

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبو بكر بلكايد – تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Par : Aberkane achraf issam eddine et Djillali mohammed charafeddine

Sujet

Modélisation et analyse de la performance des tubes en U pour la climatisation géothermique

Soutenu publiquement, le 10/ 06/ 2024 , devant le jury composé de :

M/GUELLIL hocine	MCA	Université de Tlemcen	Président
M/ BENMANSOUR abdelkrim	MCB	Université de Tlemcen	Examinateur
M/YOUSFI sidi mohammed	MA	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2023 /2024

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions le BON DIEU le tout puissant de m'avoir prêté foi, courage, santé et volonté d'entamer et de terminer ce mémoire. Mener une recherche de thèse jusqu'à son terme est un exercice long, solitaire, rythmé d'imprévus dans son déroulement et ses résultats qui n'aurait pas été possible sans l'entourage de mon promoteur, qui m'a montré le chemin à prendre.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers notre encadreur de mémoire **YOUSFI SIDI MOHAMMED** enseignant à l'université de Tlemcen, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses conseils avisés qui ont joué un rôle essentiel dans nos conversations.

Nous exprimons, Je tiens à exprimer ma gratitude envers les membres du jury président de cette soutenance Mr **GUELLIL HOUCINE**, ainsi que examinateur Mr **BENMANSOUR ABDELKRIM** qui ont accepté d'examiner notre mémoire et ont travaillé avec nous pour assurer le bon déroulement de celui-ci.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers toute l'équipe pédagogique de l'université de Tlemcen et les experts qui ont supervisé notre formation pour leur contribution théorique.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes parents pour leurs sacrifices.

A mes chers frères et sœurs et ma famille « ABERKANE » et « DJILALI »
sans exception.

A tous nos copains et ce qui nous aide durant ce travail surtout « IBRAHIM
SELIMIYEH » et « AMZAL OMAR ».

ملخص

في هذه الدراسة، نتحدث عن إمكانية استخدام الطاقة الحرارية الجوفية لتبريد المباني والمنشآت في المناطق الحارة والمعزولة باستخدام مبادل حراري عمودي من نوع U. تُعد هذه الإجراءات من بين الأكثر فعالية في مجال التكيف لتقليل مستويات الطاقة وضمان استدامة المشروع الحراري الجوفي. لذلك، فإن تقييم هذه التقنية ضروري لضمان اتخاذ قرار مستنير وضمان تطوير مستدام لهذا المشروع الحراري الجوفي.

تم إجراء تحليل بارامتري لدراسة تأثير سرعة وقطر الأنبوب على كفاءة المبادل الحراري. بعد التحليل الديناميكي للسوائل الحسابي (CFD) الذي تم إجراؤه باستخدام برنامج (ANSYS Fluent)، تم الحصول على النتائج التالية: يُظهر المبادل أفضل أداء عندما تنخفض سرعة السائل ويقل قطر القناة، بشرط أن يكون الأنبوب مصنوعًا من مادة ذات توصيل حراري مثالي لتحسين التوصيل الحراري. لقد أظهر نوع المبادل الحراري من نوع U أفضل أداء. كان القطر الحلقي للأنبوب $D = 0.04$ متر وعدد رينولدز 3500. عند المخرج، كانت درجة الحرارة 291.7 كلفن، مع فرق 11.3 كلفن بين المدخل (303 كلفن) والمخرج.

الكلمات المفتاحية: الطاقة، الطاقة الحرارية الجوفية، مبادل حراري من النوع U ، التبريد، التأثير البيئي، المحاكاة الرقمية.

ABSTRACT :

In this study, we discuss the possibility of using geothermal energy to cool buildings and facilities in hot and isolated areas by using a vertical U-tube heat exchanger. These procedures are among the most efficient in terms of air conditioning to reduce energy levels and ensure the environmental sustainability of the geothermal project. Therefore, the evaluation of this technique is essential to ensure well-informed decision-making and the sustainable development of this geothermal project.

A parametric analysis was conducted to study the influence of the fluid velocity and tube diameter on the efficiency of the heat exchanger. After performing CFD analysis using ANSYS Fluent software, the following results were obtained. The heat exchanger showed the best performance when the fluid velocity decreased and the channel diameter decreased, provided that the tube has a material with optimal thermal conductivity to improve thermal conductance. The U-tube heat exchanger type demonstrated the best performance. The annular tube diameter was $D = 0.04$ m and the Reynolds number was 3500. At the outlet, the temperature was 291.7 K, with a difference of 11.3 K between the inlet at 303 K and the outlet.

Keywords: Energy, geothermal energy, U-type heat exchanger, cooling, environmental impact, numerical simulation.

Résumé:

Dans cette étude, nous parlons la possibilité d'utiliser l'énergie géothermique pour refroidissement les bâtiments et les installations dans les zones chaudes et isolées en utilisant un échangeur de chaleur verticale type U. Ces procédures sont parmi les plus efficaces en matière de climatisations pour diminuer les niveaux d'énergie et l'environnement durable du projet géothermique. L'évaluation de cette technique est en conséquence essentielle pour assurer une prise en charge bien éclairée et un assurer un développement durable de ce projet de géothermique.

Une analyse paramétrique a été effectuée pour étudier l'influence de la vitesse et du diamètre du tube sur l'efficacité de l'échangeur. Après l'analyse CFD effectuée avec le logiciel ANSYS Fluent, les résultats suivants ont été obtenus. L'échangeur présente les meilleures performances quand la vitesse du fluide diminue et le diamètre du canal diminue, pourvu que le tube ait un matériau avec une conductivité thermique optimale pour améliorer la conductance thermique. Le type d'échangeur de chaleur type U a présenté les meilleures performances. Le diamètre annulaire du tube $D = 0.04$ m et le nombre de Reynolds de 3500. Lors de la sortie, la température était de 291,7 K, avec un écart de 11.3 entre l'entrée 303 K et la sortie.

Mots clés : Energie, Géothermie, échangeur de chaleur type U, refroidissement, impact environnemental, simulation numérique.

Sommaire

Introduction Général	01
Chapitre I : Généralités sur la géothermie	
I.1. Introduction	04
I.2. Histoire de la géothermie	04
I.3. Principe	06
I.4. différents types de géothermie	07
I.4.1. la géothermie haute énergie.....	08
I.4.2. La géothermie moyenne énergie.....	09
I.4.3. La géothermie de basse énergie.....	10
I.4.4. La géothermie de très basse énergie	11
I.5. Utilisation de la géothermie	12
I.6. Perspectives futures de la géothermie.....	13
I.7. Structure interne du globe	15
I.8. avantage de la géothermie	16
I.9. Inconvénients de la géothermie	16
I.10.La classification des systèmes géothermiques	17
I.11. Histoire La géothermie en Algérie.....	19
I.12. La géothermie en Algérie.....	20
I.13.Conclusions	24
Chapitre II : systèmes géothermiques de refroidissement	
II.1 Introduction.....	25
II.2. Le système de refroidissement active	25
II.2.1 Pompe à chaleur	25
II.2.1.1 Pompe à chaleur et sol	26
II.2.2 Pompe à chaleur géothermique	28

II.2.2.1 Composant.....	29
II.2.2.2 Principe de fonctionnement d'une (PACG)	30
II.2.2.3 Types.....	32
II.2.2.4 Types de configuration des (PACG).....	34
II.2.2.4.1 Configuration verticale	34
II.2.2.4.2 Configuration horizontale	35
II.2.3 La ventilation par des ventilateurs d'échappement géothermie	36
II.3 Le système de refroidissement passif	37
II.3.1 échangeurs de chaleur.....	37
II.3.1.1 Principe but et fonctions d'un échangeur de chaleur.....	38
II.3.1.2 Echangeur de chaleur air-sol.....	39
II.3.1.2.1 Principe de fonctionnement du puis canadien	40
II.3.1.2.2 type échangeur de chaleur air-sol	41
II.3.1.2.3 La forme d'échangeur air-sol	42
II.4 Conclusion	44

Chapitre III : Impact environnementaux potentiels à la géothermie

III.1 Introduction	45
III.2 Impacts sur l'environnement naturel.....	45
III.2.1 Air.....	45
III.2.2 Eau.....	47
III.2.2.1 Qualité	47
III.2.2.2 Quantité.....	49
III.2.3 Flore et faune	50
III.2.4 Déchets solide	50
III.2.5 Sol.....	51
III.2.5.1 Glissements de terrain	51
III.2.5.2 Subsidence	52

III.2.5.3 Séismicité	53
III.3 Chaleur non renouvelable perdue	56
III.4 Aménagement du territoire	56
III.4.1 Bruit.....	57
III.4.2 changement dans le paysage	58
III.4.3 La valorisation du sol	59
III.5 Conclusion	60

Chapitre IV : Modélisation et simulation numérique

IV.1 Description du problème	61
IV.2 Equation	61
IV.2.1 Equation de Navier-stokes.....	61
IV.2.2 Modélisation de la turbulence.....	62
IV.2.3 Equation générale de transport	63
IV.2.4 Equation de la roche et de sol	63
IV.3 Simulation numérique	64
IV.4 Définition d'ANSYS Inc.	64
IV.5 Différentes étapes simulation	65
IV.6 Description et modélisation du problème.....	66
IV.7 Mise en place d'un système d'analyse fluide en 2d.....	67
IV.7.1 Création de la géométrie.....	67
IV.7.1.1 La première étape.....	67
IV.7.1.2 La deuxième étape dans le modèle de design	68
IV.7.2 Maillage.....	69
IV.7.2.1 Vérifiez la taille de maillage	71
IV.8 Mettre en place le problème sous fluent	71
IV.8.1 Présentation de code fluent.....	71
IV.8.2 différentes de simulation sous fluent.....	71

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1 Résultats et discussions	75
V.1.1 Effet du diamètre et de vitesse de fluide	75
V.1.1.1 première cas (D=0.04m)	75
V.1.1.2 deuxième cas (D=0.06m)	82
V.1.1.3 troisième cas (D=0.08m)	89
V.1.2 comparaison les trois meilleur cas	97
Conclusion générale	100
Bibliographie	101

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

Figure I.1 : Production d'électricité avec la géothermie dans le monde (2005-2010).

Figure I.2: Principe de la géothermie.

Figure I.3 : Ressources mondiales de la géothermie.

Figure I.4 : Géothermie haute énergie.

Figure I.5 : Géothermie moyenne énergie.

Figure I.6 : Géothermie de basse énergie.

Figure I.7: Géothermie très basse énergie (puits provençal).

Figure I.8 : Principales utilisations de la géothermie en fonction de température.

Figure I.9: Schéma de la structure interne du globe.

Figure I.10 : Modèle conceptuel de champ à haute température dans un système volcanique Fissuré.

Figure I.11 : Vue schématique d'un bassin sédimentaire à réservoir géothermique situé à 2-4 km de profondeur.

Figure I.12 : Carte géothermique du Sud algérien.

Figure I.13 : Situation géographique de la région d'étude.

CHAPITRE II :

Figure II.1 : Écarts de températures : pompe à chaleur à air et système géothermique.

Figure II.2 : Composantes d'une pompe à chaleur.

Figure II-3 : Principe de base des systèmes PACG en boucle fermée.

Figure II.4 : Schéma et cycle de base de la pompe à chaleur.

Figure II.5: Exemple de pompe à chaleur sol/sol.

Figure II.6 : Exemple de pompe à chaleur sol/eau.

