RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIREMINISTÈREDEL'ENSEIGNEMENTSUPÉRIEURETD ELARECHERCHESCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ Dr. YAHIA FARES DE MÉDÉAFACULTÉDESSCIENCESETDELATECHNOLOGIE

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Envue de l'obtention du diplôme Master énergie renouvelable en mécanique

Thème:

Analyse des performances de l'échangeur de chaleur coaxial et du fluide caloporteur

pour le développement de la géothermie moyenne-profonde

Encadrant:

Dr. Tahar Souad

Co-encadrant:

Pr. ZIRARI Mounir

Préparé par :

Tchoketch hadjer

Chenoufi Sid Ali

2022/2023

Remerciements

Toutes les louanges et actions de grâces sont dues à Allah, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la volonté, le soutien, l'endurance et la bravoure nécessaires pour accomplir cette maigre tâche.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au Dr Tahar S, qui a bien voulu nous superviser et nous a fait bénéficier de son expertise et de ses conseils avisés afin de mener à bien cette tâche. Merci au Pr ZIRARI.M, notre co-encadrant, d'avoir accepté d'encadrer ce travail de mémoire. Nous apprécions votre disponibilité, votre tolérance et vos encouragements, ainsi que la motivation,

le soutien et le temps qu'il nous a si gentiment accordé.

Découvrez dans cet art la manifestation de notre admiration et de notre gratitude.

Vous nous respectez en évaluant ce travail.

Dédicaces

A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.
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, et à qui je souhaite plus de succès.
A tous ceux que j'aime.
Merci
Hadjer tchoketch

Dédicaces

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles

. A mon très cher père Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection

Chenoufin Sidali

Table des matières

Liste des figures
Liste des tableaux
Nomenclature

INTRODUCTION GENERALE **15**

CHAPITRE I:ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 INTRODUCTION **2**

I.2 SYSTEMES GEOTHERMIQUES **2**

I.2.1 SYSTEMES GEOTHERMIQUES PROFONDS (DEEP GEOTHERMAL SYSTEMS) : 2
I.2.2 SYSTEMES GEOTHERMIQUES PEU PROFONDS (SHALLOW GEOTHERMAL SYSTEMS) 3

I.3 TYPES DE GEOTHERMIE **3**

I.3.1 GEOTHERMIE DE FAIBLE ENERGIE 4
I.3.2 GEOTHERMIE DE MOYENNE ENERGIE 4
I.3.3 GEOTHERMIE DE HAUTE ENERGIE 4
I.3.4 ETAT DE L'ART 4

I.4 CONCLUSION **17**

CHAPITREII:FORMULATION MATHEMATIQUE

II.1 INTRODUCTION **18**

II.2 MODELISATION DE L'ECOULEMENT DES FLUIDES **18**

II.2.1 L'EQUATION DE LA CONTINUITE 18
II.2.2 L'EQUATION DE QUANTITE DE MOUVEMENT 18
II.2.3 ÉQUATION DE L'ENERGIE 19

II.3 MODELISATION THERMIQUE **19**

II.3.1 DIFFERENTES MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR 19
II.3.2 CONDITION DE DIRICHLET 24
II.3.3 CONDITION DE NEUMANN 24
II.3.4 CONDITION DE ROBIN-FOURIER 24

II.4 CALCUL PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES DES NANO FLUIDES **25**

II.4.1 LA FRACTION VOLUMIQUE (Φ) 25
II.4.2 CONDUCTIVITE THERMIQUE DES NANOFLUIDES ET SES MODELES (K_{NF}) 25
II.4.3 VISCOSITE DYNAMIQUE 25
II.4.4 MASSE VOLUMIQUE 26
II.4.5 CHALEUR SPECIFIQUE 26

II.5 CONCLUSION **27**

CHAPITREIII:RESOLUSION NUMIRIQUE

III.1 INTRODUCTION **28**

III.2 LES METHODES NUMERIQUE **28**

III.2.1 METHODE DES DIFFERENCES FINIES 28
III.2.2 METHODE DES VOLUMES FINIS 29
III.2.3 METHODE DES ELEMENTS FINIS 29

III.3 RESOLUTION DES EQUATIONS PAR ELEMENTS FINIS **29**

III.3.1 METHODES DES ELEMENTS FINIS 29

III.3.2 MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS 30
LA FORMULATION FORTE D'UN PROBLEME AUX CONDITIONS AUX LIMITES S'ECRIT ALORS COMME SUIT : 30
LA FORMULATION VARIATION ELLE FAIBLE PEUT ETRE OBTENUE PAR LES ETAPES SUIVANTES : 30
III.3.3 FORME GENERALE DES EQUATIONS DU SYSTEME[22]: 31
III.4 CHOIX DU MAILLAGE 32
III.4.1 DISCRETISATION: 33
III.5 DISCRETISATION DE L'EQUATION DE CHALEUR PAR ELEMENT FINI: 33
III.5.1 BILAN THERMIQUE: 33
III.5.2 FORME DISCRETISEE: ELEMENTS FINIS: 34
III.5.3 DISCRETISATION DE LA FORME INTEGRALE FAIBLE: 35
III.5.4 EXEMPLE DE CALCUL ELEMENTAIRE : 36
III.6 CONCLUSION : 37
CHAPITRE IV:RESULTATS ET DISCUSION
IV.1 INTRODUCTION : 38
IV.2 PRESENTATION D'ANSYS (APDL) : 38
IV.3 VALIDATION DES MODELES DEVELOPPES : 40
IV.4 ÉTUDIER L'EFFET DE LES NANO-FLUIDE SUR LE TRANSFERT THERMIQUE DANS L'ECHANGEUR DE CHALEUR 42
IV.5 L'AMéLIORATION DE NOTRE SYSTEME……..... 43
IV.6 CONCLUSION……49
CONCLUSION GENERALE

Liste des figures

Figure I.1 Schéma descriptif d'un système géothermique profond [3]……..**1**

Figure I.2 Schéma descriptif d'un système géothermique peu profond [3]……**2**

Figure I.3 Types de géothermie [4].……**2**

Figure I.4 structure des tubes [5].…….**4**

Figure I.5 Variations de l'extraction de chaleur selon le type de disposition du milieu souterrain [5]……**4**

Figure I.6 DBHE coaxiaux installés dans un puits O&G reconverti (Cas 1) et dans un nouveau forage(Cas2). …….**5**

Figure I.7 Énergie nette (en haut) et température de sortie simulée (en bas) après 1 an de fonctionnement……**6**

Figure I.8 Coût de production normalisé de l'énergie thermique avec un puits existant reconverti en DBHE (Cas 1) en exploitation pendant 30 ans, comparativement au coût de l'électricité et du gaz dans le sud du Québec (fourniture de chaleur seulement) [6].....**6**

Figure I.9 Schéma du flux de travail du modèle DBHE [7]……**7**

Figure I.10 Comparaison du modèle S3 et des résultats numériques à 10a par COMSOL[7].....**7**.

Figure I. 11 Extraction et récupération de chaleur du DBHE en un an de fonctionnement [7].....**8**.

Figure I.12 Comparaison entre le résultat de la simulation et les données de l'expérience [8]……..**8**

Figure I.13 Système de chauffage urbain géothermique (H.S.T. = Hot Storage Tank, H.P. = Heat Pump) [8]…….**9**

Figure I.14 Extraction de chaleur au 90ème jour de chaque mode de fonctionnement [8]……**9**

Figure I.15 Changement de température de la formation rocheuse à 1 m du BHE [8].....**10**

Figure I.16 Schéma de principe d'un échangeur de chaleur coaxial à forage profond [11]…….**10**

Figure I.17 Distributions de température du fluide sous différents diamètres extérieurs de conduit [11]…….**11**

Figure I.18 Répartition des températures du fluide sous différentes puissances d'échange de mètre linéaire [11]……...**12**

Figure I.19 Répartition de la température du fluide sous différents matériaux de remblai [11]……**12**

Figure I.20 Température minimale de refoulement du forage (à gauche) et efficacité globale de stockage (à droite) pendant un cycle de fonctionnement annuel en fonction de la profondeur du forage et de la puissance moyenne du système [12]……..**13**

Figure I.21 Schéma de principe d'un CBHE profond typique [13]……...**13**

Figure I.22 Comparaisons CF de la couche de sol de 0 à 1020 m et de 1020 à 1800 m sous différents débits [13].....**14**

Figure I.23 (a) Schéma du DBHE coaxial (avec sens d'écoulement normal - échangeur de chaleur CXA), et (b) le domaine nodal discrétisé (modifié d'après [15])……..**14**

Figure I.24 Impact du paramétrage sur l'efficacité du stockage, y compris (a) la conductivité thermique du tuyau interne, (b) la profondeur du trou de forage, (c) la température d'entrée pendant l'extraction, (d) la conductivité thermique du tuyau externe, (e) la conductivité thermique de la roche, (f) le débit, (g) gradient géothermique, (h) conductivité thermique du coulis, (i) température d'entrée de charge et (j) sens d'écoulement du DBHE [14].....**15**

Figure II.1 Différent mode de transfertthermique, [17]……..**19**

Figure II.2 Conductivité thermique, [17]…….**20**

Figure II.3 Le transfert thermique par rayonnement,[17]…….**22**

FigureIII.1 Bilan thermique……...**32**

Figure III.2 Domaine plan discrétisé en 12 élément relies entre eux par15 nœuds……..…**34**

Figure III.3 Elément a deux nœuds ……...**36**

Figure IV.1 : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS……**40**

Figure IV.2: nos résultats obtenus à partir d'un mètre……**41**
Figure IV.3 : les resultants obtenue par beier et al……**41**

Figure IV.4: représente la circulation de fluide caloporteur dans l'échangeur de chaleur coaxial……...**44**
Figure IV.5: le champ de température de fluide caloporteur (eau pure)……....**45**
Figure IV.6 : le champ de température de nano-fluide (eau + Al_2O_3)……....**45**
Figure IV. 7: le champ de température de nano-fluide (eau + Cu)……..**45**

Figure IV.8 : changement de température de l'eau (eau pure) par rapport à la profondeu……..**47**
Figure IV.9 : changement de température de nano-fluide (eau+ Al_2O_3) par rapport à la profondeur……**47**
Figure IV.10 : changement de temperature de nano-fluide (eau+Cu) par rapport à la profondeur……**47**
Figure IV.11 : répresente la circulation de nano-fluide dans un échangeur de chaleur se

forme
U……**48**
Figure IV. 12: le champ de température de nano-fluide (eau + Cu)……..**49**
Figure IV.13 : le champ de température de nano-fluide (eau + Al_2O_3)…….**49**
Figure IV.14 : ce graphe représente la variation de température de nano-fluide (eau+Cu) au fonction de profondeur dans un échangeur de chaleur ce forme U……**49**
Figure IV.15 : ce graphe représente la variation de température de nano-fluide (eau+Al_2O_3) au fonction de profondeur dans un échangeur de chaleur ce forme U……**49**
Figure IV.16. Colonnes graphiques représentant les performances de chaque forme enfonction du fluide utilisé…….**50**

Liste des tableaux

Tableau I.1 Le modèle coaxial DBHE est en bon accord avec les résultats réels des tests d'ingénierie ……**11**

Tableau III.1 Avantage et inconvénient des MDF……**27**
Tableau III.2 : Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables **[22]**….....**31**

Tableau.VI.1. Paramètres utilisés dans le cas de la vérification. [29]……...**42**
Tableau.VI.2. les paramètres thermo-physique des nano-fluide……...**43**

Tableau.VI.3. Extraction de chaleur pour chaque fluide échangeur……..…...**50**

NOMENCLATURE

F	Distances équivalentes représente la proximité de surface Solide	
h	Coefficient d'échange de convection	m/s
K	énergie cinétique turbulente	J/Kg
T	temps	S
T	Température	$K°$
U	Composante de la vitesse moyenne dans la direction X	
V	Composante de la vitesse moyenne dans la direction Y	
$\overline{u_\iota \ u_j u_k}$	Terme de diffusion	m/s
$\overline{u_\iota \ u_j}$	Tension de Reynolds	

Symboles grecs

α	La diffusivité thermique	
δ_{ij}	Symboles de Kronecker	
ε	Taux de dissipation de l`énergie cinétique turbulente	$m^2 \ / s^2$
μ	La viscosité dynamique	Kg/m.s
λ	La conductivité thermique	j /s.m.k
ϕ	Variable généralisée par unité de masse	
υ	La viscosité cinématique	$/ \ s^2$
Γ	Coefficient d`échange dans les termes de transport	
$\Gamma_\emptyset$	Coefficient de diffusion	

C_p Chaleur massique

ε Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente m^2/s^2

ρ Masse volumique Kg/m3

μ La viscosité dynamique Kg/m.s

Abréviation

Nu Nombre de Nusselt

Re Nombre de Reynolds

BHE profond de type U

DBHE échangeur de chaleur de forage profond

VIT Tube isolé sous vide

ملخص

في إطار البحث عن مصادر نظيفة لإنتاج الكهرباء و الحرارة
قمنا بدراسة الطاقة الحرارية الأرضية, و ذلك بتحليل أداء مبادل حراري محوري من اجل امتصاص حرارة الأرض و استخدامها في تسخين و تبريد المباني , كما درسنا تأثير المائع الحراري على امتصاص الحرارة الأرضية من اجل تحسين أداء المبادل الحراري , و ذلك باستعمال نوعين من المبادلات الحرارية و نوعين من الموائع النانومترية بالإضافةإلى الماء الذي يستعمل غالبا هذا المجال.
النتائج المتحصل عليها في هذا البحث تبين ان المبادل الحراري على شكل U
أعطى نتائج أحسن من المبادل الحراري المحوري كما إن الموائع النانومترية قدمت أداءأحسن من الماء و احسن مائع كان المائع النانومتري (ماء + نحاس) في كلا المبادلين.

الكلمات المفتاحية :الطاقة الحرارية الأرضية,أداء,مبادل حراري محوري,المائع الحراري ,الموائع النانومترية, المبادل الحراري على شكلU,المائع النانومتري (ماء+نحاس)

Abstract

As part of the search for clean sources of electricity and heat production, we studied geothermal energy, analyzing the performance of a coaxial heat exchanger to absorb ground heat and use it in the heating and cooling of buildings. We also studied the effect of the heat transfer fluid on heat absorption. in order to improve the performance of the heat exchanger, using two types of heat exchangers and two types of nanofluids in addition to water, which is often used in this field.The results obtained in this research show that the U-shaped heat exchanger performed better than the coaxial heat exchanger, and the nanofluids provided better performance than water, and the best fluid was the nanofluid (water + Cu) in the two exchangers.

Key words : geothermalenergy, performance , coaxial heat exchanger, heat transfer fluid, nanofluid, U-shaped heat exchanger, nanofluid (water + Cu) .

Résumé

Dans le cadre de la recherche de sources propres de production d'électricité et de chaleur, nous avons étudié la géothermie, en analysant les performances d'un échangeur de chaleur coaxial pour absorber la chaleur de sol et l'utiliser dans le chauffage et le refroidissement des bâtiments. Nous avons également étudié l'effet du fluide caloporteur sur l'absorption de chaleur. afin d'améliorer les performances de l'échangeur de chaleur, en utilisant deux types d'échangeurs de chaleur et deux types de nanofluides en plus de l'eau, qui est souvent utilisée dans ce domaine.Les résultats obtenus dans cette recherche montrent que l'échangeur de chaleur en forme de U a donné de meilleurs résultats que l'échangeur de chaleur axial, et les nanofluides ont fourni de meilleures performances que l'eau, et le meilleur fluide était le nanofluide (eau + Cu) dans les deux échangeurs.

Motsclés:

la géothermie, échangeur de chaleur coaxial, fluide caloporteur, l'échangeur de chaleur en forme U, nanofluides , le refroidissement ,nanofluide (eau + Cu)

Introduction générale

La preservation de Notre environnement et le passage à des sources d'énergie plus propres et plus durables sont devenus des preoccupations mondiales majeures. Dans ce contexte, la géothermie apparaît comme une voie prometteuse pour répondre à nos besoins énergétiques tout en protégeant l'environnement.

L'énergie géothermique est une forme d'énergie renouvelable qui tire parti de la chaleur naturelle présente dans le sol pour produire de l'électricité et de la chaleur. Elle est basée sur l'exploitation de la chaleur de la terre, des nappes phréatiques et des roches chaudes à différentes profondeurs.

La géothermie présente de nombreux avantages. C'est une source d'énergie renouvelable, car la chaleur de la Terre est pratiquement inépuisable à l'échelle humaine. Il est également considéré comme une énergie propre car il génère peu ou pas d'émissions de gaz à effet de serre lors de son utilisation. De plus, il est stable et fiable car la chaleur géothermique est toujours disponible, contrairement aux sources d'énergie intermittentes telles que le solaire et l'éolien.

L'énergie géothermique est utilisée dans les systèmes de pompes à chaleur géothermiques. Ces systèmes exploitent la chaleur de la Terre pour chauffer les maisons et les bâtiments. L'énergie géothermique peut également être utilisée pour le refroidissement à l'aide de systèmes de climatisation géothermiques, qui sont considérés dans cet manuscrit afin d'exploiter la chaleur géothermique pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments.

