

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عبد القادر

تلمس - تلمس -

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen -
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie mécanique

Spécialité : Energies renouvelables en mécanique

Présenté par :

DIABI Hanifa

SAIDI Merwane

Sujet

Pompe à chaleur utilisant la récupération de l'énergie géothermique

Soutenu publiquement, le /06/ 2024, devant le jury composé de :

M/ ROSTANE Brahim	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mme/ SI CHAIB Amel	MAB	Université de Tlemcen	Examineur
Mme/ BENAHMED Lamia	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur
M/ ALIANE Khaled	Professeur	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2023 /2024

Remerciements

Je commence par exprimer ma gratitude envers le Créateur de toutes choses pour m'avoir accordé la force, la persévérance et les opportunités nécessaires tout au long de mon parcours académique.

*Un immense merci à mon encadrante de mémoire, **Mme. BENAHMED Lamia**, pour avoir accepté de superviser ce travail, dont les conseils avisés, les suggestions et les encouragements ont grandement enrichi mes réflexions.*

*Je tiens également à exprimer ma gratitude envers mon co-encadreur, **Mr. ALIANE Khaled**, dont l'apport a été précieux dans l'élaboration de ce travail.*

*Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers les membres du jury, **Mr. ROSTANE Brahim** et **Mme. SI CHAIB Amel**, pour leur disponibilité et leur expertise dans l'évaluation de ce travail.*

*Un grand remerciement au chef du département de Génie Mécanique, **Mr. M. BENRAMDANE**, ainsi qu'à tous les enseignants pour leur soutien continu, leur encouragement et leur orientation tout au long de mon cursus universitaire.*

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes chers parents, ce n'est qu'un simple fruit de vos sacrifices et votre
éducation spéciale, Vous êtes ma raison de réussir et de continuer
à avancer dans le chemin que vous avez tracé !*

Tout le mérite vous revient

A mes frères et sœurs

A toute ma famille

*A toute personne qui a contribué de près ou de loin dans la réalisation de
cette recherche.*



Dédicace

Je dédie ce travail

À ma mère, source infinie d'amour et de soutien, pour ses encouragements constants et sa foi inébranlable en moi.

À mon père, pilier de sagesse et de persévérance, pour m'avoir appris l'importance du travail acharné et de la détermination.

Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mes frères, mes grands-parents et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, A celui qui m'a guidé et amené à choisir cette spécialité et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime

ملخص

في هذا العمل، تمت دراسة استرجاع الطاقة الجيوحرارية باستخدام مبادل حراري عمودي بهدف استخدامه لاحقاً في مضخة حرارية. أولاً، تم تقديم شرح حول المضخة الحرارية الجيوحرارية وأهمية استخدام الأرض كمصدر للحرارة لتلبية احتياجات التدفئة.

يهدف هذا العمل إلى تقديم دراسة عددية ثلاثية الأبعاد لتقييم تأثير العوازل على أداء مبادل حراري على شكل حرف U. الهدف الأسمى هو تحسين نقل الحرارة لضمان أداء مثالي للتدفئة.

تم حل نظام المعادلات الحاكمة لهذه المشكلة باستخدام طريقة الحجم المحددة بواسطة برنامج Ansys CFX. النموذج الاضطرابي المستخدم هو نموذج $k-\omega$ SST.

الكلمات المفتاحية: محول حراري جيوحراري، عمودي، مضخة حرارية، ثلاثي الأبعاد ،
Ansys CFX ، تدفئة جيوحرارية، $k-\omega$ SST.

Résumé

Dans ce travail, on a étudié la récupération de l'énergie géothermique par échangeur de chaleur géothermique vertical pour l'utiliser ensuite dans une pompe à chaleur. Dans un premier temps, on a présenté la pompe à chaleur géothermique et l'intérêt d'utiliser le sol comme source de chaleur froide pour répondre aux besoins en chaleur.

L'objectif de ce travail est de présenter une étude numérique en 3D visant à évaluer les effets des chicanes sur les performances d'un échangeur thermique en forme U.

Notre but ultime est d'améliorer le transfert de chaleur pour garantir une performance de chauffage optimale.

Le système d'équations gouvernantes qui régit le problème est résolu numériquement par la méthode des volumes finis par le logiciel Ansys CFX. Le modèle de turbulence utilisé est le modèle k- ω SST.

Mots clés : Echangeur géothermique, vertical, pompe à chaleur, 3D, Ansys CFX, chauffage géothermique, k- ω SST.

Abstract

In this work, the recovery of geothermal energy using a vertical geothermal heat exchanger to subsequently use it in a heat pump has been studied. Initially, the geothermal heat pump and the interest in using the ground as a cold heat source to meet heating needs were presented.

The objective of this work is to present a 3D numerical study aimed at evaluating the effects of baffles on the performance of a U-shaped heat exchanger.

Our ultimate goal is to improve heat transfer to ensure optimal heating performance.

The governing system of equations that defines the problem is numerically solved using the finite volume method by the software Ansys CFX. The turbulence model used is the k- ω SST model.

Keywords: Geothermal exchanger, vertical, heat pump, 3D, Ansys CFX, geothermal heating, k- ω SST

Table des matières

Remerciements	i
Dédicace	ii
Dédicace	iii
ملخص.....	iv
Résumé.....	v
Abstract	vi
Listes des figures.....	x
Liste des tableaux.....	xii
Nomenclature	xiii
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Revue bibliographique	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Travaux précédents	4
Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie	
II.1. Introduction	19
II.2. La géothermie	19
II.2.1. Définition	19
II.2.2. Types d'énergie géothermique	21
II.2.2.1. La géothermie de surface.....	21
II.2.2.2. La géothermie profonde.....	21
II.2.3. Classification des ressources géothermiques	22
II.2.3.1. Géothermie haute énergie	22
II.2.3.2. Géothermie moyenne énergie	23
II.2.3.3. Géothermie basse énergie	23
II.2.3.4. Géothermie très basse énergie	24
II.2.4. La géothermie en Algérie.....	24
II.2.5. Les Avantages et les inconvénients de la géothermie.....	26
II.5.1 Les avantages :.....	26
II.5.2. Les inconvénients :	26
II.3. Pompe à chaleur.....	27
II.3.1. Définition	27

Table des matières

II.3.2. Le principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur	27
II.3.3. Technologies de pompes à chaleur	28
II.3.3.1. Pompe à chaleur à compression.....	28
II.3.3.2. Pompes à chaleur à absorption	29
II.3.4. Pompe à chaleur réversible	30
II.3.5. Coefficients de performance.....	31
II.3.5.1. En mode chauffage :	31
II.3.5.2. En mode rafraîchissement :	32
II.3.6. Les différents systèmes de captage.....	32
II.3.6.1 Les systèmes fermés	32
II.3.6.2. Les systèmes ouverts	36
II.3.7. Les émetteurs de chaleur.....	38
II.3.7.1 Les radiateurs.....	38
II.3.7.2. Le plancher chauffant	39
II.3.7.3. Les ventilo-convecteurs	39
II.4. Conclusion.....	40
Chapitre III : Traitement Numérique du problème Etudié	
III.1. Introduction	43
III.2. Les équationsgouvernantes.....	43
III.2.1. Equation de continuité :	43
III.2.2. Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes) :	43
III.2.3. Equation de l'énergie :	43
III.3. Méthode des volumes finis.....	44
III.4. Modèle de la turbulence (k- ω SST).....	45
III.5. Géométrie du problème étudié	46
III.6. Présentation du code CFX-18.0.....	49
III.6.1 ANSYS ICEM CFD	50
III.6.1.1. Création de la géométrie	50
III.6.1.2. Maillage (CFX-Mesh).....	51
III.6.2.CFX-pre	52
III.6.3. CFX-Solveur	53
III.6.4. CFX-post.....	54
III.7. Conclusion.....	55

Chapitre IV : Résultats et discussion	
IV.1. Introduction	57
IV.2. Indépendance de la solution du maillage	57
IV.3. Validation.....	58
IV.4. Résultats et discussion	58
IV.4.1. Les contours de la vitesse :.....	58
IV.4.2. Composante de l'énergie cinétique turbulente :.....	60
IV.4.3. La température :.....	61
IV.4.4. Le champ de pression.....	62
IV.4.5. Composante de la vitesse transversale v :	63
IV.4.6. Composante de la vitesse longitudinale u :	64
IV.4.7. Lignes de courant	65
IV.4.7. Profils de température :.....	66
IV.4. Conclusion	71
Conclusion générale	73
Références Bibliographiques.....	74

Listes des figures

Listes des figures

Figure I. 1 : Diagramme schématique d'une configuration verticale d'échangeur de chaleur géothermique à tube en U unique (GHE).....	5
Figure I. 2 : Diagramme schématique du GHPS de l'Université d'Oakland.	5
Figure I. 3 : Échangeur de chaleur en U avec entretoises.	6
Figure I. 4 : Maillage numérique utilisé pour le modèle étudié.	6
Figure I. 5 : Résumé de l'étude.	7
Figure I. 6 : Modèle physique du GAHE.	8
Figure I. 7 : Illustration du maillage utilisé.	8
Figure I. 8 : Courbes de température isothermes.	9
Figure I. 9 : Évolution de la température de l'air de sortie prévue à temps pour les modes de fonctionnement (a) refroidissement et (b) chauffage.	10
Figure I. 10 : Contours de température dans la section verticale à longueur du domaine numérique.	10
Figure I. 11 : Domaine de simulation pour l'EAHE.	11
Figure I. 12 : Températures de l'air à l'entrée et aux sorties simulée.	11
Figure I. 13 : Echangeur a 4 tubes.	12
Figure I. 14 : Echangeur à 6 tubes.	12
Figure I. 15 : Echangeur à 8 tubes Expérience de chauffage.	13
Figure I. 16 : Disposition de l'échangeur air/sol.	13
Figure I. 17 : Disposition des sondes le long de l'échangeur.	14
Figure I. 18 : Plan du R.D.C.	15
Figure I. 19 : Circuit de captage vertical.	15
Figure I. 20 : Image réelle de l'installation de l'échangeur.	16
Figure I. 21 : Schéma d'installation expérimentale de l'échangeur.	16
Figure I. 22 : Schéma de la géométrie du puits canadien.	17
Figure I. 23 : Comparaison entre les courbes de T_{asp} pour une paroi plane et paroi cylindrique lorsque $d_1=50\text{mm}$	17
Figure II. 1. Les sources d'énergie géothermique.	19
Figure II. 2. Gradient géothermique.	20
Figure II. 3. La géothermie de surface.	21
Figure II. 4. La géothermie profonde.	22

Listes des figures

Figure II. 5. Schéma expliquant la géothermie haute énergie.....	22
Figure II. 6. Schéma expliquant la géothermie moyenne énergie.....	23
Figure II. 7. Schéma expliquant la géothermie basse énergie.....	24
Figure II. 8. Schéma expliquant la géothermie très basse énergie.	24
Figure II. 9. Localisation et température des ressources géothermiques de l'Algérie.	26
Figure II. 10. Une pompe à chaleur.....	27
Figure II. 11. Schéma expliquant le principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur.	28
Figure II. 12. Schéma de principe d'une pompe à chaleur à compression, entraînée par un moteur thermique.	29
Figure II. 13. Pompes à chaleur à absorption.....	30
Figure II. 14. Schéma de fonctionnement d'une pompe à chaleur réversible pour la production de chaud.....	31
Figure II. 15. Schéma de fonctionnement d'une pompe à chaleur réversible pour la production de froid.	31
Figure II. 16. Capteur horizontal.....	33
Figure II. 17. Schéma d'une pompe chaleur à détente directe (sol-sol).....	33
Figure II. 18. Schéma d'une pompe chaleur à fluides intermédiaires.....	34
Figure II. 19. Schéma d'une pompe chaleur mixtes (sol-eau).....	34
Figure II. 20. Configurations et géométries possibles, pour les sondes géothermiques verticales.	35
Figure II. 21. Champ de sonde géothermique.	36
Figure II. 22. Schéma expliquant le principe de fonctionnement d'une corbeille géothermique.	36
Figure II. 23. Différentes formes de doublets géothermiques.....	37
Figure II. 24. Schéma Puits à colonne permanente.	38
Figure II. 25. Radiateur.	39
Figure II. 26. Schéma d'un plancher chauffant.	39
Figure II. 27. Ventilo- convecteur.....	40
Figure III. 1. Volume de contrôle.....	44
Figure III. 2. Géométrie de l'échangeur de forme U.....	47
Figure III. 3. Géométrie de l'échangeur avec des chicane à l'entrée.....	48
Figure III. 4. Géométrie de l'échangeur avec des chicane à la sortie.	48

Listes des figures

Figure III. 5. Géométrie de l'échangeur avec des chicanes à l'entrée et à la sortie.	49
Figure III. 6. Structure du code ANSYS CFX.	49
Figure III. 7. Géométrie du domaine de calcul réalisée à l'aide d'ICEM CFD 18.	51
Figure III. 8. Maillage du domaine d'étude avec ICEM CFD 17.....	52
Figure III. 9. Présentation des conditions aux limites de la géométrie dans le logiciel CFX Pre.	53
Figure III. 10. Résolution du problème par CFX- Solver.	54
Figure III. 11. Présentation de résultat par le CFX- post.	54
Figure IV. 1. Mailles testées.....	57
Figure IV. 2. Répartition du champ de vitesse à travers l'échangeur.	59
Figure IV. 3. Energie cinétique turbulente sur le plan de tube.....	60
Figure IV. 4. Etude comparative des champs thermiques sur le plan de l'échangeur	61
Figure IV. 5. Comparaison des distributions de pression à travers l'échangeur.....	62
Figure IV. 6. La variation des champs de vitesse transversale à travers l'échangeur.....	64
Figure IV. 7. La variation des champs de vitesse longitudinale à travers la section du tube...	64
Figure IV. 8. Lignes de courant en 3D.....	65
Figure IV. 9. Profils de température dans le tube de sortie pour les différents cas.....	66
Figure IV. 10. Profils de température dans le tube sans chicanes.....	67
Figure IV. 11. Profils de température dans le tube avec chicanes à l'entrée.....	68
Figure IV. 12. Profils de température dans le tube avec chicanes à la sortie.....	69
Figure IV. 13. Profils de température dans le tube avec chicanes de 2 cotés.....	70

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II. 1 . Localisation et température de quelques sources thermales de l'Algérie	25
Tableau III. 1. Coefficients empiriques du modèle SST k- ω	46
Tableau III. 2 dimensionnement de tube en U.	46
Tableau III. 3 Les paramètres géométriques des anneaux.....	47
Tableau III. 4 Statistique de maillage.....	52
Tableau III. 5 conditions aux limites.....	52

Nomenclature

Liste des abréviations :

GHE : Echangeur de chaleur géothermique
GHPS : Système de pompe à chaleur géothermique
GAHE : Echangeur de chaleur sol-air
GCHP : Pompe à Chaleur Couplée au Sol
COP : Coefficient de performance
SPT : Test de pénétration standard
PVC : Polychlorure de vinyle
CFD : Mécanique des fluides numérique
PAC : Pompes à chaleur
ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
EER : Coefficient frigorifique

Lettres grecques :

ρ : Masse volumique du fluide [Kg / m^3]
 μ : Viscosité dynamique [Pa.s]
 ω : Fréquence turbulente [$1/\text{s}$]
 β : Coefficient de dilatation thermique
 σ_k : Coefficient de Prandtl pour l'énergie cinétique turbulente
 σ_ω : coefficient de Prandtl turbulent pour le taux de dissipation spécifique
 μ_i : viscosité de transport [m^2 / s]
 α : Diffusivité thermique [m^2 / s]
 \emptyset : Grandeur physique
F : Fonction de mélange
 P_k : Taux de production d'énergie cinétique turbulente [m^2 / s^3]
 C_μ : Constante de modèle de turbulence
 S_{ij} : Tenseur de déformation [$1/\text{s}$]

Lettres latines :

C_p : Capacité thermique massique à pression constante [$\text{J}/\text{Kg.K}$]
T : Température[K]
t : Temps [s]
V : Vecteur vitesse [m/s]

Nomenclature

∇T : Gradient de température [K/m]

∇p : Gradient de pression [N/m³]

\bar{p} : Pression moyenne

K : Energie cinétique de turbulence [m²/s²]

x,y,z : Coordonnées spatiales [m]

\bar{u}_i : Vitesse moyenne suivant x [m/s]

\bar{u}_j : Vitesse moyenne suivant y [m/s]

L : Profondeur [m]

D : Distance [m]

t : Epaisseur [m]

∇ : La notation nabla

ν_t : La viscosité turbulence

ϑ : Viscosité cinématique [m²/s]



Introduction

Générale

Introduction Générale

Le recours massif aux énergies fossiles a longtemps été le moteur de notre développement industriel et économique. Cependant, leur utilisation massive a engendré une multitude de problèmes, notamment le réchauffement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre. Face à cette crise environnementale, la transition vers des sources d'énergie plus durables est devenue une priorité mondiale.

Les énergies renouvelables offrent une solution prometteuse pour atténuer les effets du changement climatique et réduire notre dépendance aux combustibles fossiles. Parmi ces alternatives, l'énergie géothermique qui se distingue par sa disponibilité constante et son potentiel dans le secteur du bâtiment.

Les bâtiments, en tant que premiers consommateurs d'énergie, jouent un rôle crucial dans cette transition vers des modes de vie plus durables. En exploitant l'énergie géothermique pour le chauffage et le rafraîchissement, il est possible de réduire significativement l'empreinte carbone des bâtiments tout en assurant un confort thermique optimal pour leurs occupants.

L'énergie géothermie est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et la technique qui vise à l'exploiter. Le principe consiste à exploiter l'énergie géothermique contenue dans le sol via un échangeur de chaleur et de profiter de l'écart de température entre celle de l'ambiance et du sol dans une profondeur définie, pour chauffer en hiver ou refroidir en été.

Il existe plusieurs technologies pour assurer l'échange de chaleur entre le local et le sous-sol. Par exemple, on peut mentionner les systèmes de pompes à chaleur, équipés de capteurs géothermiques verticaux ou horizontaux.

L'objectif de ce travail est de présenter une étude numérique visant à évaluer les effets des chicanes sur les performances d'un échangeur thermique en U.

Afin d'accomplir les objectifs de cette étude, ce mémoire est segmenté en quatre chapitres :

- ✚ Le premier chapitre est dédié à une recherche bibliographique, qui se focalise sur les études antérieures portant sur l'utilisation de l'énergie géothermique comme source de chauffage et de refroidissement pour les bâtiments résidentiels (maisons individuelles).

Introduction Générale

✚ Le deuxième chapitre offre une vue générale sur l'énergie géothermique, d'une part en exposant sa définition, ses divers types, les ressources géothermiques, ainsi que ses avantages et inconvénients.

D'autre part, il présente des généralités sur les pompes à chaleur géothermiques, en montrons leurs composants, leurs types, leur fonctionnement et les différentes méthodes de captage associées.

✚ Le troisième chapitre présente le système d'équations, ainsi que le modèle de turbulence ($k-\omega$ SST) et le logiciel Ansys CFX utilisé pour modéliser numériquement l'écoulement et le transfert thermique dans un échangeur de chaleur géothermique en forme U.

✚ Le quatrième chapitre traite une discussion détaillée sur les résultats obtenus.

Finalement, ce mémoire se termine par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

A decorative floral wreath border composed of dark blue lines, leaves, and small flowers, framing the central text.

Chapitre I
Revue
bibliographique

Chapitre I : Revue bibliographique

I.1. Introduction

L'objectif du premier chapitre consiste à effectuer une synthèse des recherches théoriques, analytiques, numériques et expérimentales portant sur la géothermie. Nous nous penchons particulièrement sur les principales études relatives à un échangeur géothermique conçu pour récupérer l'énergie thermique.

Ci-dessous, nous exposons les résultats de plusieurs études menées dans le même domaine.

I.2. Travaux précédents

Kh. Salhein, C. J. Kobus et M. Zohdy [1] ont présenté un modèle mathématique du comportement de transfert de chaleur entre le liquide à l'intérieur des conduites géothermiques souterraines verticales et le sol environnant pour les modes de chauffage (en hiver) et de refroidissement (en été) dans un échangeur de chaleur géothermique (GHE) qui peut optimiser son rendement. La température de sortie du GHE atteint la valeur appropriée lorsque la vitesse de l'eau est suffisamment réduite. Par la suite, le modèle proposé a été appliqué à une étude de cas d'un système de pompe à chaleur géothermique (GHPS) de 400 tonnes à l'Université d'Oakland, en mode chauffage et refroidissement, afin d'évaluer sa validité et d'améliorer les performances du GHE. Le modèle a été implémenté dans MATLAB à l'aide d'un solveur d'équation différentielle ordinaire. Les résultats révèlent que la plage acceptable de vitesse de l'eau pour le GHE de l'Université d'Oakland se situait entre 0,35 et 0,45m/s, qui garantissaient que le système de pompe à chaleur délivrait la température appropriée pour fournir au Bâtiment de santé humaine une température confortable quelle que soit la saison. Les plages de vitesse de l'eau suggérées dans les tuyaux verticaux à tube unique en U d'un diamètre de 25 mm, de 32mm, et de 40mm sont compris entre 0,33 et 0,43 m/s, 0,35 à 0,45m/s, et 0,38 à 0,48 m/s, respectivement.

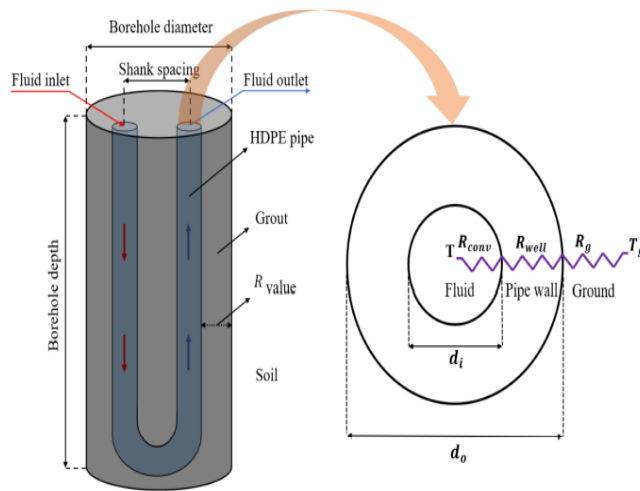


Figure I. 1 : Diagramme schématique d'une configuration verticale d'échangeur de chaleur géothermique à tube en U unique (GHE).

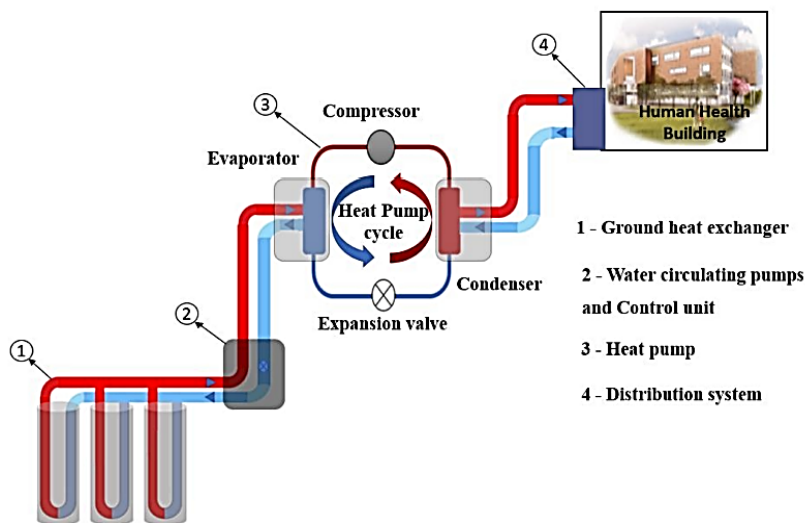


Figure I. 2 : Diagramme schématique du GHPS de l'Université d'Oakland.

M. Benyoub, B. Bouhacina, A. Oudrane et B. Aour¹ [2] ont étudié les systèmes de climatisation par Puits Géothermie qui utilise le sol comme source de chaleur est une technologie d'énergie renouvelable prometteuse et très efficace et économique pour fournir le chauffage et le refroidissement des locaux résidentiels. La climatisation se fait par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur à tube en U. Une étude de simulation numérique d'un fluide caloporteur qui s'écoule à l'intérieur d'un échangeur de chaleur géothermique à tube en U est présentée. La géométrie de ce modèle et le maillage ont été réalisés à l'aide du

Chapitre I : Revue bibliographique

logiciel Gambit. La simulation du comportement dynamique et thermique du fluide a été effectuée en utilisant le logiciel Fluent(3D).

Le système se compose d'un échangeur de chaleur géothermique vertical d'un tube en de 5 m de long, avec un diamètre de forage de 0,110 m, effectué dans la terre remplie en suite de béton, le tube en U à 32 mm de diamètre et La distance entre ses deux jambes est de 60 mm

Les principales conclusions peuvent être tirées de ces travaux étudiés sont comme suit :

✓ L'évolution de la température en fonction de la position montre que le béton dans un échangeur vertical géothermique est indispensable pour la stabilité et la rigidité du tube en U et pour l'augmentation du transfert thermique.