Figure II.7 : Exemple de pompe à chaleur glycol/eau.

Figure II.8 : configuration Verticale.

Figure II.9 : configuration Horizontale en séries et en parallèle.

Figure II.10 : La ventilation par des ventilateurs d'échappement géothermie.

Figure II.11 : Schéma d'un échangeur air/sol.

Figure II.12 : Description d'un puits canadien en été.

Figure II.13 : Echangeur air sol (système à boucle ouverte).

Figure II-14 : Echangeur air sol (système à boucle fermée).

Figure II.15 : Echangeur air sol horizontal.

Figure II-16 : ECHANGEUR AIR/SOL SPIRALE.

Figure II-17 : ECHANGEUR AIR/SOL VERTICAL.

CHAPITRE III :

Figure III.1 : Exemples de centrales géothermiques

CHAPITRE IV :

Figure IV.1 : logo de l'entreprise

Figure IV.2 : les différentes étapes d'une simulation

Figure IV.3 : Position du problème

Figure IV.4 : L'aspect de travail est illustré dans l'organigramme suivant.

Figure IV.5 : page de projet in workbench

Figure IV.6 : La géométrie est présentée en deux plans et en 1D

Figure IV.7 : Le premier maillage $D=0.04m$

Figure IV.8 : le deuxième maillage $D=0.06m$

Figure IV.9 : le troisième maillage $D=0.08m$

Figure IV.10 : Les informations sur la page setup

Figure IV.11 : Les informations sur la page général

Figure IV.12 : précise le type de l'écoulement

Figure IV.13 : choisir le type de fluide

CHAPITRE V :

Figure V.1 : Champ de température ($\phi = 0.04m ; R_e = 3500$)

Figure V.2 : Champ de température avec zoom ($\phi = 0.04m ; R_e = 3500$)

Figure V.3 : Champ de température ($\phi = 0.04m ; R_e = 5000$)

Figure V.4 : Champ de température avec zoom ($\phi = 0.04m ; R_e = 5000$)

Figure V.5 : Champ de température ($\phi = 0.04m ; R_e = 7000$)

Figure V.6 : Champ de température avec zoom ($\phi = 0.04m ; R_e = 7000$)

Figure V.7 : Champ de vitesse ($\phi = 0.04m ; R_e = 3500$)

Figure V.8 : Champ de vitesse ($\phi = 0.04m ; R_e = 5000$)

Figure V.9 : Champ de vitesse ($\phi = 0.04m ; R_e = 7000$)

Figure V.10 : évolution de température pour $\phi = 0.04m$ et $R_e = 3500$

Figure V.11 : évolution de température pour $\phi = 0.04m$ et $R_e = 5000$

Figure V.12 : évolution de température pour $\phi = 0.04m$ et $R_e = 7000$

Figure V.13 : comparaison évolution de température pour $\phi = 0.04m$ et différente Reynolds

Figure V.14 : Champ de température ($\phi = 0.06m ; R_e = 3500$)

Figure V.15 : Champ de température avec zoom ($\phi = 0.06m ; R_e = 3500$)

Figure V.16 : Champ de température ($\phi = 0.06m ; R_e = 5000$)

Figure V.17 : Champ de température avec zoom ($\phi = 0.06m ; R_e = 5000$)

Figure V.18 : Champ de température ($\phi = 0.06m ; R_e = 7000$)

Figure V.19 : Champ de température avec zoom ($\phi = 0.06m ; R_e = 7000$)

Figure V.20 : Champ de vitesse ($\emptyset = 0.06m ; R_e = 3500$)

Figure V.21 : Champ de vitesse ($\emptyset = 0.06m ; R_e = 5000$)

Figure V.22 : Champ de vitesse ($\emptyset = 0.06m ; R_e = 7000$)

Figure V. 23: évolution de température pour $\emptyset = 0.06m$ et $R_e = 3500$

Figure V. 24: évolution de température pour $\emptyset = 0.06m$ et $R_e = 5000$

Figure V.25 : évolution de température pour $\emptyset = 0.06m$ et $R_e = 7000$

Figure V.26 : comparaison évolution de température pour $\emptyset = 0.06m$ et différente Reynolds

Figure V.27 : Champ de température ($\emptyset = 0.08m ; R_e = 3500$)

Figure V.28 : Champ de température avec zoom ($\emptyset = 0.08m ; R_e = 3500$)

Figure V.29: Champ de température ($\emptyset = 0.08m ; R_e = 5000$)

Figure V.30 : Champ de température avec zoom ($\emptyset = 0.08m ; R_e = 5000$)

Figure V.31 : Champ de température ($\emptyset = 0.08m ; R_e = 7000$)

Figure V.32 : Champ de température avec zoom ($\emptyset = 0.08m ; R_e = 7000$)

Figure V.33: Champ de vitesse ($\emptyset = 0.08m ; R_e = 3500$)

Figure V.34 : Champ de vitesse ($\emptyset = 0.08m ; R_e = 5000$)

Figure V.35 : Champ de vitesse ($\emptyset = 0.06m ; R_e = 7000$)

Figure V.36 : évolution de température pour $\emptyset = 0.08m$ et $R_e = 3500$

Figure V.37 : évolution de température pour $\emptyset = 0.08m$ et $R_e = 5000$

Figure V.38 : évolution de température pour $\emptyset = 0.08m$ et $R_e = 7000$

Figure V.39 : comparaison évolution de température pour $\emptyset = 0.08m$ et différente Reynolds

Figure V.40 : Evolution de température pour les trois meilleur cas

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I :

Tableau I.1: Une comparaison entre la géothermie et les autres énergies.

Tableau I.2: Caractéristiques de quelque source thermique sud Nord de l'Algérie.

Tableau I.3: Données physico chimiques de que loques forages albiens du sud de l'Algérie.

CHAPITRE II :

Tableau II.1 : Températures minimales types de sources de chaleur en mode chauffage.

CHAPITRE III :

Tableau III.1 : Émissions de gaz à effet de serre pour l'ensemble du cycle de vie de différentes sources d'énergie. Tiré de l'Agence Internationale de l'Énergie (1998).

CHAPITRE IV :

Tableau IV.1 : Les caractéristiques géométriques et thermiques Du modèle numérique.

Tableau IV.2 : Les constantes par défaut utilisées dans le code Fluent.

Tableau IV.3: résultats de maillage générer

CHAPITRE V :

Tableau V.1 : La température à la sortie pour tous les cas

Nomenclature

Symboles :

D : Diamètre de conduite [m]

Z : Hauteur du puits [m]

e : Épaisseur du conduit [m]

L : longueur du conduit [m]

h : coefficient de convection thermique [W/m^2K]

T : Température [K]

T_a : Température du fluide a l'entrée [K]

T_s : Température du sol [K]

C_p : Chaleur spécifique [$J/kg \cdot k$]

V : Vitesse de circulation du fluide à l'intérieur du conduit [m/s]

$C_1; C_2; C_\mu$: Constants utilisés dans le modèle

$S_\emptyset; S_k; S_\varepsilon$: Terme source

Symboles Grègues :

μ : viscosité dynamique [$p_a \cdot s$]

μ_τ : Viscosité turbulent [$p_a \cdot s$]

ν : viscosité cinématique [m^2/s]

ρ : Masse volumique [Kg/m^3]

λ : Conductivité thermique du fluide [$W/m \cdot k$]

λ_s : Conductivité thermique du solide [$W/m \cdot k$]

ε : Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulent [m^2/s]

k : Turbulence énergétique cinématique [m^2/s^2]

\emptyset : Variable général de dépendante

Γ_ϕ : Coefficient de diffusion

σ_k : Nombre de Prandtl pour k,

σ_ε : Nombre de Prandtl pour ε

Nombres sans dimension :

R_e : Nombre de Reynolds

p_r : Nombre de Prandtl

LISTE DES ABRÉVIATIONS :

AHU : Air humide dans les unités

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

COP : Coefficient de performance

Dpa : Déci pascal

EGS : Systèmes géothermiques stimulés

EER : Energy Efficiency Ratio

GWe : Gigawatts

Inc : Incorporated

LMDT : Différence de température moyenne logarithmique

PAC : Pompe à chaleur

PACG : Pompe à chaleur géothermique

MI : Magnitude locale

RSC : Systèmes géothermiques à roches sèches chaudes

Twh : térawatts-heure

Introduction Générale

Introduction Général :

Le développement rapide de tous les segments au niveau mondial a entraîné une augmentation significative de la consommation d'énergie. Cette demande supplémentaire est principalement satisfaite par l'usage des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon) qui a des impacts négatifs sur l'environnement (pollution, réchauffement de la planète).

En plus, la dépendance des combustibles fossiles bouleverse l'équilibre économique, politique et social des nations consommatrices et productrices. Donc les combustibles fossiles une source d'énergie très importante, cependant leur caractère non renouvelable et épuisable leur exploitation excessive.

D'un autre côté, il existe de nombreuses sources d'énergie naturelles, inépuisables et dont l'impact sur l'environnement est minime qui ont été utilisées depuis l'Antiquité jusqu'à aujourd'hui. Malgré leur efficacité et leur efficacité, l'adoption de ces sources d'énergie demeure largement sous-utilisée, car cela nécessiterait des investissements technologiques très importants pour les rendre plus compétitives économiquement. D'autre part, l'énergie solaire, l'énergie éolienne, les biocarburants, l'énergie marine et l'énergie géothermique sont des exemples de sources d'énergie alternatives.

Il s'agit d'une des sources d'énergie renouvelable les plus cruciales à l'échelle mondiale, mais sa disponibilité dépend du type de sol. L'exploitation de l'énergie géothermique nécessite des forages profonds dans les sols, leurs profondeurs variant en fonction des applications que l'on souhaite. On peut en effet noter qu'elle est utilisée à des fins de production d'électricité et pour des applications dans les systèmes de refroidissement et de chauffage.

Pendant L'été, la température monte à 47°C à l'ombre et dans les régions désertiques. Il en résulte une demande croissante en matière de machines à climatisation pour les ménages et les industries qui alourdissent les factures d'électricité inutilement pour les particuliers, les institutions gouvernementales et les entreprises privées. Il est par conséquent devenu impératif d'aborder sérieusement cette question pour se libérer autant que possible des machines de climatisation gourmandes en électricité. Les machines conventionnelles doivent donc être progressivement remplacées par, entre autres, un plus grand nombre de

Pompes à chaleur, un meilleur modèle d'isolation des bâtiments, un changement de design orienté vers la ventilation naturelle, une grande intégration de pompes à chaleur pour éviter de recourir à des machines de climatisation gourmandes en électricité etc. Les bouteilles d'eau ne nous rendent guère service pour nous rafraîchir. En l'absence d'un écoulement continu d'air dans les bureaux, les salles de classe et les transports publics, il faut trouver de meilleures méthodes de refroidissement des énormes volumes d'air. La récupération de chaleur en fin de cycle servant à réduire la quantité d'énergie pour le refroidissement. La récupération de chaleur permet de récupérer la chaleur émise par les équipements ou les lieux de stockages informatiques cette chaleur est ensuite utilisée dans le même bâtiment.

En investissant dans de telles solutions, chaque citoyen, gouvernement, ou entreprise pourrait économiser sur sa facture en électricité, et aider à atténuer les effets du changement climatique.

