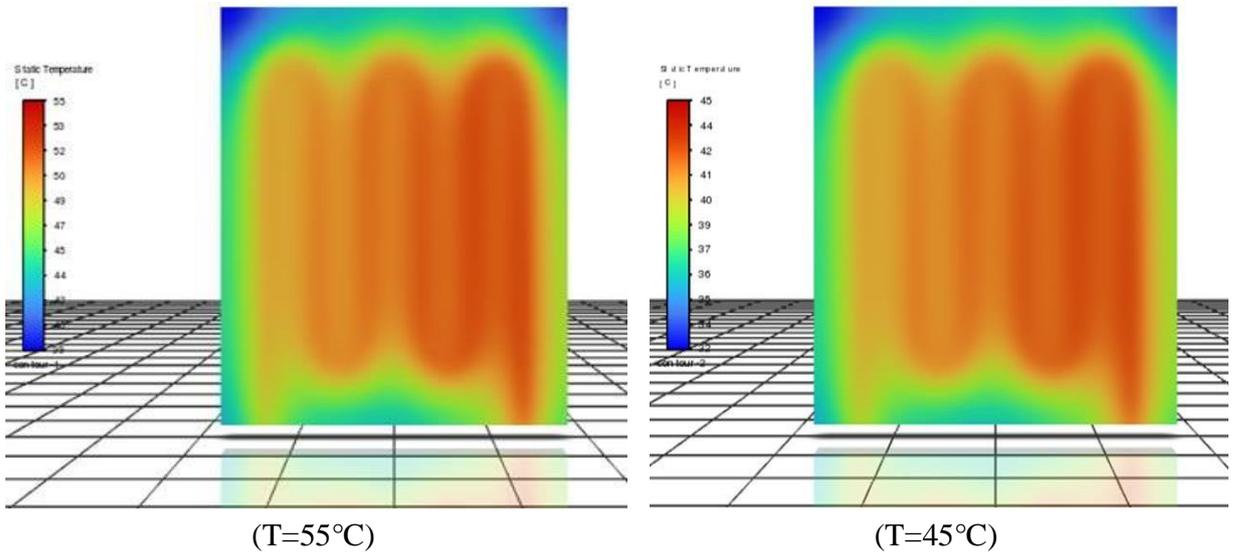


Figure 58 Propagation de la température dans la dalle (55°C,45°C)

IV.4.2.2 Profil de pression statique :

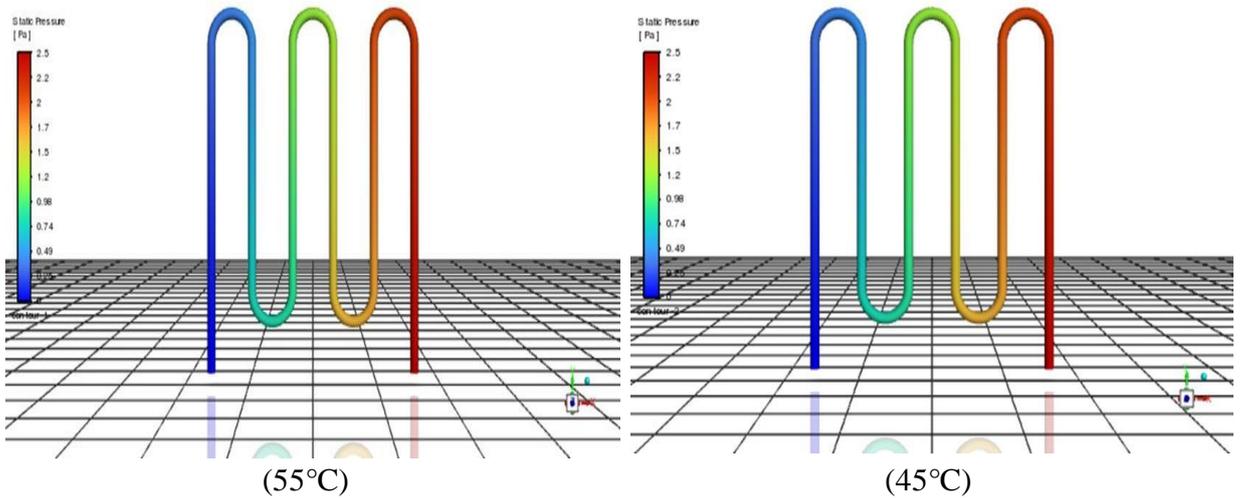


Figure 59 pression statique (55°C,45°C)