✓ La distribution de la température en fonction de la position montre la capacité du sous-sol réservé pour le stockage de l'énergie thermique qui est inversement proportionnelle à la diffusivité du sol.

✓ La distribution de la température en fonction de la position montre aussi que la distribution de la température autour du tube en U change avec la profondeur.

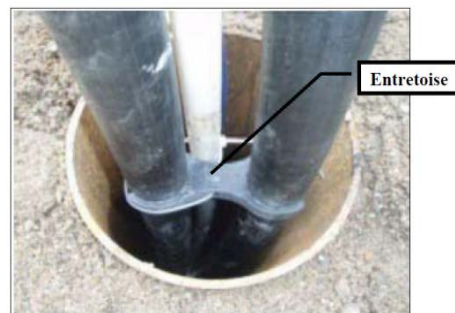


Figure I. 3 : Échangeur de chaleur en U avec entretoises.

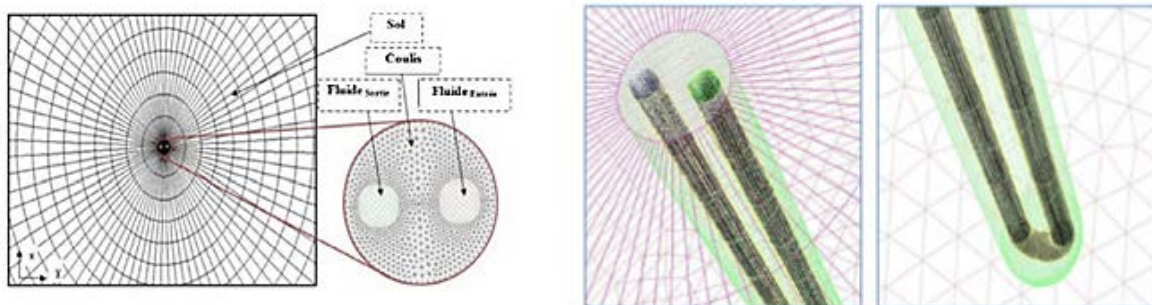


Figure I. 4 : Maillage numérique utilisé pour le modèle étudié.

Chapitre I : Revue bibliographique

A. Aranda-Arizmendi, M. Rodríguez-Vázquez, C.M Jiménez-Xamán, R.J Romero, M. Montiel-González [3] ont fait une étude paramétrique d'un échangeur de chaleur sol-air (GAHE) utilisant des modèles numériques basés sur la dynamique des fluides computationnelle avec la méthode des volumes finis pour évaluer le potentiel thermique du GAHE est présentée. Les variables climatologiques telles que l'humidité relative, la vitesse du flux d'air et la température de l'air entrant sont analysées, ainsi que l'augmentation de la conductivité thermique du sol due à sa teneur en humidité. De plus, une étude de la profondeur d'installation optimale ainsi que de la longueur de l'isolation thermique dans le tuyau de sortie du GAHE est présentée. Les résultats révèlent qu'il existe un potentiel d'échange thermique plus élevé dans le GAHE pour une profondeur d'enfouissement optimale de 4 m et une longueur de canalisation de 15 m, une teneur en humidité du sol de 30 % pour le chauffage et 32 % pour le refroidissement, et un diamètre de canalisation de 0,15 m. L'utilisation d'isolant thermique est recommandée uniquement pour les 2 derniers mètres de longueur du tuyau de sortie du GAHE.

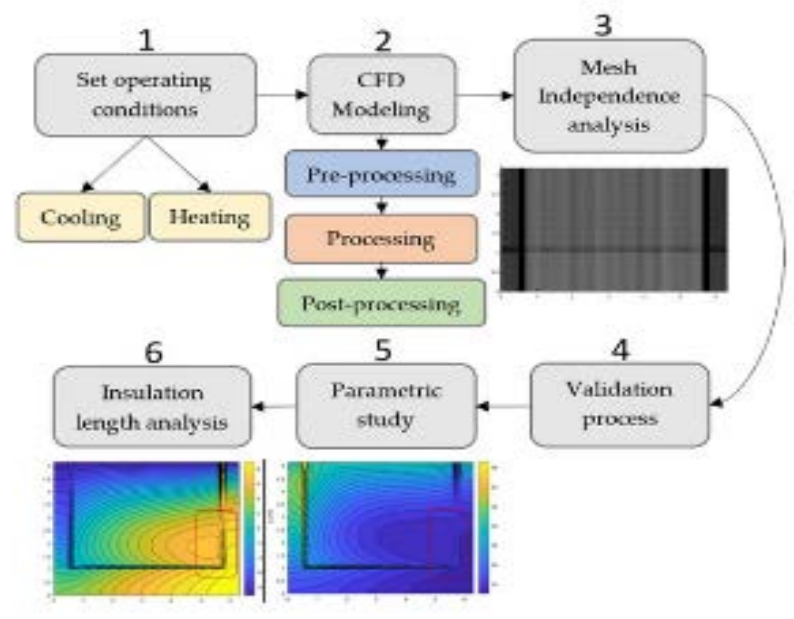


Figure I. 5 : Résumé de l'étude.

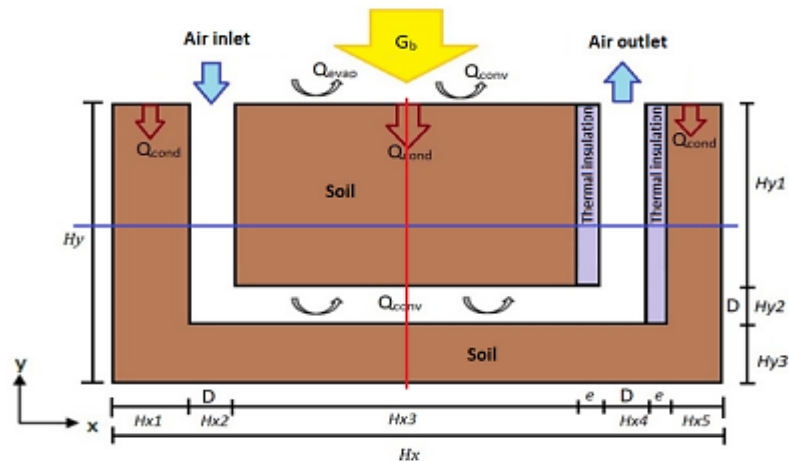


Figure I. 6 : Modèle physique du GAHE.

A. Jahanbin [4] a étudié les pompes à chaleur couplées au sol (GCHP) sont connues comme une technologie prometteuse pour la climatisation des bâtiments et la production d'eau chaude sanitaire. Il a proposé une conception nouvelle et simple de l'échangeur de chaleur au sol (GHE), à savoir le GHE vertical avec un tube en U elliptique pour améliorer les performances thermiques des systèmes GCHP. Pour le prouver ; une série de simulations 3D par éléments finis sont effectuées pour étudier le comportement thermique des tubes en U elliptiques et pour comparer leurs performances avec celles des tubes en U simples typiques. De plus, les paramètres influents sur les performances thermiques des tubes en U elliptiques ont été étudié et le pourcentage de décrémentation de la résistance thermique du trou de forage, par rapport au tube en U typique, est comparé pour chaque paramètre. Les résultats montrent que les tubes en U elliptiques pourraient améliorer le transfert de chaleur dans une mesure significative et diminuer la résistance thermique du forage de plus de 17 %, par rapport aux tubes en U simples typiques et d'augmenter le coefficient de performance (COP) des systèmes GCHP.

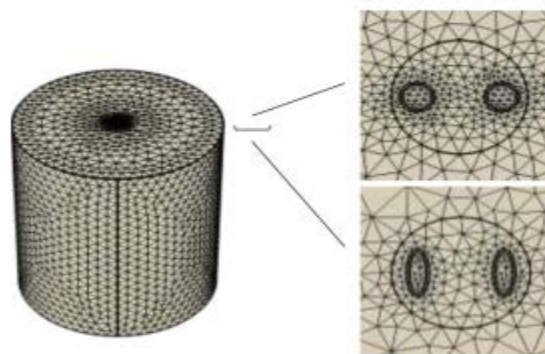


Figure I. 7 : Illustration du maillage utilisé.

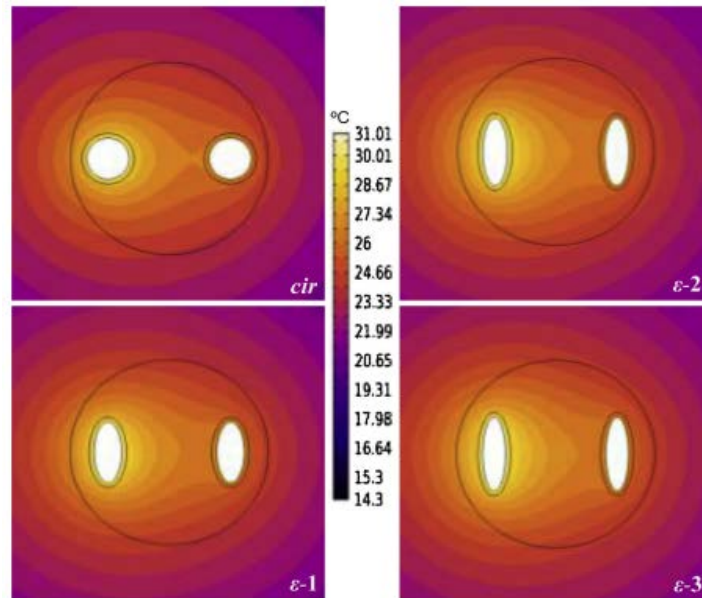


Figure I. 8 : Courbes de température isothermes.

N. Rosa, N. Soares, J.J Costa, P. Santos et H. Gervásio [5] ont évalué numériquement l'influence de trois paramètres sur la performance thermique globale d'un Système EAHE pour les bâtiments résidentiels dans le climat méditerranéen chaud-été. ANSYS- a été utilisé pour simuler le comportement transitoire EAHE pendant les modes de fonctionnement de chauffage et de refroidissement, et d'évaluer l'influence de chaque paramètre sur la température de l'air de sortie et le taux de transfert de chaleur sol-air. Les résultats numériques ont été validés par rapport aux données expérimentales et par rapport aux résultats analytiques. Cette dernière a également montré que pour une certaine vitesse de l'air et un certain diamètre de tuyau, la distance entre les tuyaux peuvent être réduits de 1,0 m à 0,5 m sans compromettre les performances EAHE, permettant ainsi une réduction de la superficie nécessaire pour les tuyaux EAHE jusqu'à 50%, et pour un certain diamètre de tuyau et distance entre les tuyaux adjacents, plus la vitesse de l'air est élevée, plus les performances thermiques du système sont faibles, principalement pour le refroidissement.

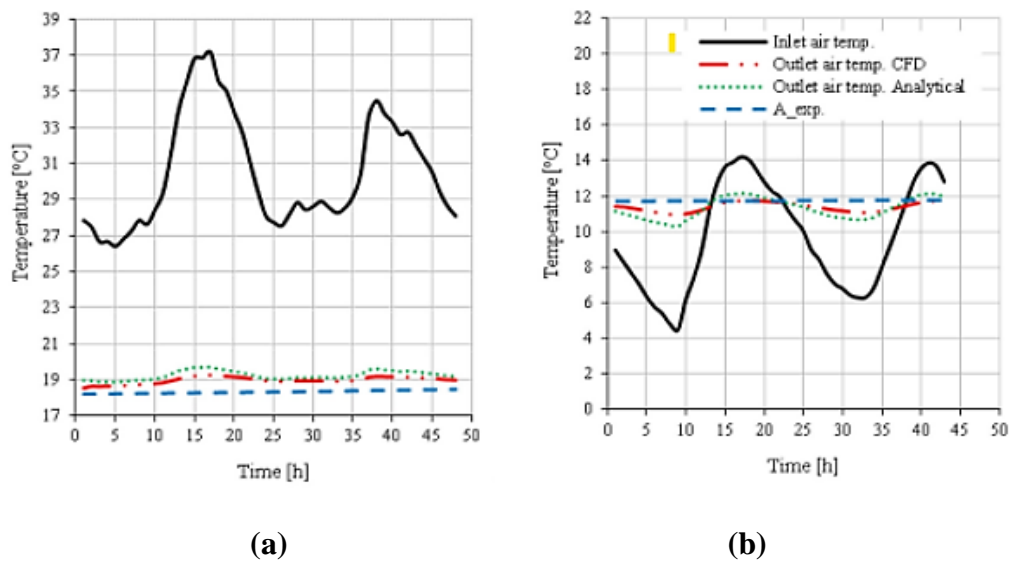


Figure I. 9 : Évolution de la température de l'air de sortie prévue à temps pour les modes de fonctionnement (a) refroidissement et (b) chauffage.

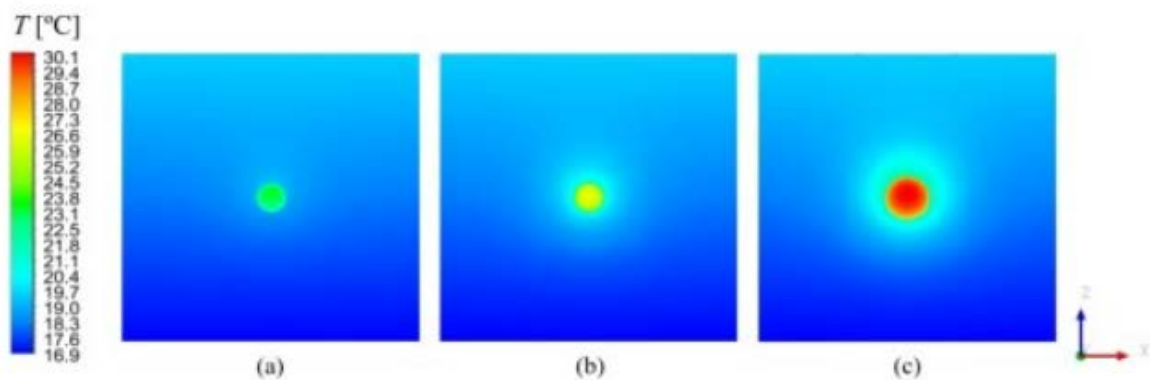


Figure I. 10 : Contours de température dans la section
Verticale à longueur du domaine numérique.

V.F. Hermes, J.V.A. Ramalho, L.A.O. Rocha, E.D. dosSantos, W.C. Marques, J. Costi, M.K. Rodrigues, L.A [6] ont analysé le comportement thermique d'un EAHE en tenant compte de données réalistes relatives à une ville côtière du sud du Brésil,

- Les profils géotechniques du sol ont été obtenus in situ grâce à des tests de pénétration standard (SPT),
- La variation annuelle de la température de la surface du sol et de l'air dans la région.

Les simulations ont été effectuées avec un modèle de calcul de volume fini vérifié et validé. Comme le montrent les résultats globaux, 2 m est la profondeur idéale pour placer les conduits localement, ce qui augmente les potentiels thermiques EAHE en été et en hiver.

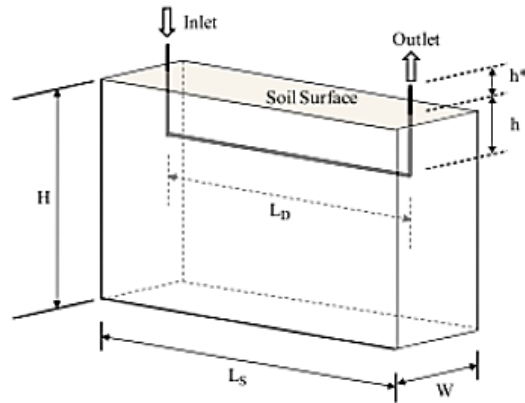


Figure I. 11 : Domaine de simulation pour l'EAHE.

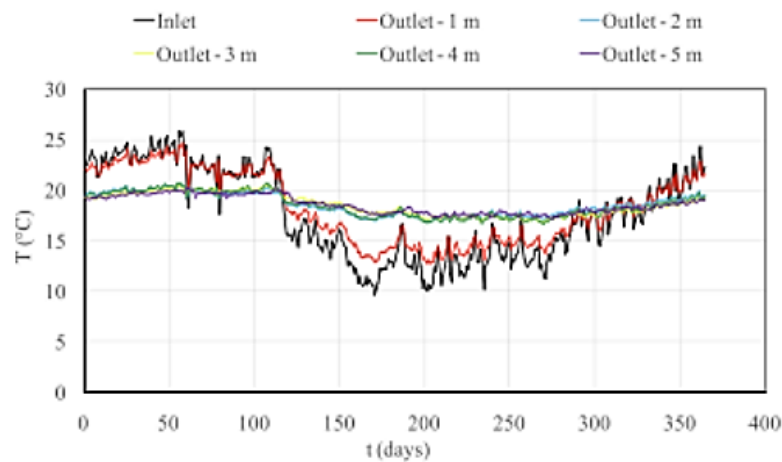


Figure I. 12 : Températures de l'air à l'entrée et aux sorties simulée.

A. SAYAD [7] a présenté les résultats de deux séries d'expériences réalisées dans la région ouest de Biskra ; la première série a été réalisée en utilisant l'eau chaude sortant d'un forage situé entre la commune de Bouchagroune et la commune d'Ourlal, la température à la sortie du forage est égale à 67°C, l'objectif de ces expériences est de chauffer l'air en utilisant trois différents échangeurs qui se différencient par leurs longueurs. La deuxième série d'expériences a été réalisées en moi de Juillet à la commune de Lioua, sur les mêmes échangeurs qui ont été immergés dans l'eau froide (19°C) d'un forage agricole. Cette fois l'objectif est de rafraichir l'eau entrant à un échangeur air-eau pour une utilisation domestique.

Ils ont réalisé trois différents échangeurs en PVC dont la même architecture mais qui se différencient par le nombre de tubes (quatre, six et huit tubes).

- La longueur de chaque tube est de 1 mètre.

Chapitre I : Revue bibliographique

- La distance entre deux tubes est de 78 mm et la différence entre les deux tubes dans la moyenne de chaque échangeur est de 115mm.
- Le diamètre du tube est de $\varnothing=32\text{mm}$.
- L'épaisseur de la paroi de chaque tube est de 1mm.



(a) Expérience de chauffage.



(b) Expérience de refroidissement.

Figure I. 13 : Echangeur a 4 tubes.



(a) Expérience de chauffage.



(b) Expérience de refroidissement.

Figure I. 14 : Echangeur à 6 tubes.

Chapitre I : Revue bibliographique



Figure I. 15 : Echangeur à 8 tubes Expérience de chauffage.

Les résultats de l'étude ont montré qu'il y a une relation proportionnelle entre la différence de température entre la sortie et l'entrée et la longueur de l'échangeur et une relation inversement proportionnelle avec le débit de l'air.

N. Moummi, H. Benfatah, N. Hatraf, A. Moummi et S. Youcef Ali, [8] ont étudié analytiquement et expérimentalement un échangeur air/sol, au laboratoire de génie mécanique de l'Université de Biskra ; pour déterminer les caractères principaux qui influent sur la performance de ce système.

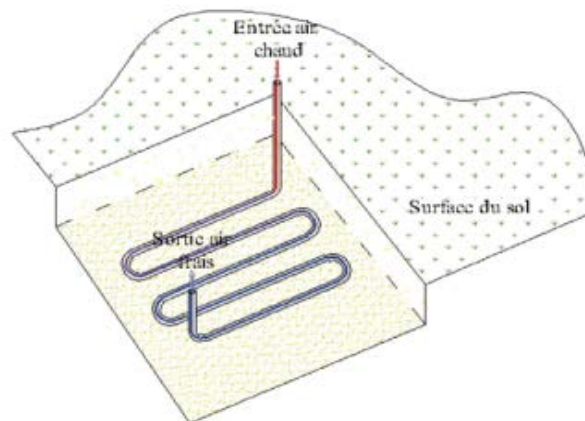


Figure I. 16 : Disposition de l'échangeur air/sol

Dans cette étude, ils ont considéré que :

- L'échange thermique se fait en régime stationnaire.
- Le sol est considéré homogène.
- Les caractéristiques de l'air et du sol sont considérées constantes.

Dans une section du conduit perpendiculaire à l'écoulement, l'air est considéré homogène,

L'échange convectif est régi par un coefficient convectif moyen.

- La température extérieure du tube est constante.

Chapitre I : Revue bibliographique

- La vitesse de l'air est considérée constante le long du conduit.

Il s'agit d'un réseau de quatre traçons d'une longueur totale d'environ 60 m. Le diamètre interne du tube est de 110mm. L'ensemble est placé à une profondeur de 3 m sous une pente de 2 %. Les tubes sont disposés et espacés les uns des autres d'une distance entre axes de 2 m.

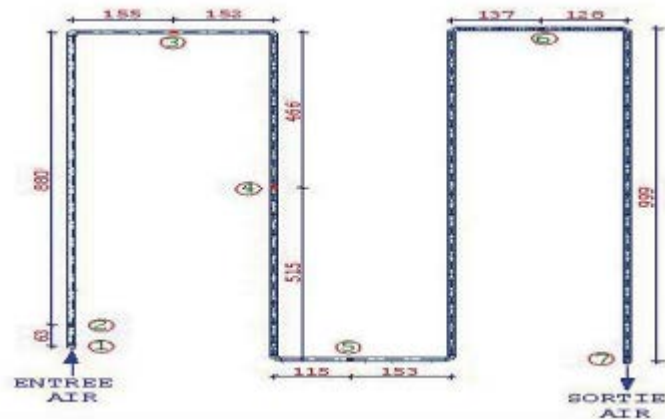


Figure I. 17 : Disposition des sondes le long de l'échangeur

DJ. Takourabt, A. Tamadzt, [9] ont fait l'étude d'une entreprise pour le chauffage d'une habitation d'environ 70 m², implantée à Tizi - Ouzou, à l'aide d'une pompe à chaleur qui est un organe essentiel. Ils ont mené au choix de la pompe sol/eau pour le captage horizontal. Celle-ci a l'avantage par sa simplicité et un cout limité ils ont choisi d'étudier deux circuits de captage · Circuit de captage :

- Capteur géothermique vertical d'un tube de diamètre 0.0422 m enterré à une profondeur de 52 m.
- Capteur géothermique horizontal d'un tube de diamètre 0.05 m, d'une longueur de 153 m de tuyau qui est réparti en 9 circuits parallèles de 17 m sur une surface d'environ 95 m².
- Circuit de chauffage (plancher chauffant) d'une longueur de 277.29 m.

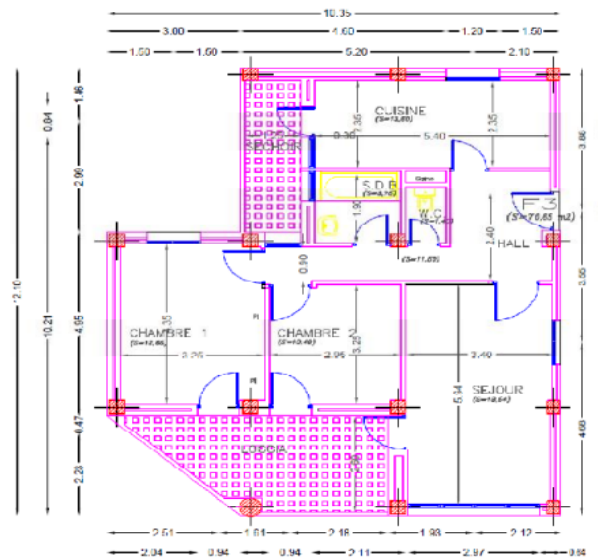


Figure I. 18 : Plan du R.D.C

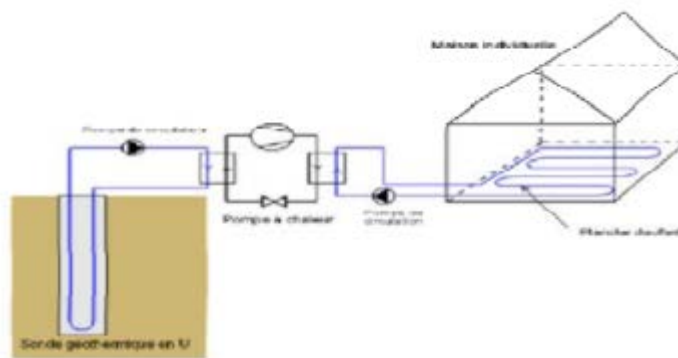


Figure I. 19 : Circuit de captage vertical

T. S. Bisoniya, A. Kumar and P. Baredar, [10] ont testé un échangeur air / sol dans les conditions chaudes et sèches à Bhopal en Inde. L'installation expérimentale est composée de deux tubes cylindriques en PVC de 0,1016 m de diamètre interne, 9,144 m de longueur de chaque tube, raccordés en série. La longueur totale de l'échangeur est 19.228 m, y compris les coudes et Les raccordements, enterré à une profondeur de 2 m. Pour des vitesses de l'air égales à 2m/s, 3.5m/s and 5m/s, ils ont conclu que la température de l'air chute rapidement dans les premiers mètres du tube que les derniers mètres. L'échangeur gagne 12,9 °C et 11,3 °C de température pour des vitesses de l'air de l'ordre de 2 m/s and 5m/s respectivement. Un modèle numérique est développé par le solveur CFD et validé avec les résultats expérimentaux réalisés sur site. [10]



Figure I. 20 : Image réelle de l'installation de l'échangeur.