Dans cette section, nous présentons les principes de base du refroidissement par géothermie et des différentes applications qui en découlent. Et Impacts environnementaux potentiels liés à la géothermie. Pour garantir la réussite de notre recherche et obtenir des résultats précis, nous nous focaliserons sur la simulation numérique à l'aide du logiciel ANSYS pour le fluide à travers l'échangeur de chaleur verticale de type U.

Notre rapport pour organiser notre mémoire, nous le divisons en cinq chapitres. Et conclusion générale.

- **Le première chapitre :** on va donner une idée générale sur la géothermie, incluant son principe, son histoire, ses méthodes d'exploitation, ses différentes classifications, ses avantages et inconvénients, ainsi que son état actuel en Algérie.
- **Le deuxième chapitre :** on présente les systèmes géothermiques de refroidissements actif et passif comme systèmes utilisant une énergie renouvelable alternative aux énergies fossiles polluantes ; On traite les échangeurs de chaleur et les pompes à chaleur géothermiques.
- **Le troisième chapitre :** on va parler sur les impacts environnementaux potentiels à la géothermie, incluant les impacts l'environnement naturel (air, eau, sol.....) et aménagement du territoire.

- **Le quatrième chapitre** : L'approche mathématique de l'étude, après avoir présenté la problématique d'ensemble, elle sera définie par les différents modèles Mathématiques utilisés pour modéliser tous les comportements de température à la sortie de l'échangeur selon les normes d'ingénierie et La simulation numérique seront obtenue par le logiciel ANSYS.
- **Le cinquième chapitre** : avoir des résultats de simulation ainsi que pour l'analyser en détail comme la plage de la température pour les diamètres différents et les vitesses.

Enfin, notre étude se termine par une conclusion.

Chapitre I :

Généralités sur la

géothermie

I.1 Introduction :

Afin de diminuer le réchauffement climatique et la pollution dans la planète générée par l'usage des énergies fossiles, plusieurs pays ont développé des technologies qui emploient les énergies renouvelables riches et respectueuses de l'environnement présentes dans la nature. Ces sources d'énergie incluent l'énergie géothermique, dérivée des mots grecs "géo" (terre) et "thermie" (chaleur). C'était la science qui étudie les phénomènes thermiques à l'intérieur de la terre et les technologies conçues pour les exploiter [1].

L'énergie géothermique est une source d'énergie durable renouvelable utilisable pour produire de la chaleur et de l'électricité quelles que soient les conditions météorologiques, la saison ou l'heure de la journée. Sa diversité vient des changements de température et de profondeur, permettant une variété d'utilisations.

Cette énergie tire sa source de la chaleur emmagasinée sous la surface de la Terre, principalement engendrée par la radioactivité naturelle des roches constituant sa croûte, et renforcée par des échanges thermiques avec les profondeurs terrestres. Dans de nombreuses régions, à une profondeur de 500 mètres, la température des roches avoisine les 25 à 30°C, tandis qu'à 1 000 mètres de profondeur, elle varie entre 35 et 45°C. Néanmoins, dans les zones caractérisées par des conditions géologiques particulières telles que des croûtes minces ou une activité volcanique, ces températures peuvent dépasser les 100°C, voire atteindre 200°C.

L'énergie géothermique est devenue de plus en plus importante ces dernières années en raison de sa source de chaleur terrestre pratiquement inépuisable, ce qui la rend très prometteuse dans le domaine de l'approvisionnement énergétique. Son rôle dans les futurs scénarios de politique énergétique continue de devenir de plus en plus important.

I.2 Histoire de la géothermie :

Depuis de nombreuses générations, l'énergie géothermique a été utilisée de différentes manières, en utilisant les sources chaudes pour des tâches culinaires, l'activité volcanique pour l'extraction du soufre et les espaces souterrains pour conserver les aliments. Malgré ces premières applications, l'utilisation généralisée de l'énergie géothermique n'est passée de la phase artisanale à la phase industrielle qu'au début du XXe siècle. L'énergie géothermique a commencé à être utilisée à Ardrelle, en Toscane, en Italie comme source

D'électricité viable au début du XXe siècle. En 1904, une étape importante fut franchie lorsque cinq lampes, de plusieurs dizaines de watts chacune, ont été allumées avec succès à l'aide d'un générateur relié à une machine à vapeur géothermique. Par la suite, en 1905, la première centrale électrique expérimentale, d'une capacité de 20 kilowatts, a été construite pour fournir de l'électricité aux familles du village grâce à un réseau de distribution rudimentaire. En 1913, la construction de la première centrale géothermique a commencé, avec une turbine pionnière installée et produisant 250 kilowatts d'électricité. Le développement de cette technologie se confirme en 1944, lorsque la puissance de la centrale atteint 127 mégawatts.

En 1960, la production d'énergie géothermique apparaît et a commencé à se propager à l'échelle mondiale, devenant rapidement une industrie en pleine croissance. Des centaines de systèmes sont répartis dans le monde, avec des capacités installées allant de quelques mégawatts à plusieurs dizaines de mégawatts, dans un quart des pays, dont les États-Unis, le Japon, l'Italie, les îles, la Nouvelle-Zélande, l'Indonésie, les Philippines et le Mexique. Environ un tiers de ces installations sont dans des marchés émergents, où l'énergie géothermique représente 30% de la production énergétique nationale. En 2005, la capacité installée mondiale était d'environ 8 900 MW, avec une production annuelle d'électricité géothermique d'environ 57 TWh, soit 0,4% de la production mondiale totale d'électricité. L'énergie géothermique se classe au quatrième rang parmi les sources d'énergie renouvelable pour la production d'électricité, avec 62 TWh, après l'hydroélectricité (2 630 TWh) et la biomasse (220TWh) [2].



Figure I.1 : Production d'électricité avec la géothermie dans le monde (2005-2010) [3].

Les systèmes d'énergie géothermique, les sources chaudes, les geysers et les sols chauffés par le magma chaud sont largement exploités pour diverses utilisations. Production d'électricité et chauffage. Y'a des pays comme l'Islande et la Turquie qui utilisent ces systèmes pour répondre à leurs besoins énergétiques. La capacité opérationnelle mondiale de production d'énergie géothermique continue de croître de manière constante. En janvier 2015, la capacité géothermique était d'environ 12,8 GWe, répartie dans 24 pays. D'ici 2020, cette production devrait passer de 14,5 à 17,6 GWe, pour atteindre potentiellement environ 25 GWe d'ici 2030 [4].

La géothermie a d'abord été utilisée pour le chauffage des habitations. Après le très ancien réseau de chaleur de Chaudes-Aigues (Auvergne), construit au XIV^e siècle et alimenté par une source d'eau chaude à 82°C, des expériences ponctuelles ont eu lieu aux États-Unis à Boise (Idaho) et à Klamath Falls (Oregon) dès la fin du XIX^e siècle.

En 1930, Le chauffage géothermique a été introduit pour la première fois dans la capitale islandaise Reykjavik, permettant de chauffer. Aujourd'hui, une grande partie de la capitale islandaise est chauffée.

Grands réseaux de chauffage urbain utilisant la géothermie se développeront par la suite en France, en Italie, en Roumanie, en Russie, en Turquie, en Géorgie, en Chine, aux États-Unis, etc. Avec environ 27 800 MW installés et 72,6 TWh produits annuellement.

La géothermie thermique est exploitée dans plus de soixante pays (Japon, Chine, Russie, Etats-Unis, France, Islande, etc.). Elle constitue, grâce à la variété de ses usages (chauffage des habitations, production de froid, chauffage de serres, d'étangs de pisciculture, de boue de néologie, etc.) [1].

I.3 Principe :

Il existe deux grands types de Géothermie

➤ **Géothermie de surface :**

Le rayonnement solaire et le ruissellement des eaux de pluie provoquent une inertie thermique du sol : à plusieurs mètres de profondeur, la température est quasiment constante l'année.

La géothermie de surface utilise cette inertie pour obtenir une température inférieure à la température de surface en été, et inversement, pour obtenir une température supérieure à la température de surface en hiver.

Pendant l'hiver, la chaleur du sol ou de l'air est captée par des canalisations qui transportent du fluide caloporteur. Ensuite, cette chaleur est restituée à la maison grâce à la pompe à chaleur.

En été, la chaleur excédentaire de la maison est rejetée dans l'air via une pompe à chaleur.

➤ **Géothermie profonde :**

Le concept repose sur l'exploitation de la chaleur présente au plus profond de la masse d'eau chaude. Cette chaleur transite par un « échangeur thermique » alimenté par un système de pompe à chaleur, qui libère l'excédent de chaleur dans un tuyau d'évacuation. La chaleur restante est ensuite dirigée vers des radiateurs situés à l'intérieur de l'habitation. Bien adaptée au chauffage, cette forme de géothermie ne permet cependant pas de réguler la température à l'intérieur de la maison, contrairement à la géothermie de surface.

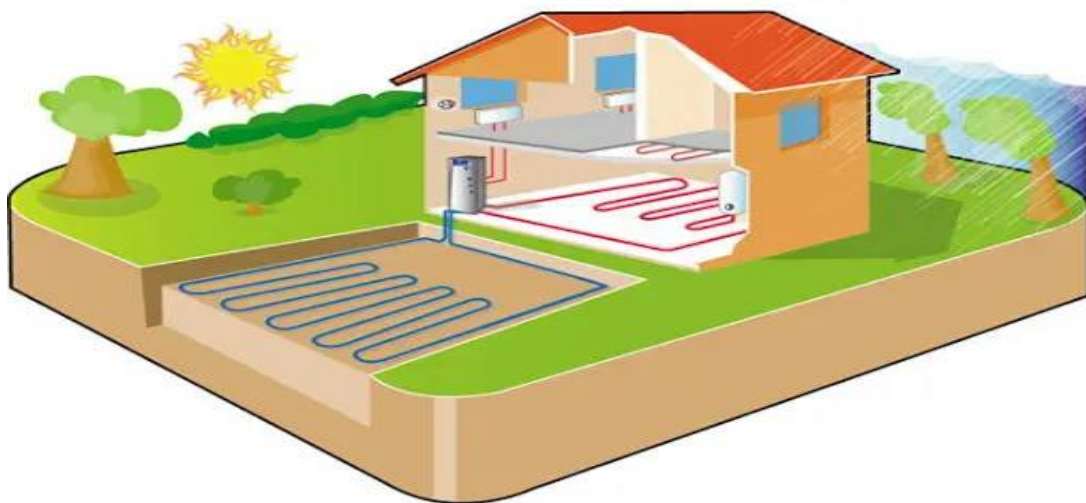


Figure I.2: Principe de la géothermie [5]

I.4 différents types de géothermie :

Les ressources géothermiques sont souvent classées en fonction de différences paramétrées tels que la source de chaleur, la méthode de transfert de chaleur, la température de la source, la profondeur du réservoir, l'état physique et l'utilisation.

De manière générale, on peut distinguer quatre principaux types d'énergie géothermique [6].