Cependant, l'exploitation de l'énergie géothermique présente également des défis. Elle est géographiquement limitée aux zones où l'accès géothermique est facilement accessible, ce qui limite sa diffusion à certaines régions du monde. De plus, le forage géothermique peut être coûteux et nécessite une expertise technique. Il existe également des préoccupations environnementales, telles que le risque de tremblement de terre associé à certaines activités géothermiques.

Malgré ces défis, la géothermie continue de prendre de l'importance comme source d'énergie alternative, contribuant à diversifier le mix énergétique et à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Des progrès technologiques sont réalisés pour rendre l'exploitation de l'énergie géothermique plus efficace et économique. En tant que forme d'énergie renouvelable à faible émission de carbone, l'énergie géothermique joue un rôle essentiel dans la transition vers un avenir énergétique plus durable.

Notre travail constitué de quatre chapitre :

- ✓ La première partie de ce mémoire est dédiée à une synthèse bibliographique sur les échangeures coaxial et la géothermie et ses types , on présente aussi une synthèse des différents travaux expérimentaux et numériquessur le sujet de la géothermie et des échangeures de chaleur coaxial afin de donner un aperçu de la manière d'étude et d'exploitationde cette énergie afin d'atteindre le compfort énergétique grâce à cette source d'énergie.
- ✓ La deuxième partie, concerne la présentation des équations des modèles dynamique et thermique du problème étudié.
- ✓ La troisème partie ,est didiée à la présentation de la résolution numérique en présentant les différentes méthodes de résolution et la présentation de la méthode de discrétisation par élément fini à la fin du chapitre.
- ✓ On présente dans la dernièrepartie, le modèle numérique, les matériaux utilisés pour les échangeurs de chaleur coaxial et en U, en prenant en compte les différents fluides dans chaque échangeur (eau) et nanofluide (Al_2O_3 + eau), (Cu + eau), avec une comparaison des deux échangeurs utilisés dans cette étude et leurs performances, et enfin les principaux résultats de simulation avec ces interprétations.

Finalement, on termine ce mémoire par une conclusion générale.

chapitre I :
Etude bibliographies

I.1 Introduction

Avec l'aggravation de la crise mondiale de l'énergie et de l'environnement, ilest d'une grande importance d'utiliser une énergie propre et renouvelable pour réaliser la conservation de l'énergie des systèmes d'alimentation en énergie des bâtiments et éviter l'émission supplémentaire de dioxyde de carbone provenant des combustibles fossiles conventionnels [1]. Ce chapitre est un bref aperçu de la géothermie et en présentant par la suite les principaux travaux et recherches sur cette étude.

I.2 Systèmes géothermiques

I.2.1 Systèmes géothermiques profonds (Deep geothermal systems) :

Les Systems géothermiques profonds (Figure1) concernent les resources ou aquifers géothermiques profonds (Deep geothermal resources and aquifers), on parle alors de géothermie profonde. Dans ce cas, les systems conçu sont pour objectif l'exploitation des eauxthermales des nappes aquifères profondes (≈ 1000 à 3000 m) suffisamment chaudes pour être utilisées directement dans des réseaux de chauffage urbain. Le réseau de distribution de chaleur géothermique se compose d'une station (ou centrale), des canalisations et des sous-stations. Les deux éléments principaux dans les Systems géothermiques profonds sont le doublet géothermique (forage de production et d'injection) et l'échangeur de chaleur [2].

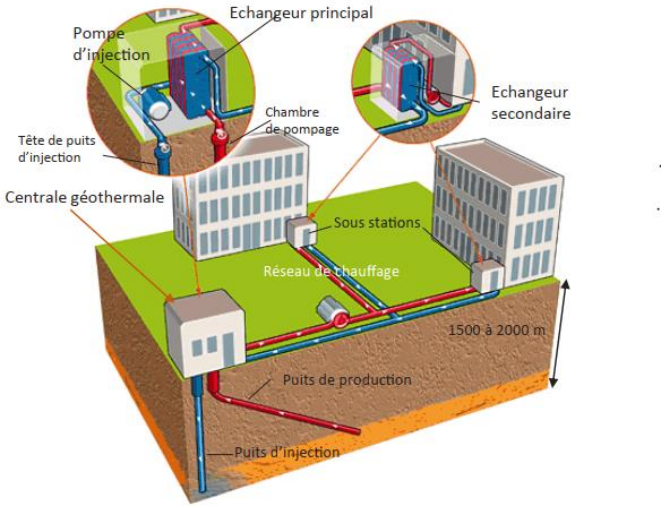


Figure I.1 Schémadescriptif d'un système géothermique profond [3].

I.2.2 Systèmes géothermiques peu profonds (Shallow geothermal systems)

Les systèmes géothermiques peu profonds utilisent la chaleur du sol ou de l'eau des nappes superficielles comme source d'énergie,on parle alors de géothermie superficielle. Ce type de systèmes estle plus répandu dans le monde et les domaines d'application comprennent le chauffage et rafraîchissement des logements individuels, collectifs ou tertiaires. Les systèmes géothermiques peu profonds nécessitent l'association d'une pompe à chaleur (PAC) et des capteurs ou sondes pour capter la chaleur du sous-sol [2].

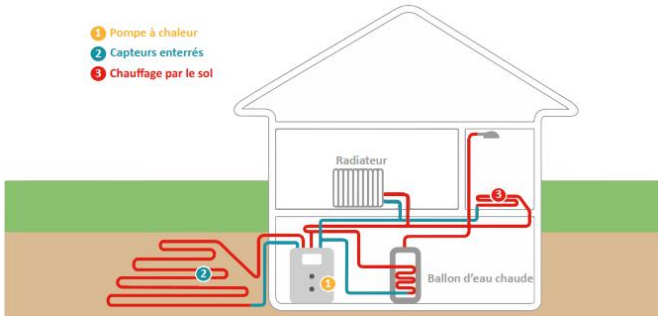


Figure I.2 Schéma descriptif d'un système géothermique peu profond [3].

I.3 Types de géothermie

L'utilisation de la chaleur du sous-sol est dépendante des avancées technologiques nous permettant de récupérer de cette chaleur. En fonction de la demande énergétique et de la quantité de chaleur disponible dans le sous-sol. On distingue trois grands types de géothermie, différenciables selon la profondeur, la température ou encore l'utilisation de la ressource de chaleur : la géothermie de très faible à faible énergie (température inférieure à 90 °C), la géothermie de moyenne énergie (température supérieure à 90 °C) et la géothermie de haute énergie (température supérieure à 120 °C) [4].

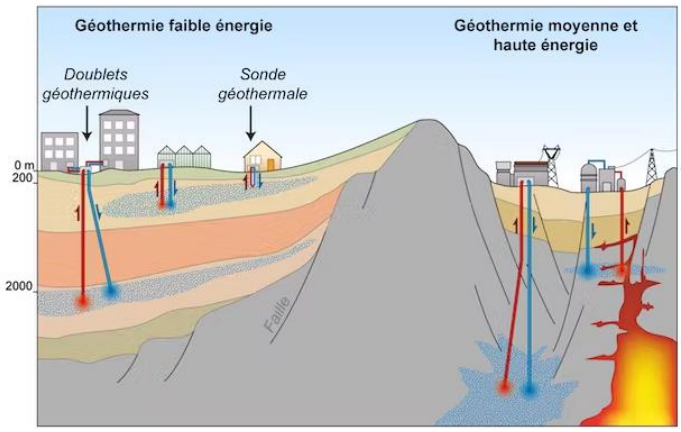


Figure I.3 Types de géothermie [4].

I.3.1 Géothermie de faible énergie

Concerne le secteur domestique ou industriel et s'applique à utiliser la chaleur ou la douceur du sous-sol pour chauffer, refroidir et produire de l'eau chaude pour des habitations uniques, des immeubles ou encore des bâtiments tertiaires [4]. Donc, elle concerne l'exploitation de la chaleur du sous-sol ou des aquifères superficiels de 0 à 600m de profondeur, dont la température est inférieure à 30 °C. La technique se base sur l'ajout d'une pompe à chaleur associée à des capteurs ou forages [2].Elle peut être utilisée en partout dans le monde notamment en Algérie.

I.3.2 Géothermie de moyenne énergie

Concerne des projets plus profonds et des températures généralement supérieures à 90 °C. Le but de cette géothermie est d'utiliser la forte température des profondeurs pour produire de la chaleur, ou de l'électricité (dans une moindre mesure). Les usages principaux de ce type de géothermie sont industriels et comprennent l'extraction de produits chimiques, le séchage de produits industriels ou encore la récupération de métaux [4]. Elle peut être utilisée dans les zones thermales du nord de l'Algérie (Mascara, Ain Defla,Khenchela).

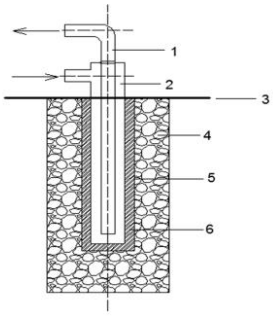
I.3.3 Géothermie de haute énergie

Elle cherche quant à elle à capter l'eau à des températures supérieures à 120 °C, sous forme de vapeur, qui servira à produire de l'électricité grâce à des turbines. Ce type de géothermie est développé dans des contextes géologiques spécifiques, impliquant la présence de corps chauds apportant la source de chaleur [4]. Elle est rencontrée dans les régions géologiquement actives (zones volcaniques ou sismiques). Ce type de géothermie n'existe pas en Algérie

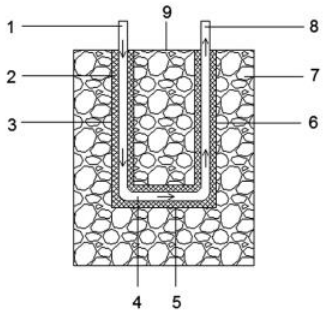
I.3.4 Etat de l'art

De nombreuses études numériques et expérimentaux ont été consacré à l'étude de la géothermie. W.ZHANG et al[5] ont examiné les avantages de la géothermie moyenne-profonde et ont décrit les principes structuraux des échangeurs de chaleur à tuyauterie coaxiale et à forage profond de type U (figure I.4) .Les performances de transfert de chaleur des deux types des BHE profonds sont comparés. Les. Des équations énergétiques sont

établies pour les fluides de circulation, le coulis, les tuyaux d'acier et les milieux souterrains, et les implications des paramètres connexes sont discutées.



a



1. Tuyau interieur 2. Tuyau exterieur 3. Surface du sol 4. Sols rocheux 5. Forage 6. Matériau de remplissage

a. Tube coaxial

1. Conduit descendante 2. Matériau de remplissage 3. Forage descendant 4. Tube horizontal 5. Forage horizontal 6. Forage ascendant 7. Sols rocheux 8. Tube ascendant 9. Surface du sol

b. Tube en U

Figure I.4 structure des tubes [5].

Leurs résultats prouvent que La performance de transfert de chaleur d'un BHE profond de type U est meilleure que celle d'un tuyau coaxial profond (L'extraction nominale de chaleur de BHE profond de type U est généralement supérieure à 1000 kW, et la valeur est plus de deux fois plus grande que celle de BHE profond de tuyau coaxial) (voir figure I.5). L'analyse comparative des tubes coaxiaux et des BHE profonds de type U permet la sélection des BHE en fonction de la situation réelle d'un projet. Ceci est bénéfique pour l'utilisation rationnelle de l'énergie géothermique moyenne profondeur, et il favorise le développement de la technologie de chauffage utilisée dans les applications géothermiques.

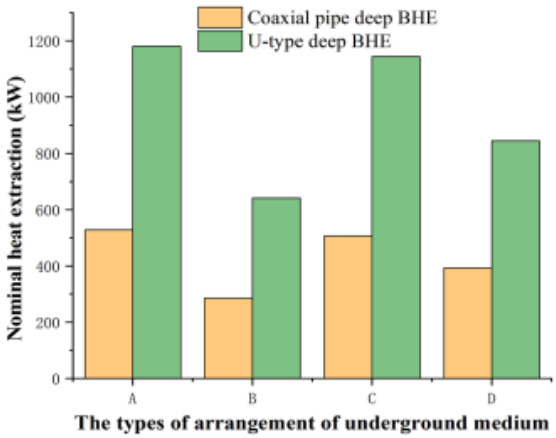


Figure I.5 Variations de l'extraction de chaleur selon le type de disposition du milieu souterrain [5].

D’autre part, différentes conceptions de DBHE coaxiaux ont été simulées numériquement (figure I.6) par Gascuel et al [6] et comparées pendant 1 an de fonctionnement en continu dans un bassin sédimentaire froid à l'aide du logiciel FEFLOW. Les facteurs affectant les performances, y compris : (1) la profondeur, (2) la réaffectation d'un puits de pétrole et de gaz (O&G) ou le forage d'un puits plus important, (3) les options de réaffectation, (4) matériau de tuyau intérieur, composé de tubes isolés sous vide (VIT) ou de polyéthylène haute densité et (5) de coulis avec différentes conductivités thermiques ont été évalués.

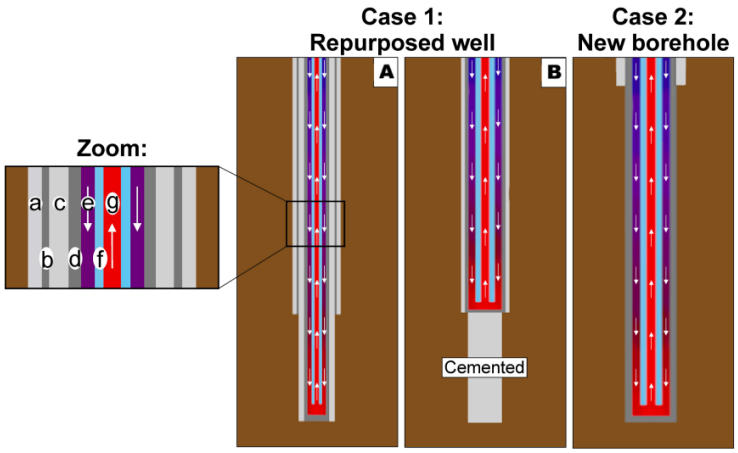
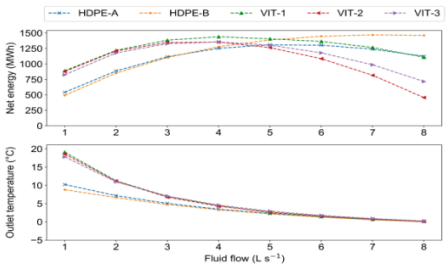


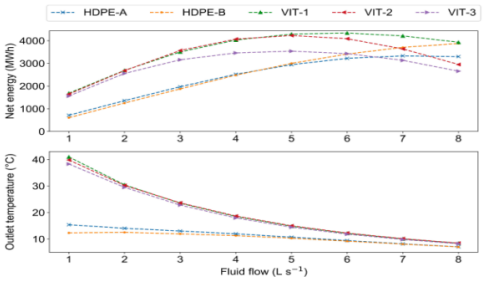
Figure I.6DBHE coaxiaux installés dans un puits O&G reconverti (Cas 1) et dans un nouveau forage (Cas 2).

Scénario A: Insertion d'un tuyau extérieur à l'intérieur du tubage existant afin de recouvrir la section ouverte inférieure. Scénario B: Utilisation du tubage préexistant comme conduite extérieure, tandis que sa section ouverte inférieure est cimentée. Zoom: a: Coulis préexistant, b: Caisson préexistant, c: Coulis neuf, d: Tuyau extérieur en acier, e: Espace annulaire, f: Tuyau intérieur, g: Espace intérieur [6].

Leur étude a mis en évidence que les performances des DBHE sont significativement impactées par leurs paramètres de conception et de fonctionnement, qui peut être optimisé. Les simulations systématiques réalisées démontrent clairement le potentiel des DBHE à produire de la chaleur à faible empreinte carbone dans les climats froids, même dans un contexte à faible gradient thermique. La conclusion générale est que moins d'énergie nette peut être extraite (31 % -45 %) en réaffectant un puits O&G qu'en forant un nouveau trou de forage, principalement en raison du diamètre plus petit du tuyau interne et des pertes de pression associées (figure I.7).



DBHE de 223 mm de diamètre et de 1500 m de profondeur



DBHE de 223 mm de diamètre et de 3000 m de profondeur

Figure I.7 Énergie nette (en haut) et température de sortie simulée (en bas) après 1 an de fonctionnement [6].

Économiquement avantageux sur une période d'exploitation continue de 30 ans, même en considérant sa plus grande performance, en raison des coûts de forage élevés et du faible coût de l'hydroélectricité. En revanche, selon les estimations de coûts réalisées ici, le coût de la chaleur produite à partir les puits réaffectés seraient inférieurs au chauffage électrique direct et pourraient même être dans la même gamme ou inférieurs au chauffage au gaz dans certains cas.