IV.4.2.3 Profil de cisaillement mural :

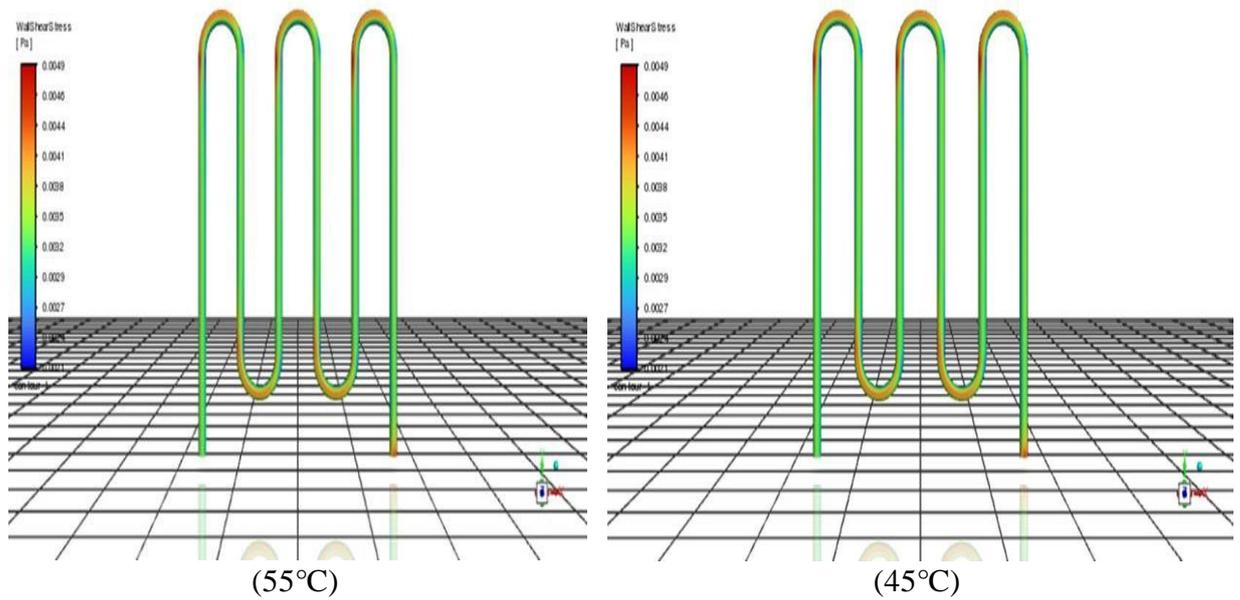


Figure 60 cisaillement de mur (55°C,45°C)

IV.5 Interprétation et commentaire

IV.5.1 Cas N°1 (T=45°C) :

IV.5.1.1 Profil de température

La **figure.48,49,50** représenté la propagation de la température dans la dalle avec une vitesse des fluide différentes ($v_1=0.1\text{m/s}$, $v_2=0.2\text{m/s}$, $v_3=0.3\text{ m/s}$) .On remarque que dans **figure.48** la température n'est pas bien propagé et même dans la **figure.49** la température ne propage pas totalement, par contre dans la **figure.50** la température se propage bien due à la vitesse de fluide dans le serpentin, et cela est confirmé dans la propagation de température dans le serpentin **figure.51,52,53**. On déduire que si la vitesse du fluide est plus élevée, la température se propage plus efficacement à travers la dalle, comme le montre la **figure.50**. Cela suggère qu'il existe une relation proportionnelle entre la vitesse du fluide et la propagation de la température dans la dalle. Cette observation est cohérente avec les principes de transfert de chaleur, où une vitesse plus élevée du fluide permet un transfert de chaleur plus efficace.