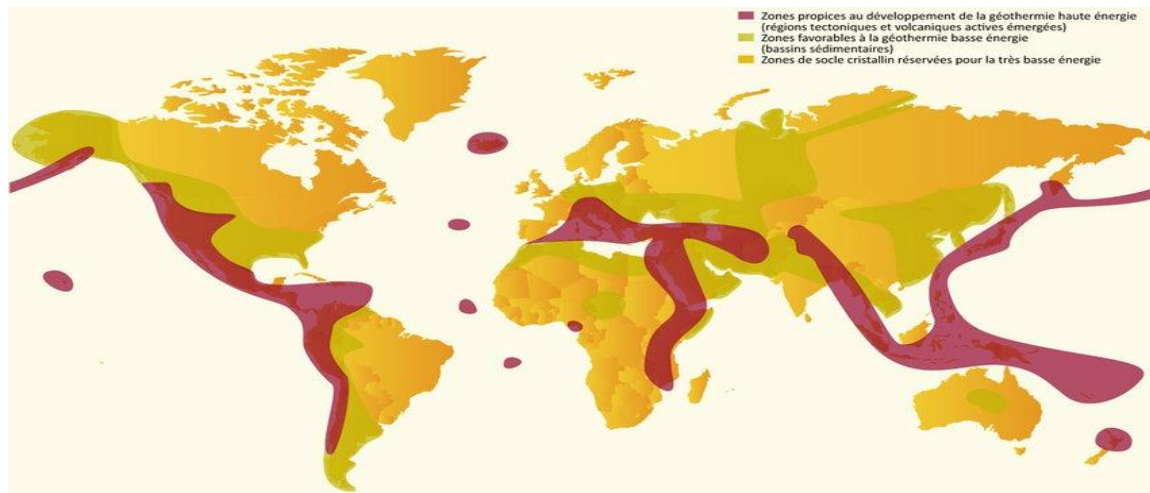


Figure I.3 : Ressources mondiales de la géothermie [7]

Couleur : Zones propices au développement de la géothermie haute énergie.

Couleur : Zones favorables à la géothermie basse énergie (bassins sédimentaires).

Couleur : Zones de socle cristallin réservées pour la très basse énergie.

I.4.1 La géothermie haute énergie :

(Ou haute température) concerne les fluides dont la température est supérieure à 150°C. Ces produits sont généralement mis en production par forage à des profondeurs supérieures à 1 500 mètres [8].

Les ressources géothermiques à haute énergie sont situées où il y a des zones avec des gradients géothermiques super élevés, comme des endroits avec des volcans ou des failles dans la terre.

L'ascenseur géothermique utilise de la vapeur ou du gaz qui monte vers à la surface pour entraîner des turbines afin de produire de l'électricité.

Ce type d'énergie géothermique est le plus efficace, mais aussi le plus coûteux et le plus dangereux car cela peut provoquer des tremblements de terre et des éruptions volcaniques, des émissions de gaz toxiques ou encore des fuites de liquide.

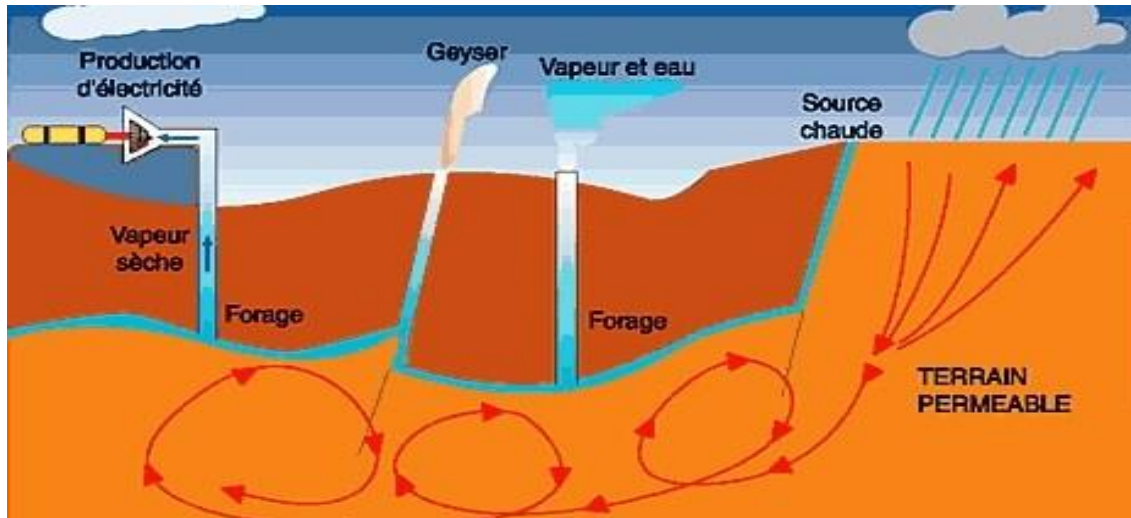


Figure I.4 : Géothermie haute énergie [9]

I.4.2 La géothermie moyenne énergie :

La chaleur géothermique à température moyenne, également appelée enthalpie moyenne, se trouve souvent sous la forme d'eau chaude ou de vapeur humide à des températures comprises entre 90 et 150 degrés Celsius. Généralement ces ressources sont situées à des profondeurs d'environ 1 000 mètres dans les régions à haut potentiel d'énergie géothermique, mais elles peuvent également se trouver dans des bassins sédimentaires à des profondeurs allant de 2 000 à 4 000 mètres [10].

Afin de produire de l'électricité, on doit employer l'eau chaude extraite pour chauffer un autre fluide dans un système fermé, où la température d'évaporation du fluide secondaire est inférieure à celle de l'eau géothermique. Ce processus est facilité par un échangeur de chaleur.

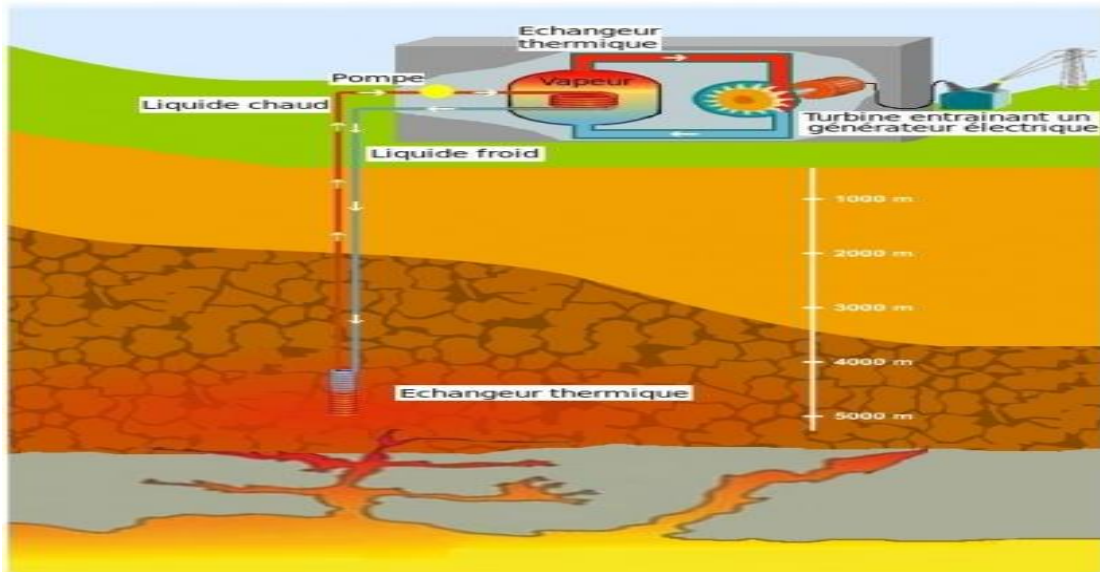


Figure I.5 : Géothermie moyenne énergie [11]

I.4.3 La géothermie de basse énergie :

(Ou basse température) exploite la chaleur de gisements d'eau situés à des profondeurs de quelques centaines de mètres jusqu'à environ 2 000 m, pour des températures généralement comprises entre 30°C et 90°C [10]. Elle pompe l'eau chaude du sous-sol, la transporte jusqu'aux bâtiments à chauffer, puis la réinjecte dans le sol. Ce type de géothermie est plus efficace que la géothermie très basse énergie, mais il comporte également des risques environnementaux plus importants, tels que la pollution des nappes phréatiques, les émissions de gaz à effet de serre, les nuisances sonores ou les microséismes.

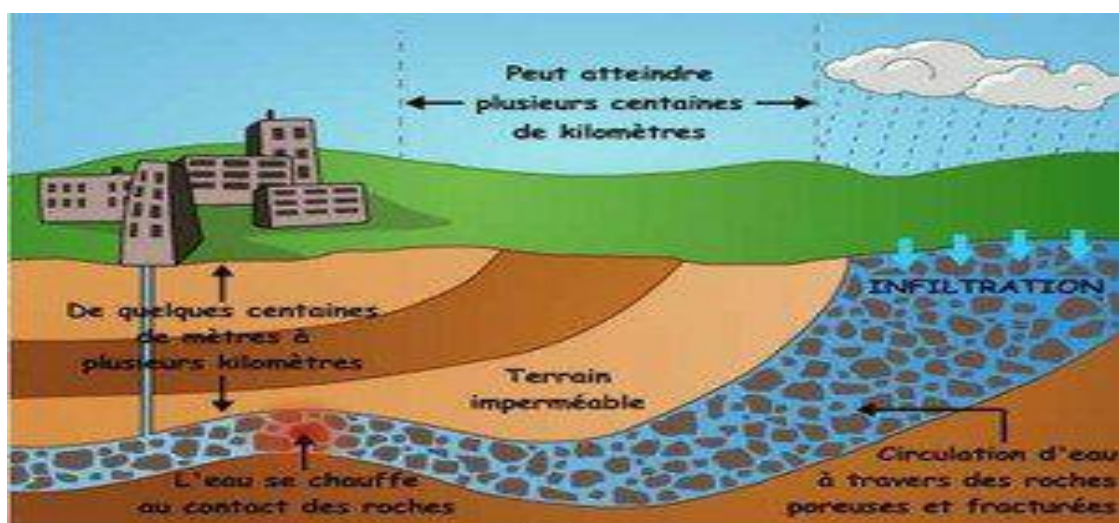
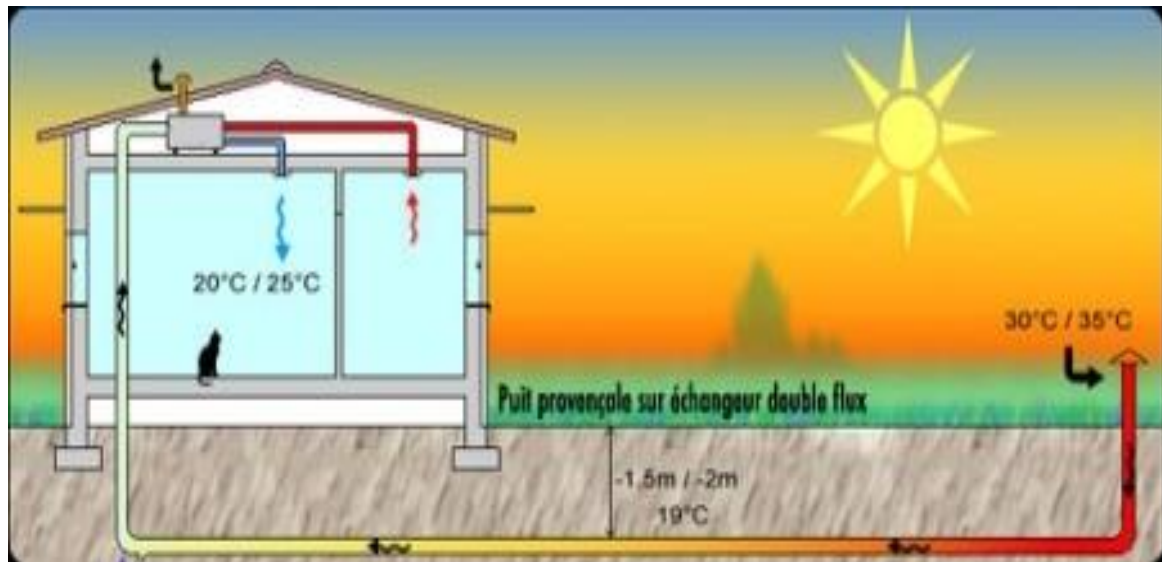


Figure I.6 : Géothermie de basse énergie [9]**I.4.4 La géothermie de très basse énergie :**

(Ou température ultra-basse) Exploiter la chaleur des eaux souterraines ou des eaux souterraines à des profondeurs généralement inférieures à 200 mètres, à des températures inférieures à 30°C.