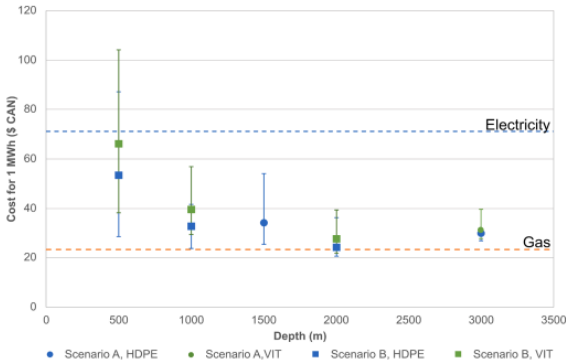


Figure I.8 Coût de production normalisé de l'énergie thermique avec un puits existant reconverti en DBHE (Cas 1) en exploitation pendant 30 ans, comparativement au coût de l'électricité et du gaz dans le sud du Québec (fourniture de chaleur seulement) [6].

Luo et al [7] ont proposé un nouveau modèle analytique, tenant pleinement compte du gradient géothermique, des stratifications souterraines et de l'écoulement des eaux souterraines, qui est appelé S3-FLS avec le nom complet de « méthode de source de ligne f.inie segmentée par infiltration stratifiée ». Il se caractérise par une vitesse de calcul élevée et une mise en œuvre et une transplantation faciles (figure I.9).

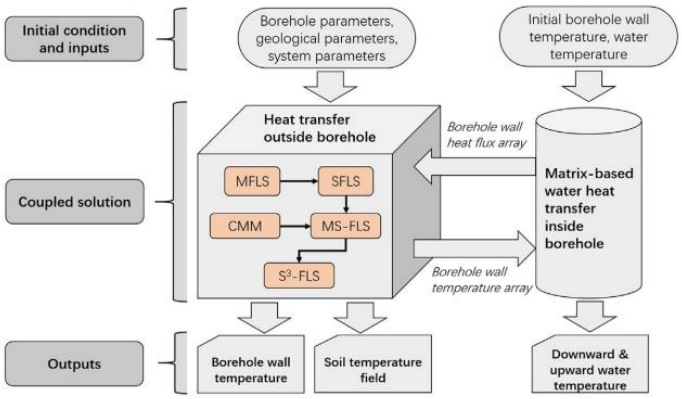


Figure I.9 Schéma du flux de travail du modèle DBHE [7]

Le modèle est comparé au modèle d'éléments finis dans COMSOL dans différentes conditions (figure I.10).

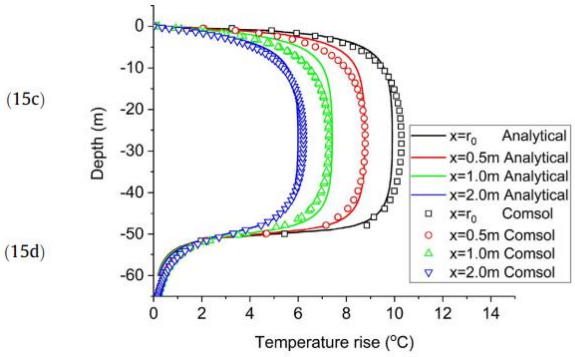


Figure I.10 Comparaison du modèle S3 et des résultats numériques à 10a par COMSOL[7].

Comme conclusion de leurs étude, l'écoulement des eaux souterraines peut améliorer les performances d'extraction de chaleur du DBHE, mais lorsque la vitesse d'écoulement est supérieure à une certaine valeur, les performances ne seraient plus améliorées. Cela peut fournir un support théorique pour la sélection du site pour le forage DBHE (figure I.11).

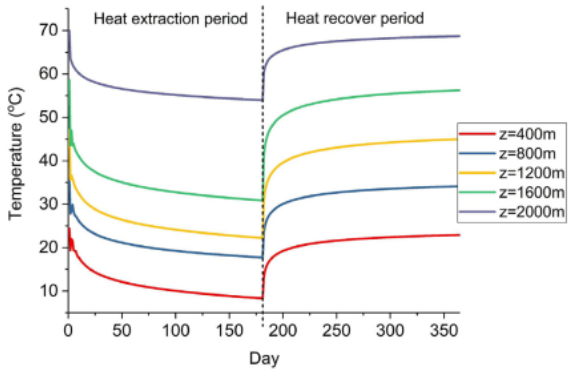


Figure I. 11 Extraction et récupération de chaleur du DBHE en un an de fonctionnement [7].

Un modèle numérique établi par Wang et al [8] pour le BHE profond coaxial peut refléter avec précision le processus de transfert de chaleur entre le BHE et la formation rocheuse. Les résultats simulés ont été comparés aux données mesurées Esen et al [9] pour vérifier l'exactitude du modèle (figure I.12).

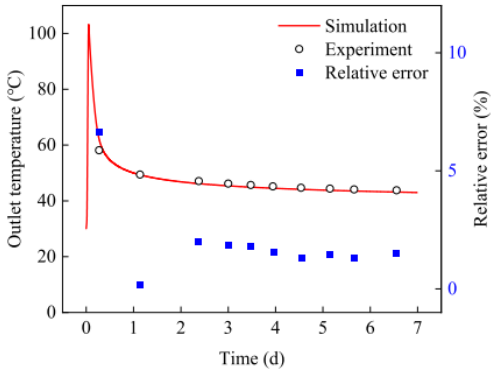


Figure I.12 Comparaison entre le résultat de la simulation et les données de l'expérience [8].

En addition, comparé les performances du BHE dans différents modes de fonctionnement, observé les changements dans la répartition de la température du sous-sol avant et après les vacances d'hiver et analysé les performances à long terme du BHE, leurs résultats ont confirmé qu'il est préférable pour l'extraction de chaleur de maintenir une température de fluide d'entrée inférieure au trou de forage. Par conséquent, il est proposé d'appliquer un réservoir de stockage à changement de phase dans les systèmes de chauffage urbain géothermique Kyrakis et al [10] comme il est montré dans la figure I.13.

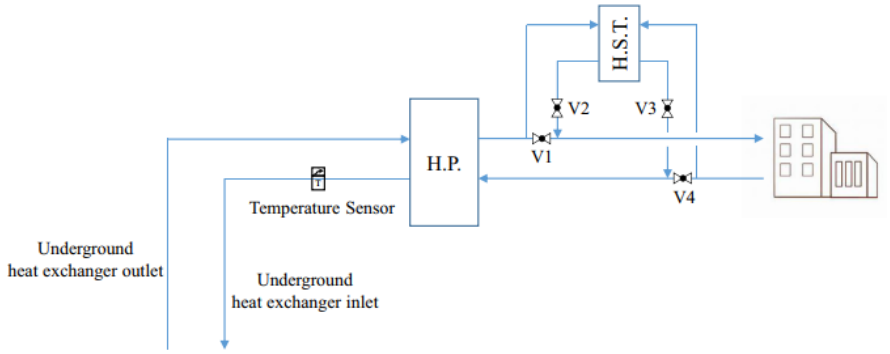


Figure I.13 Système de chauffage urbain géothermique (H.S.T. = Hot Storage Tank, H.P. = Heat Pump) [8].

Et en comparaison des quatre stratégies de fonctionnement ils ont trouvé que le "mode 12+12" est très approprié pour les bâtiments tels que les écoles et les immeubles de bureaux où la charge thermique change régulièrement au fil du temps.De plus, ils ont noté aussi que Les extractions de chaleur annuelles pour les différents modes de fonctionnement sont similaires.Par conséquent, ils ont considéré que différents modes de fonctionnement ne produisent presque que la même chaleur dans différentes périodes de temps.En outre, l'abaissement de la température d'entrée a un effet positif sur l'extraction de chaleur annuelle, l'extraction de chaleur au 90èmejour et la puissance d'extraction de chaleur (figure I.14).

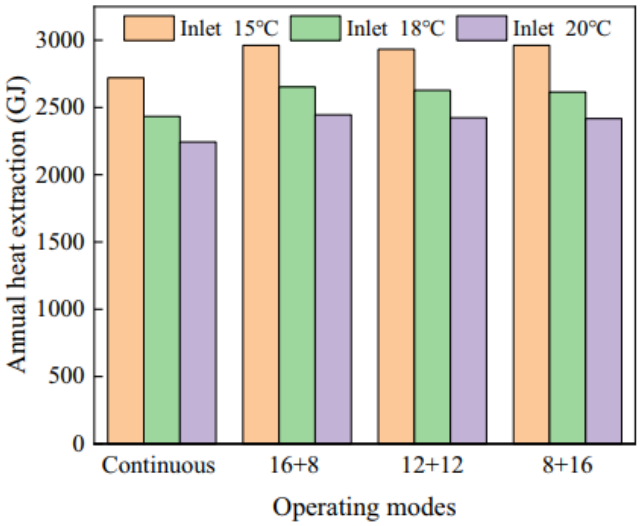


Figure I.14 Extraction de chaleur au 90ème jour de chaque mode de fonctionnement [8].

D’autre part, La répartition de la température des formations rocheuses plus profondes estdétériorée plus sérieusement pendant le fonctionnement, de sorte que sa température est plus difficile à récupérer (figure I.15).

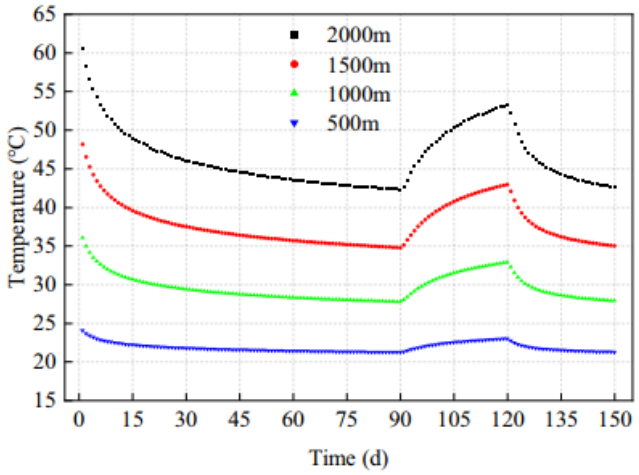


Figure I.15 Changement de température de la formation rocheuse à 1 m du BHE [8].

Une étude établi par Li et al [11],analyse plus en détail les caractéristiques de distribution de la température du fluide et du sol du système DBHE, discute de la récupération thermique du sol environnant et élucide le degré d'influence de différents paramètres sur le système (figure I.16).

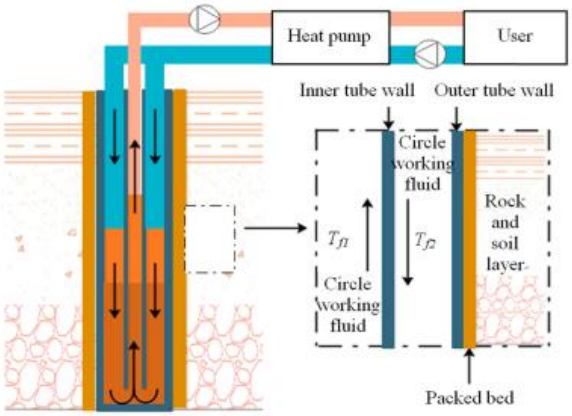


Figure I.16 Schéma de principe d'un échangeur de chaleur coaxial à forage profond [11].

Le modèle coaxial DBHE est en bon accord avec les résultats réels des tests d'ingénierie (table I.1).

Diameter extérieur du tuyau (mm)	Débit de circulation (m^3/h)	Puissance d'échange de chaleur au mètre linéaire (W/m)	Matériaux de remblai (W/m.°C)
1 244.5x10.3;219.1x10.16; 193.7x8.33; 177.8x9.19; 168.3x8.94	42	100	1.5
2 219.1x10.16	14; 21; 28; 35; 42	100	1.5

De plus, le système DBHE a une influence limitée sur les couches de roche et de sol environnantes, et vérifie que le système d'échangeur de chaleur a une stabilité adéquate. En addition, il est recommandé d'isoler les tuyaux intérieurs pour réduire la consommation de la pompe et améliorer les performances thermiques et économiques du système (figure I.17).

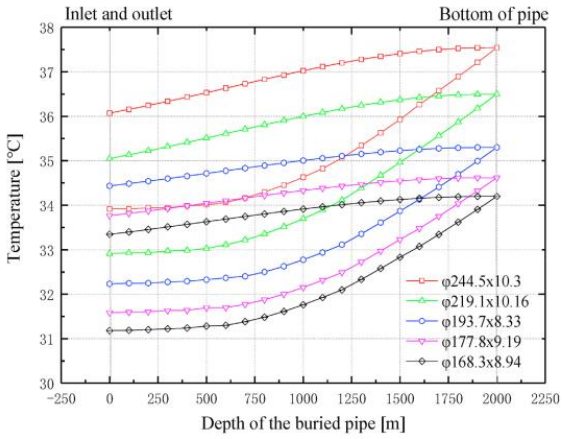


Figure I.17 Distributions de température du fluide sous différents diamètres extérieurs de conduit [11].

Et enfin,Pour garantir que la température d'entrée du système DBHE ne descende pas en dessous de 5 C pendant l'extraction de chaleur, la puissance d'échange de chaleur du mètre linéaire ne doit pas être supérieure à 150 W/m (figure I.18).

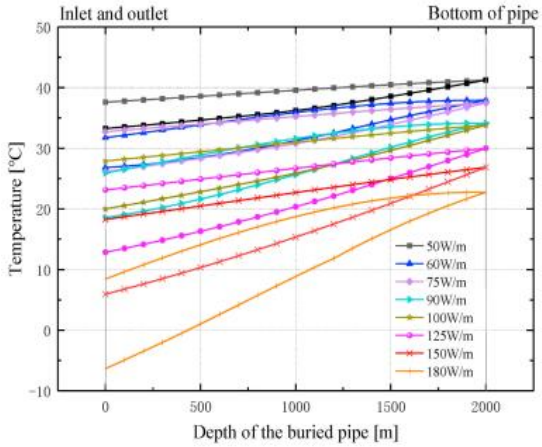
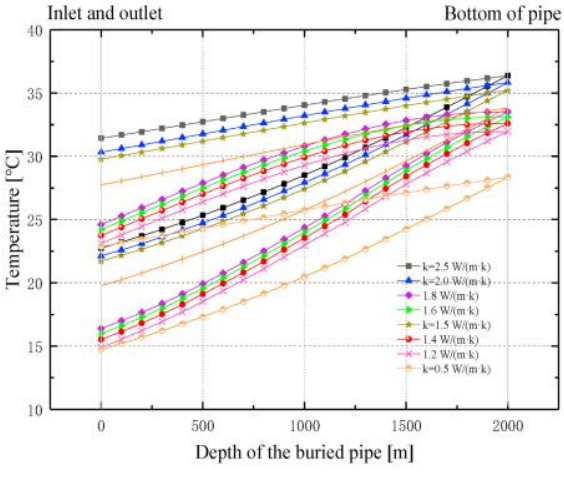


Figure I.18Répartition des températures du fluide sous différentes puissances d'échange de mètre linéaire [11].

Alors que les conductivités thermiques supérieures à 1,5 W/(m.°C) ont un effet mineur sur la distribution de température du fluide. Par conséquent, il est recommandé de choisir un matériau de remblai avec une conductivité thermique appropriée dans l'ingénierie réelle (figure I.19).



j

Figure I.19Répartition de la température du fluide sous différents matériaux de remblai [11].

Hirvijoki et al [12] explorent les forages géothermiques coaxiaux intermédiaires à profonds pour le stockage saisonnier de la chaleur du quartier. Pour celà, ils ont étudié deux scénario,un pour maximiser le facteur de capacité du réseau de chauffage urbain et un autre pour utiliser l'énergie éolienne intermittente comme source de chaleur sur une base annuelle.Les résultats de la simulation de premier principe montrent qu'en coopération avec le forage, l'énergie

éolienne intermittente ainsi qu'un réseau de chauffage urbain fonctionnant à pleine capacité tout au long de l'année pourraient tous deux couvrir la demande de chaleur horaire avec une efficacité de stockage effective de 100 %, à condition que la profondeur du forage et la puissance nominale du système sont choisies proportionnellement (figure I.20).

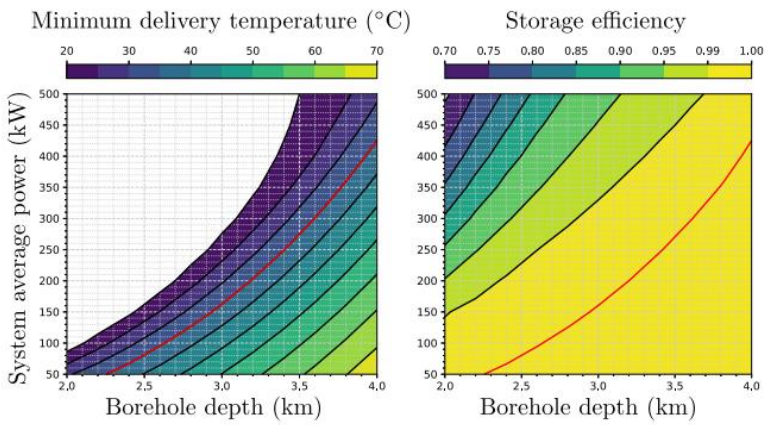


Figure I.20 Température minimale de refoulement du forage (à gauche) et efficacité globale de stockage (à droite) pendant un cycle de fonctionnement annuel en fonction de la profondeur du forage et de la puissance moyenne du système [12].