IV.5.1.2 Profil de pression statique :

Dans la **figure.54**, la pression statique varie de 0.22 Pa à 0 Pa. Dans la **figure.55**, cette variation se situe entre 1.3 Pa et 0 Pa. Enfin, dans la **figure.56**, la pression statique varie de 2.5 Pa à 0 Pa. En effet, d'après les résultats obtenus, à mesure que la vitesse du fluide augmente, la pression statique à l'intérieur du serpentin semble également augmenter. Cela est cohérent avec les principes de la dynamique des fluides, où une augmentation de la vitesse du fluide peut entraîner une augmentation de la pression.

IV.5.1.3 Profil de cisaillement de mur :

Les **figure.57,58 ,59** et **60** illustrent le cisaillement mural d'un serpentin. Dans les **figure.57,58** le cisaillement débute à sa valeur maximale de 0,00044 Pa, puis diminue à 0,00031 Pa, tandis que dans les virages du serpentin, il atteint 0,00037 Pa. Dans la **figure.59**, le cisaillement initial est de 0,0025 Pa, puis diminue à 0,0018 Pa, avec une augmentation dans les virages jusqu'à 0,0023 Pa. Enfin, dans la **figure.60**, le cisaillement démarre à 0,0049 Pa, pour descendre à 0,0032 Pa, avec une valeur maximale dans les virages de 0,0044 Pa. Dans la **figure.57**, le cisaillement mural varie de 0,00026 Pa à 0,00044 Pa, tandis que dans la **figure.59**, il varie de 0,0012 Pa à 0,0025 Pa. En revanche, dans la **figure.60**, il fluctue entre 0,0021 Pa et 0,0049 Pa., il y a une corrélation entre la vitesse du fluide et le niveau de cisaillement. Lorsque la vitesse du fluide est plus élevée, le cisaillement mural semble également être plus élevé. Cela est cohérent avec les principes de la mécanique des fluides, où une vitesse plus élevée induit généralement des forces de cisaillement plus importantes sur les parois des conduits.

IV.5.2 Cas N°2: Comparaison entre (T=45°C) et (T=55°C) :

IV.5.2.1 Profil de température :

La **figure.61** nous présentent une comparaison entre la propagation de température dans la dalle entre deux différentes températures de fluide (55°C,45°C). On voit que la propagation de température change avec une différence légère quand on augmente la température de fluide

IV.5.2.2 Profil de pression statique :

La **figure.62** présentent la pression statique de serpentin avec deux températures. On déduit que Lorsque l'on augmente la température du fluide, on observe que la pression statique reste constante.

IV.5.2.3 Profil de cisaillement :

La **figure.63** présente la contrainte de cisaillement sur le serpentin à deux températures différentes. On peut en déduire que lorsque la température du fluide est augmentée, la même contrainte de cisaillement sur le serpentin est observée.

IV.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons comparés les résultats obtenus par le logiciel Fluent R24 d'un écoulement thermique au sein d'une dalle chauffante avec des différentes vitesses et températures de fluide. Et nous avons évalués la propagation de température dans la dalle, pression statique ainsi que le cisaillement mural. D'après les résultats obtenues on a conclu que :

- Pour assurer une propagation efficace de la température, une vitesse de fluide plus élevée est nécessaire
- Une vitesse de fluide plus élevée entraîne généralement une augmentation plus significative de la pression
- Une augmentation de la vitesse du fluide tend à provoquer un cisaillement mural plus important
- Une augmentation de température change légèrement la propagation de la température dans la dalle

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude démontre la faisabilité de l'exploitation de l'énergie solaire dans diverses applications, en particulier dans le domaine de l'habitat, tel que le chauffage des maisons. C'est pourquoi notre attention s'est principalement portée sur les dispositifs solaires, visant à intégrer les nouvelles technologies de l'énergie renouvelable, notamment le concept de "plancher solaire direct".