Il utilise une pompe à chaleur pour faire circuler un fluide caloporteur dans des canalisations enfouies sous terre. Ce liquide se chauffe par un contact avec le sol, se transforme en gaz et rejoint le système de chauffage ou de climatisation du bâtiment [13]. Cette énergie géothermique a un faible impact environnemental parce qu'elle n'émet pas de gaz à effet de serre et ne nécessite pas de forage profond.

**Figure I.7**: Géothermie très basse énergie (puits provençal) [12]

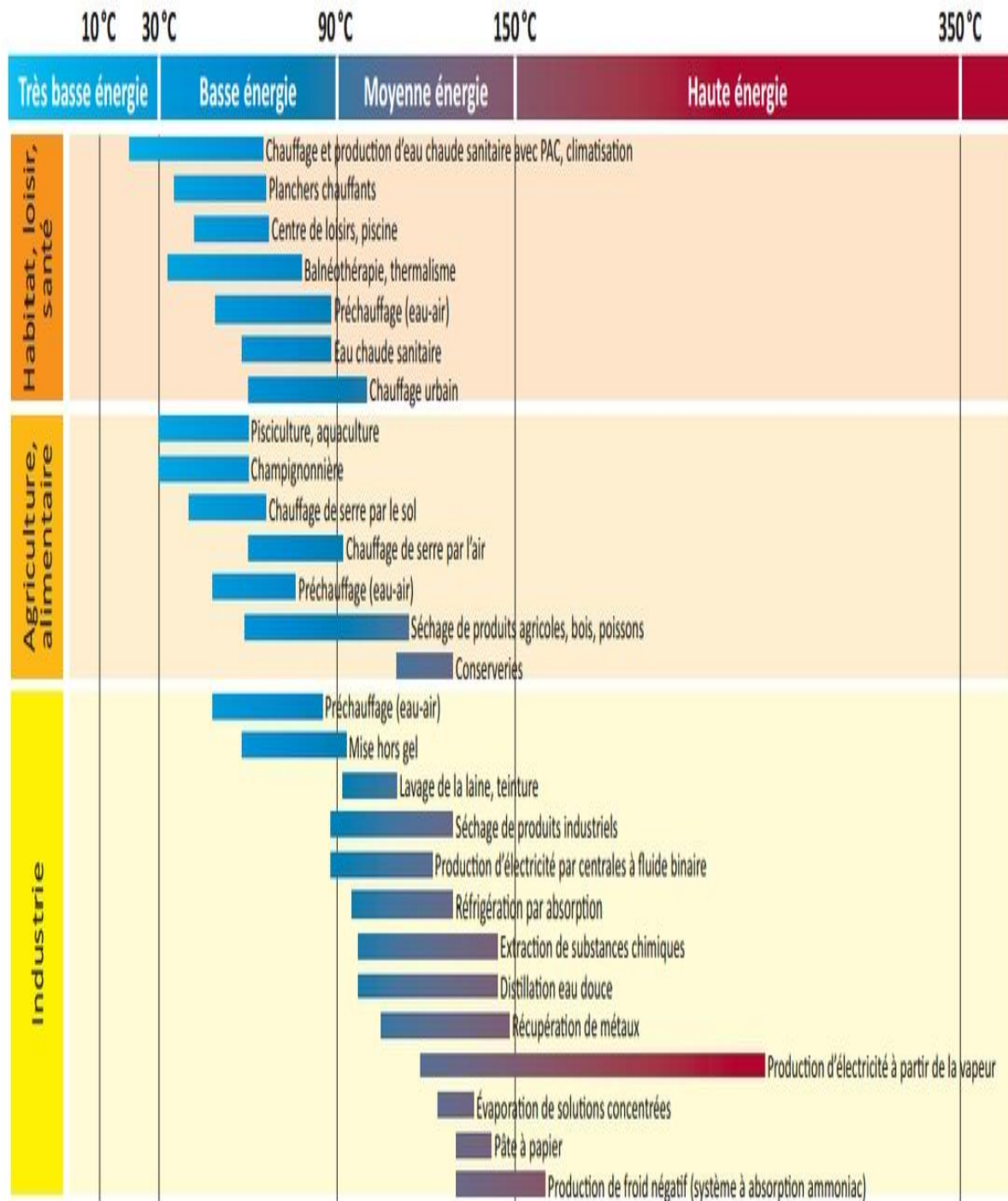


Figure I.8 : Principales utilisations de la géothermie en fonction de température [14]

I.5 Utilisation de la géothermie :

L'énergie géothermique est utilisée comme source d'énergie en exploitant la chaleur présente à la surface de la Terre ou dans les profondeurs de sa croûte, résultat de la désintégration radioactive des minéraux et de la perte de chaleur continue de la formation

D'origine de la Terre. L'utilisation de la chaleur des couches terrestres implique le forage de puits à différentes profondeurs, allant de quelques mètres à environ 10 kilomètres, en fonction du résultat souhaité. La chaleur, elle est souvent tirée du sol en remontant de la vapeur ou de l'eau chaude du sous-sol pour chauffer directement des bâtiments, des maisons, etc., soit par un réseau de distribution d'eau, soit par des échangeurs de chaleur comme les thermocouples, qui transfèrent la chaleur à l'intérieur.

Dans les centrales géothermiques, il est possible de produire de l'électricité en utilisant la vapeur produite dans les profondeurs de la terre pour faire marcher des turbines qui sont reliées à des générateurs.

I.6 Perspectives futures de la géothermie :

L'énergie géothermique fournit une grande partie des besoins énergétiques mondiaux tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. À la lumière des nouvelles tendances et des avancées technologiques, le future de l'énergie géothermique s'annonce radieux et pourrait modifier son rôle dans le mix énergétique mondial.

Premièrement, grâce aux progrès des technologies de forage et de fracturation hydraulique, cela pourrait ouvrir la voie à des réservoirs géothermiques plus profonds, étendant ainsi l'énergie géothermique à des zones auparavant considérées comme inappropriées.

Deuxièmement, les études actuelles sur les systèmes géothermiques à basse température pourraient rendre possible leur utilisation aux zones où les ressources à haute température ne sont pas accessibles, facilitant ainsi le chauffage, le refroidissement et les processus industriels tels que le séchage des récoltes.

Troisièmement, en combinant l'énergie géothermique avec d'autres énergies renouvelables comme le solaire et l'éolien, Cela offre des opportunités d'énergie de base stable, complétant les sources intermittentes.

Quatrièmement, le développement de systèmes pour stocker la chaleur géothermique Permettrait d'avoir un réseau plus flexible, ce qui pourrait aider à faire face aux changements de demande selon les saisons.

Cinquièmement, les améliorations dans les technologies de conversion de l'énergie géothermique, comme les turbines à vapeur et les cycles thermiques organiques, pourraient

Augmenter l'efficacité des centrales et réduire les coûts de production d'électricité

Sixièmement, les applications géothermiques directes pour le chauffage local et industriel, l'élevage de poissons pourraient connaître une croissance significative, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles et les émissions de CO₂.

Enfin, des réglementations favorables et des incitations financières sont essentielles pour stimuler les investissements et faciliter le déploiement de projets géothermiques à grande échelle. En générale, l'avenir de l'énergie géothermique semble radieux, offrant une source d'énergie propre, durable et fiable, dépendante de l'innovation technologique, de la coopération avec d'autres énergies renouvelables et de cadres politiques favorables.

La croissance rapide de l'énergie géothermique en tant que source d'énergie renouvelable et hautement rendement en fait principalement préférable pour remplacer les combustibles fossiles en diminution tels que le pétrole et le gaz. Son occupation de la cinquième place parmi les énergies à potentiel d'avenir témoigne de son importance croissante au niveau mondial

Table I.1: Une comparaison entre la géothermie et les autres énergies [15]

	<i>Pétrole</i>	<i>Gaz</i>	<i>Energie solaire</i>	<i>Energie éolien</i>	<i>Energie géothermique</i>
<i>Localisation</i>	Proche orient principalement	Gisement le plus souvent en Algérie, en Russie et en pleine mer	La où il y a un rayonnement solaire constant.	La où il y a du vent qui souffle a plus de 10 km/h	Partout pour la basse énergie, des sites plus spécialisés pour d'autres formes d'énergies
<i>Coût (coût d'installation ou coût de consommation)</i>	Coût du baril(Mai 2011 81 euro)	Coût annuel de consommation : 1291,8 euro Selon la ville, pour une utilisation individuelle.	Coût d'installation : De 500 à 1000euro par panneaux. Pas de coût de consommation	Coût d'installation : 15000 euro (pour un champ éolienne) 1,5 à 2 % de l'investissement initial	Coût d'installation au minimum 1000 euro Pas de coût de consommation
<i>Emission de CO₂(en gramme de CO₂/KWh)</i>	900 à 1150	400 à 420	Pas de rejet sauf lords de la création de centrale solaire.	Très peu de rejets (quelques cas particuliers)	Rejet indirect (carburant par la pompe)

I.7 Structure interne du globe :

D'une manière générale, la structure de la terre se compose de trois couches principales, à commencer par le noyau, qui représente environ 17 % du volume de la terre, et le noyau est divisé en deux couches, le noyau interne. À une profondeur de 6371 kilomètres, la température peut atteindre 4200 degrés. Le noyau externe liquide y a une température de 3500 degrés, entouré d'une coquille solide (composée de deux couches, la croûte supérieure et la croûte inférieure), d'une épaisseur allant jusqu'à 3000 kilomètres et représente 81% de la terre. Sa température varie entre 1000 et 3000 degrés.