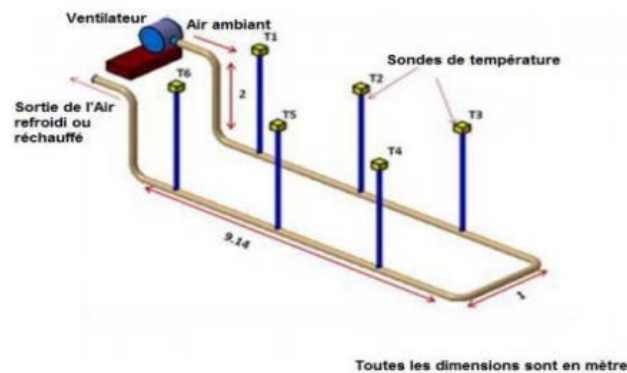


Figure I. 21 : Schéma d'installation expérimentale de l'échangeur.

H. BENFATEH,[11] Il a établi un modèle mathématique pour déterminer la température de sortie de l'échangeur à partir des principaux facteurs intrinsèques et extrinsèques au système. L'installation expérimentale est composée :

- D'un réseau de 2x04 tubes de 11cm de diamètre, longs de 12m et situés à 2 profondeurs différentes de 2m et 3m
- Les tubes sont disposés et espacés les uns des autres d'une distance entre axes de 02 m
- Un caniveau en sortie d'échangeur et une pente de 2 % permettent de recueillir les eaux de condensation et de les évacuer à l'aide d'une pompe.
- Deux fosses de réception en béton sont construites à l'entrée et en sortie d'échangeur.
- Un extracteur d'air de débit variable.
- Sondes thermiques : Plusieurs sondes thermiques ont été placées à l'entrée, au milieu et en sortie des tuyaux, ainsi que dans le sol à 2 et 3 m de profondeur.

Dans cette étude ils ont essayé de trouver des expressions analytiques puis numériques reliant la température de l'air à la sortie de l'échangeur en fonction de :

- la température extérieure

Chapitre I : Revue bibliographique

- la température du sol.
- les débits de ventilation.

Ceci est fait pour deux configurations de la géométrie de la gaine :

- Cas où la gaine est considérée plane.
- Cas où la gaine est considérée cylindrique

Ensuite ils ont essayé de trouver une relation entre la chaleur $Q_{sensible}$, le débit de l'air et le diamètre de la gaine.

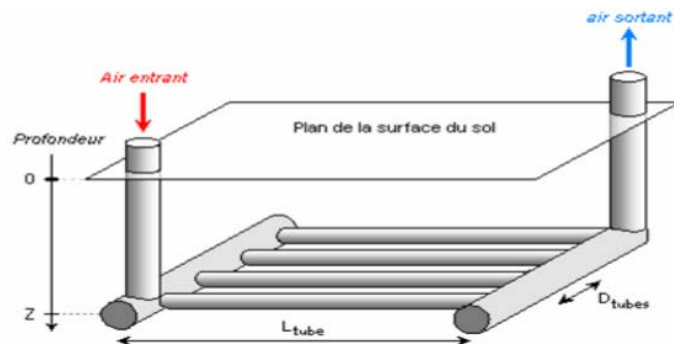


Figure I. 22 : Schéma de la géométrie du puits canadien.

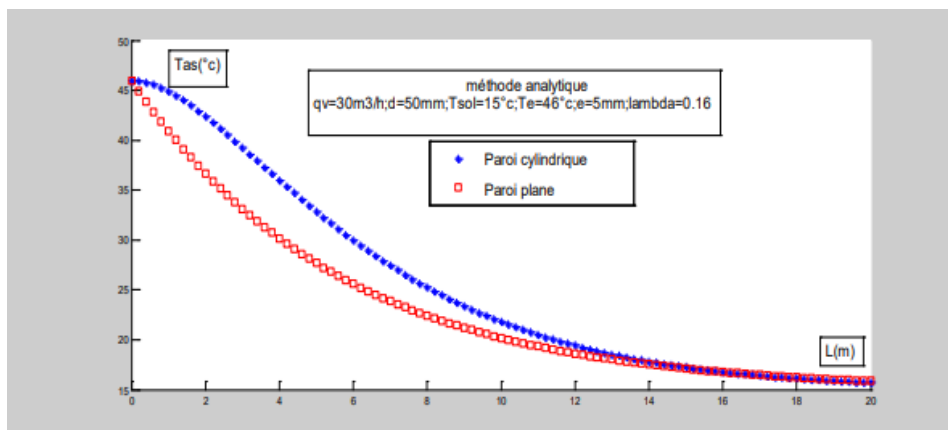
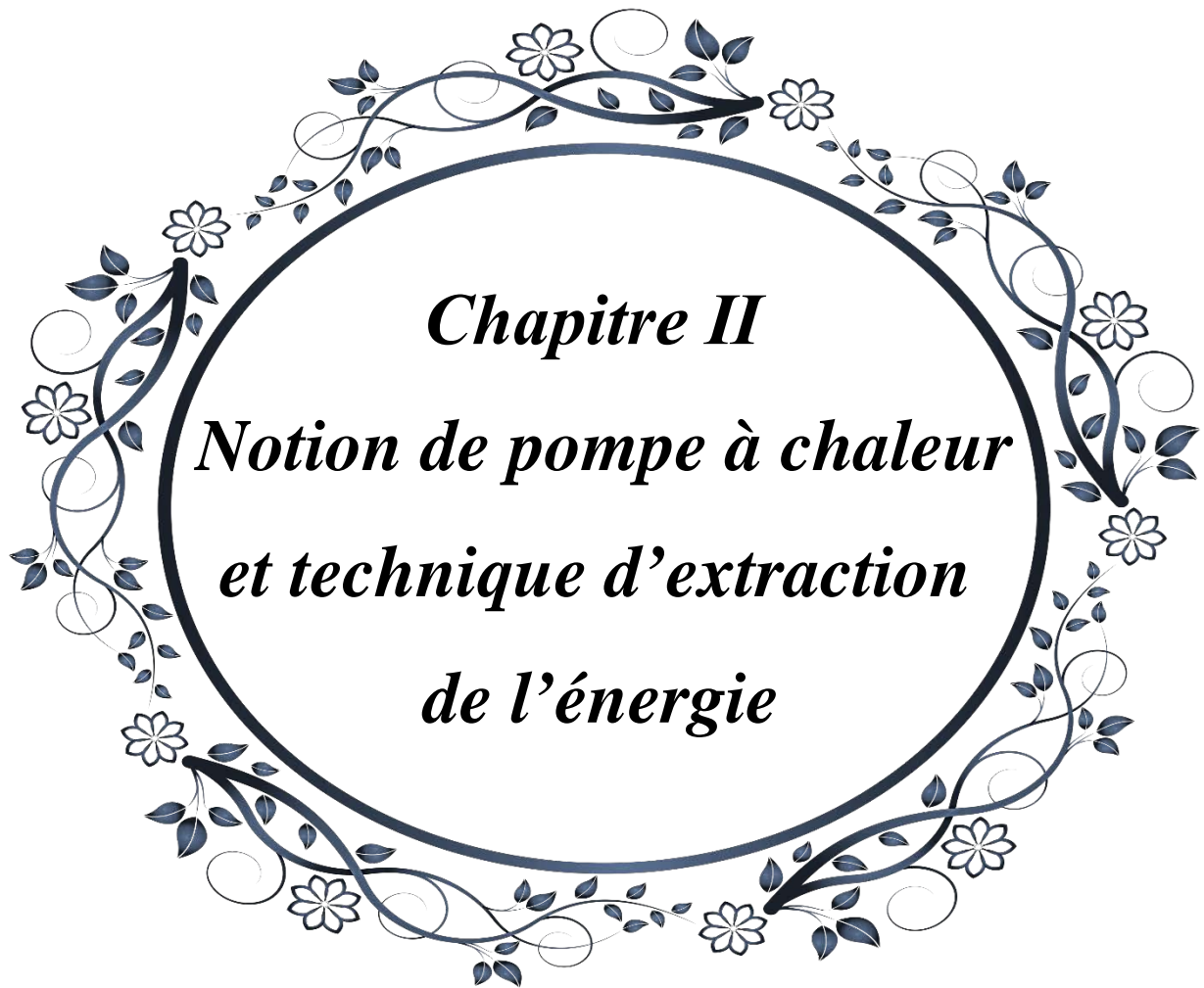


Figure I. 23 : Comparaison entre les courbes de T_{as} pour une paroi plane et paroi cylindrique lorsque $d_1=50\text{mm}$.

A decorative floral wreath border in black and white, featuring stylized leaves and flowers, framing the central text.

Chapitre II
Notion de pompe à chaleur
et technique d'extraction
de l'énergie

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

II.1. Introduction

Ce chapitre offre une présentation de l'énergie géothermique, d'une part en exposant sa définition, ses divers types, les ressources géothermiques, ainsi que ses avantages et inconvénients.

D'autre part, il présente des généralités sur les pompes à chaleur géothermiques, en montrant leurs composants, leurs types, leur fonctionnement et les différentes méthodes de captage associées.

II.2. La géothermie

II.2.1. Définition

Le terme "géothermie" découle de la fusion des mots grecs "Géo" pour "terre" et "thermie" pour "chaleur". La géothermie se destine à étudier les mécanismes de diffusion de la chaleur de la Terre jusqu'à sa surface et vise à mieux comprendre la structuration, les interactions internes et les manifestations externes de la Terre.[12]

La température à la surface de la Terre est influencée par deux sources d'énergie distinctes. D'une part, l'énergie solaire, provenant de l'extérieur de la planète, fournit un flux thermique externe, tandis qu'un flux thermique interne, également dirigé vers la surface, émane de l'intérieur du globe terrestre.

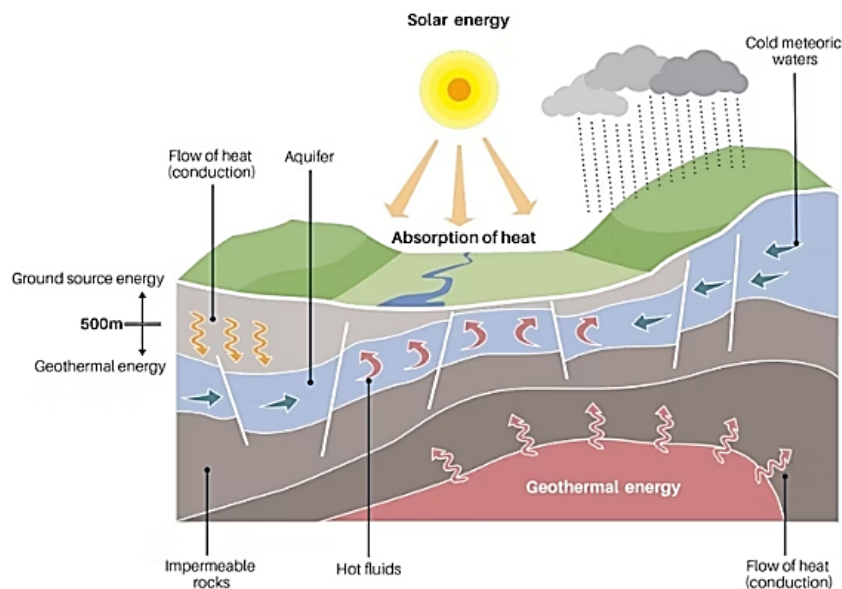


Figure II. 1. Les sources d'énergie géothermique. [13]

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

L'origine principale de cette chaleur interne provient de la désintégration radioactive des éléments radiogéniques, tels que l'uranium (U^{235} , U^{238}), le thorium (Th^{232}) et le potassium (K^{44}), naturellement présents dans les roches de la croûte terrestre et du manteau. Ces éléments, naturellement instables, se désintègrent pour former des éléments fils plus stables, libérant ainsi de l'énergie thermique qui représente près de 90% de l'énergie totale dissipée. D'autre part, une autre source de dissipation de chaleur à la surface terrestre est associée à l'énergie primitive de la Terre. Cette énergie primitive est la chaleur accumulée lors de l'accrétion des corps célestes qui ont formé la Terre, et cette chaleur continue de se dissiper vers la surface aujourd'hui. Ce processus représente environ 10% de l'énergie thermique totale produite à la surface de la Terre. [12]

La chaleur de la terre augmente avec la profondeur. Les mesures récentes de l'accroissement de la température avec la profondeur, appelée gradient géothermique, ont montré que cette valeur n'était pas uniforme à la surface du globe. En moyenne, la température croît d'environ 3°C pour 100 mètres, mais de nombreuses régions présentent des gradients géothermiques inhabituels : certains peuvent atteindre 10°C pour 100 mètres, tandis que d'autres ne montent que d' 1°C pour la même distance. Ces disparités sont influencées par divers facteurs géologiques et géographiques, comme la présence d'activité volcanique, les variations de composition du sol et les structures géologiques spécifiques. [14]

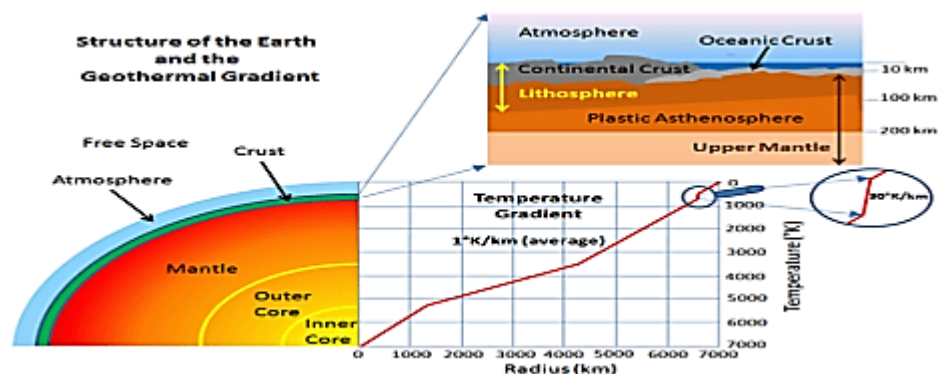


Figure II. 2. Gradient géothermique. [14]

L'énergie géothermique est l'ensemble des technologies qui permet d'exploiter la chaleur emmagasinée à l'intérieur de la terre. Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité. [15]

II.2.2. Types d'énergie géothermique

L'énergie géothermique peut être divisée en deux catégories : l'énergie géothermique de surface et l'énergie géothermique profonde.

II.2.2.1. La géothermie de surface

Le rayonnement du soleil et le ruissellement de l'eau de pluie permettent au sol de jouer un rôle d'inertie thermique, il y règne à quelques mètres de profondeur une température pratiquement constante tout l'année. La géothermie de surface utilise cette inertie pour obtenir des températures plus basses que les températures à la surface en été, et à l'inverse obtenir des températures plus élevées que les températures à la surface en hiver. En Hiver, la chaleur du sol ou de l'air est captée par une tuyauterie conduisant un fluide caloporteur. La chaleur est restituée dans le logement par la pompe à chaleur. En été, l'excès de chaleur dans la maison est restitué dans l'air par la pompe à chaleur. [16]

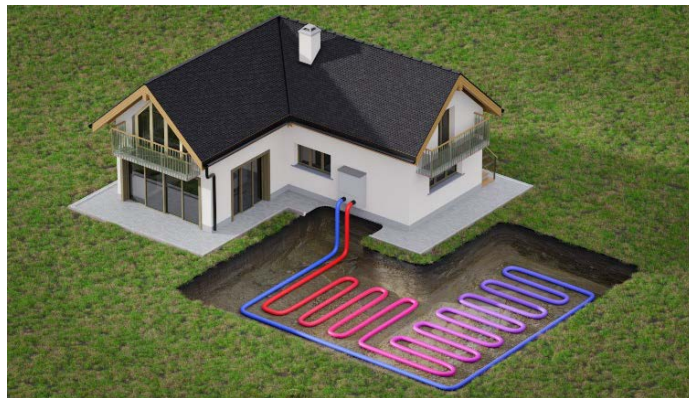


Figure II. 3. La géothermie de surface. [17]

II.2.2.2. La géothermie profonde

Le principe est de récupérer la chaleur en profondeur dans les nappes d'eau chaudes. Cette chaleur traverse « l'échangeur de chaleur » (système de pompe à chaleur), où l'excès de chaleur est rejeté dans le tuyau de rejection. La chaleur restante est envoyée aux radiateurs situés dans le logement. Ce type de géothermie est très pratique pour le chauffage, mais, contrairement à la géothermie de surface, on ne peut pas abaisser la chaleur dans la maison. [16]

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

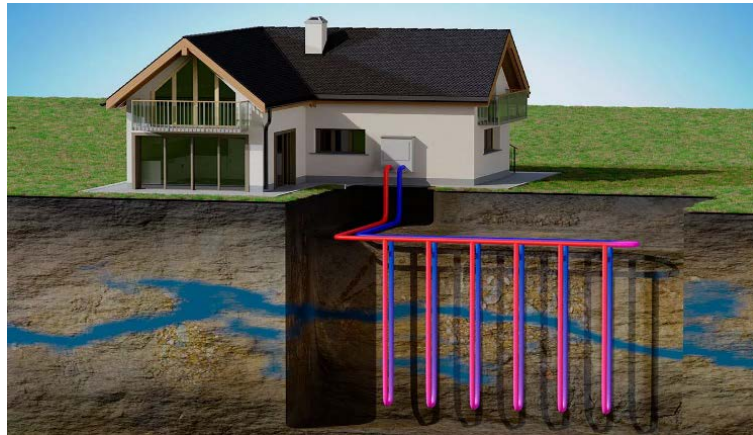


Figure II. 4. La géothermie profonde. [18]

II.2.3. Classification des ressources géothermiques

II.2.3.1. Géothermie haute énergie

Ces sources d'eaux géothermales à haute température se trouvent essentiellement dans les régions volcaniques du globe, à des profondeurs qui dépendent des conditions géologiques, entre 1 500 et 5 000 mètres. Ces gisements se caractérisent par des températures supérieures à 150°C. La géothermie haute énergie est destinée principalement à la production d'électricité et de la cogénération (production conjointe d'électricité et de chaleur grâce à des turbines à vapeur avec la récupération des condensats de la vapeur). [19]

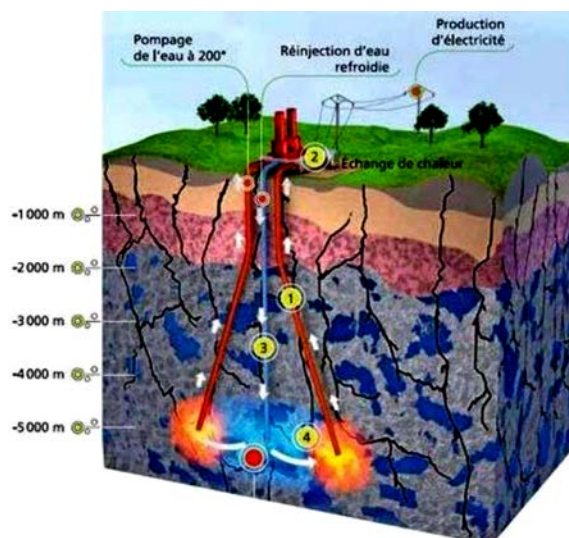


Figure II. 5. Schéma expliquant la géothermie haute énergie. [20]

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

II.2.3.2. Géothermie moyenne énergie

La géothermie moyenne énergie concerne des gisements d'eau liquide dont la température se situe entre 90°C et 150°C. On trouve des gisements de ce type à moins de 1 000m de profondeur dans les zones volcaniques ou entre 2 000m et 4 000m de profondeur dans des zones à gradient géothermal quasi-normal, généralement dans des bassins sédimentaires.[21]

Elle est utilisée dans des applications directes (le chauffage de locaux, le séchage de produits alimentaires, pisciculture, etc.), ou pour la production d'électricité par les systèmes à cycle binaire.[22]

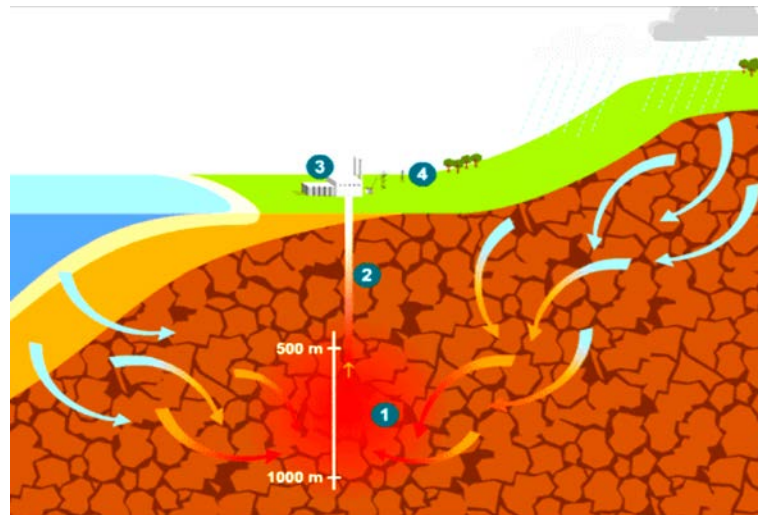


Figure II. 6. Schéma expliquant la géothermie moyenne énergie. [23]

II.2.3.3. Géothermie basse énergie

Les gisements sont localisés entre 1500 et 2500 mètres de profondeur avec des températures allant de 30°C à 90°C. Les réservoirs exploités sont le plus généralement situés des bassins sédimentaires. Cette énergie est principalement utilisée pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur, et certaines applications industrielles. [22]

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

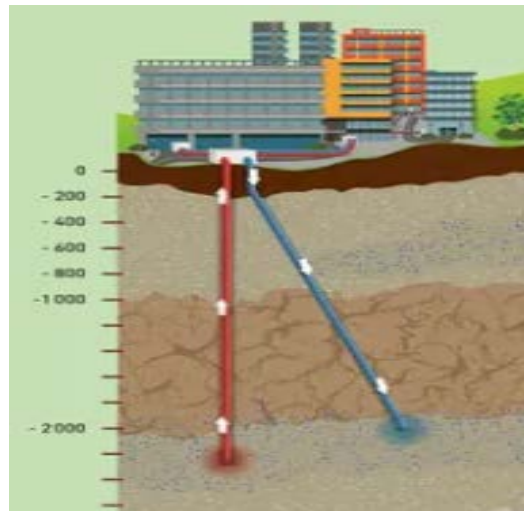


Figure II. 7.Schéma expliquant la géothermie basse énergie.