Huajun et al [13], ont rapporté un nouvel essai sur le terrain sur un CBHE (figure I.21) de 1800 m de profondeur dans le soulèvement sud de Daxing, à Pékin, une région géologique représentative du nord de la Chine. Sous le débit économique de 20–25 m^3/h, la puissance d'extraction de chaleur constante est de 237,24–256,54 kW.

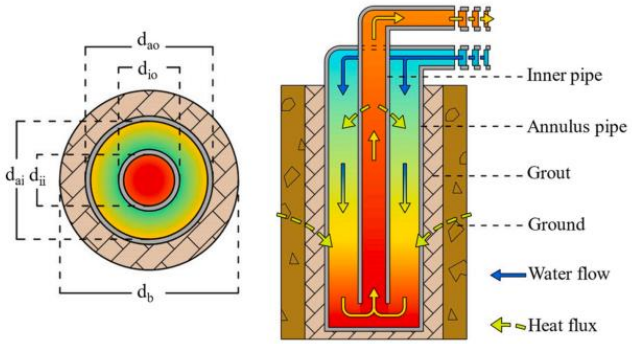


Figure I.21 Schéma de principe d'un CBHE profond typique [13].

Leurs résultats confirment que les CBHE profonds présentent des avantages plus évidents pour le chauffage des locaux des bâtiments ayant des besoins de chauffage intermittents (figure I.22).

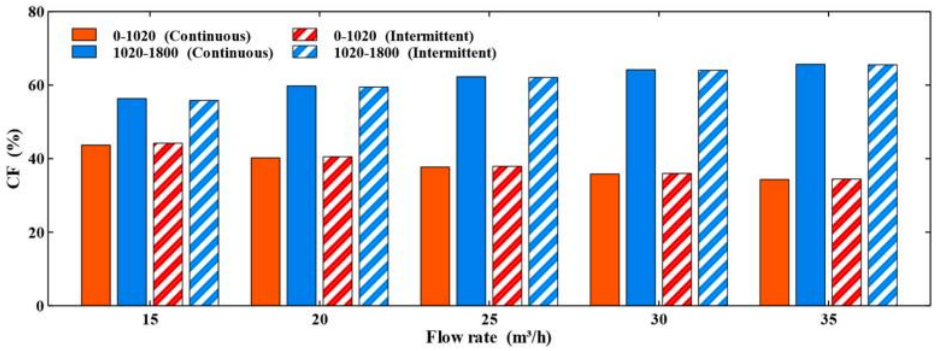


Figure I.22 Comparaisons CF de la couche de sol de 0 à 1020 m et de 1020 à 1800 m sous différents débits [13].

Brown et al [14]ont présenté une étude de modélisation qui met en évidence le potentiel d'exploitation des DBHE à double usage pour le stockage d'énergie thermique et l'extraction de chaleur (figure I.23).

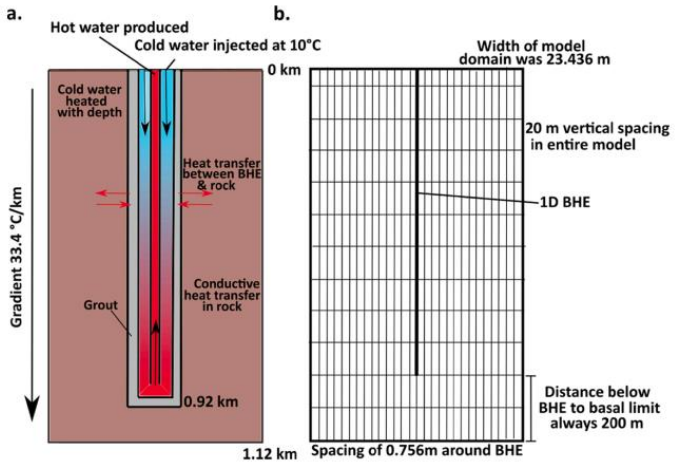


Figure I.23(a) Schéma du DBHE coaxial (avec sens d'écoulement normal - échangeur de chaleur CXA), et (b) le domaine nodal discrétisé (modifié d'après [15]).

Ils ont marqué Un écart de température de sortie inférieur à 0,3 % indique une bonne performance en comparaison. Par la suite, une analyse de sensibilité locale et globale a été réalisée pour comprendre les impacts d'une gamme de paramètres sur le fonctionnement d'un DBHE pour BTES. Où ils ont tiré que Ces paramètres doivent être pris en compte dans la planification et la conception universelles des systèmes BTES profonds.

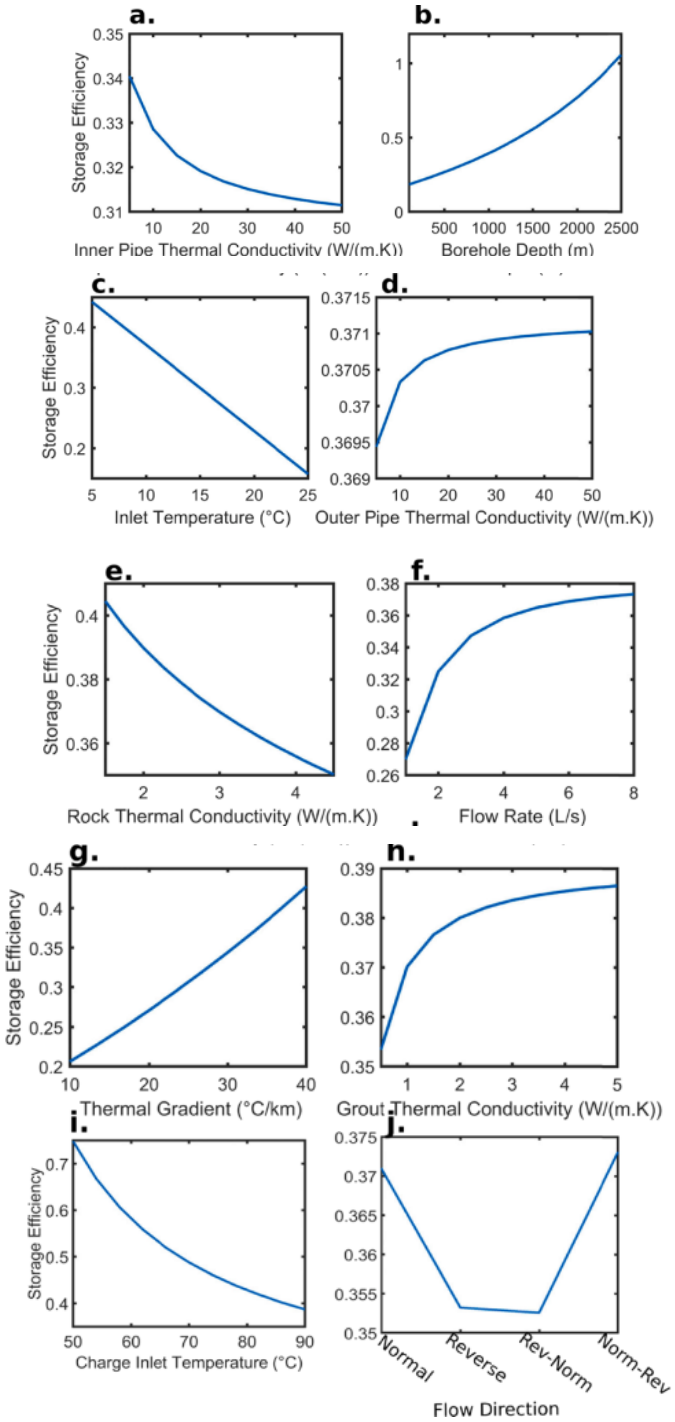


Figure I.24 Impact du paramétrage sur l'efficacité du stockage, y compris (a) la conductivité thermique du tuyau interne, (b) la profondeur du trou de forage, (c) la température d'entrée pendant l'extraction, (d) la conductivité thermique du tuyau externe, (e) la conductivité thermique de la roche, (f) le débit, (g) gradient géothermique, (h) conductivité thermique du coulis, (i) température d'entrée de charge et (j) sens d'écoulement du DBHE [14].

Par conséquent,Les paramètres opérationnels étaient plus influents sur les systèmes BTES profonds que les conductivités thermiques des matériaux.Cela a été mis en évidence par une

analyse utilisant les coefficients de corrélation de Spearman et de Pearson. De plus, La direction d'écoulement (c'est-à-dire la direction d'écoulement normale v inverse ou CXA v CXC) a eu peu d'impact sur les résultats du modèle.

I.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire les différents systèmes géothermiques et types de géothermies. Afin de fournir une analyse approfondie et d’en savoir plus sur cette étude, les principaux travaux antérieurs sont présentés

chapitre II :
Formulation mathématique

II.1 Introduction

Dans ce chapitre et à la suite d'une présentation brève du système d'équations générales régissant l'écoulement d'un fluide newtonien incompressible. On ne considère ici que les aspects relatifs aux caractéristiques dynamiques de l'écoulement laminaire avec transfert de chaleur et sans transfert de masse.

Dans son ensemble, la mécanique des fluides est gouvernée par trois équations fondamentales. Celles-ci sont l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation d'énergie [16].

II.2 Modélisation de l'écoulement des fluides

Dans un repère cartésien, les écoulements newtoniens, incompressibles et visqueux sont quantifies par les équations définies dans les paragraphes ci après.

II.2.1 L'équation de la continuité

Cette équation concerne le principe de conservation de la masse dans un élément. Elle exprime l'égalité de la variation de la masse d'élément et de la déférence entre la quantité de fluide qui entre et celle qui quitte pendant le même temps.

L'équation de continuité globale est donnée par:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho\vec{\nabla}\vec{V} = 0 \text{ Avec :} \left(\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V^p\nabla^p\right) \quad \textbf{(II.1)}$$

Dans un système de coordonnées cartésiennes, la vitesse $\vec{V}$= (u, v, w) et **ρ** c'est la densité

Donc l'équation devient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \textbf{(II.2)}$$

II.2.2 L'équation de quantité de mouvement

En mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux continus. Elles gouvernent par exemple les mouvements de l'air de l'atmosphère, les courants océaniques, l'écoulement de l'eau dans un tuyau, le mouvement d'air dans les

locaux et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de fluides. Elles sont nommées d'après deux physiciens du XIXe siècle, Claude Navier et George Stokes.

$$\boldsymbol{\rho\left\{\frac{\partial\vec{v}}{\partial t}+\vec{v}\nabla\vec{v}\right\}=-\nabla P+\mu\nabla^2\vec{v}+\rho\overrightarrow{g}} \qquad \textbf{(II.3)}$$

Ou :$\boldsymbol{\rho}$ la densité considéré variable avec le temps,$\boldsymbol{\mu}$ la viscosité dynamique aussi variable, P la pression et $\boldsymbol{\vec{g}}$ la gravité.

II.2.3 Équation de l'énergie

$$\boldsymbol{\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\vec{v}.\nabla T\right)=k\nabla^2 T+q} \qquad \textbf{(II.4)}$$

$$\boldsymbol{\Gamma=\frac{k}{\rho c}} \qquad \textbf{(II.5)}$$

T : température.

q : source volumique.

II.3 Modélisation thermique

Le transfert d'énergie se produit chaque fois qu'un gradient de température existe à l'intérieur d'un système, ou lorsque deux systèmes de températures différentes sont mis en contact. Le processus par lequel le transfert de l'énergie s'effectue est désigné par le terme générale de 'transmission de la chaleur' la grandeur transférée appelée chaleur, ne peut être ni mesurée ni observée directement, mais ses effets donnent lieu à des observations et des mesures. L'écoulement de la chaleur comme la production de travail phénomène qui implique la variation de l'énergie interne.

II.3.1 Différentes modes de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur peut être défini comme la transmission de l'énergie d'une région à une autre sous l'influence d'une différence de température. Cet écoulement de chaleur est régi non seulement par une relation unique, mais plutôt par une combinaison de différentes lois physiques indépendantes. Les ouvrages traitant du transfert de chaleur introduisant généralement trois modes de transmission de chaleur :

- La conduction
- Le rayonnement
- La convection

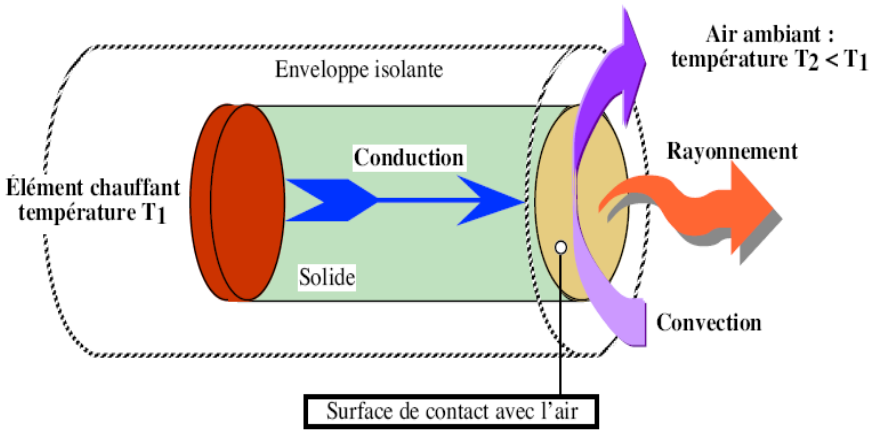


Figure II.1 Différent mode de transfertthermique, [17].

II.3.1.1 Transfert de chaleur par conduction

La conduction est définie comme étant le mode de transfert de chaleur provoqué par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux. L'effe macroscopique observable est une égalisation des températures du système. Ce pend antis certaines zones sont maintenues à température constante par apport de chaleur (réservoir de chaleur) ou évacuation de chaleur (puits de chaleur), ils' établit un transfert continu de la chaleur de la région chaude vers la région froide.

- **Cas des gaz**

En un point M(x, y, z) du volume d'un gaz, la température T(x, y, z) est associée à l'énergie des molécules du gaz se trouvant à proximité de ce point. Les molécules d'un gaz sont animées d'un mouvement de translation aléatoire, d'un mouvement de vibration et de rotation interne. L'ensemble de ces mouvements forme le phénomène d'agitation thermique, au queles t'associée une énergie proportionnelle à la température. Lors des collisions, les molécules voisines interagissent entre elles et s'échangent de l'énergie des molécules les plus énergétiquesvers les molécules les moins énergétiques. Il s'effectue alors un transfert de chaleur. On parle de diffusion d'énergie.

- **Cas des liquides**

L'origine du transfert de chaleur est identique à celui des gaz. Néanmoins, les molécules sont plus proches et donc, les interactions sont plus fortes et fréquentes.

- **Cas des solides**

Dans ce cas, la conduction est attribuée à un transfert d'énergie sous la forme de vibrations du réseau cristallin, [17].

Loi de Fourier

Fourier apparente la conduction de chaleur à l'écoulement d'un fluide qui a lieu des régions chaudes vers les régions froides et dont les seules manifestations dans la matière se traduisent par des variations de températures (effet macroscopique). Les dilatations des dispositifs seront négligées.

Considérons un milieu cylindrique homogène de section S et de longueur L (fig.II. 2), les deux faces du cylindre sont maintenues respectivement à la température T2 (source chaude) et T1. (Source froide). Il se produit un transfert d'énergieorienté de la source chaud envers la source froide.

Le milieu étant homogène, en régime permanent, la température se répartit de manière uniforme, [17].

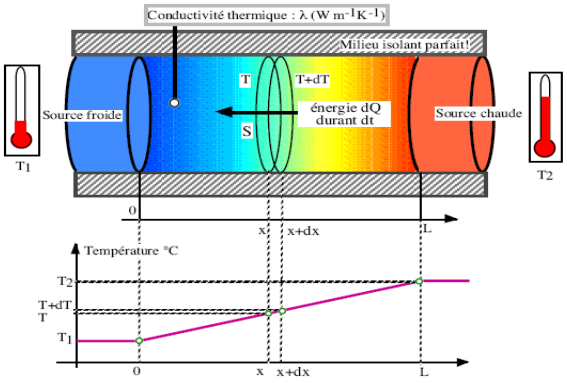


Figure II.2 Conductivitéthermique, **[17].**

En régime permanent, la loi de Fourier exprime la quantité de chaleurélémentairedQ qui traverse en x une surface S d'épaisseur dxdurant le temps dt

$$\boldsymbol{dQ = -\lambda A \frac{dT}{dx} dt} \qquad \textbf{(II.6)}$$

dQ : Énergie élémentaire en Joule

λ :Conductivité thermique du matériau en $W.m^{-1}.K^{-1}$

A : section en m^2

dt : temps élémentaire en s

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température en x en $K.m^{-1}$

II.3.1.2Transfert de chaleur par convection

Le transfert de chaleur par convection apparaît entre deux phases dont l'une au moins est mobile, en présence d'une différence de température. Le mouvement des phases peut être provoqué par une dégradation d'énergie mécanique, le transfert de chaleur est dit de convection forcée. Le mouvement peut être provoqué par l'existence même du transfert de chaleur par suite de l'apparition dans le milieu d'une différence de masse volumique, le transfert de chaleur est dit de convection naturelle ou libre, [17].

La convection naturelle apparaît spontanément, elle se produit dans un fluide au sein du quel existe un gradient de température. C'est le cas dans une pièce où l'air chaud produit au niveau du sol va monter au plafond tandis que l'air froid vade cendre. Le mouvement est dû au fait que l'air chaud est moins dense que l'air froid et monte donc sous l'effet d'une force d'Archimède. Autre exemple: mouvement de l'eau dans une casserole chauffée par une plaque électrique.