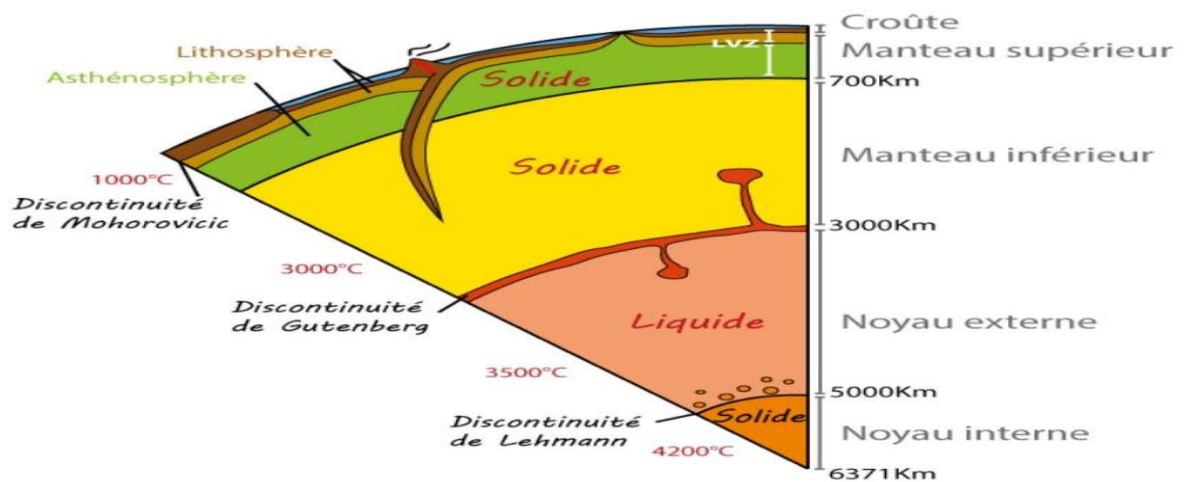


Figure I.9: Schéma de la structure interne du globe [1]

Il existe deux types de croûte superficielle : la croûte continentale, d'une densité de 2,7 et d'une épaisseur de 30 à 70 kilomètres, et la croûte océanique, d'une densité de 3,3 et d'une épaisseur de 5 à 20 kilomètres. En raison de la cristallisation du noyau, seule une petite quantité de chaleur pénètre dans la croûte. En effet, la conductivité électrique de la couche de couverture est très faible. Par conséquent, la majeure partie de la chaleur présente dans les couches terrestres provient de la désintégration d'éléments radioactifs tels que l'uranium, le thorium et le potassium dans le manteau et la croûte. A une certaine profondeur, la température de la croûte terrestre est presque constante tout long de l'année.

En fonction de la température de l'environnement extérieur, on peut utiliser cette propriété à deux fins différentes. Par utilisation des échangeurs de chaleur appropriés, la stabilisation géothermique peut servir pour la climatisation en été et le chauffage en hiver.

I.8 avantages de la géothermie :

- **Abondance** : La chaleur terrestre est pratiquement illimitée, fournissant une source d'énergie constante et fiable pour répondre à nos besoins énergétiques.
- **Faibles émissions** : Contrairement aux combustibles fossiles, l'énergie géothermique émet très peu de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à lutter contre le changement climatique.
- **Sécurité énergétique** : Les ressources géothermiques sont disponibles localement, réduisant ainsi la dépendance à l'égard de sources d'énergie étrangères et instables.
- **Puissance de charge de base** : les centrales géothermiques peuvent fournir une production d'énergie continue et stable pour compléter les sources d'énergie renouvelables intermittentes telles que l'énergie éolienne et solaire.
- **Utilisation minimale des terres** : Les centrales géothermiques utilisent généralement moins de terres que les autres formes de production d'énergie, préservant ainsi les habitats naturels.
- **Fiabilité** : Les centrales géothermiques offrent une haute disponibilité et une plus grande fiabilité, réduisant les interruptions de service et garantissant une alimentation électrique continue.

I.9 inconvénients de la géothermie :

- **Disponibilité limitée** : Toutes les régions ne disposent pas de ressources géothermiques appropriées.
- **Coûts initiaux élevés** : le forage de trous et l'installation d'infrastructures peuvent être coûteux.
- **Risques géologiques** : Des tremblements de terre et des affaissements peuvent survenir dans certaines zones.
- **Impact environnemental** : Des gaz à effet de serre et des polluants s'ils ne sont pas gérés correctement peuvent être libérés.
- **Corrosion et tartre** : Des dépôts minéraux peuvent s'accumuler dans les canalisations et les équipements, nécessitant un entretien.

- **Utilisation de l'eau** : Les centrales géothermiques nécessitent de grandes quantités d'eau pour leur refroidissement.

I.10 La classification des systèmes géothermiques :

Pour utiliser efficacement un champ géothermique, il est essentiel de comprendre les caractéristiques de la ressource, en particulier sa source de chaleur. Les ressources géothermiques sont classées en fonction de plusieurs facteurs tels que le mécanisme de transfert de chaleur, la température du réservoir, l'état physique, les méthodes d'utilisation et le contexte géologique. Les auteurs ont classé ces ressources en fonction des systèmes géologiques dont elles sont issues :

- **Les systèmes géothermiques volcaniques** : sont souvent liés à l'activité des volcans, avec comme source de chaleur des intrusions chaudes ou du magma. Ils sont généralement localisés à l'intérieur ou près de complexes volcaniques, tels que les caldeiras, situés souvent le long des frontières volcaniques. Ces complexes, comme les caldeiras, se trouvent fréquemment aux limites des plaques, bien que certains soient présents dans des zones chaudes. Dans ces systèmes, les fractures perméables et les zones de faille jouent un rôle crucial dans la régulation de l'écoulement de l'eau.
- **Les systèmes convectifs contrôlés par les fractures** : Dans les régions tectoniquement actives, les systèmes convectifs contrôlés par les fractures trouvent leur origine dans la chaleur émanant de la croûte profonde, dont le flux dépasse largement la moyenne, dépassant les 30 °C/km. Cette chaleur provient des zones tectoniques actives où la croûte en profondeur est particulièrement chaude. À des profondeurs dépassant souvent 1 km, les eaux géothermales parcourent un réseau de fractures verticales, s'écoulant pour capter la chaleur des roches environnantes.
- **Les systèmes géothermiques sédimentaires** : se trouvent dans les principaux bassins sédimentaires mondiaux. Leur existence est attribuable à la formation de couches sédimentaires perméables à des profondeurs importantes (> 1 km) et à des gradients géothermiques supérieurs à la moyenne (> 30 °C/km). Bien que les fractures puissent avoir une nature convective dans certains cas, ces systèmes sont principalement de nature conductrice. Les systèmes convectifs, tels que ceux contrôlés par des fractures, peuvent émerger depuis la surface de la terre, bien que certains soient enracinés dans des roches sédimentaires.

- **Les systèmes à géo-pression:** Les systèmes géo pressurés, similaires aux réservoirs de pétrole et de gaz géo pressurés, présentent des similitudes avec les fluides piégés dans les pièges stratigraphiques pouvant atteindre des pressions proches des valeurs litho statiques. Typiquement situés en profondeur, ces réservoirs peuvent afficher des pressions similaires aux valeurs litho statiques.
- **Les systèmes géothermiques à roches sèches chaudes (RSC) ou stimulés (modifiés) (EGS) :** Les formations décrites sont constituées de masses rocheuses soumises à une activité volcanique intense ou à des flux de chaleur exceptionnellement élevés. Malgré leur faible perméabilité ou leur quasi-imperméabilité, des tentatives ont été faites pour utiliser la fracturation hydraulique, connue sous le nom d'"hydro-fracturation", afin de créer des réservoirs artificiels dans ces formations ou d'améliorer les réseaux de fractures existants. Ces systèmes sont principalement destinés à être utilisés dans des doublets de production ou de réinjection [19].

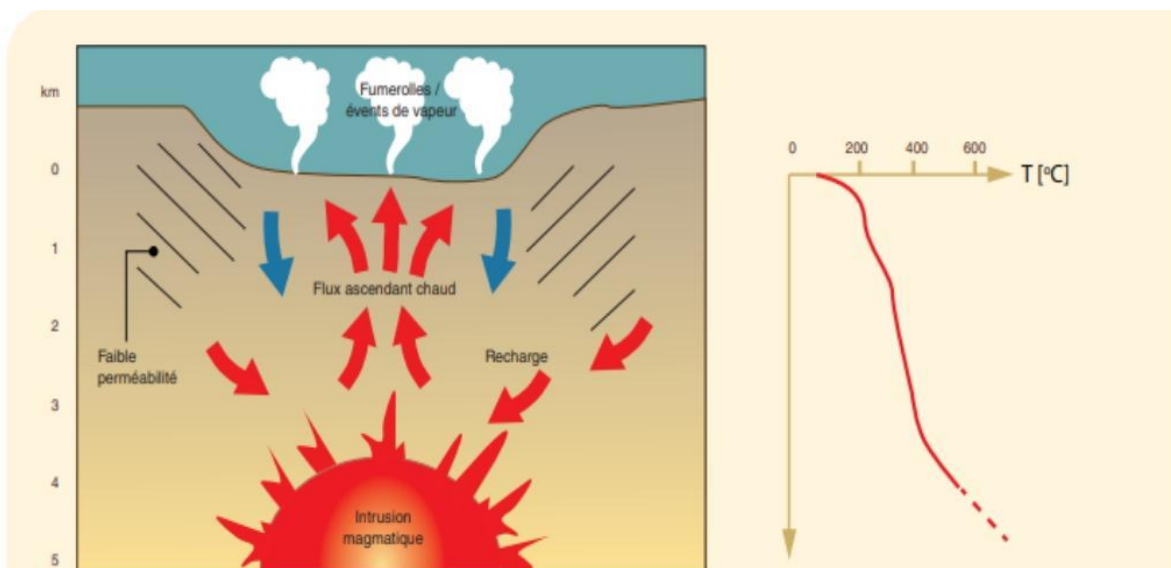


Figure I.10 : Modèle conceptuel de champ à haute température dans un système volcanique fissuré [20]

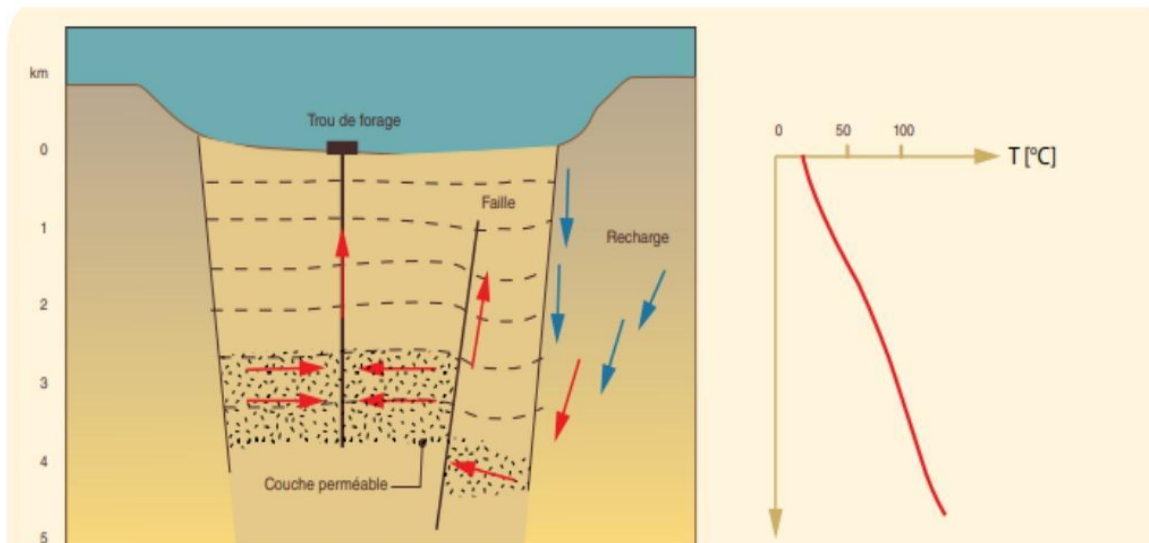


Figure I.11 : Vue schématique d'un bassin sédimentaire à réservoir géothermique situé à 2-4 km de profondeur [20]

I.11 Histoire La géothermie en Algérie :

L'énergie géothermique en Algérie remonte à plusieurs décennies, mais son développement significatif s'est surtout fait à partir des années 2000.