II.2.3.4. Géothermie très basse énergie

La Géothermie dite « très basse énergie » prélève la chaleur du sous-sol à basse température moins de 30 °C à des profondeurs allant jusqu'à 200 mètres. Ce niveau de température ne permet pas une utilisation directe de la chaleur par simple échange mais nécessite l'appoint en surface de pompes à chaleur (PAC) qui augmentent la température à un niveau suffisant pour le chauffage. Elle est utilisée aussi bien dans les maisons individuelles que dans les immeubles collectifs ou les bâtiments commerciaux. [24]

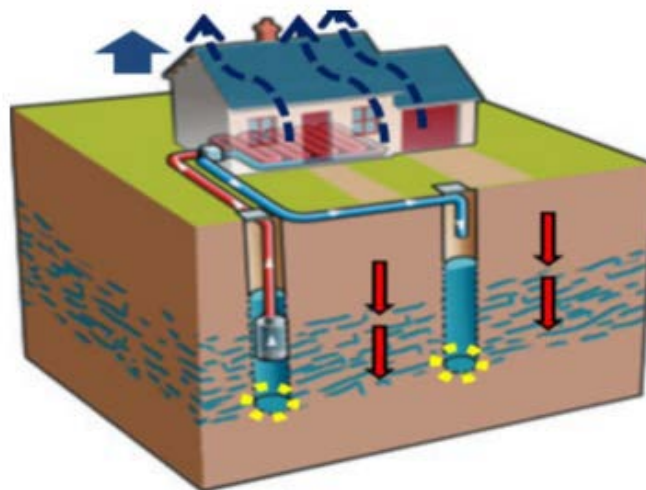


Figure II. 8.Schéma expliquant la géothermie très basse énergie [25]

II.2.4. La géothermie en Algérie

L'Algérie est reconnue comme l'un des pays possédant une abondance d'eaux thermo-minérales, avec une variété de nappes et de sources d'eau chaude offrant des températures

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

allant de 22°C à 98°C. Selon le dernier recensement effectué par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) en 2006, plus de 240 sources thermales ont été répertoriées dans le pays. Ci-dessous, quelques-unes de ces sources thermales algériennes sont répertoriées avec leur localisation respective et leurs températures dans le tableau suivant :[26]

Tableau II. 1 . Localisation et température de quelques sources thermales de l'Algérie [26]

Source Thermale	Localisation	Température (°C)
Hammam Rabbi	Saïda	49
Hammam Bouhadjar	Aïn Témouchent	66.5
Hammam Ain Mentila	Relizane	31
Hammam Righa	Aïn Defla	67
Hammam Melouane	Blida	38.5
Hammam El Mesrane	Djelfa	42
Hammam Ksenia	Bouira	60
Hammam Sidi Yahia Al Aidli	Béjaïa	58
Hammam Meskhoutine	Guelma	98
Hammam Hammamet	Tébessa	35

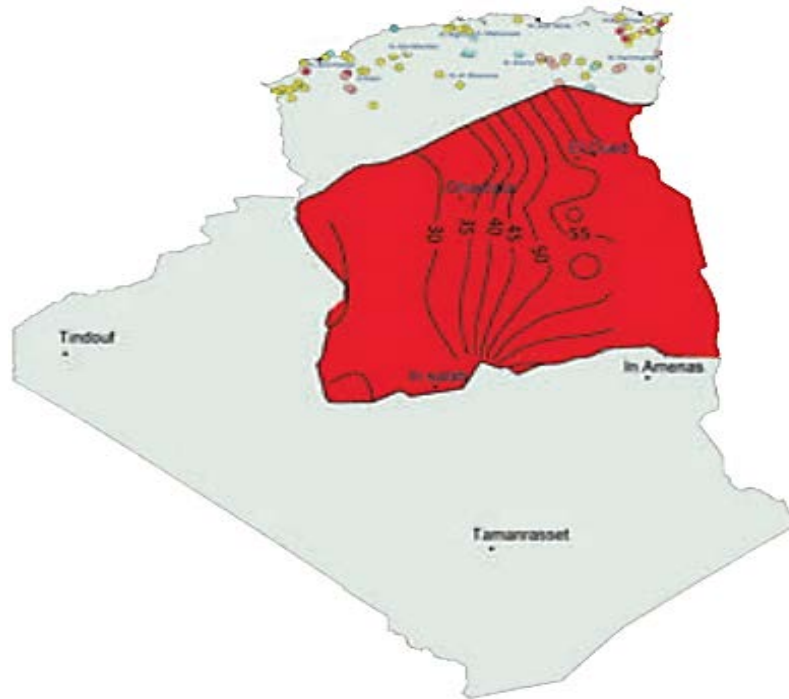


Figure II. 9 . Localisation et température des ressources géothermiques de l'Algérie. [26]

II.2.5. Les Avantages et les inconvénients de la géothermie

II.5.1 Les avantages :

- Ressource énergétique locale qui ne nécessite pas de transport
- Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement
- Capacités de production importantes comparées aux autres énergies renouvelées
- Énergie de base, généralement, indépendant des conditions climatiques. [27]

II.5.2. Les inconvénients :

- Coûts d'investissement et de maintenance très élevés.
- L'utilisation de la géothermie reste particulière, proche notamment des zones volcaniques.
- Risque de glissement de terrain. [27]

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

II.3. Pompe à chaleur

II.3.1. Définition

Dans un réfrigérateur, la chaleur est extraite de l'intérieur pour abaisser sa température, puis rejetée à l'extérieur, dans l'air de la cuisine. De même, une pompe à chaleur puise la chaleur de l'environnement extérieur, que ce soit le sol, l'air ou l'eau, pour la transférer à l'intérieur du logement. La pompe à chaleur est constituée d'un circuit hermétique à travers lequel circule un fluide frigorigène, pouvant être à l'état liquide ou gazeux en fonction des différents éléments qu'il traverse, tels que l'évaporateur, le compresseur, le condenseur et le détendeur.

Elle se compose d'une unité extérieure chargée de capter les calories présentes dans l'environnement extérieur, ainsi que d'unités intérieures chargées de les redistribuer à l'intérieur du bâtiment.

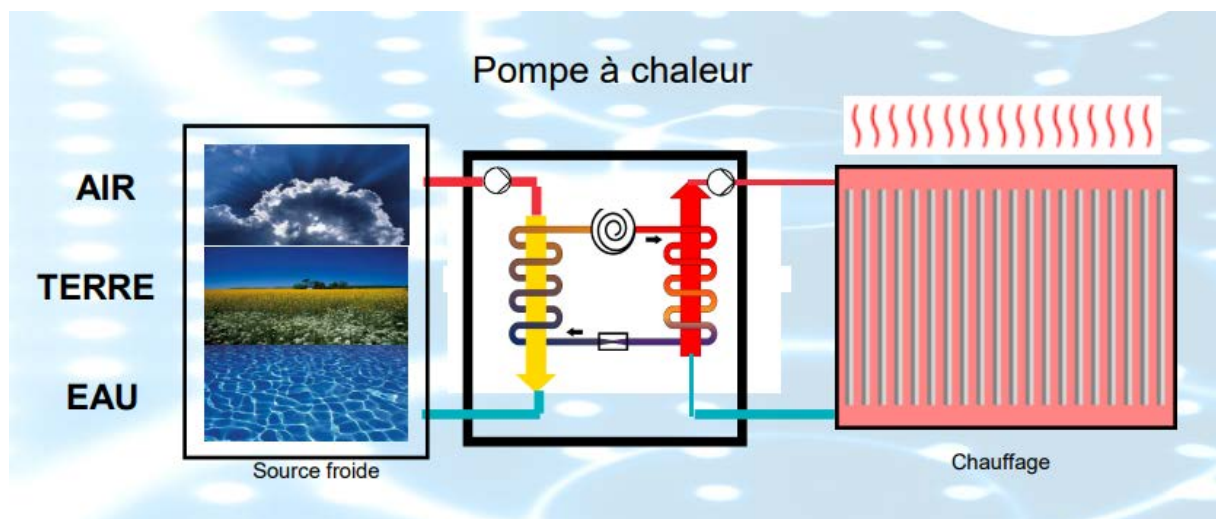


Figure II. 10. Une pompe à chaleur

II.3.2. Le principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur

Une pompe à chaleur est constituée d'un circuit fermé dans lequel circule un fluide de travail (fluide frigorigène), qui change de phase en fonction de sa position dans le circuit. Ce fluide est vaporisé et chauffé à travers un premier échangeur (évaporateur), ensuite il est comprimé au niveau du compresseur, ce qui entraîne une augmentation de la pression et donc une augmentation de la température de fonctionnement de la pompe à chaleur, ce liquide entre en contact avec un deuxième échangeur de chaleur (condenseur) permettant à sa chaleur d'être transférée à l'eau de circuit de chauffage (condensation). Ce fluide, entraîné par haute pression,

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

traverse un régulateur (détendeur), sa pression diminue et alors on retrouve un liquide froid à basse pression : le cycle peut recommencer. [28]

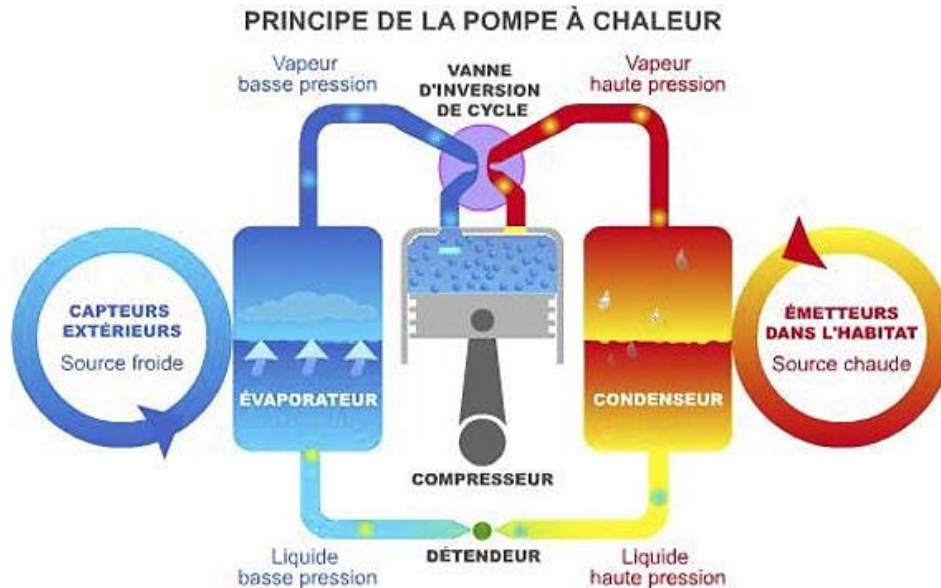


Figure II. 11.Schéma expliquant le principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur. [29]

II.3.3. Technologies de pompes à chaleur

Plusieurs technologies de pompes à chaleur sont disponibles, parmi lesquelles les plus répandues actuellement sont les pompes à chaleur à compression et celles à absorption au gaz.

II.3.3.1. Pompe à chaleur à compression

Une pompe à chaleur à compression est un dispositif thermodynamique qui permet de transférer de la chaleur d'une source froide vers une source chaude en utilisant un compresseur mécanique, qui peut être alimenté soit par de l'électricité (PAC à compression électrique) soit par du gaz (PAC à moteur gaz). [30]

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

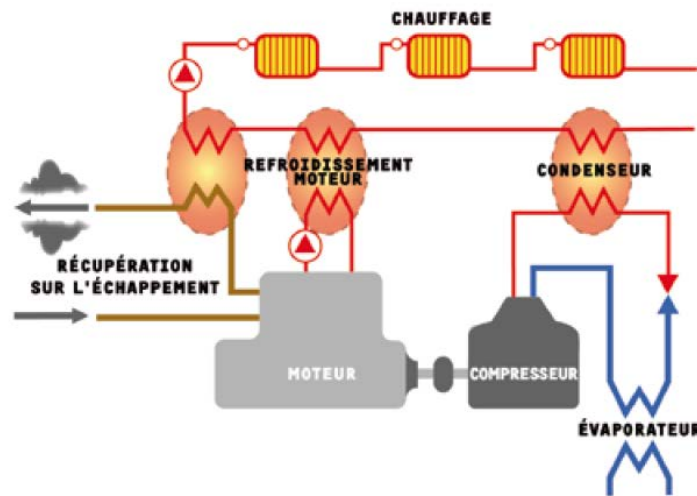


Figure II. 12. Schéma de principe d'une pompe à chaleur à compression, entraînée par un moteur thermique. [30]

Un moteur à combustion fonctionne en brûlant un combustible tel que de l'essence ou du diesel pour produire de l'énergie mécanique. Lorsque le moteur fonctionne, il génère de la chaleur, qui est utilisée de deux manières principales :

Une partie de la chaleur produite est utilisée pour chauffer les gaz d'échappement. Ces gaz sont ensuite dirigés vers le compresseur pour fournir de la chaleur supplémentaire à celle provenant du condenseur. En parallèle, l'énergie mécanique produite par le moteur à combustion est également utilisée pour actionner le compresseur, ce qui comprime le fluide frigorigène dans le système de pompe à chaleur. La chaleur provenant des gaz d'échappement, combinée à celle récupérée du condenseur, est transférée au fluide frigorigène dans le condenseur. Cela contribue à augmenter la température du fluide et à libérer davantage de chaleur dans l'environnement à chauffer.

II.3.3.2. Pompes à chaleur à absorption

Dans le cas des PAC à absorption, l'élévation de température et de pression ne se fait pas via un compresseur mais par l'intermédiaire d'un brûleur à gaz.

Cette machine est divisée en deux sous-ensembles interconnectés. Une partie est composée d'un système classique (condenseur, détendeur et évaporateur) fonctionnant avec du fluide frigorigène pur. L'autre partie est constituée de l'absorbeur et du désorbeur (compresseur thermique) fonctionnant avec la solution binaire.

Le réfrigérant entre dans le condenseur sous forme gazeuse et est condensé en produisant de la chaleur à moyenne température, il sort du composant à saturation. Ensuite, il est détendu

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

et rejoint l'évaporateur où il s'évapore en consommant de la chaleur à basse température. Il quitte l'évaporateur à saturation. Ce réfrigérant est ensuite absorbé par la solution au niveau de l'absorbeur. La solution absorbe le réfrigérant en produisant de la chaleur à moyenne température et sort du composant proche de la saturation. La fraction massique d'absorbant dans la solution diminue. Cette solution est pompée pour rejoindre le désorbeur à haute pression. Le désorbeur consomme de la chaleur à haute température pour désorber le réfrigérant. La solution sortant de ce composant est proche de l'équilibre. Ce réfrigérant sous forme gazeuse retourne dans le condenseur pendant que la solution, avec une fraction massique en absorbant plus importante, est renvoyée vers l'absorbeur à travers un détendeur pour terminer le cycle. [31]

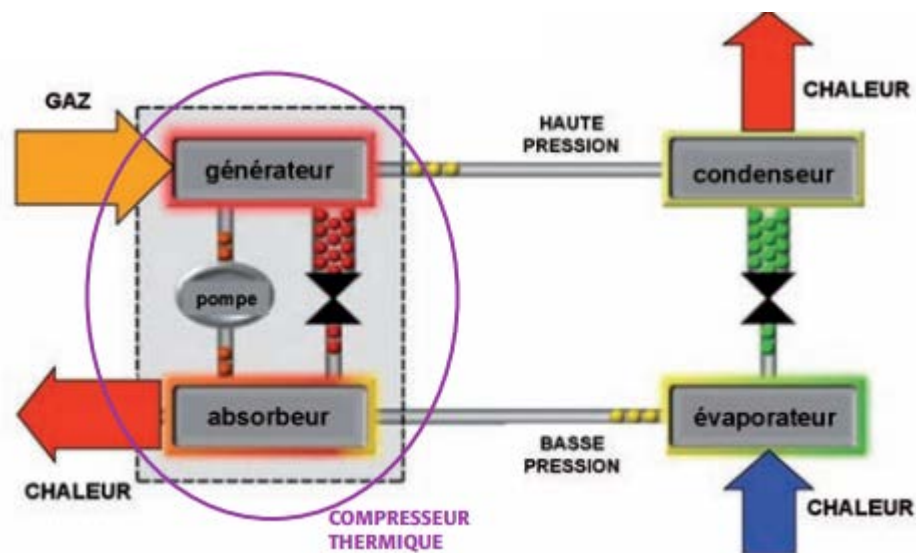


Figure II. 13. Pompes à chaleur à absorption. [32]

II.3.4. Pompe à chaleur réversible

Une pompe à chaleur réversible fonctionne sur le même principe qu'une pompe à chaleur classique, mais avec une capacité supplémentaire : elle peut non seulement chauffer un espace en extrayant de la chaleur de l'extérieur et en la transférant à l'intérieur, mais elle peut aussi refroidir cet espace en extrayant la chaleur de l'intérieur et en la rejetant à l'extérieur.

Pour réaliser cette double fonction, le système utilise une vanne à 4 voies sur le circuit frigorifique. Cette vanne permet de changer le sens de circulation du fluide frigorigène, transformant ainsi le condenseur en évaporateur, et vice versa. [30]

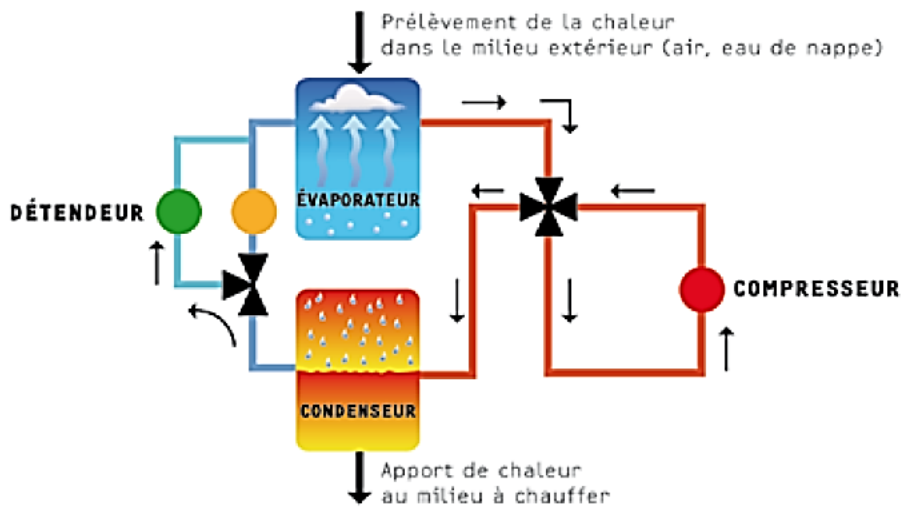


Figure II. 14.Schéma de fonctionnement d'une pompe à chaleur réversible pour la production de chaud. [30]

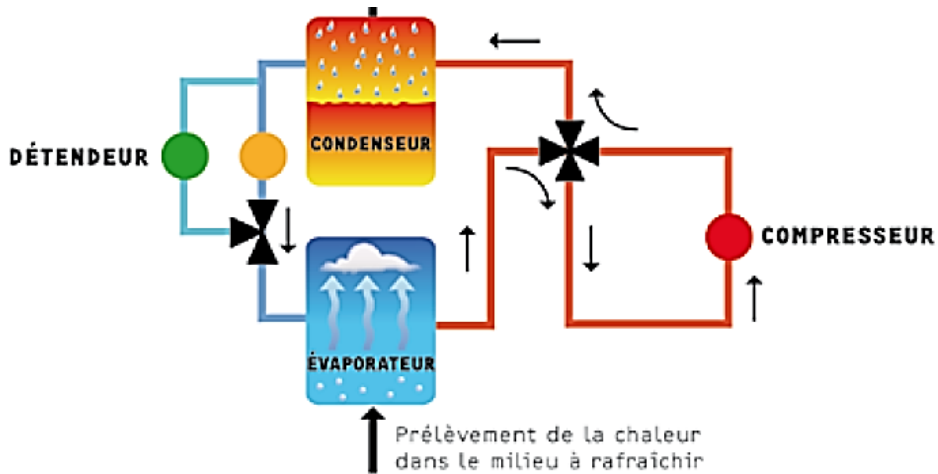


Figure II. 15.Schéma de fonctionnement d'une pompe à chaleur réversible pour la production de froid. [30]

II.3.5. Coefficients de performance

Le coefficient de performance (COP) est une mesure de l'efficacité d'un système, généralement utilisé pour évaluer les systèmes de chauffage, de climatisation et de réfrigération.

II.3.5.1. En mode chauffage :

Le coefficient de performance (COP) est le rapport entre l'énergie thermique utile restituée pour le chauffage et l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner la pompe à chaleur.[28]

$$\text{COP} = \frac{\text{énergie produite par PAC (chaleur restitué dans un espace)}}{\text{énergie consommé par PAC (compresseur et auxiliaires)}} \quad (\text{II.1})$$

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{évaporateur}}}{W_{\text{compresseur}}} \quad (\text{II.2})$$

En application le deuxième principe de Carnot, le COP théorique ou idéal est égal à :

$$\text{COP} = \frac{T_{\text{chaude}}}{T_{\text{chaude}} - T_{\text{froide}}} \quad (\text{II.3})$$

II.3.5.2. En mode rafraîchissement :

L'EER (Energy Efficiency Ratio) est le coefficient frigorifique. Il est défini comme le rapport entre la quantité de chaleur retirée du milieu refroidi et la quantité d'énergie consommée par le compresseur du système.[30]

$$\text{EER} = \frac{\text{énergie transférée par la PAC (chaleur prélevée dans un espace)}}{\text{énergie consommé par la PAC (compresseur et auxiliaires)}} \quad (\text{II.4})$$

$$\text{EER} = \frac{Q_0}{W_{\text{comp}}} \quad (\text{II.5})$$

II.3.6. Les différents systèmes de captage

Dans les systèmes géothermiques, la chaleur est captée à l'aide des capteurs installés dans le sol ou dans des nappes d'eau souterraines. Pour ce faire, il existe deux types de configurations principales : les systèmes à boucle ouvertes et à boucle fermées.

II.3.6.1 Les systèmes fermés

Un système géothermique fermé fonctionne en faisant circuler un fluide caloporteur à l'intérieur d'un circuit installé dans le sous-sol. Ce circuit permet de capter la chaleur du sol et de la transférer au fluide caloporteur. Ce dernier absorbe alors la chaleur du sol et la transporte vers un système de chauffage ou de refroidissement.

II.3.6.1.1 Les systèmes géothermiques horizontaux

Les systèmes géothermiques horizontaux sont constitués de capteurs composés de tubes en polyéthylène ou en cuivre, enfouis horizontalement dans le sol à une profondeur peu profonde (de 0,60 m à 1,20 m). Ces tubes sont utilisés pour capter la chaleur emmagasinée dans le sol et la transférer vers une pompe à chaleur. [33]

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie



Figure II. 16. Capteur horizontal. [34]

Trois classifications principales de systèmes géothermiques horizontaux sont répertoriées :

II.3.6.1.1.1. Les PAC à détente directe (sol-sol)

C'est le système d'avoir un seul fluide caloporteur, circule dans la pompe à chaleur et l'échangeur souterrain et dans l'émetteur de la chaleur (plancher chauffant, radiateurs, ventilo-convecteurs, etc.). [33]

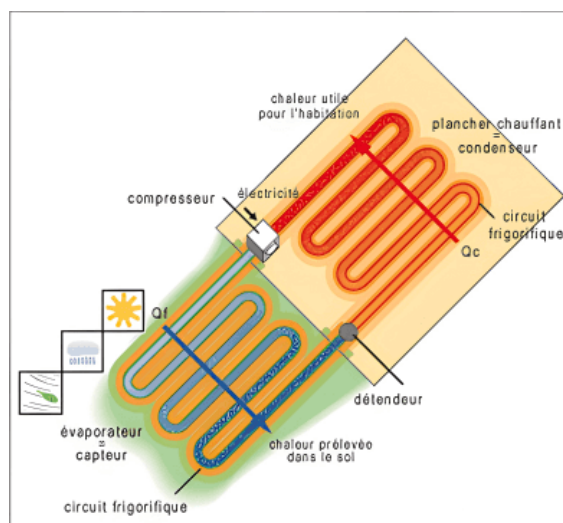


Figure II. 17. Schéma d'une pompe chaleur à détente directe (sol-sol). [35]

II.3.6.1.1.2. Les PAC à fluides intermédiaires (eau glycolée-eau)

Dans ce système, de l'eau glycolée circule dans des capteurs et transmet les calories récupérées du sol au circuit émetteur contenant de l'eau. [33]

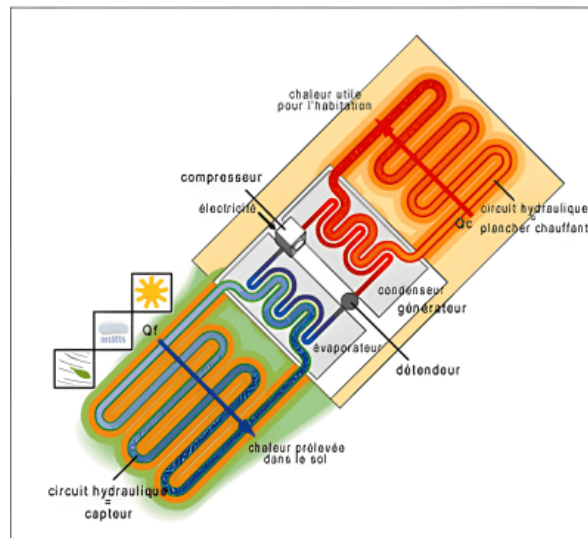


Figure II. 18.Schéma d'une pompe chaleur à fluides intermédiaires. [35]

II.3.6.1.1.3. Les PAC mixtes (sol-eau)

Dans ce système, un fluide caloporteur circule à travers un circuit souterrain, pour récupérer les calories du sol, puis il transfère cette chaleur au circuit émetteur contenant de l'eau. [33]

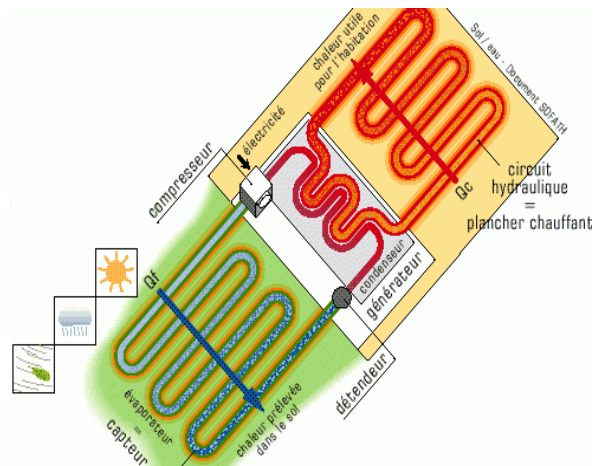


Figure II. 19.Schéma d'une pompe chaleur mixtes (sol-eau). [35]

II.3.6.1.2. Les systèmes géothermiques verticaux (sondes géothermiques)

Les Sondes géothermiques sont des systèmes utilisés pour extraire les calories du sol en faisant circuler un fluide caloporteur à l'intérieur d'un puits équipé d'un échangeur de chaleur, présentant sous différentes géométries (simple U, double U, coaxial, spiralée ...)

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

Sa profondeur peut atteindre plusieurs centaines de mètres, là où la température du sol est stable tout au long de l'année.