Pour simplifier le système d'équations utilisé dans la configuration étudiée, des hypothèses simplificatrices ont été introduites et justifiées. La résolution du problème a été effectuée à l'aide d'une méthode numérique basée sur la méthode des volumes finis, en utilisant le logiciel ANSYS Fluent.

Ce logiciel a été utilisé pour simuler le fonctionnement et le comportement thermique du plancher solaire direct (PSD) et obtenir les variations de divers paramètres propres, à la région d'étude choisie.

Concernant l'influence de la température de départ du fluide : il est observé que celle-ci doit être sélectionnée en fonction du niveau de confort thermique désiré. Dans notre cas, maintenir une température maximale de 55°C permet d'atteindre un certain niveau de confort thermique.

Quant à l'influence de la vitesse d'entrée du fluide : il est constaté que cette dernière doit être choisie en fonction du niveau de confort thermique recherché.

En conclusion, il est important de souligner que les dalles chauffantes fournissent une chaleur douce et uniforme dans l'ensemble de la maison, jouant ainsi un double rôle en tant que dispositif de stockage et d'émission de chaleur. Leur capacité thermique élevée présente à la fois des avantages et des inconvénients : d'un côté, elle permet de stocker la chaleur pendant de longues périodes, mais d'un autre côté, elle peut être un inconvénient lorsque des variations rapides de température sont nécessaires.

**Références
Bibliographiques**

Références Bibliographiques :

- [1] C. Coulon, S. Le-Boiteux et P. Segonds. Thermodynamique physique Cours et exercices avec solutions. Edition Dunod.1997
- [2] H.B. Callen THERMODYNAMICS, Cours , Edition John Wiley and Sons, 1960.
- [3] R. Clerac, C. Coulon, P. Goyer, S. Le- Boiteux et C. Rivenc. Thermodynamics, Cours et travaux dirigés de thermodynamique. Université Bordeaux 1, 2003.
- [4] C. LHUILLIER, J. ROUS Introduction à la thermodynamique, Edition Dunod.
- [5] <http://perso.usthb.dz/~snouri/>.
- [6] Moran M. J, Shapiro H. N, Munson B. R, DeWitt D. P. Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer. John Wiley & Sons, Inc., USA, 2003.
- [7] J. P. Petit. Techniques de l'ingénieur, notions de transferts thermiques par convection. A1540 (1979).
- [8] J.F. Sacadura. Initiation de transfert thermiques, Technique et documentation. Paris (1982).
- [9] A. Sfeir, G. Guarracino. Ingénierie des systèmes solaires. Technique et Documentation, Paris (1981).
- [10] P. Fridmann. Le plancher chauffant et rafraichissant, réglementation, dimensionnement, mise en oeuvre, réglage. Edition Parisienne (2003).
- [11] M. Lochoshvili. Les technologies nouvelles ont-elles un rôle à jouer sur un marché très concurrentiel de la Russie postsoviétiques, le marché du chauffage (période étudiée 1991-2008).Thèse de doctorat, Université Paris-Sorbonne (2009).
- [12] A. DARS, Projet de fin d'études pour le master de recherche MEEP, Etude et développement d'un modèle analytique pour les planchers chauffants hydrauliques, EPF école d'ingénieur, Troyes, France, 2017.
- [13] J. Yves Messe. Therm Excel. Copyright 2004-2007.
- [14] Watson, R., & Chapman, K. (2002). Radiant heating and cooling handbook McGraw Hill Professional .
- [15] HENCO (fabricant des tuyaux multicouche pour le chauffage) Manuel technique Belgique 2006.
- [16] H. Bourefis. Modélisation d'un plancher chauffant. Cas de la région de Hassi Messaoud. Thèse de magistère, Université Mentouri Constantine (2000).
- [17] < Energie solaire-Calculs et optimisation > JACQUES BERNARD édition ellipses.2004.
- [18] C. A. Roulet. Energétique du bâtiment I, Interactions entre le climat et le bâtiment. Edité par Presses Polytechniques Romandes (1987).