La convection forcée se produit quand le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure, par exemple une pompe ou un ventilateur (cas des radiateurs de voiture, des montages électroniques refroidis ou chauffés par ventilateur, etc.).

II.3.1.3 Transfert de chaleur par rayonnement

On entend par rayonnement thermique, l'émission d'énergie susceptible de se transmettre dans le vide, ils 'agit du rayonnement électromagnétique. Dans la pratique, le rayonnement s'effectue en présence d'un gaz, c'est la raison pour laquelle le rayonnement est rarement le seul type d'échange thermique mis enjeu: la convection et la conduction sont également présentes. Cependant aux haut est Températures, le rayonnement prend une importance prépondérante.

Le rayonnement des corps est dû à des transitions énergétiques par exemple des états de vibrations quantifiées de la chaîne d'atomes. Lors que l'état du système passe d'un niveau énergétique E au niveau E+dE, il y a émission d'un photon de fréquenceνtel que hν= d Eavech = 6.6 10-34 Js^{-1} la constante de Plank. Par exemple un rayonnement infrarouge ayant une longueur d'onde de 1μm correspond à une fréquenceν= c/λ= 3.1014 Hz et possède une énergie de dE = hν= 1.9810^{-19} J soit 1.23 eV.

Si un corps rayonne, il émet donc de l'énergie et sa température doit baisser. Cependant dans la pratique un corps n'est jamais isolé. Il est en équilibre avec le milieu qui l'entoure et par conséquent il reçoit lui-même de l'énergie et sa température atteint un équilibre. Le rayonnement émis est alors une caractéristique de cette température. C'est par exemple le cas de la Terre et du soleil. Le soleil réchauffe la terre par rayonnement (λ = 400 nm)et la terre remet un rayonnement de manière à assurer une température de l'ordre de 300K.

On peut exprimer le phénomène global du rayonnement de la façon suivante. Considérons en figure II.3 un mur de surface S dont les deux faces sont respectivement maintenues aux températures T_1 et T_s. ($T_1 > T_s$). Ce mur est donc soumis à un phénomène de conduction. On suppose que seule la surface située à droite échange de la chaleur par rayonnement avec le milieu ambiant à la température T_a, [17].

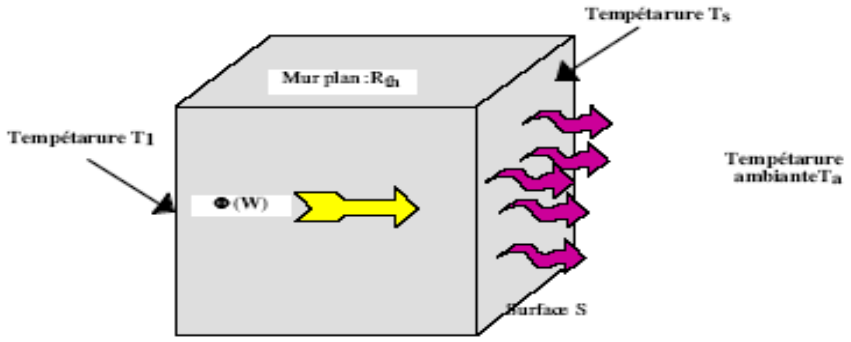


Figure II.3 Le transfert thermique par rayonnement,[17].

D'après la loi de Stéphan, le flux de chaleur échangé entre la surface S et le milieu ambiant peut S'écrire :

$$\boldsymbol{\varphi(W) = \varepsilon.\sigma.A\left(T_s^{\,4} - T_a^{\,4}\right)} \qquad \textbf{(II.7)}$$

$\boldsymbol{\sigma}$: constante de Stephan Boltzmann 5,67 x 10^{-8} W.m^{-2}. K^{-4}

A: surface d'échange (m^2)

$\boldsymbol{\varepsilon}$: coefficient d'émission de la surface (ε= 1 pour un corps noir, ε<<1 corps brillant)

T_s: température de surface du corps

T_a: température ambiante.

Les conditions aux limites

Les conditions aux limites (CL) peuvent avoir plusieurs formes. Elles traduisent les transferts entre les différentes parties du corps et son milieu environnant. Useulement, on distingue quatre types de conditions:

II.3.2 Condition de Dirichlet

Qui fixent la température$\boldsymbol{Ts}$ à la surface des corps (ou sur une partie de la surface) à chaque instant:

$$\boldsymbol{T_s = T(x_s, y_s, z_s)}$$

Ou $\boldsymbol{x_s, y_s, z_s}$décrivent la surface.

Ce type de conditions facilite beaucoup les calculs. Cependant, elles sont assez éloignées de la réalité physique car il est très difficile d'imposé une température sur une surface. Ce cin'est possible que dans le cas d'un contact parfait avec un autre corps isotherme à température maintenue constant. On utilise quand même ce type de CL pour la conduction dans un corps en contact avec un fluide très turbulent, [16].

II.3.3 Condition de Neumann

Qui spécifient la connaissance du flux surfacique dans chaque point de la surface du corps étudié et à chaque instant :

$$\boldsymbol{\varphi_s = \mathrm{Q}(x_s, y_s, z_s, \mathrm{t})}$$

Dans le cas le plus simple du régime stationnaire, le flux surfacique reste constant et donc :$\boldsymbol{\varphi_s}$=$\boldsymbol{Q_s}$=cst

La condition de ce type permet de tenir compte d'un flux surfacique absorbé par rayonnement à la surface d'un corps (par exemple les objets métalliques chauffés à de haut est températures dans des fours, le rayonnement solaire absorbé par des corps solides), [16].

II.3.4 Condition de Robin-Fourier

Ces conditions donnent la température environnante du corps T_e et la loi qui décrit le transfert thermique entre le corps et sont environnement. Ce type de transfert qui a lieu à la surface du corps est très complexe, étant donné le grand nombre de variables qui sont

impliquées. La loi de newton établit la relation entre la densité de flux thermique transféré à la surface du corps, de température T_c, vers son milieu environnant de température T_e(T_e<T_c) :

$$\boldsymbol{\varphi = h\,(T_c - T_e)} \qquad [W/m^2]$$

Où **h** est un facteur de proportionnalité appelé coefficient de transfert thermique[5].

II.4 Calcul Propriétés thermo-physiques des nano fluides

II.4.1 La fraction volumique (φ)

Le rapport entre le volume des nano particules et le volume global des nano fluides est appelé fraction volumique. Ce paramètre est crucial pour un nanofluide puisqu'il apparaît dans toutes les relations qui servent à calculer les autres propriétés. La fraction volumique est donnée par la relation suivante : [18] :

$$\boldsymbol{\varphi = \frac{V_S}{V_{Total}}} \qquad \textbf{(II.8)}$$

II.4.2 Conductivité thermique des nanofluides et ses modèles (K_{nf})

Il est généralement connu que les formules proposées par Maxwell et Hamilton-Crosser ne fournissent qu'une première estimation de la conductivité thermique des nanofluides. Il existe un certain nombre de corrélations semi-empiriques qui peuvent être utilisées pour calculer la conductivité thermique de divers nanofluides qui sont basées sur des résultats expérimentaux :[19] :

$\boldsymbol{\frac{k_{nf}}{k_f} = -13\varphi^2 + 6.3\varphi + 1}$Pour le nanofluide (Al2O3 + eau) **(II.9)**

$\boldsymbol{\frac{k_{nf}}{k_f} = 11.6\varphi^2 + 9.6\varphi + 1}$Pour le nanofluide (Cu + eau) **(II.10)**

II.4.3 Viscosité dynamique

La dispersion des nanoparticules dans une liquide a un effet sur la viscosité dynamique, qui peut être calculée à partir de la viscosité dynamique du fluide de base et la fraction volumique du nanofluide.

II.4.3.1 Modèle de Pack et Cho [21]

$$\mu_{nf} = \mu_f(533.9\varphi 2 + 39.11\varphi + 1) \quad \textbf{(II.11)}$$

II.4.3.2Modèle d'Einstein (1906)

La viscosité effective des nanofluides augmente en augmentant la concentration des particules et diminue avec une augmentation de température. Le modèle d'Einstein est exprimé par la relation suivante [20]

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = (1 + 2.5\varphi) \quad \textbf{(II.12)}$$

II.4.4 Masse volumique

La définition de la densité d'un nano-fluide $\boldsymbol{\rho_{nf}}$supposée parfaitement et homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide), est déterminée en fonction de la fraction volumique φ à une température de référence donnée mélange. A partir de cette définition, on peut exprimer ρnf comme suit : [18]:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_P \quad \textbf{(II.13)}$$

II.4.5 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique des nano-fluides est rarement étudiée, surtout en utilisant des méthodes expérimentales. La chaleur spécifique ou la capacité thermique massique, également connue sous le nom de Cp (J/kg.K), est la quantité d'énergie apportée par échange thermique pour élever la température de l'unité de masse d'une substance pendant la transformation de 29 degrés Kelvin. Selon la plupart des auteurs, l'une des deux relations suivantes exprime la chaleur spécifique d'un nano-fluide

II.5.5.1 Modelé de Pak et Cho[18]

$$(CP)nf = (1 - \varphi)(Cp)f + \varphi(CP)p \quad \textbf{(II.14)}$$

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, On a présenté les équations mathématiques qui gouvernent l'écoulement laminaire d'un fluide incompressible en régime transitoire et les différents modes de transfert thermique qui influe sur un échangeur de chaleur ainsi que les corrélations de calcul des propriétés thermo-physique des nano fluides.

chapitre III :
Rrésolution numérique

III.1 Introduction

Depuis de nombreuses années, les techniques de simulation connaissent un développement considérable. Les mises au point expérimentales, longues et coûteuses sont progressivement remplacées par des études dans lesquelles les outils de simulation prennent une place de plus en plus importante. Les impératifs industriels de rapidité et de limitation des coûts sont pour l'essentiel responsables de cette évolution. Les approches actuelles concernent l'ensemble des domaines et en particulier la prise en compte des phénomènes dynamique et thermiques.

III.2 Les méthodes numérique

Pour passer d'un problème exact continu régit par une EDP au problème approché discret, il existe trois grandes familles des méthodes, [22]

- La méthode des différences finies.
- La méthode des éléments finis.
- La méthode des volumes finis.

III.2.1 Méthode des différences finies

Consiste en une discrétisation des opérateurs différentiels sur une grille de pas d'espace fixe à l'aide de développements de Taylor tronqués. Soit par exemple l'équation aux dérivées partielles [22]

$$\boldsymbol{\partial_t u + \alpha \partial_x u = 0}, \quad \boldsymbol{\alpha} > 0 \qquad \textbf{(III.1)}$$

Un schéma aux différences finies possibles est

$$\frac{\boldsymbol{u_j^{n+1} - u_j^n}}{\boldsymbol{\Delta t}} + \boldsymbol{\alpha} \frac{\boldsymbol{u_j^n - u_{j-1}^n}}{\boldsymbol{\Delta x}} = \boldsymbol{0} \qquad \textbf{(III.2)}$$

Tableau III.1 Avantage et inconvénient des MDF

Avantages	Inconvénients
Très simple à écrire Peu coûteux pour le calcul	Géométrie du domaine de calcul est limitée Difficile d'envisager Considérez les conditions aux limites liées aux dérivées ou aux gradients d'inconnues.

III.2.2 Méthode des volumes finis

Est la méthode de choix pour les équations de conservation non linéaires. Voilà quelquespropriétés. Soit par exemple le système de lois de conservation en dimension deux d'espace

$$\boldsymbol{\partial_t U + \partial_x f(U) + \partial_y g(u) = 0} \qquad \textbf{(III.3)}$$

III.2.3 Méthode des éléments finis

Elle s'appuie sur une formulation variation elle de l'équation aux dérivées partielles. Il n'existe pas de formulation variation elle pour toute équation aux dérivées partielles. Les méthodes d'Eléments finis ne sont pas bien adaptées à la résolution numérique d'équations non linéaires.

III.3 Résolution des équations par éléments finis

III.3.1 Méthodes des éléments finis

La méthode des éléments finis est fondée sur deux idées principales : une méthode d'interpolation et une méthode vibrationnelle. Etant donné un domaine continu et une fonction u solutions de L(u) = 0.

a) La méthode d'interpolation fournira une fonction proche de u construite à partir d'un nombre fini de réels
b) La méthode vibrationnelle remplacera L(u) = 0 par un nombre fini d'équations. Si l'on suppose la fonction approchée connue en un certain nombre de points de l'élément, elle est évaluée en n'importe quel point de l'élément par interpolation.

La restriction de la fonction approchée à un élément K (quadratique) du maillage, notée $\emptyset_h^k$, est de la forme **[25]**:

$$\boldsymbol{\emptyset_h^k(x,y) = \sum_{i=1}^{Nk} \emptyset_i N_i\,(x,y)} \qquad \textbf{(III.4)}$$

Où :

$\emptyset_i$La valeur de la fonction approchée$\emptyset_h$au point $x_i$de coordonnées (x_i, y_i),

N_i La fonction d'interpolation associée à x_i,

N_k Le nombre de fonctions utilisées pour l'élément K.
Les coefficients $\emptyset_i$de cette combinaison linéaire sont les inconnues ou degré de liberté du problème discret. Les fonctions d'interpolation sont les fonctions de base d'un espace vectoriel de dimension finie N_h dans lequel on cherche à priori la solution discrète $\emptyset_h$.

Afin de déterminer les inconnus du problème discret, une méthode de résidus pondérés est utilisée : l'erreur commise est minimisée en remplaçant dans les équations aux dérivées partielles la fonction exacte par la fonction approchée. Pour cela, on projette l'erreur sur un espace de fonction $\emptyset_h$à préciser.

La méthode de Galerkin est un cas particulier de la méthode des résidus pondérés, l'espace de projection est le même que l'espace d'approximation de la solution du problème, autrement dit $\emptyset_h = N_h$.

III.3.2 Mise en œuvre de la méthode des éléments finis

III.3.2.1 Formulation variation elle forte

La formulation forte d'un problème aux conditions aux limites s'écrit alors comme suit :

Trouver u(x) *u(x)* espace des solutions $U_S$telles que **[23,27]** :

$$\mathcal{L}(\mathbf{u}) - \mathcal{F} = \mathbf{0} \forall \mathbf{x} \in \Omega \mathbf{B}(\mathbf{u}) = \mathbf{u_0} \forall \mathbf{x} \in \Gamma_{\mathbf{u0}} \qquad \textbf{(III.5)}$$

On note que l'espace Us dans lequel nous recherchons la fonction u, doit être défini judicieusement

III.3.2.2 Formulation variation elle faible

La formulation variation elle faible peut être obtenue par les étapes suivantes :

1. Approcher la solution u, partout dans le domaine Ω, par $\tilde{u}$tel que **[25,28]** :

$$\tilde{\mathbf{u}} = \sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{n}} \mathbf{N_i} \tilde{\mathbf{u}}_\mathbf{i} \qquad \textbf{(III.6)}$$

Où $N_i = N_i$ (x, y) désignent les fonctions de forme et$\tilde{u}_i$des valeurs nodales indéterminées.

2. Introduire (III.6) dans (III.5) il en résulte une erreur ou un résidu ε tel que :

$$\boldsymbol{\varepsilon = \mathcal{L}(\tilde{u}) - \mathcal{F} \neq 0} \qquad \textbf{(III.7)}$$

3. Obtenir une valeur nulle de ε en introduisant une fonction de point arbitraire W tel que

$$\boldsymbol{\int_{\Omega} W_k(\mathcal{L}(\tilde{u}) - \mathcal{F})d\Omega = 0, k = 1, 2, .. N} \qquad \textbf{(III.8)}$$

Où N Nombre d'inconnues indépendants du système (III.5).

En formulation de Galerkine les fonctions tests sont assimilées aux fonctions de forme.

On pose

$$\boldsymbol{W_k = N_k \Longrightarrow \int_{\Omega} N_k . \mathcal{L}(\sum_{i=1}^{n} N_i \tilde{u}_i)d\Omega = 0} \qquad \textbf{(III.9)}$$

On dit que $u \in H_0^1(\Omega)$est une solution faible de (III.8) si :

$$\boldsymbol{\forall v \in H_0^1(\Omega): a(\tilde{u}, v) = \int_{\Omega} f\ v\ d\Omega} \qquad \textbf{(III.10)}$$

a($\tilde{u}, v$) : la forme bilinéaire associée à $\mathcal{L}$Soit Ω un ouvert borné de R^d et $\partial\Omega$ est régulier. On considère alors le problème :

$$\boldsymbol{Lu = 0\ sur \Omega\ et\ u = 0\ sur\ \partial\Omega} \qquad \textbf{(III.11)}$$

III.3.3 Forme générale des équations du système[22]:

Les équations du système sont écrites sous la forme généralisée suivante

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_{\emptyset}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x c_{\emptyset}\emptyset) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_y c_{\emptyset}\emptyset) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\emptyset\Gamma_{\emptyset}\frac{\partial\emptyset}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\emptyset}\frac{\partial\emptyset}{\partial y}\right) + S_{\emptyset} \qquad \textbf{(III .12)}$$

Ou:

∅:Variable généralisée

c∅:Coefficient d'advection transitoire.