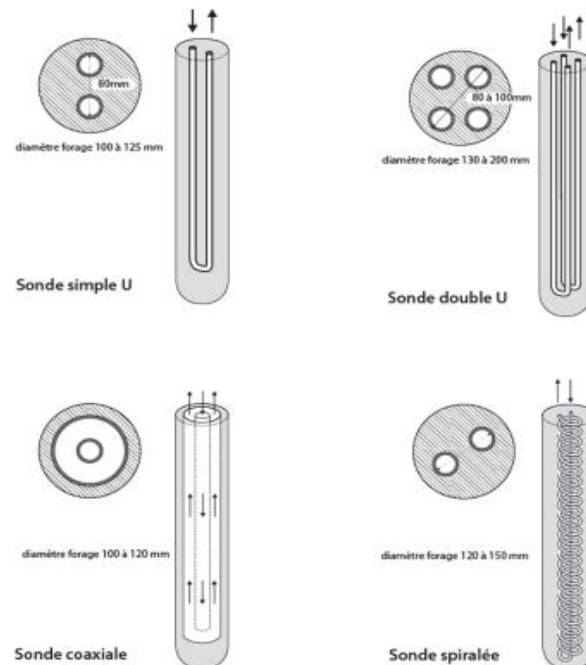


Figure II. 20. Configurations et géométries possibles, pour les sondes géothermiques verticales. [36]

II.3.6.1.2.1. Les champs de sondes

Pour chauffer des grands bâtiments ou un groupe de logements, il est possible d'installer plusieurs sondes géothermiques sur le même site afin d'obtenir un plus grand potentiel de chaleur terrestre. Les sondes sont installées à intervalles réguliers à des profondeurs variant de 30 m à plusieurs centaines de mètres, et sont raccordées à une ou plusieurs pompes à chaleur. [37]

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

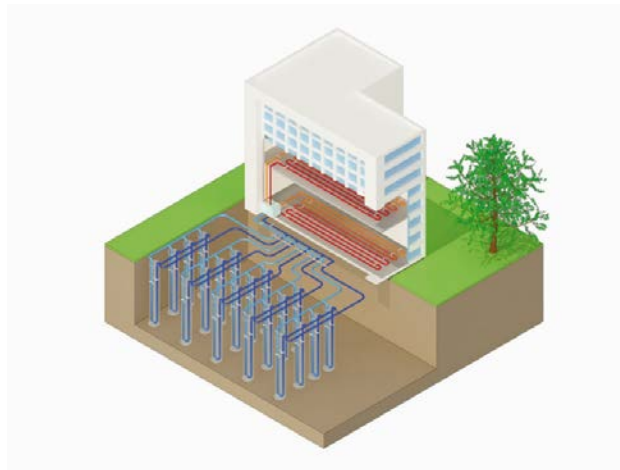


Figure II. 21.Champ de sonde géothermique. [38]

II.3.6.1.3. Les corbeilles géothermiques

Les corbeilles géothermiques sont des systèmes utilisant des boucles enroulées qui sont immergées dans des étangs ou des lacs. Ces boucles sont installées à une profondeur variante généralement entre 1 et 4 mètres, en fonction de la taille de la corbeille et des caractéristiques du terrain. À cette profondeur, la température est relativement stable tout au long de l'année, se situant généralement entre 10°C et 15°C. Cette chaleur captée est ensuite transférée à une pompe à chaleur géothermique, qui la redistribue pour chauffer ou refroidir des bâtiments. Les corbeilles géothermiques offrent une solution compacte et efficace pour le captage de chaleur du sol, offrant ainsi une alternative aux autres méthodes de captage. [39]



Figure II. 22.Schéma expliquant le principe de fonctionnement d'une corbeille géothermique. [40]

II.3.6.2. Les systèmes ouverts

Un système géothermique « ouvert » utilise la chaleur naturelle de l'eau des aquifères ou nappes phréatiques. Les systèmes géothermiques ouverts sont généralement constitués de

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

puits géothermiques : l'un est utilisé pour extraire l'eau chaude, tandis que l'autre est utilisé pour réinjecter l'eau refroidie après son utilisation. [22]

II.3.6.2.1. Doublet géothermique

Le doublet géothermique est une méthode utilisée dans les systèmes géothermiques pour garantir un équilibre dans la nappe d'eau souterraine. Deux puits sont forés : un pour extraire l'eau chaude de la nappe (puits de production) et l'autre pour la réinjecter une fois utilisée (puits d'injection). Ces puits doivent être espacés à une certaine distance pour des raisons techniques, mais parfois des puits déviés sont utilisés. Ce système assure un flux constant d'eau chaude vers la centrale géothermique pour le chauffage ou le refroidissement.[22]

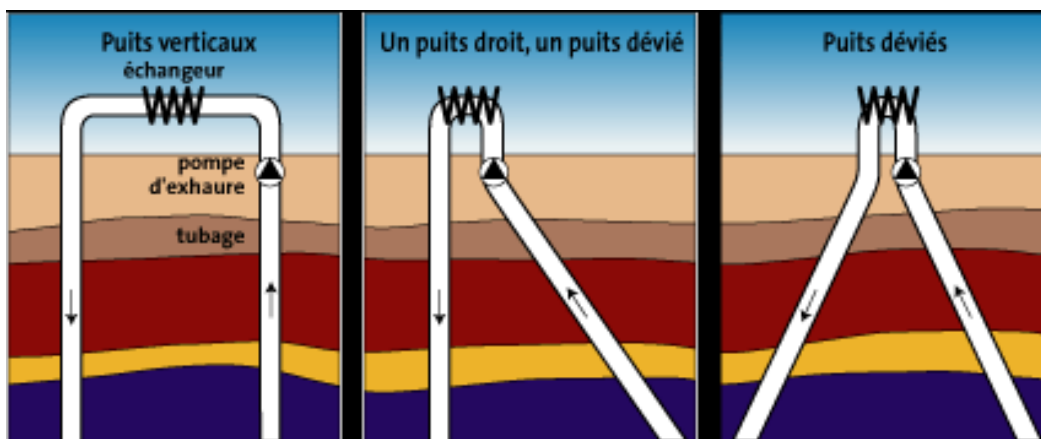


Figure II. 23. Différentes formes de doublets géothermiques. [22]

II.3.6.2.2. Puits à colonne permanente

Le Puits à Colonne Permanente est un type de puits géothermique. Dans ce système, l'eau souterraine est utilisée comme fluide caloporteur. L'eau est pompée depuis la base du puits à l'aide d'une conduite de refoulement, puis elle est dirigée vers un échangeur de chaleur pour être chauffée ou refroidie un espace. Ensuite, l'eau traitée est réintroduite au sommet du puits, entre la conduite de refoulement et la paroi du forage, pour être recyclée dans le système. [41]

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

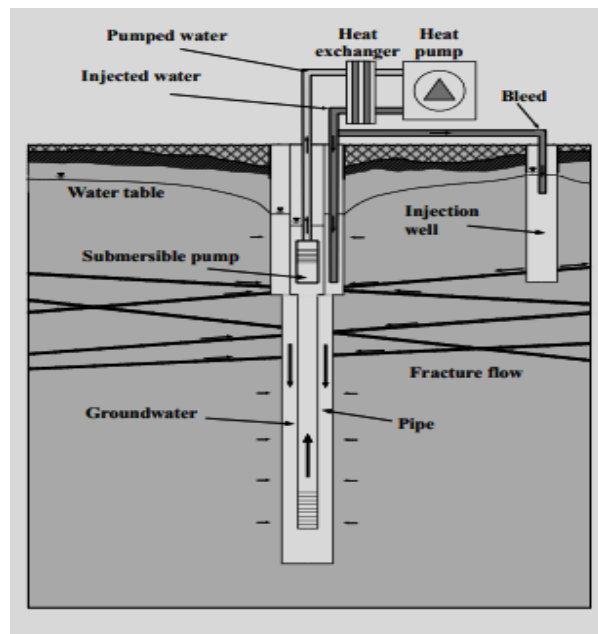


Figure II. 24. Schéma Puits à colonne permanente. [42]

II.3.7. Les émetteurs de chaleur

II.3.7.1 Les radiateurs

Les radiateurs à eau, éléments de chauffage courants, comprennent une structure interne où circule de l'eau chauffée par une pompe à chaleur. Cette chaleur est ensuite diffusée dans la pièce grâce à la convection et au rayonnement. Ces radiateurs existent sous différentes formes, comme des tubes, des lames ou des ailettes, augmentant ainsi la surface d'échange thermique avec l'air ambiant. Ils sont généralement fabriqués en acier, fonte ou fonte d'aluminium. En fonction de la température de l'eau, on distingue deux types principaux de radiateurs : les modèles haute température, les plus courants dans les habitations, nécessitant une température d'eau d'environ 65°C, et les modèles basse température, fonctionnant avec une eau à environ 55°C, contribuant ainsi à l'efficacité énergétique globale du système de chauffage.



Figure II. 25.Radiateur. [43]

II.3.7.2. Le plancher chauffant

Les planchers chauffants, constitués de tubes intégrés dans une dalle de béton, diffusent une chaleur régulière et agréable. Ils utilisent de l'eau chaude ou un fluide frigorigène circulant dans ces tubes pour chauffer l'espace. Certains modèles de planchers chauffants offrent également la possibilité de rafraîchir le bâtiment pendant les périodes estivales.



Figure II. 26.Schéma d'un plancher chauffant. [44]

II.3.7.3. Les ventilo-convecteurs

Le ventilo-convecteur est un dispositif installé à l'intérieur d'un espace pour gérer la qualité de l'air et fournir un chauffage ou une climatisation efficace. Il se compose d'un ventilateur et d'un échangeur de chaleur qui permet de chauffer ou de refroidir l'air ambiant. Lorsqu'il est utilisé avec une pompe à chaleur, le ventilo-convecteur fonctionne de la manière suivante : la pompe à chaleur extrait la chaleur de l'air extérieur ou du sol, puis la transfère à l'eau ou à un autre fluide caloporteur. Ce fluide circule ensuite dans l'échangeur de chaleur du ventilo-convecteur.

Chapitre II : Notion de pompe à chaleur et technique d'extraction de l'énergie

Lorsque le fluide chaud passe à travers l'échangeur de chaleur, il transfère sa chaleur à l'air ambiant qui est aspiré par le ventilateur. Le ventilateur propulse ensuite l'air chauffé dans la pièce, assurant ainsi une distribution uniforme de la chaleur. Cela permet de chauffer efficacement l'espace intérieur tout en maintenant un bon niveau de confort thermique.

Le ventilo-convecteur peut également être utilisé pour la climatisation en inversant le processus.



Figure II. 27. Ventilo- convecteur. [45]

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des définitions et des généralités sur l'énergie géothermique, les pompes à chaleur, ainsi que les différents procédés de captage de la géothermie.

A decorative floral wreath border composed of dark blue and black lines, featuring stylized leaves and small flowers. It frames the central text.

Chapitre III
Traitement Numérique
du Problème Etudié

III.1. Introduction

Ce chapitre aborde les équations de gouvernantes, qui sont résolues numériquement à l'aide de la méthode des volumes finis, ainsi que le modèle de turbulence (k- ω SST). Il présente également la géométrie et les conditions aux limites du problème étudié.

L'objectif de ce travail est de modéliser numériquement l'écoulement et le transfert thermique dans un échangeur de chaleur géothermique en U. Pour ce faire, deux outils de simulation sont utilisés de manière indépendante. Le premier, le logiciel ANSYS ICEM CFD, est utilisé pour dessiner la géométrie de l'échangeur et générer son maillage. Le deuxième, le code ANSYS CFX, permet la simulation numérique de l'écoulement. Il est utilisé pour le pré-prossecing, la résolution et le poste-prossecing. [46]

III.2. Les équations gouvernantes

Le traitement numérique du problème étudié nécessite l'utilisation d'équations gouvernantes qui sont des équations aux dérivées partielles issues des principes classiques de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

III.2.1. Equation de continuité :

Elle est déduite du principe de conservation de la masse et peut être exprimée comme suit :

$$\nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (\text{III.1})$$

III.2.2. Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes) :

La forme de l'équation de Navier-Stokes s'écrit comme suit :

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (\text{III.2})$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right] \quad (\text{III.3})$$

III.2.3. Equation de l'énergie :

L'équation de conservation d'énergie prend la forme suivante :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{V} \cdot \nabla T = \nabla(k \nabla T) \quad (\text{III.4})$$

III.3. Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle. Les différentes étapes de la méthode des volumes finis sont :

- La discrétisation du domaine considéré en volume de contrôle.
- L'intégration des équations différentielles aux dérivées partielles.
- Ecriture des équations algébriques aux nœuds du maillage.
- Résolution du système algébrique linéaire obtenu.

Chaque volume de contrôle est associé à un point central noté P, tandis que les limites avec les volumes voisins sont notées E et W (Est et Ouest) dans la direction x, et N et S (Nord et Sud) dans la direction y. Le volume de contrôle entourant P est représenté par les lignes discontinues. Les faces du volume de contrôle sont localisées aux points et w dans la direction x, n et s dans la direction y. [47] [48]

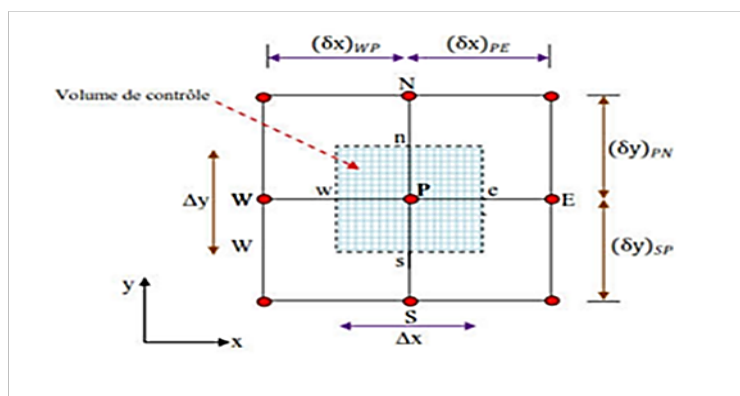


Figure III. 1.Volume de contrôle. [47]

III.4. Modèle de la turbulence (k- ω SST)

Le modèle k- ω Shear-Stress Transport (SST) combine la force et la précision des modèles standard k- ω et k- ε et adapte le terme de contrainte de cisaillement au modèle Johnson-King. Il fonctionne très bien dans les régions de sous-couches visqueuses et de paroi éloignée. Ceci est accompli par l'ajout de fonctions de mélange qui sont nulles loin de la frontière résultant en un modèle de type k- ε et une à l'intérieur de la couche limite résultant en un modèle k- ω . Les équations de transport pour le modèle k- ω SST sont :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tilde{P}_k - \rho C_{\mu} \omega k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (\text{III.5})$$

Dissipation spécifique :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \bar{U}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = & 2\alpha\rho S_{ij}S_{ij} - \beta\rho\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_i + \sigma_{\omega}\mu_i) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\ & + 2(1 - F_1)\sigma_{\omega}^2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (\text{III.6})$$

La fonction F1 est définie par :

$$F_1 = \tanh \left(\left(\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{C_{\mu}\omega L}, \frac{500\nu}{L^2\omega} \right) \frac{4\rho\sigma_{\omega}^2 k}{CDk_{\omega}L^2} \right] \right) \right) \quad (\text{III.7})$$

$$CDk_{\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega}^2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) \quad (\text{III.8})$$

La viscosité turbulente est donnée par la relation :

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, \sqrt{2S_{ij}F_2})} \quad (\text{III.9})$$

La deuxième fonction de mélange F2 est définie par :

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{C_{\mu}\omega L}, \frac{\nu}{l\omega^2} \right) \right] \right] \quad (\text{III.10})$$

Chapitre III : Traitement Numérique du Problème Etudié

Pour éviter l'accumulation de la turbulence dans des régions de stagnation une production limitée est utilisée :

$$\tilde{P}_k = \min(P_k, 10. C_\mu \rho k \omega) \quad (\text{III.11})$$

$$P_k = \mu_t \frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{III.12})$$

Les constantes de modèle sont calculées en utilisant la fonction de mélange F1 :

$$\emptyset = F_1 \emptyset_1 + (1 - F_1) \emptyset_2 \quad (\text{III.12})$$

Les valeurs des constantes de ce modèle sont dans le tableau :

Tableau III. 1. Coefficients empiriques du modèle SST k- ω .

σ_{k_1}	σ_{k_2}	C_μ	σ_{ω_1}	σ_{ω_2}	α_1	α_2	β_1
0.85	1.0	0.09	0.5	0.856	5/9	0.44	0.0828

Ce modèle est principalement conseillé dans des situations où le fluide subit des changements brusques de contraintes, c'est le cas par exemple pour des écoulements sur des surfaces courbées ou lors de séparation de couches limites. [49]

III.5. Problème d'étude

La géométrie du problème est présentée dans la figure (Figure III.2). Il s'agit d'un échangeur géothermique en forme de U (échangeur sol / eau). Les dimensions de l'échangeur sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III. 2. Dimensionnement de tube en U.

Caractéristiques	Symboles	Tailles (mm)
Profondeur	L	1000
Diamètre de tuyau interne	d	26
Epaisseur de tuyau	T	2.9
Distance du centre des deux tuyaux	D	78

Chapitre III : Traitement Numérique du Problème Étudié

On divise notre travail en quatre cas, afin de déterminer quelle géométrie offre le meilleur transfert de chaleur. Les quatre cas d'étude sont les suivants :

- **Le premier cas :** Un échangeur de forme U

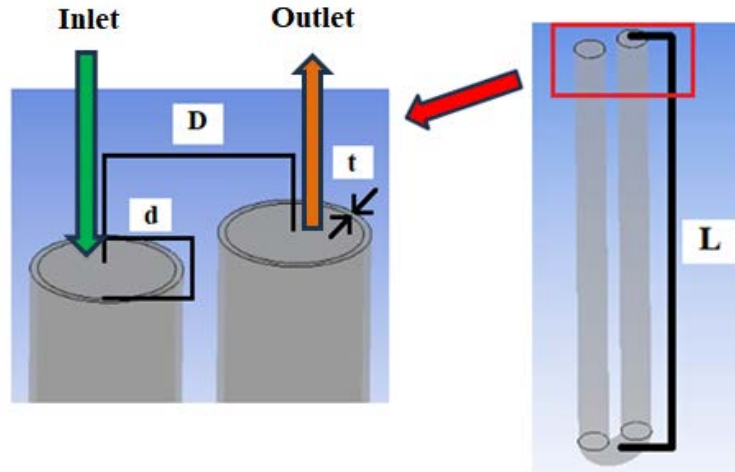


Figure III. 2. Géométrie de l'échangeur de forme U.

- **Le deuxième cas :** Un échangeur avec des chicanes à l'entrée

Pour améliorer le transfert de chaleur dans l'échangeur, des chicanes en forme d'anneau sont utilisées. La longueur de la section d'essai représente la moitié de la longueur totale du tuyau et est située à un quart de la longueur du tuyau depuis son début (voir la figure III.3).

Le tableau suivant représente les paramètres géométriques des anneaux, tels que le pas (P), l'épaisseur (D_r) et les diamètres (d).

Tableau III. 3 : Les paramètres géométriques des anneaux.

Nombres des chicanes	P (mm)	d (mm)	d_0 (mm)	D_r
1	125	26	23	1.3
2		26	20	1.3
3		26	17	1.3
4		26	14	1.3
5		26	11	1.3

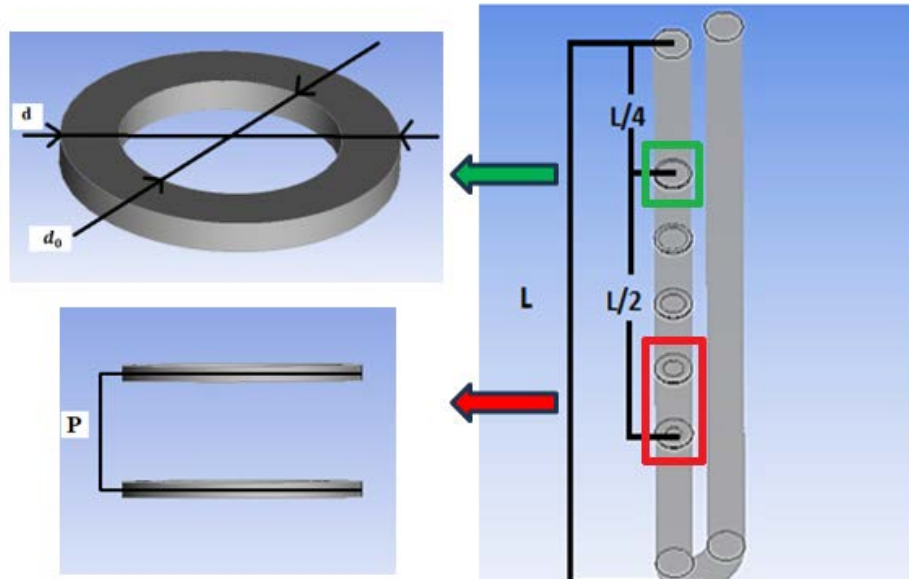


Figure III. 3. Géométrie de l'échangeur avec des chicanes à l'entrée.

- Le troisième cas : Un échangeur avec des chicanes à la sortie

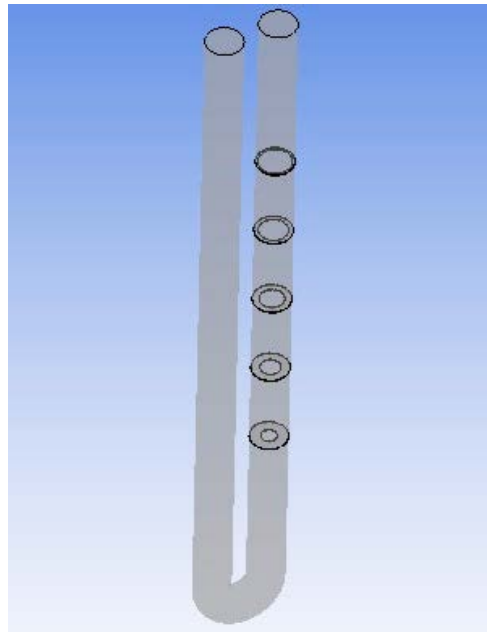


Figure. III. 4. Géométrie de l'échangeur avec des chicanes à la sortie.

- **Le quatrième cas :** Un échangeur avec des chicanes à l'entrée et à la sortie
Dans ce cas-là, on a inversé les chicanes à la sortie de l'échangeur

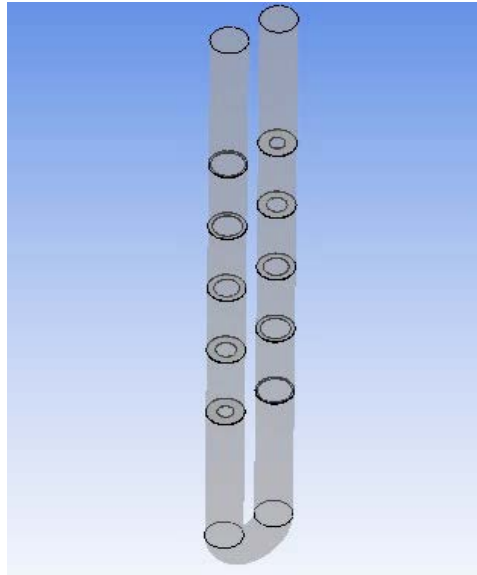


Figure III. 5. Géométrie de l'échangeur avec des chicanes à l'entrée et à la sortie.

III.6. Présentation du code CFX-18.0

La modélisation numérique de l'écoulement ou CFD (Computational Fluid Dynamic) est un ensemble de méthodes numériques permettant d'obtenir une solution approximative d'un problème de dynamique des fluides et de transfert thermique.