Voici un aperçu de l'histoire de la géothermie en Algérie, avec quelques dates clés :

- **1970s-1980s**: Les premières études sur le potentiel géothermique en Algérie ont eu lieu durant cette période, principalement dans le cadre de la recherche pétrolière et gazière. Les premiers forages exploratoires sont réalisés pour évaluer les ressources géothermiques du pays.
- **1990s** : Malgré un intérêt soutenu pour la géothermie, la décennie a été marquée par des défis économiques et politiques en Algérie, qui ont limité les investissements dans le développement des énergies renouvelables, y compris la géothermie.
- **2000s** : L'Algérie commence à intensifier ses efforts dans le domaine des énergies renouvelables, y compris la géothermie, en réponse aux préoccupations croissantes concernant la sécurité énergétique et les impacts environnementaux des combustibles fossiles. Des études de faisabilité et des projets pilotes sont lancés pour évaluer le potentiel géothermique du pays.

- **2007** : Le gouvernement algérien adopte une stratégie nationale pour le développement des énergies renouvelables, qui inclut la géothermie parmi les sources d'énergie à promouvoir.
- **2011** : L'Algérie annonce son intention de construire la première centrale géothermique du pays à Bouillante, dans la région de Guelma, à l'est du pays. Ce projet vise à exploiter les ressources géothermiques à des fins de production d'électricité.
- **2014** : La centrale géothermique de Bouillante entre en phase de construction, marquant une étape importante dans le développement de la géothermie en Algérie. Le projet est réalisé en partenariat avec des sociétés étrangères spécialisées dans la géothermie.
- **Années récentes** : L'Algérie continue d'explorer et de développer son potentiel géothermique, en mettant l'accent sur l'utilisation de la chaleur géothermique à des fins de chauffage et de refroidissement, ainsi que sur la production d'électricité. Des études géologiques approfondies et des projets pilotes sont menés dans différentes régions du pays afin d'évaluer et d'exploiter les ressources géothermiques.

I.12 La géothermie en Algérie :

De nombreuses sources thermales sont présentes dans le nord de l'Algérie, avec environ 200 sources identifiées dans la région, principalement concentrées dans le nord-est. Les principaux sites sont Hammam Maskoutaine à Guelma, avec des températures de 98°C, Hammam Boutaleb à Sétif, avec 52°C, et Hammam Bouhanifia à Mascara, avec des températures atteignant 66°C. Ces sources émergent principalement des calcaires jurassiques de la région, avec des points chauds géothermiques notables dans les régions du nord-ouest, du nord-est et du centre-nord, en particulier à Oran, en Kabylie et à Constantine. En outre, au-delà des territoires du nord, le Sahara septentrional abrite une importante réserve d'eau thermale dans l'aquifère continental intercalaire.

Tableau I.2:caractéristiques de quelque source thermale sud Nord de l'Algérie [16]

Sources thermales	Région	Faciès chimique	Résidasses (mg/l)	Température (°C)	Débit (l/s)
H.Chellala	Guelma	Sulfaté magnésien	1600	98	100
H.BouHadjar	Ain-Temouchent	Chloruré sodique	3210	66.5	--
H.Bouhanifia	Mascara	Bicarbonaté sodique	1400	66	----
H.Boutaleb	H.Boutakb	Chloruré sodique	3416	52	---
H.Essalihine	Khenchela	Chloruré sodique	2082	70	---
H.Salbine	Skikda	Sulfaté magnésien	2046	55	----
H.Sidi Bou Abdallah	Relizane	Chloruré sodique	1194	51	--
H.Delaa	M'sila	Sulfaté sodique	1980	42	----
H.Rabi	Saïda	Chloruré sodique	1524	47	----
H. Sillal	Bejaia	Chloruré sodique	2221	46	---
H.Ben Haroun	Constantine	Chloruré sodique	3762	42	10

Tableau I.3:Données physico chimiques de que loques
forages albiens du sud de l'Algérie [16]

Nom du puits	Province	Température (°C) Type d'eau	TDS (mg/l)	Débit (l/s)
H011e516	El Oued	65 NaeS04	1970	197
J0010e583	Ouargla	51 CaeS04	1620	120
J0011e94	Ouargla	60 CaeS04	1760	150
L011e11	Ouargla	48 NaeS04	3333	22
H008e59	Laghouat	34 CaeS04	2300	12
I009e55	Ghardaïa	41 NaeCl	1569	160
G009e109	Biskra	53 CaeCl	2822	100

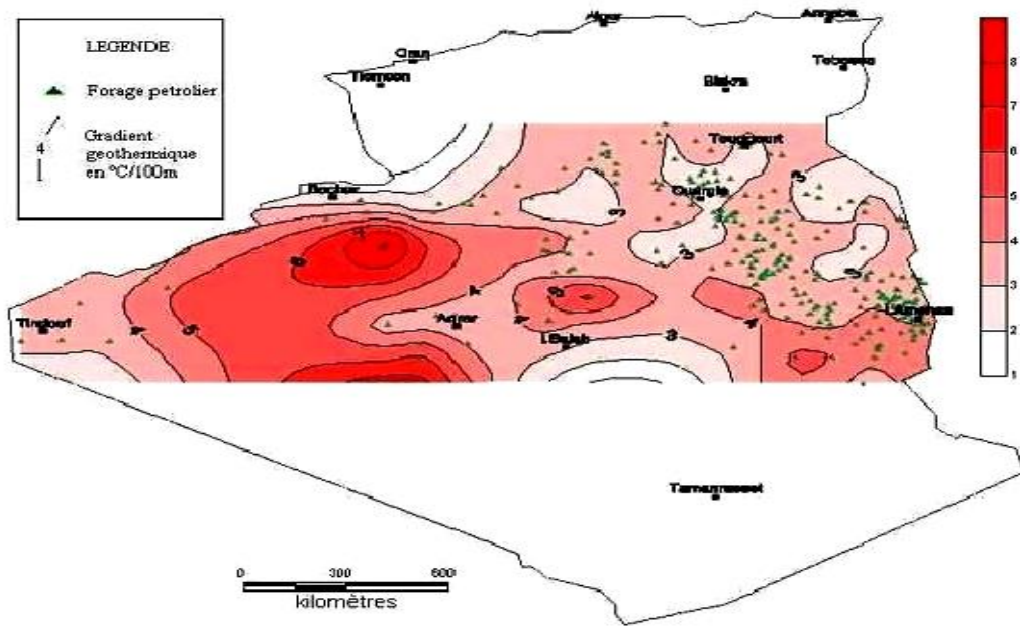


Figure I.12 : Carte géothermique du Sud algérien [17]

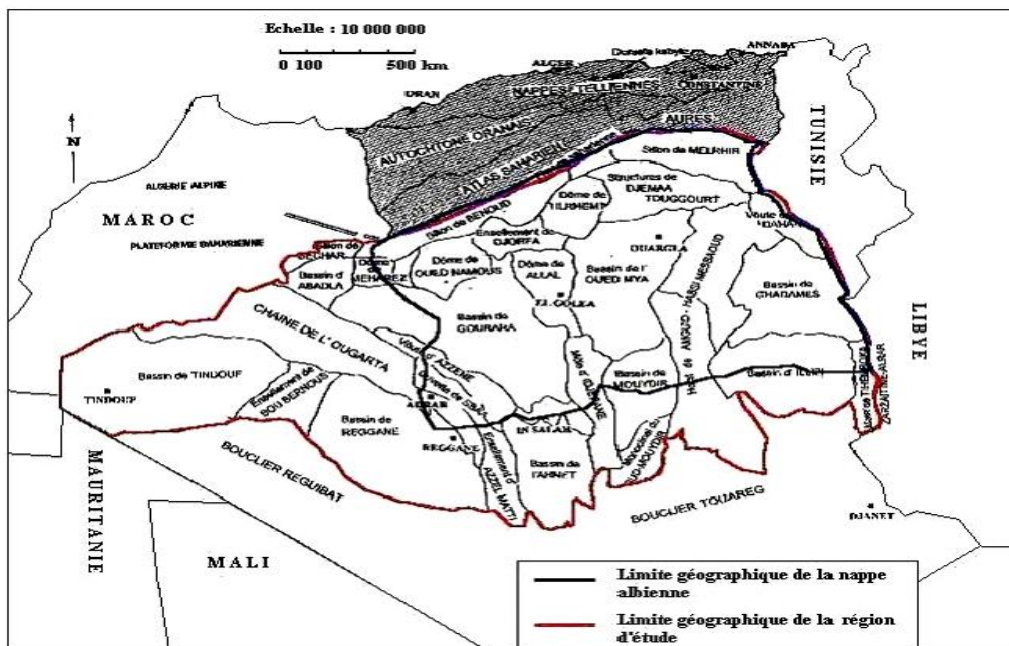


Figure I.13 : Situation géographique de la région d'étude [18]

I.13 CONCLUSION :

L'énergie géothermique est l'une des principales sources d'énergie renouvelable au monde. Sa chaleur provient de diverses sources naturelles telles que les volcans et les sources chaudes, et son efficacité thermique augmente avec la profondeur du sous-sol. Cette énergie est utilisée à diverses fins, notamment pour le chauffage, la production d'électricité et des applications dans les secteurs industriel et agricole. L'Algérie dispose d'une réserve importante d'énergie géothermique, offrant une alternative économique distincte des hydrocarbures.

Chapitre II :
systemes géothermiques de
refroidissement

II.1 Introduction :

De nos jours, l'un des éléments essentiels de la demande d'énergie est la climatisation des bâtiments, qui fait augmenter la consommation d'électricité du fait de l'accroissement des taux d'équipement. Les réserves terrestres en combustibles fossiles s'amointrissent, et l'attention se tourne donc vers une énergie durable, propre, accessible : l'énergie géothermique. En raison de son énorme potentiel, elle est l'une des alternatives énergétiques les plus prometteuses. Grâce aux politiques sur l'énergie que les pays gèrent à l'échelle nationale ainsi que dans le cadre d'accords internationaux, comme le Protocole de Kyoto ou sur le Fonds pour l'environnement mondial, il existe un climat favorable à la croissance des énergies renouvelables.

Ce chapitre parle des trucs qui peuvent faire du froid en utilisant l'énergie de la terre pour économiser de l'électricité. C'est trop cool parce que ça aide à garder les bâtiments plus confis et à rendre l'air meilleur. Ouais, c'est comme si la terre nous filait un coup de main pour maintenir les coins agréables et propres.

II.2 Le système de refroidissement active :

Les systèmes de refroidissement actif, c'est des dispositifs qui se servent de l'énergie pour faire du froid dans un machin ou une chose électronique. Ces systèmes, ils sont trop importants pour que la chaleur, elle passe bien de dedans à dehors

II.2.1 Pompe à chaleur :

Une pompe à chaleur est un appareil qui utilise l'énergie mécanique pour déplacer la chaleur d'un endroit plus frais vers un endroit plus chaud [21]. Elle est très couramment employée dans les systèmes de climatisation des bâtiments en raison de son efficacité dans le transfert de chaleur. Son avantage principal réside dans sa capacité à récupérer l'énergie de manière efficace, avec un effort moindre par rapport à la production d'énergie souhaitée. [21].

En gros, une pompe à chaleur se compose de quatre parties importantes : deux échangeurs de chaleur, un compresseur et un détendeur, c'est-à-dire l'évaporateur et le condenseur. Ces composants fonctionnent en circuit fermé, permettant à un liquide transporteur de chaleur de circuler et de changer de phase en fonction de sa position dans le circuit.