Γ∅:Coefficient de diffusion.

Sø:Termes source.

Le tableau (III-9) regroupe les expressions des différents termes dans les différentes équations du système..

Tableau III.2 : Expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables **[22].**

Variable	Coefficient d'advection c_i	Diffusivité Γ_ϕ	Termes source S_i
V_X	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\sigma\nabla\left\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}\right\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}$
V_Y	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)-\sigma\nabla\left\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}\right\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}$
T	1	$\frac{k}{\rho c^e}$	$\frac{\varphi}{\rho c^e}$
ρ	1	0	0

III.4 Choix du maillage

La méthode des éléments finis consiste à découper l'espace en fonction d'un maillage.

Normalement, les gens optent pour un maillage carré ou triangulaire, mais ils peuvent également opter pour des maillages plus complexes. Il n'est pas obligatoire que le maillage soit régulier et on a tendance à resserrer le maillage près des endroits d'intérêt (tels que ceux où on pense que la solution va varier considérablement), mais il est important de s'assurer que les éléments sont faiblement distordus (il faut se rapprocher d'un polygone régulier). Plus le maillage est serré, plus la solution obtenue à l'aide de la méthode des éléments finis sera précise et proche de la solution vraie de l'équation aux dérivés partiels**.**

Même si une structure géométriquement complexe peut être créée avec des éléments tétraédriques, elle peut nécessiter de nombreux éléments et peut échouer en raison de la simulation des ressources informatiques. Même un volume de forme régulière, mais avec un ratio très grand, nécessite de nombreux éléments tétraédriques. Dans ce cas, les éléments en hexaédre ou en coin seraient les meilleurs choix. (Image III-1) Cette différence est illustrée par un objet avec un aspect ratio large. Il montre que si une densité de maillage similaire est maintenue sur la section transversale, le nombre d'éléments tétraédriques (a) est beaucoup plus grand que celui d'éléments hexaédriques (b).

III.4.1 Discrétisation:

La discrétisation de ces équations permet de convertir leurs équations aux dérivées partielles en équations algébriques, qui peuvent ensuite être résolues par des techniques numériques classiques. La dernière étape de la procédure de discrétisation par éléments consiste à écrire l'équation généralisée dans des matrices élémentaires après intégration [22].

$$\left(\left[A_e^{transient}\right] + \left[A_e^{advection}\right] + \left[A_e^{diffusion}\right]\right)\{\emptyset_e\} = \left\{S_e^{\emptyset}\right\} \quad \textbf{(III-13)}$$

Pour les intégrales élémentaire, La méthode Galerkin des résiduelspesés est employé.

III.5 Discrétisation de l'équation de chaleur par élément fini:

III.5.1 Bilan Thermique:

Equation De Chaleur

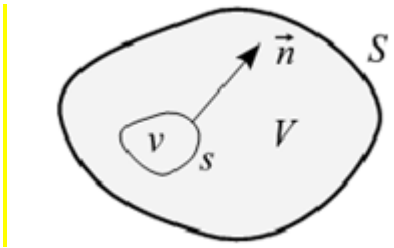


Figure III.1 :Bilan thermique Soit v une partie quel conque de V limitée par la surfaces

L'énergie thermique stockée dans le volume v est égale à la somme de l'énergie thermique produite par les sources volumétriques incluses dans V et de l'énergie thermique reçue en flux sur la surface S [24] :

$$\int \boldsymbol{\rho C p \frac{\partial T}{\partial t} dv} = \int \boldsymbol{q dv} + \int - \boldsymbol{\vec{u}(\overrightarrow{\lambda grad T}) ds} \quad \textbf{(III-14)}$$

Le domaine v étant arbitraire, on en déduit: en tout point du solide

$$\int \boldsymbol{\rho C p \dot{T} - div(\overrightarrow{grad T}) + q = 0} \quad \textbf{(III-15)}$$

Pour un matériau homogène et isotrope, l'équation(III-28)s'écrit dans le repère orthonormé {x, y}[24] :

$$\boldsymbol{\rho C p \dot{T} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + q} \quad \textbf{(III-16)}$$

Ou : $\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t}$

III.5.2 Forme discrétisée: éléments finis:

Dans la plupart des cas, il est impossible d'acquérir la solution analytique de l'équation (III-30). Cela nous incite à rechercher une solution qui peut être calculée grossièrement en utilisant l'approche deséléments finis. Le champ de température et les fonctions de test sont membres d'un même espace de dimensions finies dans cette approche, qui est un cas particulier de la méthode de Galerkin. Le domaine V est décomposé en sous-domaines Ve de forme géométrique simple (les éléments) reliés entre eux à des points liés nœuds. Cette opération est appelée maillage

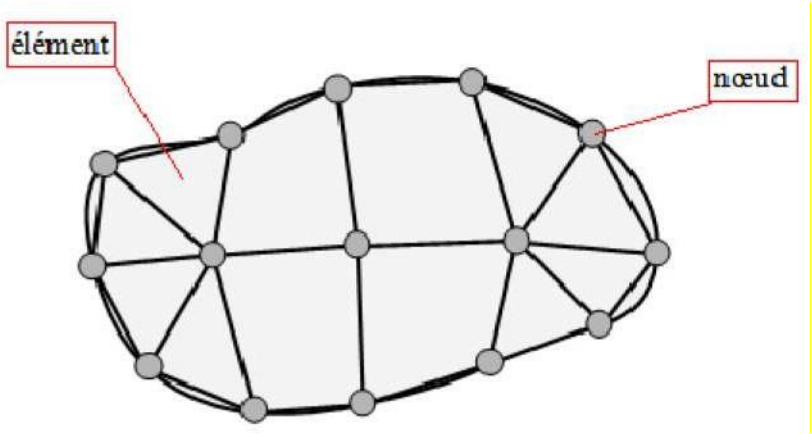


Figure III-2 : Domaine plan discrétisé en 12 élément relies entre eux par15 nœuds

III.5.2.1 Représentation élémentaire(ou locale) du champ de températures :

Le champ de températures T(x,y,t) dans l'élément(e)àpour expression[23].

$$T^e(x,y,T) = [N_1^e\,(x,y) \ldots . N_1^e(x,y) \ldots . N_n^e e(x,y)] \begin{Bmatrix} T_1^e\,(t) \\ T_1^e(t) \\ T_n^e(t) \end{Bmatrix} \qquad \textbf{(III-17)}$$

$$T^e(x;y,T) = [N_1^e(x,y)]\{T_{(t)}^e\}$$

Ou :

- -n^eestlenombredenœudsdel'élément.
- Les fonctions$N_i^e(x,y)$sontlesfonctionsd'interpolationélémentaires
- La matrice $N^e(x,y)$estlamatriced'interpolationélémentaire
- Le vecteur $T_{(t)}^e$regroupe les températures des nœuds de l'élément(e)

III.5.2.2 Représentation globale du champ de températures:

Le champ de températures T(x ,y ,t) a pour expression sur l'ensemble du domaine V

$$T\ (x,y,t) = [N_1(x,y) \dots . N_i(x,y) \dots . N_n e(x,y)] \begin{Bmatrix} T_1\ (t) \\ T_i(t) \\ T_n(t) \end{Bmatrix} \quad \textbf{(III-18)}$$

T(x ,y ,t)=[N(x ,y)]{T(t)}

Ou :

- $n$estlenombredenœudsdumaillage
- Les fonctions $N_i\ (x,y)$sont les fonctions d'interpolation(oufonctiondeforme).
- La matrice$N[(x,y)]$estlamatriced'interpolation.
- $\{T(t)\}$estlevecteurdestempératuresnodales.
- Les fonctions d'interpolation vérifient les relations :

$$N_i^e\left(x_{j,y_j}\right) = \delta_{ij} N_i\left(x_{j,y_j}\right) = \delta_{ij}; \forall i,j$$

Ou (X_i, y_j)sont les coordonnées d'unœud j

III.5.3 Discrétisation de la forme intégrale faible:

Del 'expression du champ de températures T sur le domaine: T=[N] {T}

Et {gradT}=[B]{T}avec[B]=[$\{B_1\}$ ... $\{B_i\}$ ... $\{B_n\}$]

Ou : $B_i$dépend du problème traité (spatial,plan, axisymétrique…)pour un problème spatial $\{B_i\}$S'écrit dans le repère orthonormé(x,y).

$$\{B_i\}=\begin{cases} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{cases}$$

T^*=[N]$\{T^*\} = \{T^*\}^T[N]^T et\ \{grad\ .T^*\}$=[B] $\{T^*\}$, $\{gradT^*\}^T = \{T^*\}^T[B]^T$

Emportant ces relations dans l'équation (III-28),il vient :

$\{T^*\}([C]\ \{\dot{T}\}+[k]\{T\}-\{F\})=0$ **(III.19)**

$[K] = \int_v [B]T\lambda[B]dv + \int_s h[N]^T\ [N]ds$ **(III.20)**

[C]: est la matrice de capacité thermique [j /c°]

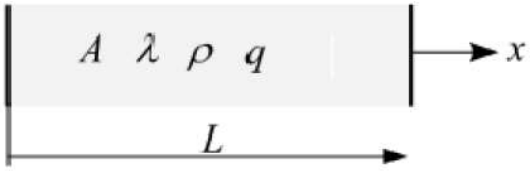
[K] : est la matrice de conductivité thermique [W/m°C]

{ F} : est le vecteur des flux nodaux [W]

{ T} : est le vecteur des températures nodales [C°]

III.5.4 Exemple de calcul élémentaire :

Elément a deux nœuds (problème a une dimension) Considérons un élément à deux nœuds de longueur L dont les caractéristiques A, , et q sont constants.



$$N_1^e = 1 - \frac{x}{L}$$

$$N_2^e = \frac{x}{L}$$

$$L = x_1 + x_2$$

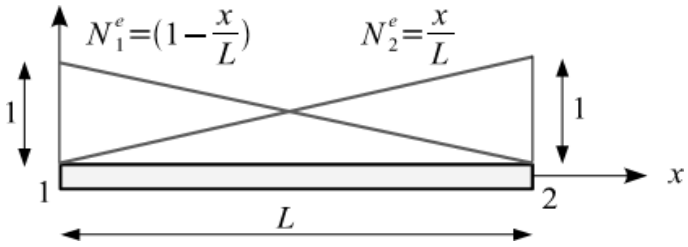


Figure III.3 :Elément a deux nœuds

Le champ de températures dans l'éléments 'écrit [24]:

$$T(X) = \left(1 - \frac{x}{L}\right)T_1 + \frac{x}{L}T_2 = \frac{1}{L}[L - XX]\begin{Bmatrix}T_1\\T_2\end{Bmatrix} = [N]\{T\}$$ **(III.21)**

OùT_1etT_2les températures noda les. On en déduit la matrice [B] :

$$[B] = \left[\frac{\partial N_1}{\partial x}\frac{\partial N_2}{\partial x}\right] = \frac{1}{L}[-1\ 1], [B]^T = \frac{1}{L}\begin{vmatrix}-1\\1\end{vmatrix} \quad \textbf{(III.22)}$$

La matrice de conductivité[k]:

$$[K] = \int [B]^T \lambda [B] = \int_0^L \lambda A [B]^T\,[B] dX = \frac{\lambda A}{L}\begin{vmatrix}1 & -1\\-1 & 1\end{vmatrix} \quad \textbf{(III.23)}$$

La densité de flux calculée avec la formule:

$$\varphi_x(x) = -\lambda\frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda[B]\{T\} = \frac{-\lambda}{L}(T_2 - T_1) \quad \textbf{(III.24)}$$

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait un aperçu sur les méthodes numérique utilisées pour le traitement des problèmes thermiques, on a fait aussi une discrétisation de l'équation de transport par la méthode des éléments finis pour la mettre sous la forme algébrique.

chapitre IV :
Résultats et discutions

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la simulation numériques d'étude de performance d'un échangeur de chaleur coaxial et en forme U.

la simulations numériques Les résultats faits à l'aide d'un logiciel, c'est le code ANSYS.

IV.2 Présentation d'ANSYS (APDL) :

Le code de calcul ANSYS est un programme Elément Finis permettant des structures tridimensionnelles dans les domaines suivants : thermiques, mécanique, statiques et dynamique linéaires et nom-linéaires, interaction fluide-structure, analyse à la fatigue…

Le code propose une libraire d'étalement pour modéliser correctement les structures et les différents effets recherchés (poutres, coques, solide, fluide, matrices de raideur, de masse, d'amortissement, etc.).

Les points forts des outils ANSYS sont :

- Une interface WORKBENCH intuitive et très facile à prendre en main.
- L'associativité avec tous les outils CAO 3D disponibles sur le marché.
- La possibilité de communiquer avec tous les logicuels CAO du marché : en format natif avec Catia V4 et V5, Solid Edge, NX-Unigraphics, Pro/Engineer, SolidWorks, Autodesk Inventor et Mechanical Desktop, et par l'intermédiaire de passerelles Acis et Parasolid intégrées avec tous les autres produits.
- Des notes de calcules automatiques.
- Des meilleurs robustes.
- Des outils de convergence automatique.
- Une gestion automatique des assemblages et des contacts.
- La possibilité d'avance progressivement dans la complexité des phénomènes traités.

Les outilles de simulation se présentent sou plusieurs niveaux :

ANSYS DesignSpace est un logiciel d'aide à la conception pour les bureaux d'études adapté aux environnements Windows standards. Il utilise la méthode des éléments finis pour analyser rapidement le comportement mécanique,

- thermique et vibratoire de vos conceptions. Il permet de traiter les assemblages et donc d'attribuer un type de contact entre les différentes pièces les constituants.
- ANSYS Professional permet des analyses plus complexes : réponses spectrales et harmoniques, calculs transitoires : mécaniques et thermiques. Il comprend des outils de contrôle avancés tels que les options de contacts surfaces/surfaces, surfaces/lignes, les combinaisons de solution, le post traitement de zones de contacts.
- ANSYS Structural et Mechanical permettent d'accéder à tous les types de non linéaire : matériaux, grandes déformations et grands déplacements. Ils sont dédiés à des utilisateurs confirmés qui disposent de connaissances théoriques sur les éléments finis.

Schéma de logiciel ANSYS :

Le logiciel ANSYS calcul par la méthode des éléments finis contient les étapes caractéristique ou blocs fonctionnels décrits sur la figure IV.1

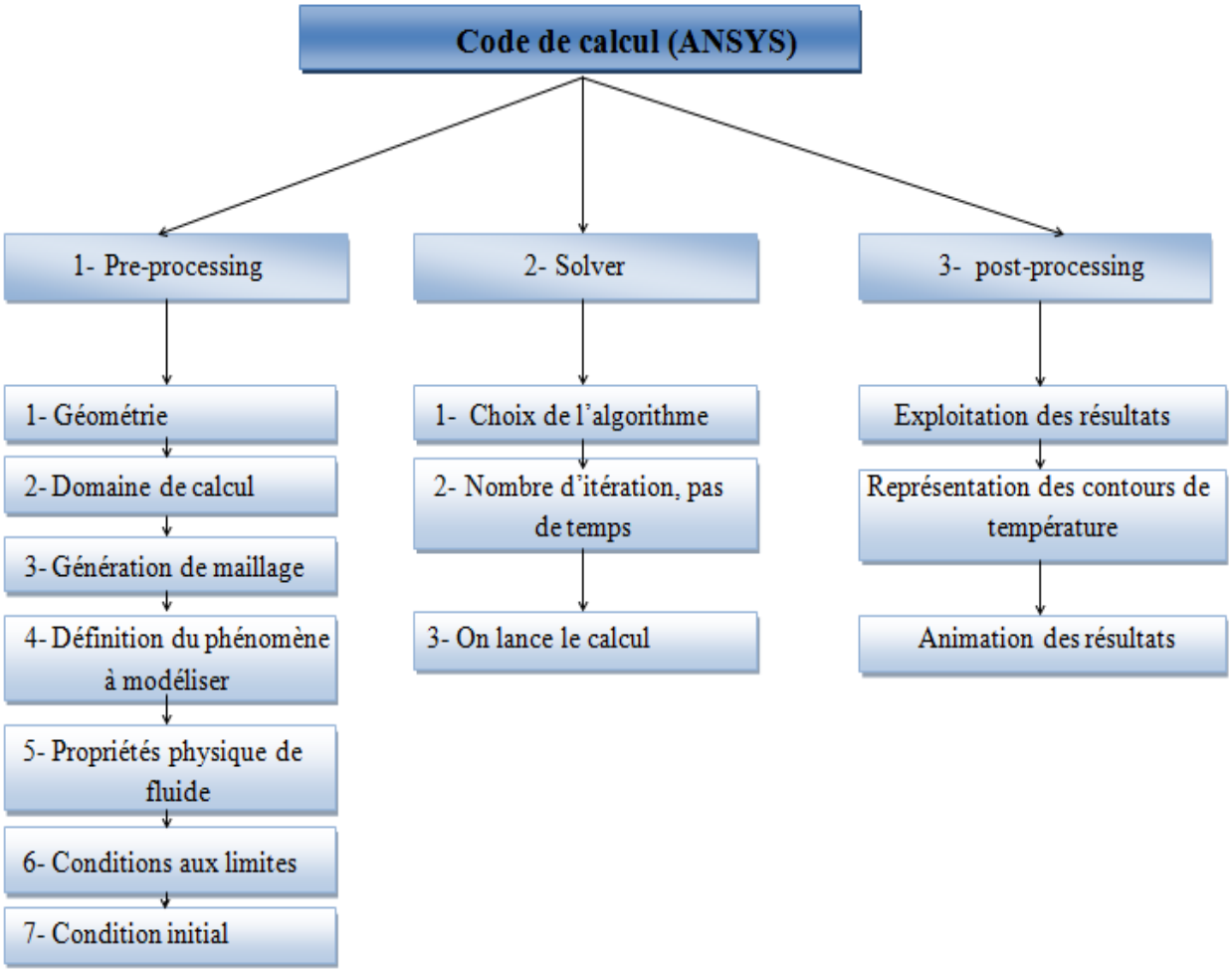


Figure IV.1 : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS

IV.3 Validation des modèles développés :

Le modèle de comparaison numérique a été développé en utilisant un modèle de source finie linéaire [30], un code numérique COMSOL et une autre solution analytique développée par Beier et al. qui donne une prédiction de la température du liquide en fonction de la profondeur, nous avons utilisé le logiciel Ansys apdl en mode transitoire avec un pas de temps de 0,1 s. sachant que nous avons simulé un échangeur coaxial d'une longueur de 1 mètre à cause de notre incapacité à simuler jusqu'à 200 mètres, nous avons aussi essayé de simuler 100 et 75 mètres et n'avons pas obtenu de résultats satisfaisants, du fait de notre faible puissance matériel informatique qui a été utilisé dans cette simulation , malgré cela nous avons obtenu de bons résultats dans la simulation à 1 mètre.