Références Bibliographiques

- [19] J. R. Vaillant. Utilisation et promesses de l'énergie solaire. Edition Eyrolle (1976).
- [20] J. C. Sabonnadière. Nouvelles technologies de l'énergie, tome 1 : Les énergies renouvelables. Lavoisier (2006).
- [21] A. H. Khedim. Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque. Centre de Publication Universitaire 2003).
- [22] P. Neyer. Energie solaire thermique. Guide des Energies Renouvelables, (2003).
- [23] Ch. P. De Brichambaut, Ch. Vauge. Le gisement solaire évaluation de la ressource énergétique. Edit Technique et Documentation, Paris (1981).
- [24] Khedim, A., Energie solaire: utilisation thermique et photovoltaïque. 2005, ANEP.
- [25] R. Kharchi. Etude expérimentale du comportement thermique d'un plancher solaire direct. Thèse de magister Université Blida (2002).
- [26] R. Kharchi, N. Ait Messaoudene, M. Belhamel. Etude expérimentale du comportement thermique d'un plancher solaire direct. Revue des Energies Renouvelables, Journées Internationales de Thermique, N° 115-119 (2001).
- [27] BENMEDDOUR AMOR « étude et simulation numérique des contraintes thermomécaniques dans le silicium photovoltaïque » thèse de doctorat Constantine 2010.
- [28] M. E. A. Bekkouche. Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen (2009).
- [29] M. Boubekri, A. Chaker, A. Cheknane. Numerical approach for performance study of hybrid PV/thermal collector. Revue des énergies renouvelables vol 12, N°3 (2009).
- [30] M. Zaheer-Uddin, G. R. Zheng and Cho. Sung-Hwan. Optimal operation of an embedded-piping floor heating system with control input constraints. Energy convers, Mgmt vol 38, N°7 (1997).
- [31] F. Mokhtari. Etude d'une boucle régulée capteur-plancher solaire. Thèse de magister Université Blida (2005).
- [32] M. Amir, M. Lacroix, N. Galanis. Comportement thermique de dalles chauffantes électriques pour le stockage quotidien. Int. J. Therm. Sci, 38 (1999).
- [33] L. Fontana. Thermal performance of radiant heating floors in furnished enclosed spaces. Applied Thermal Engineering, 31 (2011).
- [34] Mémoire de fin d'étude. (2024). récupéré May 24, 2024, depuis dspace.univ-tlemcen.dz.
- [35] ANSYS (2022). "Ansys fluent-cfd software|ansys, <<https://www.ansys.com/academic/students>>.

Références Bibliographiques

[36] Chapitre V Simulation & interprétati. (2024). récupéré May 24, 2024, depuis dspace.univ-ouargla.dz

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'enseignement Supérieur et de La recherche Scientifique

جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الآلية والكهروميكانيك

Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département automatique et électromécanique

إذن بالطباعة (مذكرة ماستر)
بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف الطلبة التالية أسماؤهم:

1. الطالب (ة): بلعور عبد السلام
2. الطالب (ة): برهان عبد القادر محمد أنيس
تخصص: صيانة صناعية
نمنح نحن الأستاذ(ة):

الاسم واللقب	الرتبة - الجامعة الأصلية	الصفة	الامضاء
بن داوي مسعود	جامعة غرداية MCB	رئيس	
خير الناس مسعود	جامعة غرداية MAB	مصحح (1)	
بلاغيت عبد الحاكم	جامعة غرداية MAB	مؤطر	

الإذن بطباعة النسخة النهائية لمذكرة ماستر الموسومة بعنوان:

Modélisation numérique d'un écoulement au sein d'une dalle chauffante

امضاء رئيس القسم

العلمي عبد اللطيف
رئيس قسم الآلية
والكهروميكانيك

جامعة غرداية
قسم الآلية
والكهروميكانيك-1
كلية العلوم والتكنولوجيا