Dans notre étude, la simulation numérique a été effectuée à l'aide du code de calcul ANSYS CFX (version 18.0). Ce logiciel permet de mettre en œuvre une simulation numérique complète de la modélisation ; allant de la création géométrique à la visualisation des résultats, en passant par la création du maillage et le calcul. Il comporte quatre modules : ICEM-CFD, CFX-Pre, CFX-Solver et CFX-Post.[50]

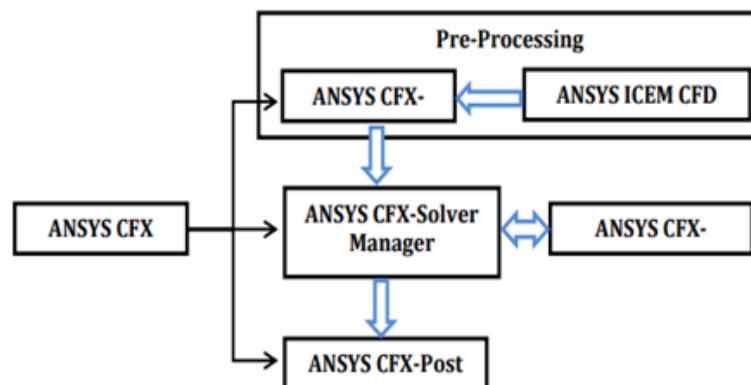


Figure III. 6. Structure du code ANSYS CFX. [50]

Chapitre III : Traitement Numérique du Problème Étudié

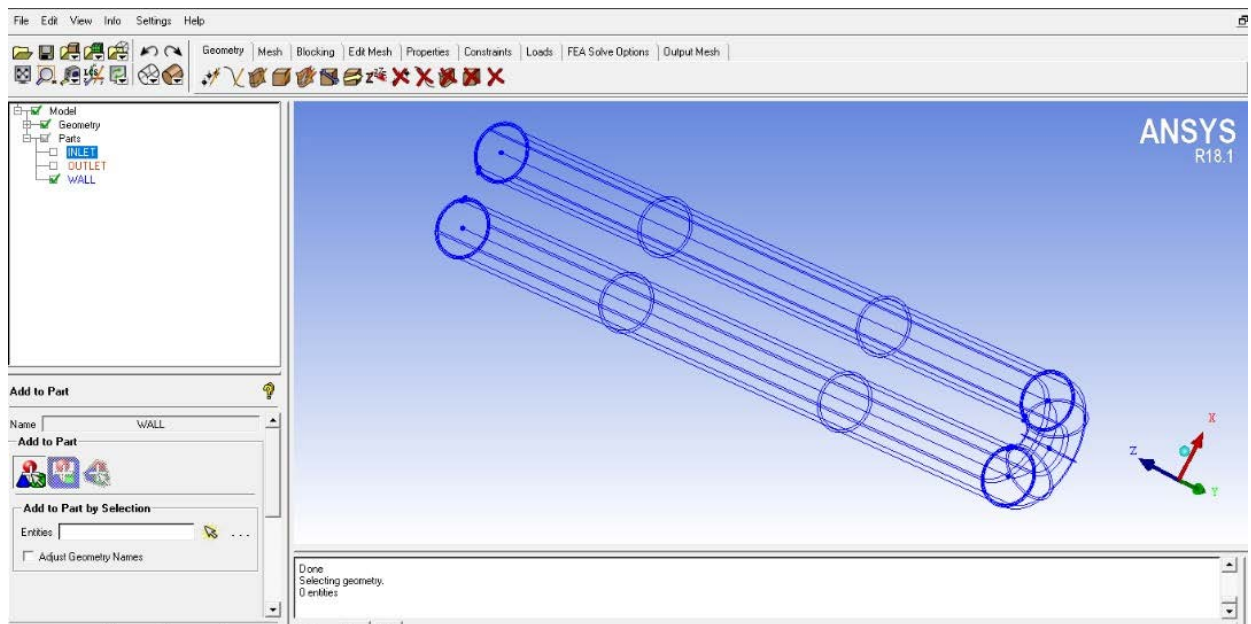
III.6.1 ANSYS ICEM CFD

ICEM CFD est un logiciel utilisé comme la CAO (Conception Assistée par Ordinateur) pour La création des géométries et la génération de maillage du code ANSYS 18.0. [49]

Ce module permet de préparer la configuration géométrique du problème étudié et de générer le maillage de manière assez conviviale bien qu'assez simple. Dans le cas de notre travail on a fait recours à l'ICEM CFD, l'un des avantages de ce logiciel, est sa simplicité ainsi que sa robustesse envers la réalisation des géométries les plus complexes. [46]

III.6.1.1. Création de la géométrie

La création de la géométrie est la première étape dans notre simulation. Elle est construite à partir de points, de courbes, de surfaces et de volumes (Figure III.7).



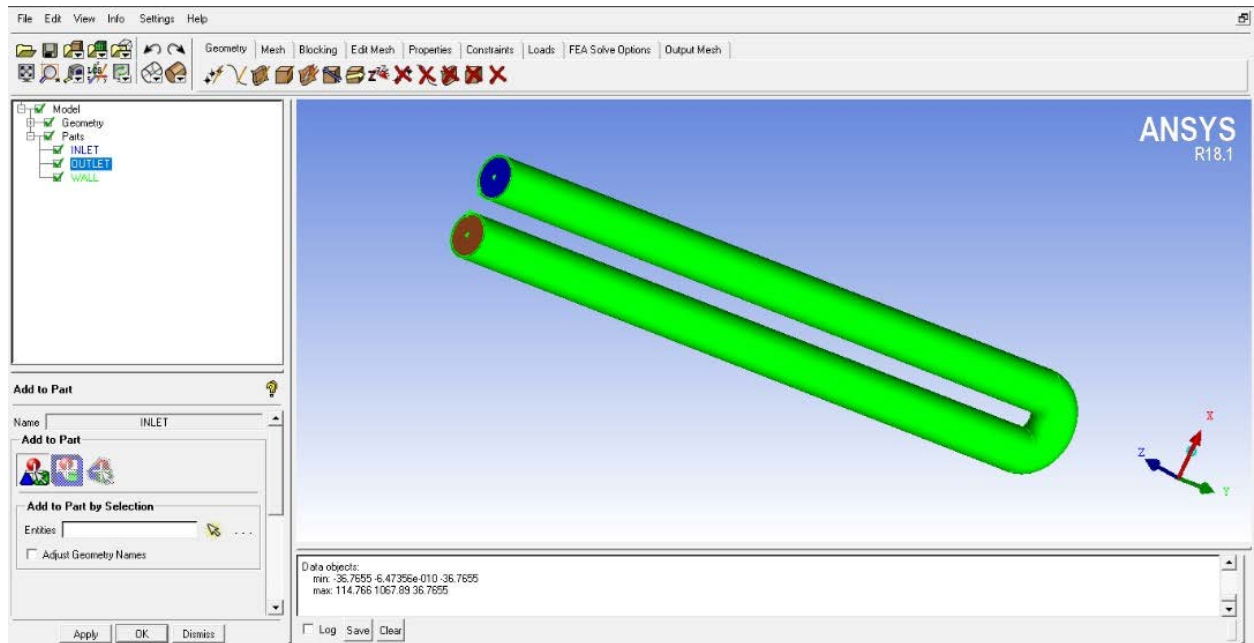


Figure III. 7. Géométrie du domaine de calcul réalisée à l'aide d'ICEM CFD 18.

III.6.1.2. Maillage (CFX-Mesh)

La création du maillage constitue la deuxième étape essentielle de notre simulation et est cruciale pour obtenir des résultats précis.

Le module ICEM CFD offre une gamme de fonctionnalités permettant de générer différents types de maillages, notamment des maillages structurés, non structurés, multi-blocs et hybrides, adaptés à une variété de géométries.[51]

Le choix du type de maillage dépend de la complexité de la géométrie étudiée. ICEM CFD offre la flexibilité de générer des maillages tétraédriques ou hexaédriques. Les maillages tétraédriques sont relativement simples à générer et sont semi-automatiques, tandis que les maillages hexaédriques nécessitent des étapes supplémentaires telles que la projection des courbes et des surfaces pour une modélisation plus précise. [51]

Chapitre III : Traitement Numérique du Problème Etudié

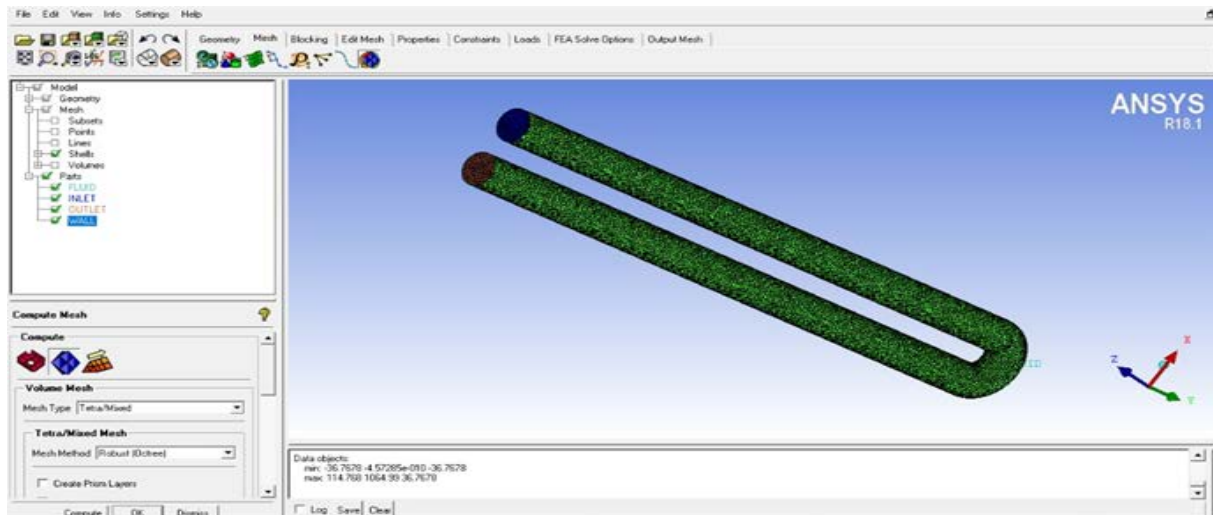


Figure III. 8. Maillage du domaine d'étude avec ICEM CFD 17.

Tableau III.4. Statistique de maillage.

Nombre de mailles	Eléments	Type
537717	1312710	Triangulaire non structuré

III.6.2. CFX-pre

CFX-Pre offre une interface moderne, cohérente et intuitive pour la définition du problème (modèle choisit, condition initial, condition aux limite, propriété du fluide, la nature de l'écoulement, les paramètres de convergence, ...etc.

Il permet d'importer le maillage de la géométrie étudiée, construit par le module ICEM CFD. Une fois tous les paramètres définis, comme présentés dans le tableau suivant :

Tableau III. 5 : Conditions aux limites.

Géométrie	Tube en U
Régime de l'écoulement	Turbulent
Type de fluide	L'eau
Modèle du turbulence	K- ω SST
Vitesse de fluide [m/s]	0.72
Température de fluide d'entrée [k]	275
Température de Wall [k]	283
Pression Relative (Pa)	0

Chapitre III : Traitement Numérique du Problème Étudié

CFX-pre génère un fichier « .def » qui contient toutes les informations relatives au maillage, aux conditions aux limites et initiales, ainsi que tous les autres paramètres introduits dans CFX-pre. Ce fichier constituera la base de travail pour le solveur. [46] [52]

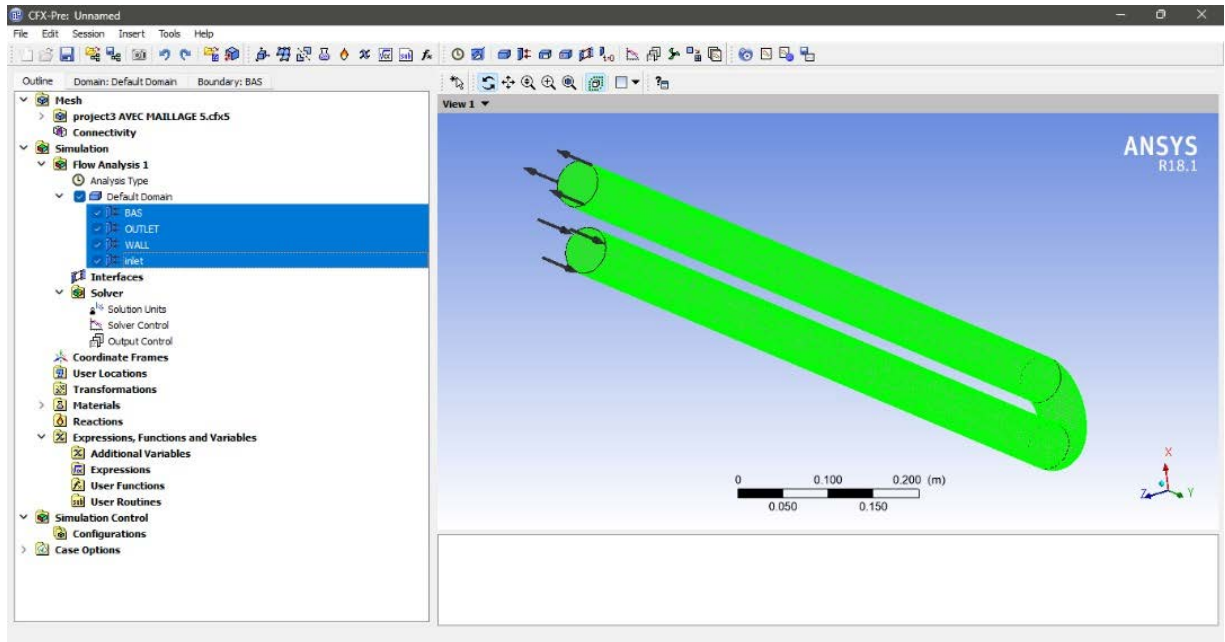


Figure III. 9. Présentation des conditions aux limites de la géométrie dans le logiciel CFX Pre.

III.6.3. CFX-Solveur

CFX-Solveur permet de résoudre des équations hydrodynamiques pour modéliser le problème physique étudié.

Toutes les spécifications du problème produites dans le module CFX-Pre sont résolues par CFX Solver pour une erreur bien définie ou un nombre d'itération maximale. Tous les résultats sont stockés dans un fichier (.res) et un autre fichier (.out) qui contient des informations sur le système étudié dans lequel toutes les équations hydrodynamiques sont résolues en un seul processus. Le solveur couplé est plus rapide que le solveur traditionnel et moins d'itérations sont nécessaires pour obtenir des résultats de simulation de flux convergés. Le graphique suivant est obtenu après itérations, ce qui est illustré dans la figure (III.5). [46] [53]

Chapitre III : Traitement Numérique du Problème Étudié

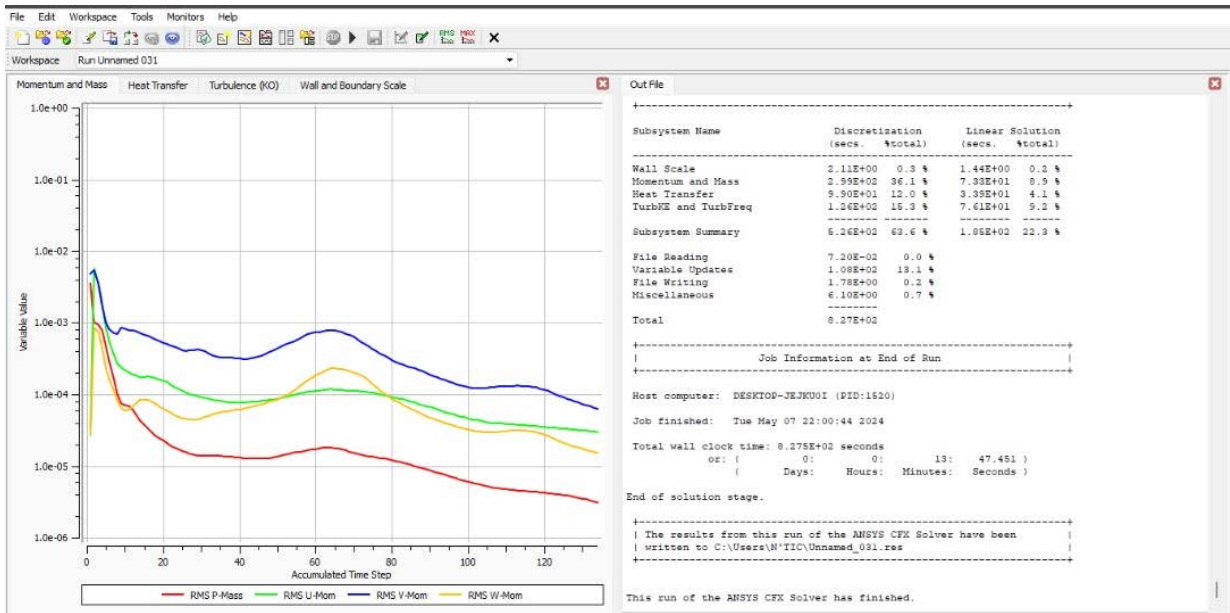


Figure III. 10. Résolution du problème par CFX- Solver.

III.6.4. CFX-post

Le module CFX-Post est un outil graphique permettant le traitement et la visualisation des résultats. Il permet d'appliquer des textures sur la géométrie, de visualiser des contours, des iso-surfaces, des lignes de courant et des champs de vitesses. De plus, il permet l'exportation des résultats sous forme numérique, tels que les valeurs des différentes variables à chaque nœud, sous forme photographique et même sous forme d'animation. Une fois que le solveur CFX est terminé.[52]

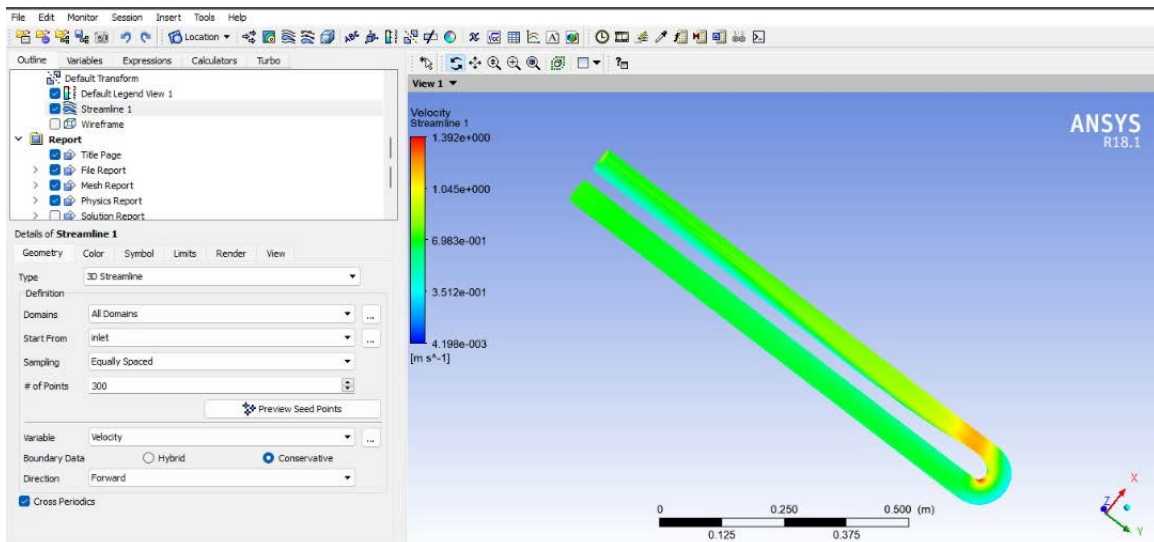


Figure III. 11. Présentation de résultat par le CFX- post.

III.7. Conclusion

ANSYS CFX est un logiciel qui permet de prédire les écoulements fluides en résolvant les équations de conservation grâce à la méthode des volumes finis. CFX est renommé pour sa précision, ce qui en fait le choix idéal pour notre étude numérique. Au cours de ce chapitre, le modèle physique de notre cas d'étude a été décrit et les conditions aux limites ont été définies. De plus, nous avons illustré les étapes suivies pour procéder à la simulation, et les résultats seront présentés dans le chapitre suivant.

A decorative floral wreath border in black ink, featuring a central oval frame. The wreath is composed of a dark blue/black line forming a thick oval, surrounded by a delicate, intricate pattern of swirling vines, leaves, and small five-petaled flowers. The text is centered within the oval frame.

Chapitre IV
Résultats
et discussions

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la présentation des résultats de la simulation numérique d'un écoulement turbulent dans un tube de forme U, obtenus par le code de calcul ANSYS CFX. L'objectif de cette étude numérique est de voir l'influence des chicane sur les changements des paramètres tels que les vitesses, les pressions et les températures....

IV.2. Indépendance de la solution du maillage

Le choix du maillage est une étape cruciale dans les simulations numériques, car il influence fortement sur la précision des résultats et le temps de calcul. Pour garantir que les résultats de notre étude sont indépendants du maillage, nous avons réalisé des simulations avec trois configurations différentes : 738387, 537717, et 396434 mailles.

Pour évaluer l'indépendance des résultats par rapport au maillage, nous avons comparé les températures à la sortie obtenues pour chaque configuration. Les résultats montrent des différences relativement faibles entre les trois maillages, ce qui suggère une convergence des solutions.

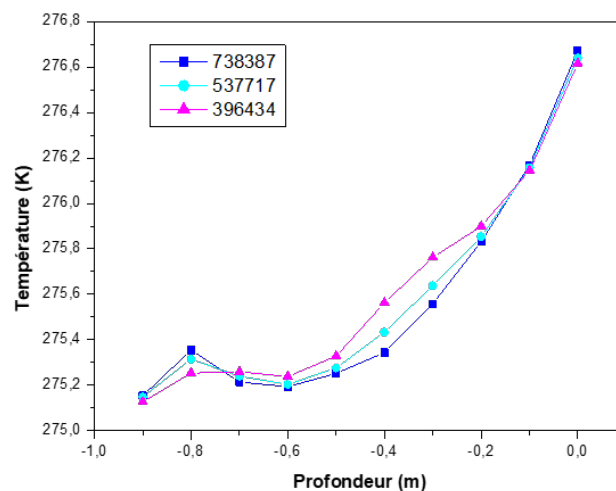


Figure IV. 1 .Test maillage.

À partir de la figure IV.6, il est clair que les écarts de température entre ces maillages sont minimes. Cette observation indique que les résultats sont suffisamment précis et que l'ajout de mailles supplémentaires n'apporte qu'une amélioration marginale en termes de précision, tout en augmentant significativement le temps de calcul.

En tenant compte de la précision des résultats et du temps de calcul, le maillage de 537717 éléments a été retenu comme la solution optimale. Ce choix est justifié par les points suivants :

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Le maillage de 537717 éléments offre une précision proche de celle du maillage plus fin (738387 éléments) tout en montrant des résultats très similaires.

Il représente un bon compromis, réduisant le temps de calcul comparé au maillage le plus fin sans compromettre la précision des résultats.

Le maillage de 537717 éléments a été sélectionné pour la suite de l'étude en raison de sa capacité à fournir des résultats précis dans un temps de calcul raisonnable.

IV.3. Validation

Les différents résultats de la simulation numérique de notre étude dynamique et thermique de l'écoulement turbulent dans un échangeur de chaleur en forme U ont été réalisés par le logiciel ANSYS CFX.

Pour valider nos résultats numériques, nous nous sommes basés sur les travaux d'un article réalisé par **P. Jalili et al [53]**.

La comparaison entre les deux simulations indique que les résultats sont satisfaisants et encourageants.

IV.4. Résultats et discussion

IV.4.1. Les contours de la vitesse :

D'après les résultats numériques ci-dessus (Fig. IV.2), on remarque qu'à l'entrée du tube, la vitesse du fluide reste constante jusqu'à ce que le fluide change de direction. À ce point, la vitesse diminue près des parois en raison de la friction et augmente en raison de la création de turbulences dans l'écoulement (cas a).

De plus, dans les cas (b) et (d), on observe une augmentation de la vitesse du fluide après le passage des chicane par rapport à la valeur initiale. Les chicanes réduisent également la section du tube, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse du fluide.

Ce phénomène s'explique par le principe de conservation de la masse, selon lequel la masse de fluide qui entre dans une section du tube doit être égale à celle qui en sort. Ainsi, selon l'équation de continuité, si la section du tube est réduite, la vitesse du fluide doit augmenter pour maintenir le débit massique constant.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

En revanche, dans le cas (c), on observe que : la vitesse du fluide diminue lorsque la section des chicanes augmente.

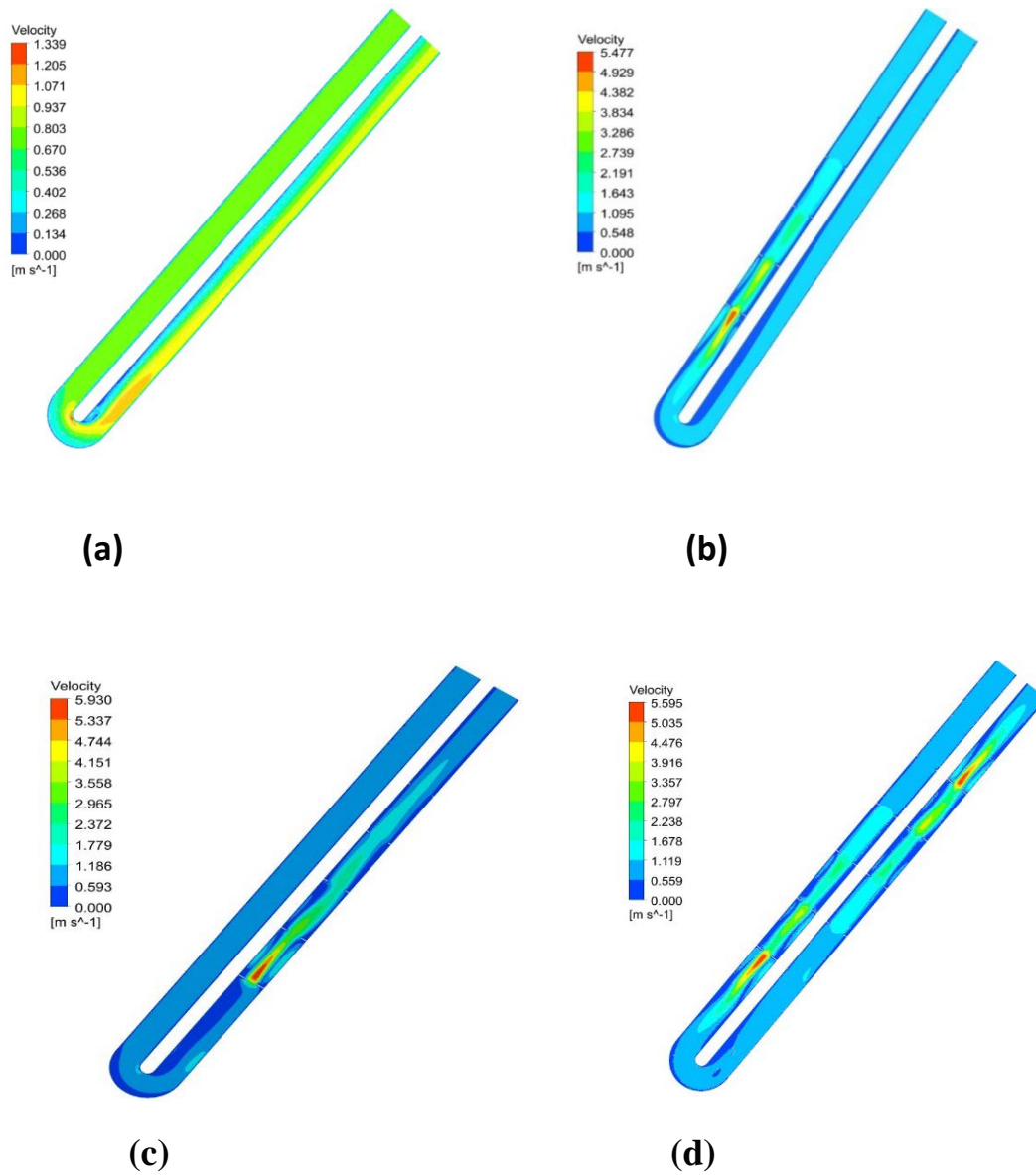


Figure IV. 2.Répartition du champ de vitesse à travers l'échangeur.