Après obtention des résultats sur un compteur et estimation de ces résultats sur 200 mètres, les résultats obtenus peuvent être considérés comme très satisfaisants.

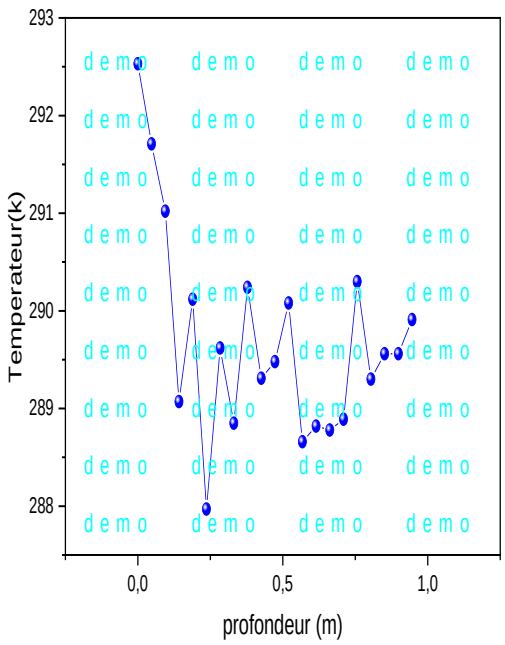


Figure IV.2: nos résultats obtenus à partir d'un mètre

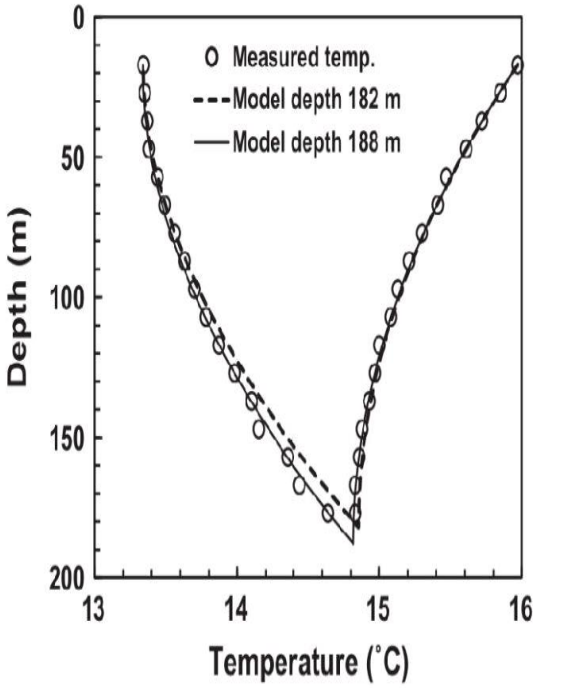


Figure IV.3 : les resultants obtenue par beier et al

Tableau.VI.1. Paramètres utilisés dans le cas de la vérification. [29]

Paramètre	Symbole	Valeur
Diamètre de forage	df	115 mm
Longueur de l'échangeur de chaleur actif	L	165–171 m
Diamètre extérieur du tuyau intérieur	deti	40 mm 2 2,4 mm
Épaisseur de la paroi intérieure	epit	114 mm

du tube		
Diamètre extérieur du tuyau extérieur	dete	
Épaisseur externe du tuyau	eet	2 0,4 mm
Conductivité thermique de la paroi intérieure et extérieure du tuyau	kpw	0,40 W/(K m)
Conductivité thermique du sol	ks	3,15 W/(K m)
Capacité calorifique volumétrique du sol	Cps	2,24 106 J/ (K m3)
Débit d'eau	qv	0,58 l/s
Densité de l'eau	ρ	999 kg/m3
Capacité calorifique volumétrique de l'eau	Cpe	
Conductivité thermique de l'eau	ke	4,19 106 J/ (K m3) 0,59 W/(K m)
Viscosité dynamique de l'eau	μPr	1.138 10 3 kg/ (m s)
Indice de Prandtl de l'eau		
Débit calorifique	Q	8.09
Température de surface du sol de référence	Tss	6380 W
Température moyenne du sol	Tms	281.9 K 281.4 K

IV.4 Étudier l'effet de les nano-fluide sur le transfert thermique dans l'échangeur de chaleur

Dans un premier temps, nous avons étudié un échangeur de chaleur axial avec de l'eau pure, puis nous avons ajouté deux différents nano-fluides(eau $+ Al_2O_3$), (eau+Cu) avec la même fraction afin d'améliorer le travail de l'échangeur.

Tableau.VI.2. les paramètres thermo-physiques des nano-fluide

Le nano-fluide	La fraction de particule	Chaleur spécifique Cp_{nf}	La densité ρ **(Kg / m^3)**	La viscosité dynamique μ **Kg / m.s**	Conductivité thermique k_{nf}

		(J/kg.K)			(W/m.K)
eau + Al_2O_3	0.0031	4077.7	1087.627	0.00302269	0.694607
Eau + Cu	0.0031	4066.15	1237.927	0.001224425	0.76607

VI.5. l'amélioration de notre système

Dans cette partie on essai d'améliorer ce notre système , on propose d'ajouter des autres fluides caloporteurs pour le développement de l'efficacité de l'échangeur de chaleur

- **Echangeur de chaleur coaxial (1 mètre) :**

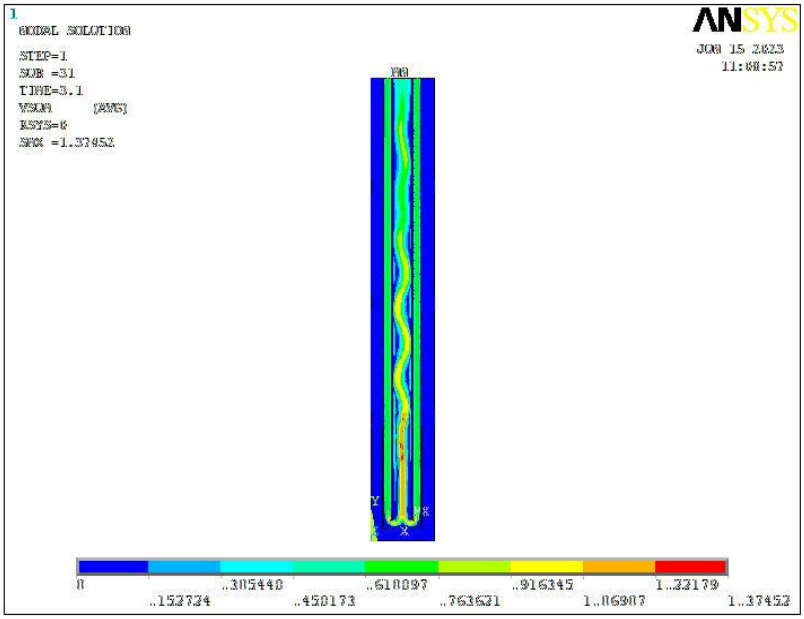


Figure IV.4: représente la circulation de fluide caloporteur dans l'échangeur de chaleur coaxial

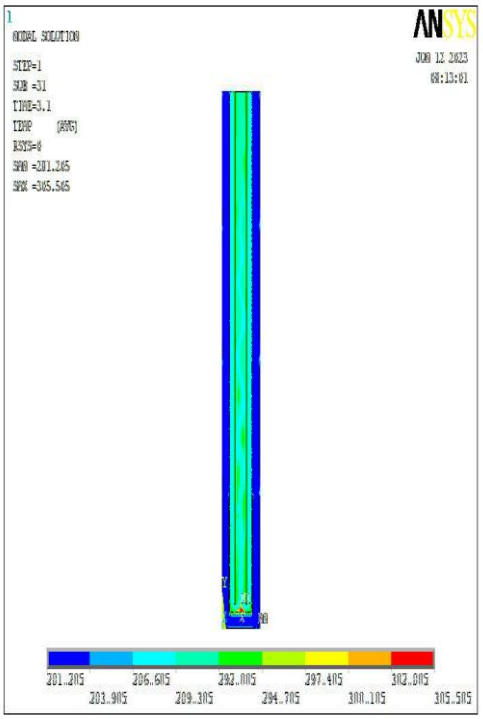


Figure IV.5: le champ de température de fluide caloporteur (eau pure

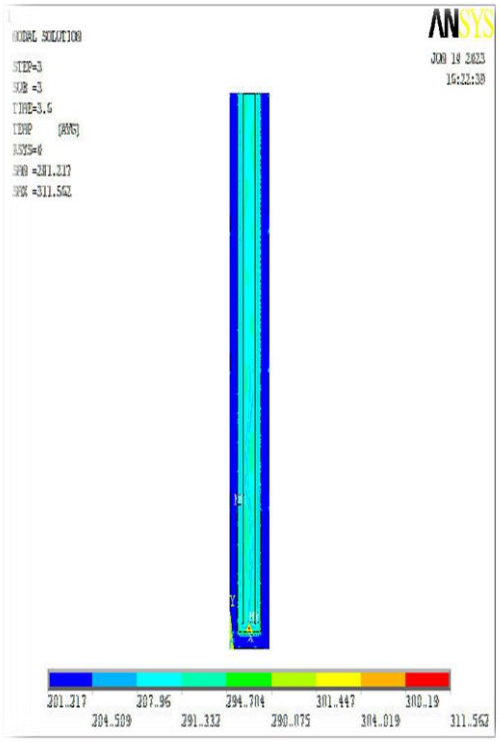


Figure IV.6 : le champ de température de nano-fluide (eau + Al_2O_3)

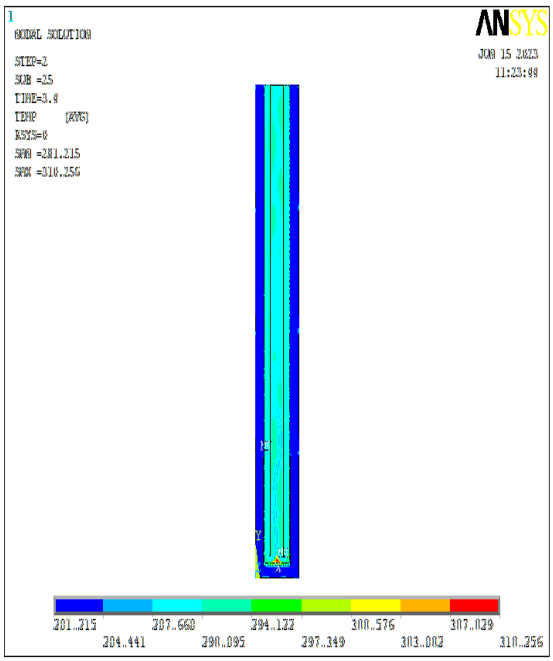


Figure IV. 7: le champ de température de nano-fluide (eau + Cu)

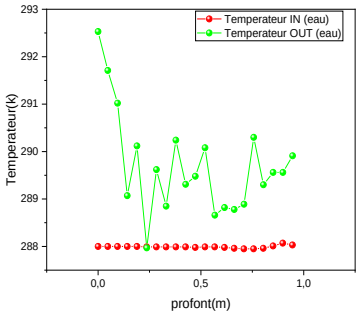


Figure IV.8 : changement de température de l'eau (eau pure) par rapport à la profondeur

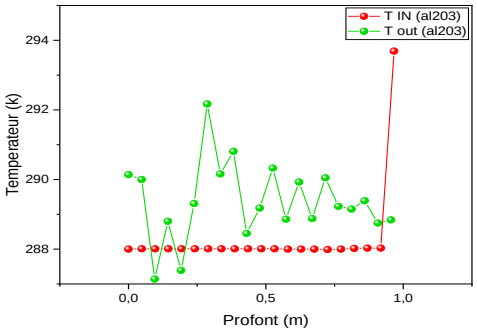


Figure IV.9 : changement de température de nano-fluide (eau+ Al_2O_3) par rapport à la profondeur

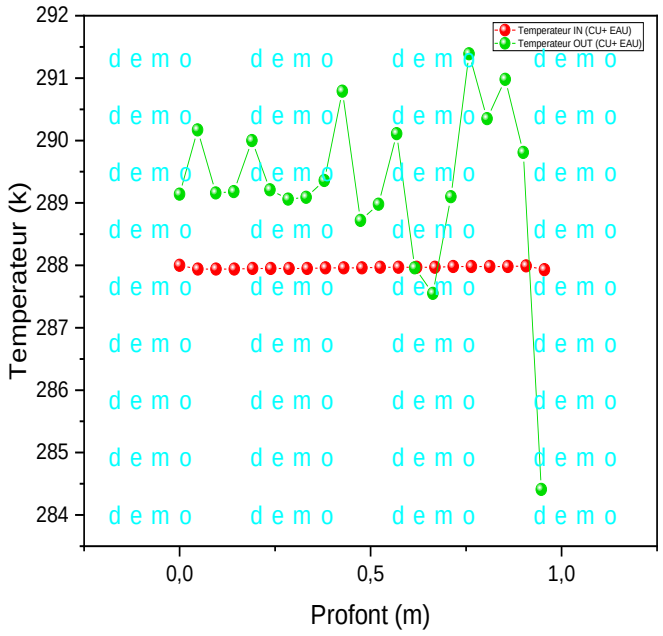


Figure IV.10 : changement de temperature de nano-fluide (eau+Cu) par rapport à la profondeur

Dans les graphiques obtenus présentés ci-dessus ,on remarque que la température d'entrer elle presque stable dans les trois cas, la température au niveau de la sortie varie en fonction du fluide utilisé dans chaque cas, Basé sur les graphes on déduire que le nano-fluide (eau+Cu) était le plus efficace pour absorber la chaleur géothermique, tandis que le nano-fluide (eau+ Al_2O_3) donnait de meilleurs résultats que l'eau pure.

Echangeur de chaleur se forme U

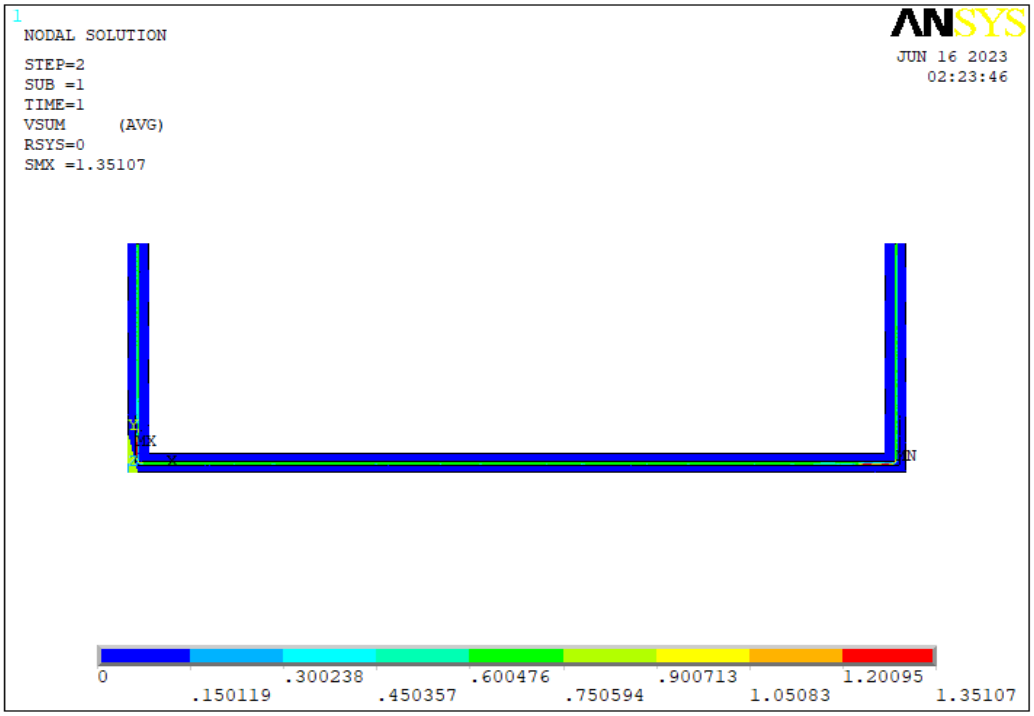


Figure IV.11 : représente la circulation de nano-fluide dans un échangeur de chaleur se formeU.

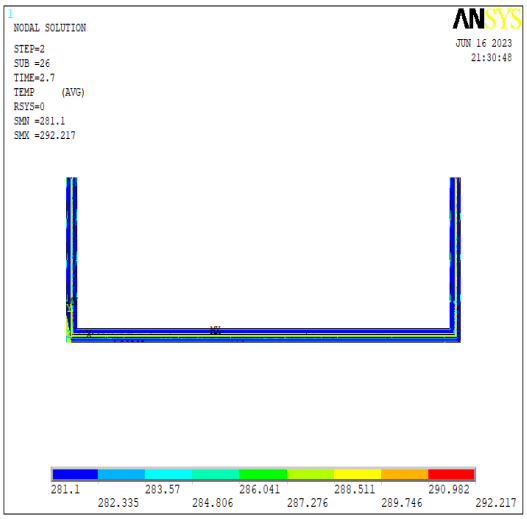


Figure IV. 12: le champ de température de nano-fluide (eau + Cu)

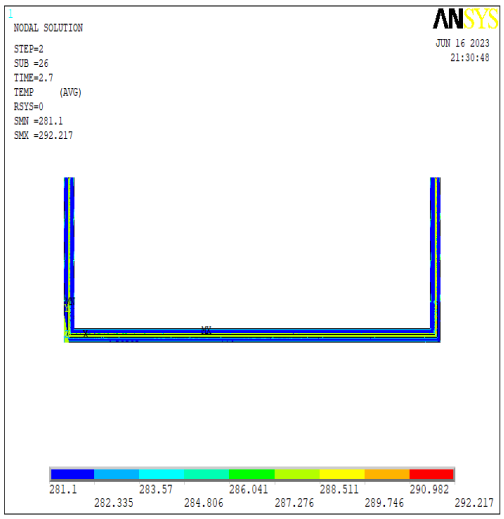


Figure IV.13 : le champ de température de nano-fluide (eau + Al_2O_3)

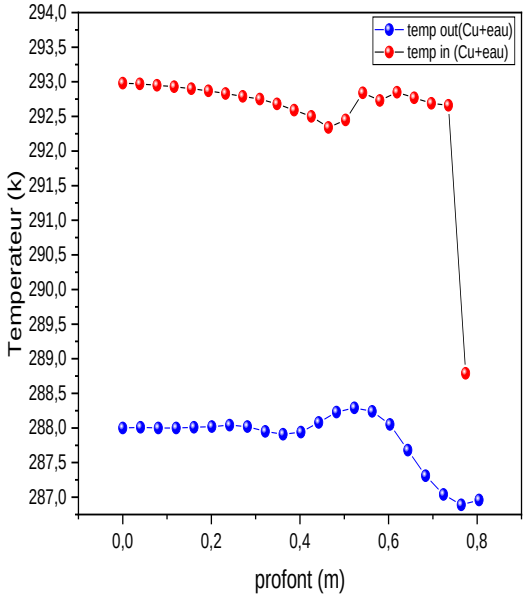


Figure IV.14 : ce graphe représente la variation de température de nano-fluide (eau+Cu) au fonction de profondeur dans un échangeur de chaleur ce forme U

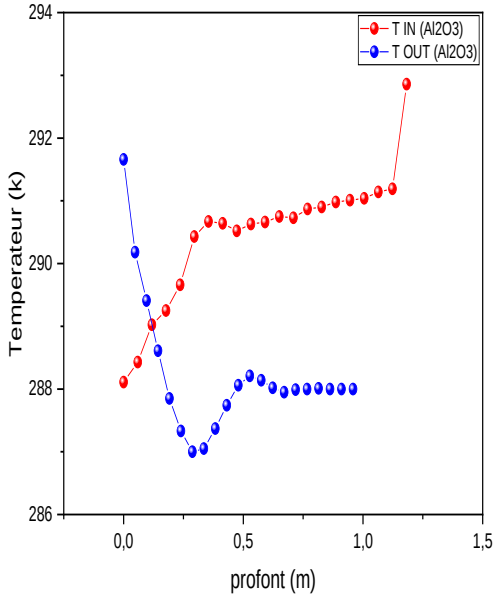


Figure IV.15 : ce graphe représente la variation de température de nano-fluide (eau+Al_2O_3) au fonction de profondeur dans un échangeur de chaleur ce forme U

De ces graphes, on constate que l'échangeur de chaleur a effectivement absorbé la chaleur

terrestre, car on constate que le nanofluide (eau +Cu) a donné de meilleurs résultats que le (eau+Al_2O_3) même si les deux liquides ont donné de bons résultats, ce qui confirme que le nano fluide (Eau + Cu) absorbe mieux la chaleur.

Par comparaison entre l'échangeur de chaleur axial et l'échangeur en U, et à travers les résultats obtenus, on peut considérer que l'échangeur en U est plus efficace pour transférer la chaleur du sol, car il a une plus grande surface de contact avec le sol, ce qui permet de meilleure absorption de la chaleur.

Tableau.VI.3. Extraction de chaleur pour chaque fluide échangeur

	Q(W)
3M(AL203+EAU)	180.567
3M(cu+EAU)	367.906
1M(EAU)	138
1M(CU+EAU)	1451.795
1M(AL203+EAU)	1436.089

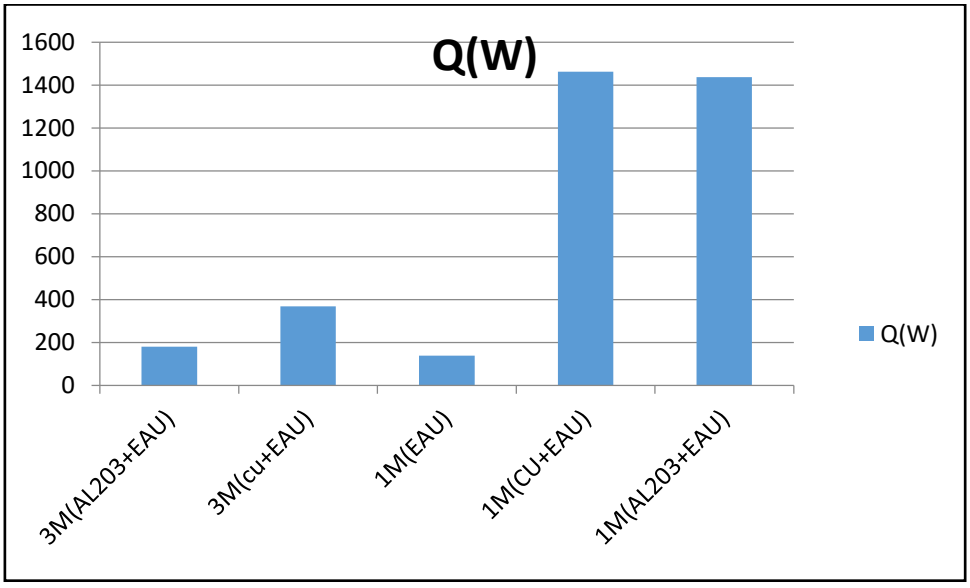


Figure IV.16. Colonnes graphiques représentant les performances de chaque forme enfonction du fluide utilisé

Dans la figure ci-dessus, on voit des barres graphiques représentant la chaleur extraite selon chaque condition (échangeur, fluide caloporteur).

On remarque que la chaleur absorbée dans l'échangeur en U est meilleure que l'échangeur axial, car la figure montre que les nanofluides sont meilleurs que l'eau.

Nous concluons d'aprèsles observations précédentes que les meilleures performances ont été fournies par l'échangeur de chaleur en forme de U et le nanofluide (eau + cuivre).

Cela s'explique par le fait que l'échangeur en U a une plus grande surface de contact avec le sol que l'échangeur axial, et les propriétés thermophysiques du nanofluide (eau + cuivre) sont meilleurs que les autres liquides.

VI.6 Conclusion :

En conclusion, après tous les résultats obtenus à partir de cette simulation, on peut conclure ce qui suit :

- Les nano fluides transportent mieux la chaleur géothermique que l'eau
- Le cuivre nano-liquide est le meilleur pour absorber la chaleur de la terre
- L'échangeur de chaleur en U est meilleur que l'échangeur coaxial

Conclusion générale :

L'énergie géothermique est une forme d'énergie renouvelable qui tire parti de la chaleur naturelle présente dans le sol pour produire de l'électricité et de la chaleur. Elle est basée sur l'exploitation de la chaleur de la terre, des nappes phréatiques et des roches chaudes à différentes profondeurs.

Ce travail a été principalement consacré à la simulation numérique par la méthode EF des phénomènes thermique et dynamiquevisait à analyser lesperformances de deux types d'échangeurs de chaleurcoaxial et en forme U , dans le contexte du développement de la géothermie , de plus trois fluide caloporteurs différents ont été utilisés : deux nano-fluide (eau + Cu), (eau+ Al_2O_3) et de l'eau pure .

Dans le premier chapitre, on a étudié les différents échangeurs coaxial utilisés à la géothermie et ses types en suite une synthèse sur les diff'rents travaux expérimentaux et numériques sur ce sujet.

Ledeuxièmechapitreestconsacréàlaprésentationdeséquationsdumodèledynamique et thermiqueduproblèmeétudié.

Le troisième chapitre est dédié à la résolution numérique et les méthodes decalcul.

Dansledernierchapitre, decemémoire on a présenté les résultats de simulationnumérique avec leurs interprétations, où les résultats obtenus montrent que:

- l'échangeur en U a des performances supérieures par rapport à l'échangeur coaxial , cela attribué à des facteurs tels que la géométrie de l'échangeur, qui favorise un meilleure efficacité thermique.
- Les nano-fluide se sont avérés plus efficaces que l'eau pure , les nano-fluide sont des suspensions de nanoparticules dans un fluide de base , ce qui leur confère des propriétés de transfert de chaleur améliorées, car on note que les nano-fluides varient en efficacité selon leur type, par conséquent les résultats indiquent que l'utilisation de nano-fluide dans les échangeurs de chaleur peut contribuer à améliorer l'efficacité énergétique et a augmenter les performances .

Les références

[1] O. Ellabban, H. Abu-Rub, F. Blaabjerg, Renewable energy resources: current status,future prospects and their enabling technology, Renew. Sustain. Energy Rev. 39(2014) 748–764.

[2] OUALiSalima. Chauffage et rafraichissementpar la géothermie. Bulletin des Energies Renouvelables N°48-2019.

[3] OUALiSalima. BRGM. <http://www.geothermie-perspectives.fr/article/technique-forage-particuliere-doublet-geothermique-profond>, accédéen 2019.

[4] Damien Do Couto (2014). Evolution géodynamique de la Mer d'Alboran par l'étude des bassins sédimentaires. Thèse de doctoraten Géosciences et ressourcesnaturelles..École doctorale Géosciences, ressources naturelles et environnement (Paris).

[5]Wenke Zhang , Wenjing Li , Bjørn R Sørensen , Ping Cui , Yi Man , Mingzhi Yu , Zhaohong Fang, 2021, Comparative analysis of heat transfer performance of coaxial pipe and U-type deep borehole heat exchangers,Geothermics 96 (2021) 102220,

[6]Gascuel et al

[7] Yongqiang Luo ⇑ , Nan Cheng, Guozhi Xu , Analytical modeling and thermal analysis of deep coaxial borehole heat exchanger with stratified-seepage-segmented finite line source method (S3 -FLS), Energy and Buildings 257(2022)111759

[8] Yaran Wang a,b , Yeming Wang a,b , Shijun You a,b , Xuejing Zheng a,⇑ , Peide Cong c , Jinkai Shi c , Bo Li c , Lichuan Wang c , Shen Wei d , Mathematical modeling and periodical heat extraction analysis of deep coaxial borehole heat exchanger for space heating , Energy and Buildings,265 , 2022, 112102

[9**]** H. Esen, M. Inalli, M. Esen, K. Pihtili, Energy and exergy analysis of a groundcoupled heat pump system with two horizontal ground heat exchangers,
Building and Environment 42 (2007) 3606–3615

[10] S.A. Kyriakis, P.L. Younger, Towards the increased utilisation of geothermal energy in a district heating network through the use of a heat storage, Applied Thermal Engineering 94 (2016) 99–110.

[11] Ji Li a, b, * , Wei Xu a , Jianfeng Li c , Shuai Huang d , Zhao Li c , Biao Qiao a , Chun Yang a , Deyu Sun a , Guangqiu Zhang a, Heat extraction model and characteristics of coaxial deep borehole heat exchanger , Renewable Energy,169, 2021 738-751

[12] Eero Hirvijoki ∗ , Janne Hirvonen, The potential of intermediate-to-deep geothermal boreholes for seasonal storage of district heat, Renewable Energy ,198 2022, 825-832

[13] Wang huajun a,* , Xu Yishuo a , Sun Yukun a , Zhao Sumin b, Heat extraction by deep coaxial borehole heat exchanger for clean space heating near Beijing, China: Field test, model comparison and operation pattern evaluation , Renewable Energy 199, 2022, 803-815

[14] Christopher S. Brown, Isa Kolo, Gioia Falcone, David Banks, Repurposing a deep geothermal exploration well for borehole thermal energy storage: Implications from statistical modelling and sensitivity analysis, Applied Thermal Engineering
220, 2023, 119701

[15]C.S. Brown, N.J. Cassidy, S.S. Egan, D. Griffiths, Numerical modelling of deepcoaxialborehole heat exchangers in the Cheshire Basin, UK, Comput. Geosci. 152(2021), 104752.

[16] MEDJBER Mohamed, YKRELEF Hichem, 2008 «Etude de l'écoulementd'air dans unecavitéparallélépipédique chargé d'obstacle » diplômed'ingénieure;Université de Yahia Fers de
Médéa .

[17] TOUMI Aboubaker, BOUDERRADJI Mohamed, 2009 « L'effet de la surface intermétallique
de SnAgCu sur la fiabilité d'un ensemble de relie semi-conducteur de puissance » diplôme d'ingénieure; Université de Yahia Fers de Médéa .

[18] KRIBY Saliha,2022 «Étude de l'écoulement des nanofluides dans une conduite circulaire aspects thermiques et hydrodynamiques»,these de doctora; Université de Yahia Fers de Médéa.

[19] Gladés Bachir(2010). Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nanofluides en configuration de Rayleigh-Bénard. [Thèse de Doctorat, Mécanique, Energétique et procédés. Université Toulouse III- Paul Sabatier, Français].

[20] Einstein Albert and Fürth R. 1956. Investigations on the Theory of Brownian Movement. New York N.Y: Dover Publications.

[21] Pak, B. C. and Cho, Y. I. (1998), "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles." Experimental Heat Transfer ,no.11 (1998):151-170.

[22] : Chapitre2:ModèleD'EtalementEtTraitementNumérique,Discrétisationlaforme

généraledeséquationsdesystèmepar élémentfini.

[23] : :ITYMYOUCEF.modélisationducomportementthermomécaniqued'unpipeline

influencedesjonctions.MAGISTEREen géniemécaniqueConstantine(2010) ;

[24] : Yves Debard, Méthode des éléments finis : thermique, Master ModélisationNumériqueet RéalitéVirtuelle. Universitédu Maine, 24 mars2006.

[25] :Aitmoudid L. (2007)"CouplageFluide-Structure pour la simulation numérique des écoulementsfluides dans uneconduite `a paroisrigidesouélastiques, enprésenced'obstaclesou non". Thèse de doctorat, Universitéd'Artois.

[26] Patru J. (2005) "Modélisation du Développement des ContraintesRésiduelles au Sein de Dépôts Plasma de Zircone et d'Acier". Thèse de doctorat, Université de Limoges.

[27] Vincent D. (2007) "Contribution à l'Etude des PropriétésOptiques de Dépôts Plasma de ZirconeYttriée: Influences de leursCaractéristiquesMicrostructurales et Physico-chimiques". Thèse de doctorat, Université de Limoges.

[28] Pironneau O. (1988) "Méthodes des élémentsfinis pour les fluides",Thèse de doctorat, Masson, Paris

[29]Richard A. Beier a , José Acuña b , Palne Mogensen c , Björn Palm b ,2013(Borehole resistance and vertical temperature profiles in coaxial borehole heat exchangers)Oklahoma State University, Stillwater, OK 74078, United States.

[30]SAADI Mohamed Salah,8/10/2018 (INTÉGRATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES POUR LE CHAUFFAGE ET LA CLIMATISATION DES BÂTIMENTS EN UTILISANT LES POMPES À CHALEUR)UNIVERSITE FRERES MENTOURI CONSTANTINE.