IV.4.2. Composante de l'énergie cinétique turbulente :

D'après les données de la Figure IV.3, on constate une hausse notable de l'énergie cinétique dans les zones où les trajectoires sont fortement courbées pour le cas (a).

En ce qui concerne les cas (b), (c) et (d), l'énergie cinétique turbulente atteint des sommets là où la vitesse du fluide est maximale.

De plus, on remarque des fluctuations significatives de l'énergie cinétique là où la vitesse du fluide est moins accélérée, jusqu'à ce qu'elle atteigne finalement un minimum.

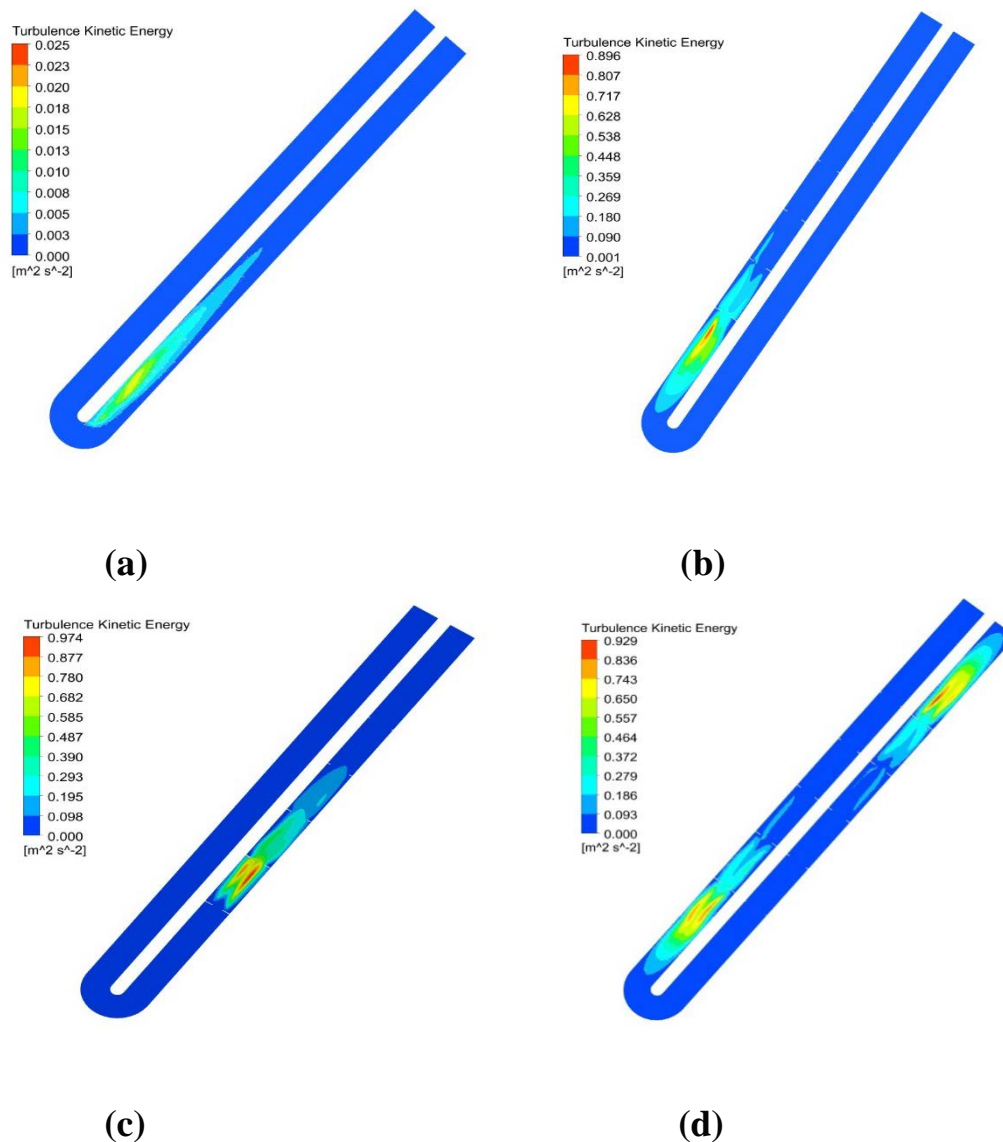


Figure IV. 3. Energie cinétique turbulente sur le plan de tube.

IV.4.3. La température :

Les résultats numériques ci-dessus (Fig. IV.5) indiquent que plus la vitesse du fluide augmente, plus la température des parois augmente. Cette augmentation provoque l'augmentation de la température à la sortie de l'échangeur.

La présence des chicanes augmente la turbulence du fluide, ce qui entraîne une augmentation de l'échange thermique et donc une augmentation de la température de sortie ce qui minimise le travail du condenseur et donc amélioration du rendement de la pompe à chaleur géothermique.

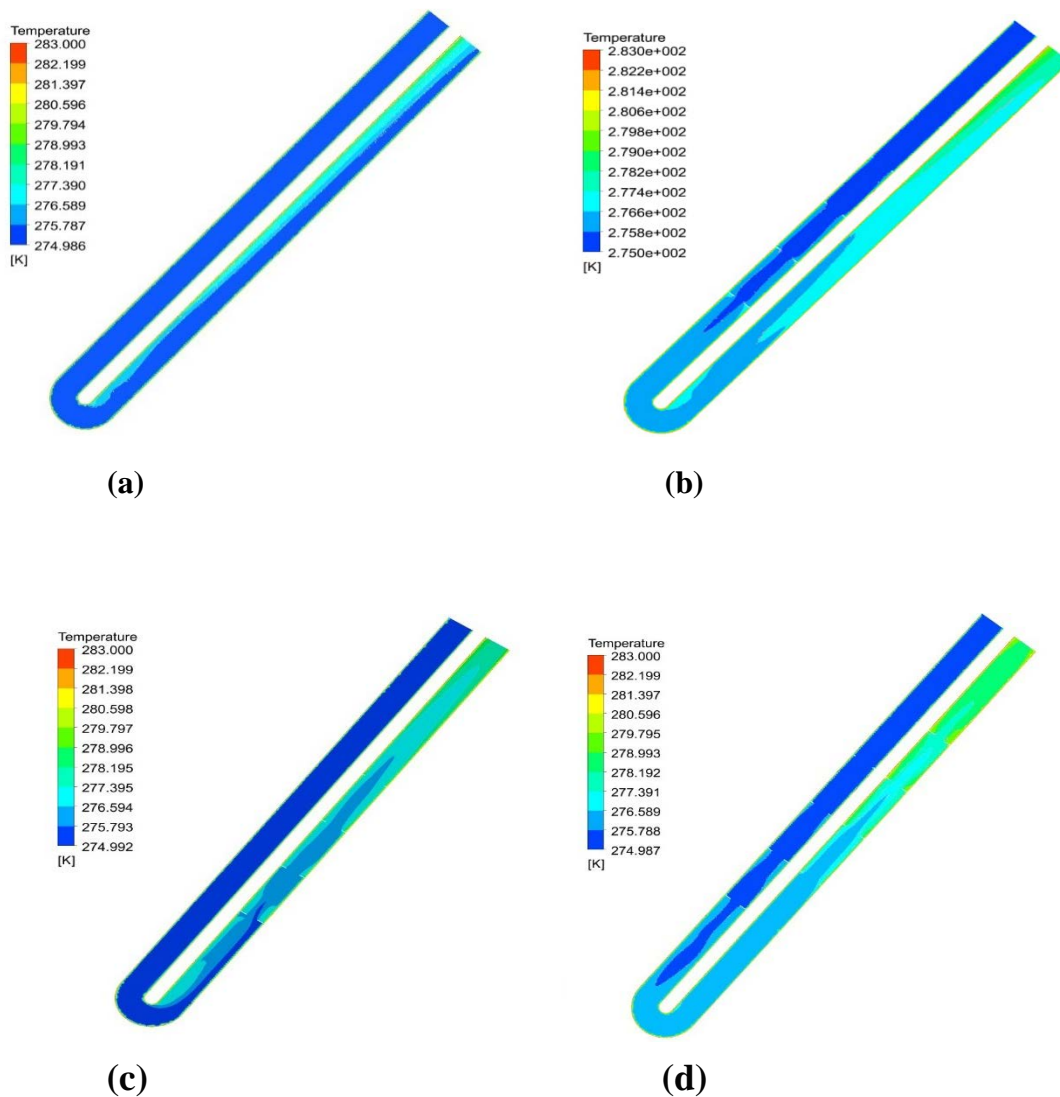


Figure IV. 4.Contours de la température sur le plan de l'échangeur.

IV.4.4. Le champ de pression

On observe d'après la figure (IV.6) :

- ✓ Une diminution de la pression à la sortie du tube par rapport à son entrée.
- ✓ Une variation de pression dans la partie inférieure de l'échangeur, la pression augmente près des parois en raison de la friction et diminue en raison de la création de turbulences dans l'écoulement (cas a).
- ✓ Une haute pression est constatée avant les chicanes, où elle atteint sa valeur maximale.
- ✓ Une diminution de la pression entre les chicanes. Cette diminution est due à l'augmentation de la turbulence du fluide.

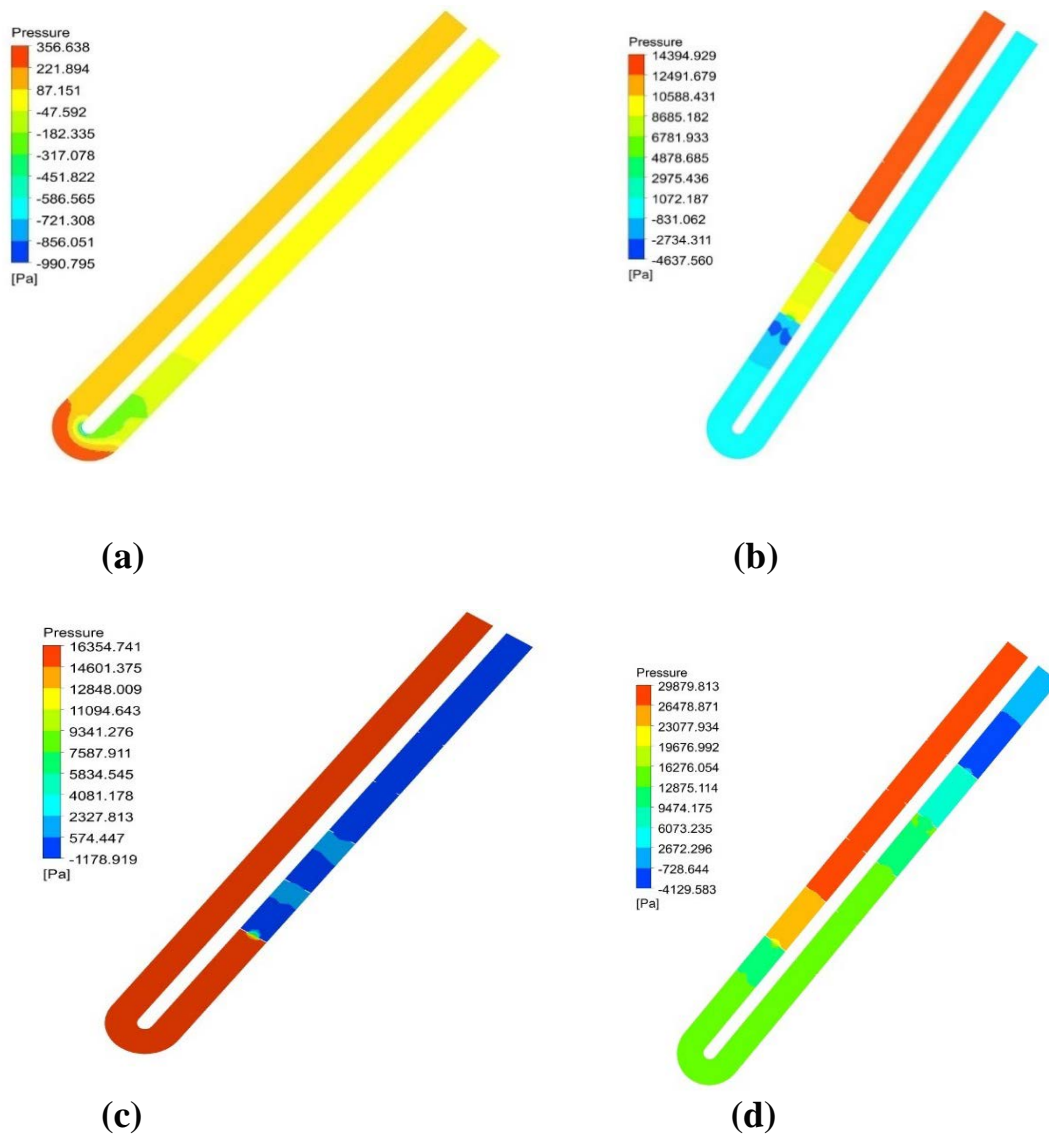


Figure IV. 5. Contours de pression sur le plan de l'échangeur.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

IV.4.5. Composante de la vitesse transversale v :

D'après les résultats numériques ci-dessus (Fig. IV.6), on observe que :

- ✓ Une diminution de la vitesse transversale à la sortie du tube par rapport à son entrée.
- ✓ Une augmentation de la vitesse transversale après le passage des chicane, dans le tube d'entrée.
- ✓ Une diminution de la vitesse après le passage des chicane, dans tube de sortie le cas (d) et une augmentation dans le cas (c).

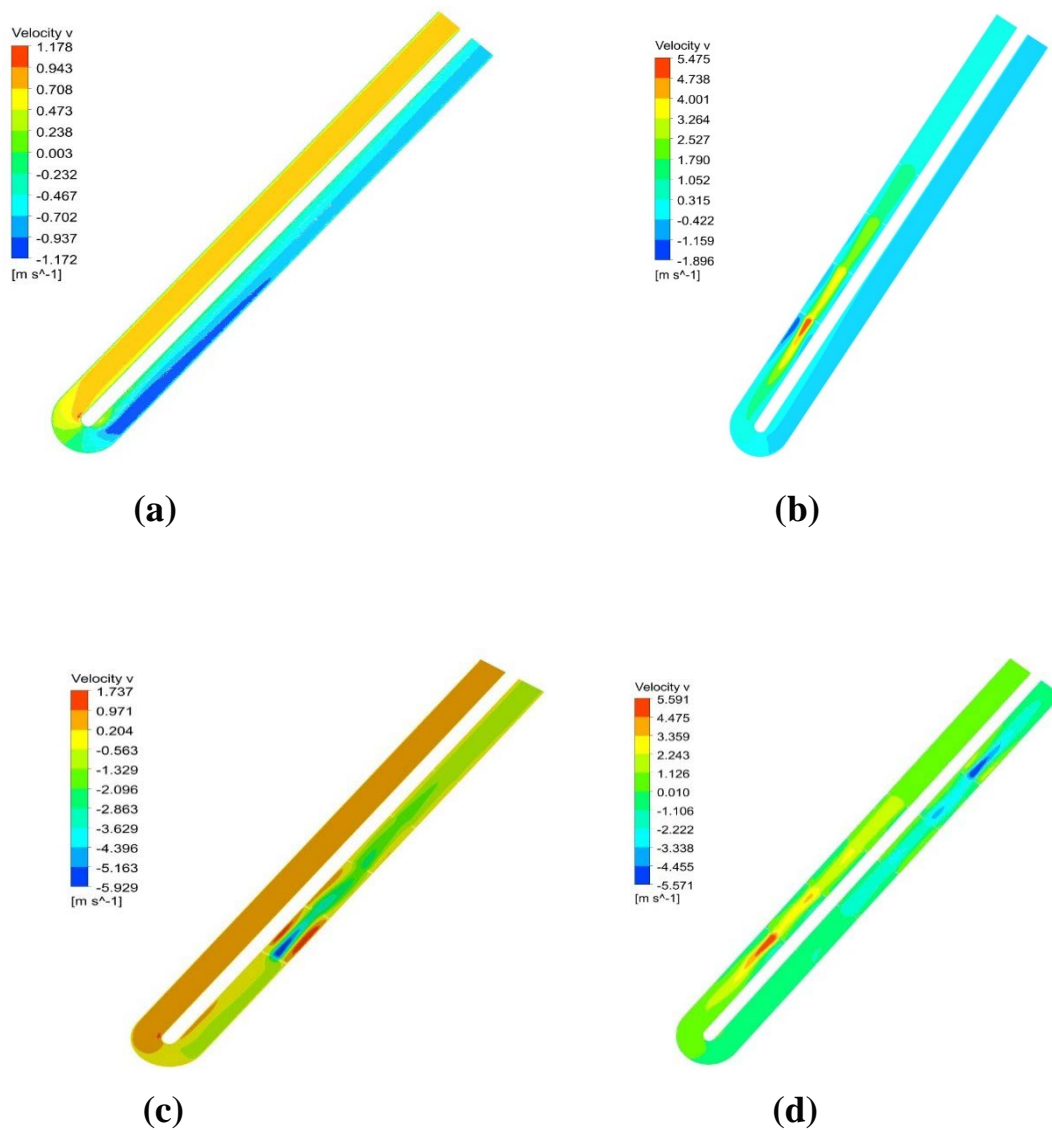


Figure IV. 6. La variation des champs de la vitesse transversale à travers l'échangeur.

IV.4.6. Composante de la vitesse longitudinale u :

La vitesse longitudinale augmente considérablement dans certaines parties de tube, notamment là où des tourbillons (des zones de rotation du fluide) et des chicanes sont présents.

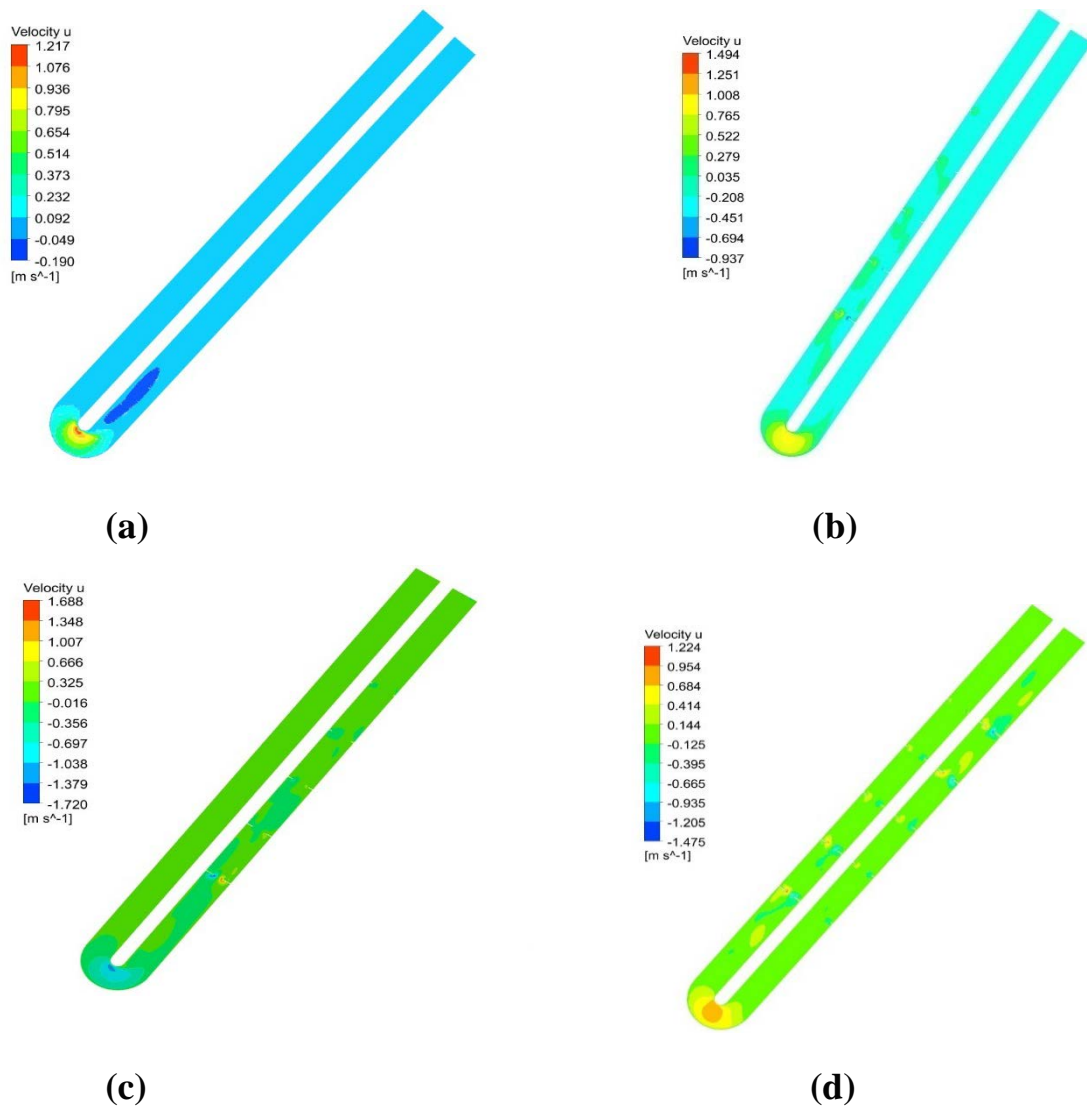


Figure IV. 7. La variation des champs de vitesse longitudinale à travers la section du tube.

IV.4.7. Lignes de courant

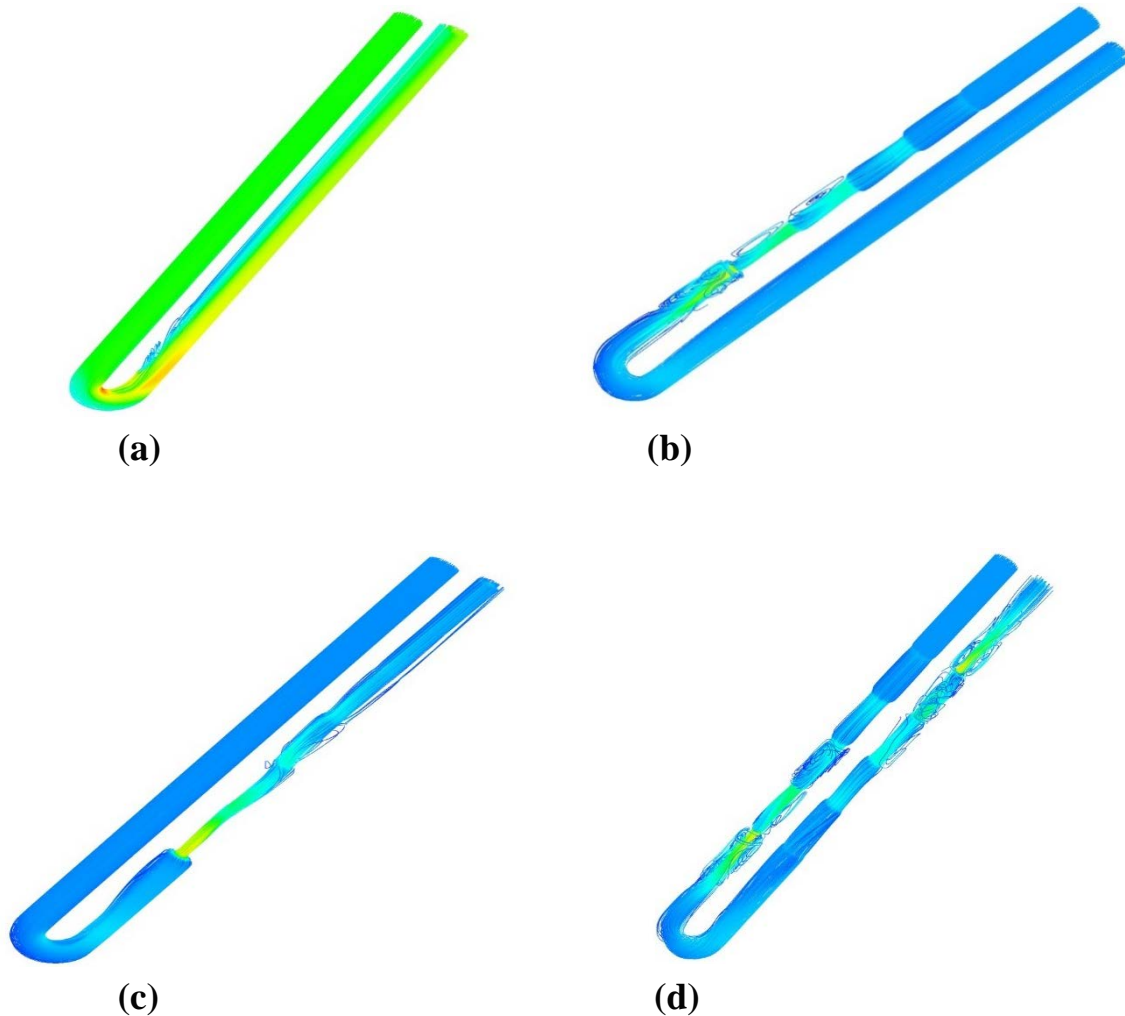


Figure IV. 8 . Lignes de courant en 3D.

D'après les résultats numériques ci-dessous (Fig. IV.8), on observe que l'écoulement de fluide se fait sous forme de lignes parallèles, suggérant un déplacement régulier et uniforme. Cependant, dès qu'il entre en contact avec les chicanes, cette organisation du flux est perturbée, provoquant des variations dans la vitesse et la direction du fluide. Ces perturbations conduisent finalement à la formation de tourbillons dans le flux.

IV.4.7. Profils de température :

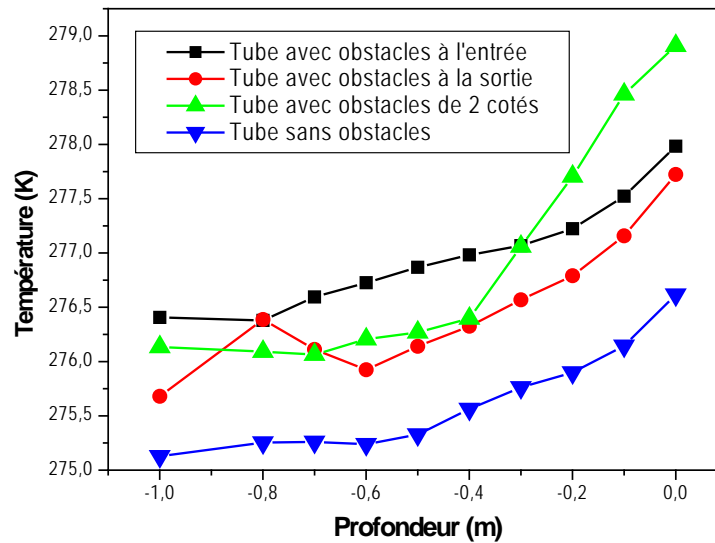


Figure IV. 9. Profils de température dans le tube de sortie pour les différents cas.

La figure IV.8 représente la distribution de la température de fluide en fonction de la profondeur à la sortie du tube pour les quatre cas. On observe que :

- Les valeurs de la température à la sortie du tube sans chicane sont faibles par rapport aux autres cas avec chicanes.
- Une variation importante de températures dans le tube avec chicanes à l'entrée par rapport au tube avec chicane à la sortie.
- Une augmentation significative de la température de fluide dans le tube avec chicanes (à la sortie, à l'entrée et le tube sans chicanes) de $-0,8$ m à 0 m de profondeur.
- Une augmentation très importante de la température de fluide dans le tube avec chicanes à la sortie de -1 m à $-0,8$ m de profondeur et une diminution de $-0,8$ m à $-0,6$ m par rapport aux autres cas.
- ✓ À une profondeur de -1 m, la température du fluide à la sortie du tube avec des chicanes à l'entrée est plus élevée, atteignant $276,4$ K, par rapport aux autres cas.
- ✓ À 0 m, la température du fluide dans le tube de sortie avec des chicanes à l'entrée et à la sortie est plus élevée, atteignant 279 (K) par rapport aux autres cas.

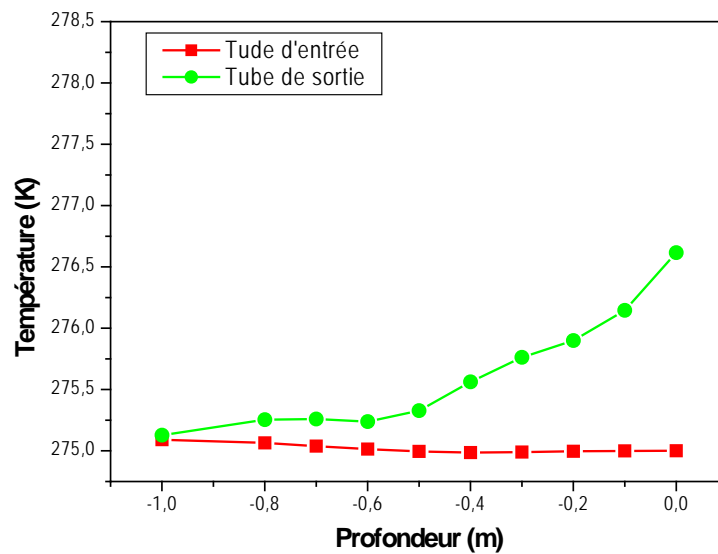


Figure IV. 10. Profils de température dans le tube sans chicanes.

La figure IV.10 représente la distribution de la température de fluide à l'entrée et à la sortie du tube en fonction de la profondeur, pour le cas d'un échangeur sans chicane. On observe que :

- La température du fluide à l'entrée reste constante à 275 K de 0 à 0,6 m, et augmente légèrement de 275 K à 275,15 K de -0,6 m à -1 m de profondeur.
 - La température du fluide à la sortie augmente de manière significative de 275,25 K à 276,75 K de -1 m à 0 m de profondeur.
 - ✓ À une profondeur de -1 m, la température du fluide dans le tube d'entrée est légèrement plus basse (275,15 K) par rapport au tube de sortie (275,25 K).
 - ✓ À 0 m, la température du fluide dans le tube de sortie (276,75 K) est considérablement plus élevée que dans le tube d'entrée (275 K).
- ✚ Cette augmentation relative est due au transfert thermique convectif entre la paroi et le fluide.

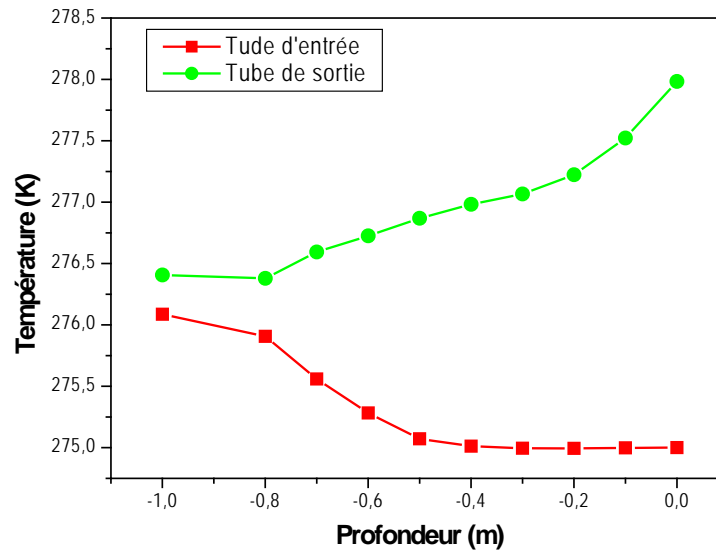


Figure IV. 11. Profils de température dans le tube avec chicanes à l'entrée.

La figure IV.11 représente la distribution de la température de fluide à l'entrée et à la sortie du tube en fonction de la profondeur, pour le cas d'un échangeur avec chicanes à l'entrée.

On remarque que :

- La température du fluide à l'entrée reste constante à 275 K de 0 m à -0,5 m, et augmente de 275 K à 276,12 K en passant de -0,5 m à -1 m de profondeur.
 - La température du fluide à la sortie reste constante 276,4 K de -1 m à -0,8 m et augmente de manière significative de 276,4 K à 278 K en passant de -0,8 m à 0 m de profondeur.
 - ✓ À une profondeur de -1 m, la température du fluide dans le tube d'entrée est légèrement plus basse (276,12 K) par rapport au tube de sortie (276,4 K).
 - ✓ À 0 m, la température du fluide dans le tube de sortie (278 K) est considérablement plus élevée que dans le tube d'entrée (275 K). Cette différence majeure souligne l'utilisation des chicanes à l'entrée de l'échangeur.
- ✚ Cette augmentation est le résultat de l'emploi des chicanes ainsi que du transfert thermique convectif entre la paroi et le fluide.

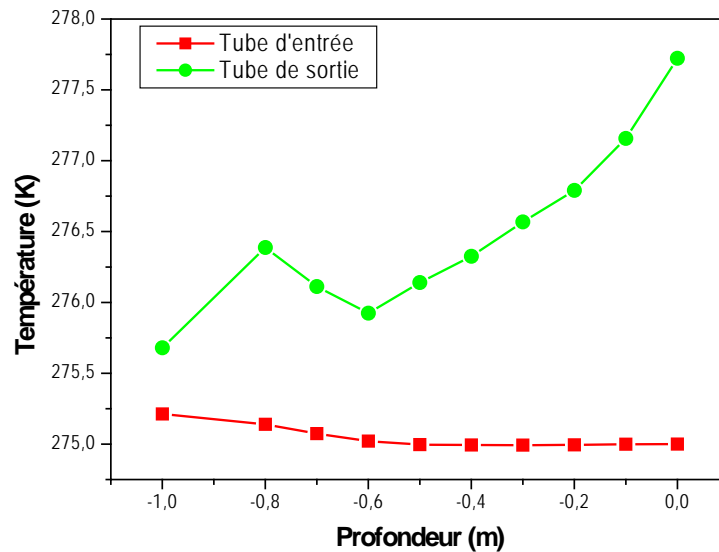


Figure IV. 12. Profils de température dans le tube avec chicanes à la sortie.

La figure IV.12 représente la distribution de la température de fluide à l'entrée et à la sortie du tube en fonction de la profondeur, pour le cas d'un échangeur avec chicanes à la sortie.

- La température du fluide à l'entrée reste constante à 275 K de 0 m à -0,6 m, puis augmente légèrement de 275,1 K à 275,25 K entre -0,6 m et -1 m de profondeur.
 - La température du fluide à la sortie augmente de 275,7 K à 276,4 K entre -1 m et -0,8 m de profondeur, puis diminue de 276,4 K à 276 K entre -0,8 m et -0,6 m, et enfin augmente de 276 K à 277,75 K entre -0,6 m et 0 m de profondeur.
 - ✓ À une profondeur de -1 m, la température du fluide dans le tube d'entrée est basse (275,25 K) par rapport au tube de sortie (275,7 K).
 - ✓ À 0 m, la température du fluide dans le tube de sortie (277,75 K) est considérablement plus élevée que dans le tube d'entrée (275 K).
- ✚ La variation est due à l'utilisation de chicanes à la sortie de l'échangeur, mais elle demeure moins importante que celle constatée avec des chicanes à l'entrée du tube.

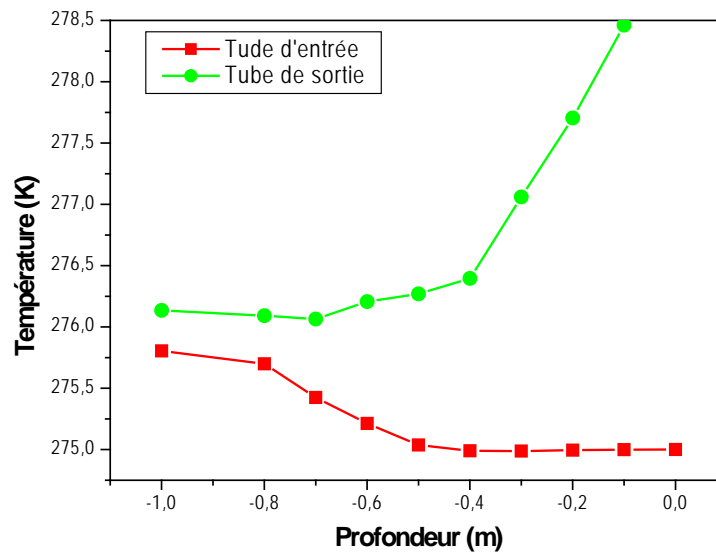


Figure IV. 13. Profils de température dans le tube avec chicanes de 2 cotés.

La figure IV.13 représente la distribution de la température de fluide à l'entrée et à la sortie du tube en fonction de la profondeur, pour le cas d'un échangeur avec chicanes de 2 cotés.

- La température du fluide à l'entrée reste constante à 275 K de 0 m à -0,5 m, puis augmente relativement de 275,1 K à 275,78 K entre -0,5 m et -1 m de profondeur.
- ✚ Cette augmentation est due à l'utilisation des chicanes.
- La température du fluide à la sortie diminue légèrement de 276,12 K à 276,11 K entre -1 m et -0,7 m, puis augmente de manière significative de 276,12 K à 278,5 K entre -0,8 m et 0 m de profondeur.
- ✚ Cette augmentation majeure est due à l'utilisation inverse des chicanes.
- ✓ A une profondeur de -1 m, la température du fluide dans le tube d'entrée est de 275,78 (K) est inférieur à celle du tube de sortie qui est de 276,12 (K).
- ✓ A une profondeur de 0,1 m, la température du fluide dans le tube de sortie 278,5 (K) est considérablement plus élevée que dans le tube d'entrée 275 (K).

IV.4. Conclusion

Cette étude se focalise sur une analyse numérique de l'écoulement turbulent dans un tube en forme de U équipé de chicanes. L'objectif est d'évaluer les effets des chicanes sur les performances thermiques et dynamiques de l'écoulement de fluide à l'intérieur de l'échangeur.

Les résultats de simulation confirment que la présence des chicanes dans l'échangeur augmente l'échange dynamique, améliorant ainsi le transfert thermique.

L'efficacité de l'échange thermique est meilleure dans le tube avec des chicanes à l'entrée et à la sortie par rapport aux autres cas.



Conclusion
Général

Conclusion générale

Conclusion générale

L'énergie géothermique est en effet l'une des énergies renouvelables qui connaît un développement considérable. Elle peut être utilisée pour le chauffage, la production d'électricité et le rafraîchissement....

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, Nous avons réalisé une étude mettant en évidence comment l'énergie géothermique, récupérée à l'aide d'un échangeur de chaleur vertical, peut être utilisée pour alimenter une pompe à chaleur et assurer le chauffage des logements.

Ce travail présente une étude numérique en 3D d'un tube en forme U (échangeur sol/eau) avec la présence des chicanes. Notre objectif était d'évaluer les effets des chicanes sur les performances de comportement dynamique et thermique de l'écoulement à l'intérieur de l'échangeur.

Pour cette étude, nous avons utilisé le logiciel Ansys CFX, qui repose sur la méthode des volumes finis pour simuler les écoulements de fluide et les transferts de chaleur.

L'analyse des résultats en comparant les profils de température montre que :

- La présence de chicanes améliore le transfert thermique.
- L'écart de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur avec des chicanes des deux côtés est plus important par rapport aux autres cas étudiés.

Cette amélioration se traduit par une meilleure efficacité énergétique de l'échangeur, ce qui garantit une performance de chauffage optimale.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] **Kh. Salhein, C. J. Kobus et M. Zohdy**, « Control of Heat Transfer in a Vertical Ground Heat Exchanger for a Geothermal Heat Pump System geotherm », Oakland University, Rochester, MI 48306, USA.
- [2] **M. Benyoub, B. Bouhacina, A. Oudrane, B. Aour1**, « L'utilisation de la Géothermie à la Climatisation des Locaux Résidentiels », Revue ALMIYAR, Numéro Spécial, Vol. 01 N°01(2018) 50– 57 ISSN 2170-0931.
- [3] **Alfredo Aranda-Arizmendi, Martín Rodríguez-Vázquez, Carlos Miguel Jiménez-Xamán, Rosenberg J. Romero et Moisés Montiel-González**, « Parametric Study of the Ground-Air Heat Exchanger (GAHE): Effect of Burial Depth and Insulation Length ». Fluids 2023, 8, 40. <https://doi.org/10.3390/fluids8020040>.
- [4] **Aminhossein Jahanbin**, « Thermal performance of the vertical ground heat exchanger with a novel elliptical single U-tube », Geothermics Volume 86, July 2020, 101804.
- [5] **N. Rosa, N. Soares, J. J Costa, P. Santos, et H. Gervásio**, « Assessment of an earth-air heat exchanger (EAHE) system for residential buildings in warm-summer Mediterranean climate ». Sustainable Energy Technologies and Assessments, 38, 100649.
- [6] **V.F. Hermes, J.V.A. Ramalho, L.A.O. Rocha, E.D. dosSantos, W.C. Marques, J. C osti, M.K. Rodrigues, L.A. Isoldi**, « Further realistic annual simulations of earth-air heat exchangers installations in a coastal city », Sustainable Energy Technologies and Assessments Volume 37, February 2020, 100603.
- [7] **SAYAD Achraf**, « Etude expérimentale d'un échangeur eau-air dans la région de Biskra ; Utilisation de la géothermie pour la climatisation des habitats », mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra.
- [8] **N. Moummi, H. Benfatah, N. Hatraf, A. Moummi et S. Youcef Ali**, « Le Rafraîchissement par la géothermie : étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra », Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3(2010), 399 – 406p.
- [9] **Takourabt, Djillali, Tamadazt, Akli**, « Chauffage d'une maison individuelle par géothermie à l'aide d'une pompe à chaleur », mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Références bibliographiques

- [10] **T. S. Bisoniya, A. Kumar and P. Baredar**, « Cooling potential evaluation of earth3air heat exchanger system for summer season », Int J Eng. Tech Res, vol. 2 4, pp. 309-316, 2014.
- [11] **H. Benfateh**, « Etude du Rafrâchissement par la Géothermie, Application à l’Habitat », mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra.
- [12] **Yannis Labeau**, « Couplage de la modélisation géologique 3D et de la modélisation hydro-thermique : apport à la compréhension du système géothermique du Lamentin (Martinique) ». Sciences de la Terre. Université des Antilles, 2018.
- [13] <https://www.energy-observer.org/fr/ressources/geothermie-energie>.
- [14] **ZAHAF Hichem, RAHOU Ibrahim**, « Dimensionnement et simulation d’un système multi-sources (géothermique, capteur Cylindro-parabolique et STEP) relie au réseau pour alimenter la ville touristique de BOUHANIFIA Mascara », mémoire de master, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.
- [15] **KESSAI Yacine**, « Refroidissement des eaux d’irrigation par la géothermie : échangeur enterré (eau/sol) de forme serpentine », mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra.
- [16] **KEDDAR Ayoub**, « Étude expérimentale des échanges thermiques en régime transitoire entre le sol et un échangeur enterré », mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra.
- [17] <https://www.ledauphine.com/magazine-immobilier/2023/02/24/installation-de-la-geothermie-le-gouvernement-augmente-son-aide-financiere>.
- [18] <https://geothermie-soultz.fr/guide/geothermie-profonde>.
- [19] **AGGOUN Amine, Meziane Abderrahmane**, « Etude et dimensionnement d'un system de chauffage à énergie géothermique », mémoire de master, Université Akli Moand Oulhadje-Bouira.
- [20] <https://www.francebleu.fr/infos/climat-environnement/puy-de-dome-se-chauffer-avec-la-chaaleur-de-la-terre-1484662514>.
- [21] <http://sacha.delanoue.free.fr/tpe/autres.html>.

Références bibliographiques

[22] **OUALI Salima**, « Chauffage et rafraîchissement par la géothermie », Thermique et Thermodynamique Solaire et Géothermie.

[23] <http://tek33g2b.over-blog.net/article-le-fonctionnement-d-une-centrale-geothermique-61173745.html>.

[24] <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/geothermie-tres-basse-energie>.

[25] **BERREGHIS Badreddine**, « Revitalisation De Tourisme Thermal », Mémoire de Master, Université 08 Mai 1945 de Guelma.

[26] **OUALI Salima**, « Eléments de l'Atlas géothermique de l'Algérie », Thermique et Thermodynamique Solaire et Géothermie – CDER 2018.

[29] **TEGGAR Abdelkarim, BELLAOUAR Abderraouf**, « Adaptation des machines frigorifiques aux régions Chaudes. Proposition d'un aéro-refroidisseur géothermal », mémoire de master, Université de Ghardaïa.

[27] **CHABLA Samia, HAMMI Kanza**, « Chauffage d'une maison avec pompe à chaleur », mémoire de master, Université *Saâd Dahra*, Blida 1.

[28] <https://www.infoenergiesrenouvelables.fr/pompe-a-chaleur/>.

[29] **LEMALE Jean, GOURMEZ Daniel**, Guide coédité par l'Agence régionale de l'Environnement en Lorraine (AREL), le BRGM, EDF et la Délégation régionale Lorraine de l'ADEME, 2008.

[30] **CHARDON Gaétan**, « Etude de pompes à chaleur à absorption multifonctions pour les sous-stations de réseaux de chaleur », Université Savoie mont-blanc, 2021.

[31] https://www.motralec.com/public/fichiers/docs/France_Air_XINEO_Pompe_a_chaleur.pdf

[32] https://www.doc-developpement-durable.org/projet-paysager-Madagascar/projet-parc-attraction_Madagascar/catalogues/pompes-a-chaleur/guide_ademe_pompes_chaleur.pdf.

[33] **MARSAUD Bruno**, « Les différentes formes de « Captage » de la ressource géothermique », (AFPG - ANTEA Group) Hervé Lautrette (AFPG – GINGER BURGEAP).

[34] <https://conseils-thermiques.org/contenu/pompe-a-chaleur-geothermique.php>.

Références bibliographiques

- [35] **Jean-Yves Ausseur (Antéa), Sophie Bezelgues-Courtade (BRGM et Peter Riederer (CSTB)**, « Les pompes à chaleur géothermiques sur champ de sondes Manuel pour la conception et la mise en œuvre », ISBN : 978-2-7159-2531-1, mars 2012 – Réf. ADEME : 6660, mars 2012 – Réf. BRGM : STC006.
- [36] Principes de fonctionnement et usages de la géothermie source : ADEME / BRGM.
- [37] <https://www.geothermies.fr/pompe-chaleur-sur-sondes-geothermiques-verticales>.
- [38] <https://www.plancher-chauffant-caleosol.fr/geothermie/corbeille-geothermique>.
- [39] <https://www.consoglobe.com/aide-installation-pompe-a-chaleur-geothermie-cg>.
- [40] **JASQUES Étienne Croteau**, « Évaluation des paramètres influençant les températures d'opération des puits à colonne permanente », École Polytechnique de Montréal.
- [41] https://ashraemontreal.org/ashrae/data/files/2e_conference_sept21.pdf.
- [42] lesentimentparfait.fr/climatisation/le-meilleur-radiateur-eau-chaude/
- [43] <https://www.construiredesamaison.com/equipement/radiateurs-planchers-chauffants/le-plancher-chauffant-hydraulique/a16149>.
- [44] <https://www.xpair.com/lexique/definition/ventilo-convecteur.htm>.
- [45] **Dr. Hamel Mohammed**, « Initiation à la simulation numérique des écoulements de fluides (CFD) Introduction à l'ANSYS ICEM CFD et ANSYS CFX », Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF.
- [46] **KHALED Bilal**, « Modélisation de la convection naturelle laminaire dans une enceinte avec une paroi munie d'un bloc », Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah Ouargla
- [47] **BENOUAZ Khawla, ABBAD Houda**, « Une méthode numérique de volume fini pour résoudre la conduction 2D dans une plaque rectangulaire en utilisant Matlab », Centre Universitaire SALHI Ahmed de Naama.
- [48] **KHANFOUF Omar**, « Modélisation par volumes finis des écoulements à surface libre », Thèse de Doctorat, Université Batna 2 - Mostefa Ben Boulaïd.

Références bibliographiques

[49] **FEDDAL Abdelkader**, « Investigation Numérique de l'Effet du Nombre de Reynolds sur l'Interaction entre deux Jets Verticaux et un Écoulement Transversal », thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf.

[50] **BEN AMEUR Okba**, « Etude de l'impact du rafraichissement des fontaines d'eau dans les maisons a passion, cas des zones sahariennes », mémoire de magister, Université Mohamed Khider- Biskra

[51] **ADJADJI Asma, LARIBI Hanane**, « Caractérisation numérique des performances thermique d'un échangeur chicané : influence des configuration géométrique », mémoire de master, Centre Universitaire SALHI Ahmed de NAAMA.

[52] **CHELLALI Abdessamed**, « Etude aérodynamique d'un l'écoulement laminaire autour d'une aile d'avion », mémoire de master, Centre Universitaire SALHI Ahmed de NAAMA.

[53] **P. Jalilia, D.D. Ganjia et S.S. Nourazar**, « Investigation of convective-conductive heat transfer in geothermal system», Journal Results in Physics, 10 (2018) 568–58.