Chaque pompe à chaleur a son truc cool qu'on appelle "l'indicateur de performance énergétique". C'est un peu comme le super-héros de la pompe à chaleur, il nous dit à quel point elle déchire dans le domaine de l'énergie. Cet indicateur compare l'énergie qu'on obtient du truc où ça devient chaud avec l'énergie qu'on met dans le compresseur. Quand la pompe à chaleur fait de la chaleur, on l'appelle le "COP". C'est comme un ratio entre l'énergie qu'on utilise au condenseur (comme une bouilloire super puissante) et l'électricité qu'on utilise dans le compresseur. Mais quand la pompe à chaleur fait du froid, on parle plutôt de l'Energy Efficiency Ratio (EER). C'est encore un ratio, mais cette fois entre l'énergie qu'on prend du truc froid (comme un congélateur géant) et l'électricité qu'on utilise dans le compresseur. Ces ratios aident à dire quelle machine est la plus cool. En général, plus le ratio est grand, plus la machine est super. La thermodynamique a même un superpouvoir pour calculer un ratio maximal théorique, qu'on appelle COP de Carnot. C'est comme la limite ultime de la performance, selon les températures du truc chaud et du truc froid.

Pour que la pompe à chaleur soit au top avec son COP, faut vraiment réduire la différence de température entre les deux endroits où elle puise la chaleur, le chaud et le froid. Le truc, c'est que plein de pompes à chaleur se servent de l'air autour, mais tu sais, l'air peut être un peu capricieux, surtout en hiver, et la différence entre la température de l'air et celle qu'on veut avoir n'est pas toujours petite. Du coup, il faut avoir un endroit, comme un réservoir de chaleur, où les températures restent plus stables au fil du temps. Cette source de chaleur agit un peu comme un coffre-fort thermique, capable de donner de l'énergie sans que les températures fassent le grand écart [22].

II.2.1.1 Pompe à chaleur et sol :

Brancher une pompe à chaleur au sol, ce n'est pas vraiment piger direct dans l'énergie interne de la terre, mais plutôt la prendre comme une sorte de coffre-fort d'énergie. La terre, elle joue le rôle de gros stockage, en aspirant et relâchant de l'énergie avec un genre de décalage. Le système, il bouffe à fond l'énergie solaire en continu, et c'est ça qui chauffe la pompe à chaleur géothermique quand il fait frisquet l'hiver.

En été, la terre peut avaler le surplus de chaleur du bâtiment [23], faisant genre d'un puits qui refroidit. Donc, le sol, il joue le rôle d'une source de chaleur qui bosse à plein régime. Pour le système géothermique en hiver, mais en été, c'est plutôt un genre de climatiseur naturel [24].

Le tableau (II-1) fournit une représentation des températures minimales standard des sources de chaleur employées dans le processus de chauffage.

Tableau II.1 : Températures minimales types de sources de chaleur en mode chauffage
[24]

Source de chaleur	Temperature minimal types (°C)
Air ambient	De -30°C à -15°C
Etude surface	De 0°C à 10°C
Eau sou terrain	De 4°C à 10°C
Sol	De 4°C à 10°C

Dans le tableau (II.1), on voit bien que la température dehors, elle varie beaucoup, elle s'éloigne souvent pas mal de la température qu'on vise. Par contre, les températures en bas, elles restent plutôt stables et sont plus près de la température qu'on veut que celles de dehors.

La figure illustre les écarts de température observés dans le fonctionnement d'une pompe à chaleur air-air et d'une pompe à chaleur géothermique (air-sol).

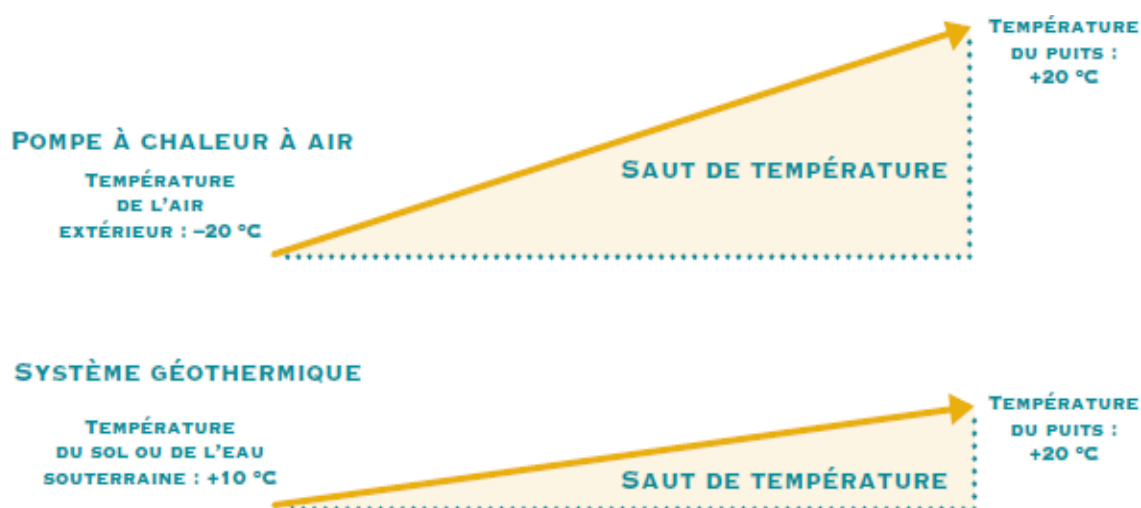


Figure II.1 : Écarts de températures: pompe à chaleur à air et système géothermique [24]

La montée de température, elle montre juste la différence entre la chaleur de départ et le puits de chaleur. Un système géothermique, c'est plus cool parce que son COP aime quand la différence de température n'est pas trop énorme, ça booste l'efficacité. Pour chauffer, une source qui envoie de la chaleur bien chaude, c'est le kif de la pompe à chaleur. Mais pour rafraîchir, on cherche un puits de chaleur avec une température aussi basse que possible [25]. Comme ça, on peut régler au mieux les températures juste à côté du sol, là où la pompe à chaleur fait son job, et ça assure un COP au top pour chauffer et refroidir, tout en économisant de l'électricité.

Pour se rapprocher de la température du sol, il est souvent nécessaire d'utiliser un capteur suffisamment long, même si cela n'est pas toujours économiquement viable. Outre la différence de température entre la source de chaleur et le puits, divers facteurs peuvent influencer sur ce point, notamment [24].

- Consommation d'électricité des pompes, des sources de chaleur auxiliaires, etc.,
- le rendement nominal de la pompe à chaleur,
- Le dimensionnement en fonction de la demande et des conditions d'exploitation (Climat, température de chauffage, réseau de distribution, etc.).

Les systèmes géothermiques sont applicables à différents types de bâtiments, tels que...

- Structures de construction neuve,
- Les édifices nécessitant de la chaleur pour divers usages (tels que les espaces intérieurs et l'eau chaude sanitaire),
- Structures nécessitant à la fois le chauffage et le refroidissement.

II.2.2 Pompe à chaleur géothermique :

Une pompe à chaleur géothermique, c'est comme un as du recyclage de chaleur. Elle puise dans la terre pour chauffer les endroits en hiver, et elle prend un coup de frais en été en utilisant la terre comme un genre de frigo. Le sol, c'est un super réservoir de chaleur parce qu'il reste plutôt stable à moins de 15 mètres sous terre. La température de la roche mère suit de près la température moyenne du sol, bougeant d'environ 1,5 à 3 °C tous les 100 m, Tout au long de l'année [26]. Ces pompes à chaleur, elles sont sympas pour la planète.

Elles gavent moins d'électricité et crachent moins de gaz à effet de serre que les vieux systèmes de chauffage et de clim. C'est du respect pour l'environnement en mode High-five. Les pompes à chaleur géothermiques, elles peuvent même faire économiser de 23 à 44 % d'énergie par rapport aux pompes à chaleur aérothermiques dernier cri, et de 63 à 72 % par rapport aux systèmes classiques qui carburent à l'électricité. Les installations de ces systèmes PACG ont eu une croissance mondiale bien costaud, genre entre 10 et 30 % chaque année au cours des dernières années [27,28].

II.2.2.1 Composants :

La pompe à chaleur géothermique est largement reconnue comme la méthode la plus efficace pour climatiser les bâtiments [29]. Elle comprend trois éléments clés : le circuit souterrain, ou échangeur de chaleur, la pompe à chaleur elle-même et le circuit de distribution [23] [30].

- Le système d'échangeur de chaleur enterré sert de source primaire de chaleur ou de froid, un fluide circulant dans les tuyaux pour extraire ou transférer la chaleur du sol.
- La pompe à chaleur fonctionne de manière classique, déplaçant l'énergie entre une source et une destination. Selon le scénario, les rôles de l'échangeur de chaleur souterrain et du bâtiment varient. En hiver, la chaleur est transférée du sol au bâtiment pour le chauffage, tandis qu'en été, la pompe à chaleur déplace la chaleur du bâtiment vers le sol pour le refroidissement.
- Le circuit de distribution est chargé d'acheminer la chaleur ou le froid produit par la pompe à chaleur vers les locaux concernés.

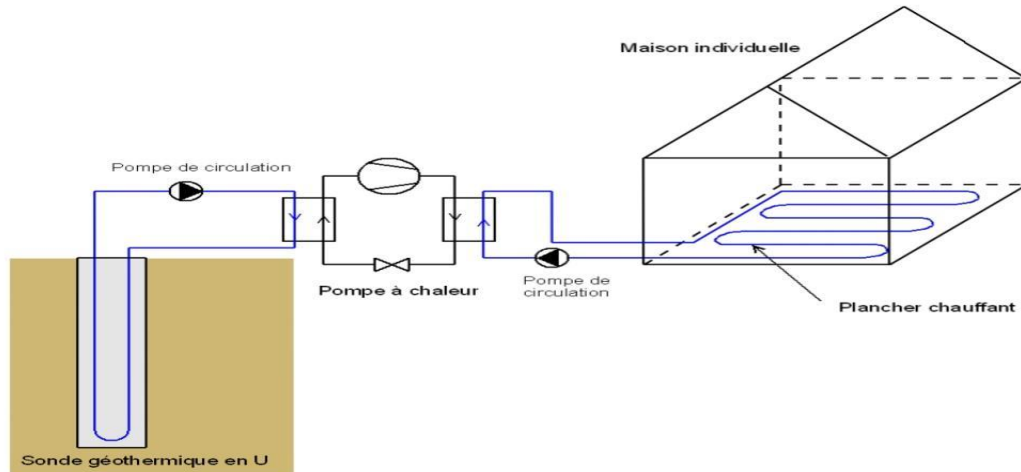


Figure II.2 : Composantes d'une pompe à chaleur

II.2.2.2 Principe de fonctionnement d'une (PACG) :

Les pompes à chaleur géothermiques fonctionnent selon les principes de la thermodynamique, où l'apport d'énergie est nécessaire pour respecter la deuxième loi. Dans les systèmes de réfrigération, un compresseur fournit le travail externe nécessaire. Ce travail dépend de la différence de température entre la source de chaleur et le puits de chaleur. Un système de refroidissement géothermique comprend généralement un échangeur de chaleur, une pompe à chaleur et un appareil de refroidissement. Dans ces systèmes, la chaleur est extraite du bâtiment et transférée au sol par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur, tel que l'eau ou un mélange eau-antigel, qui circule dans l'échangeur [31].

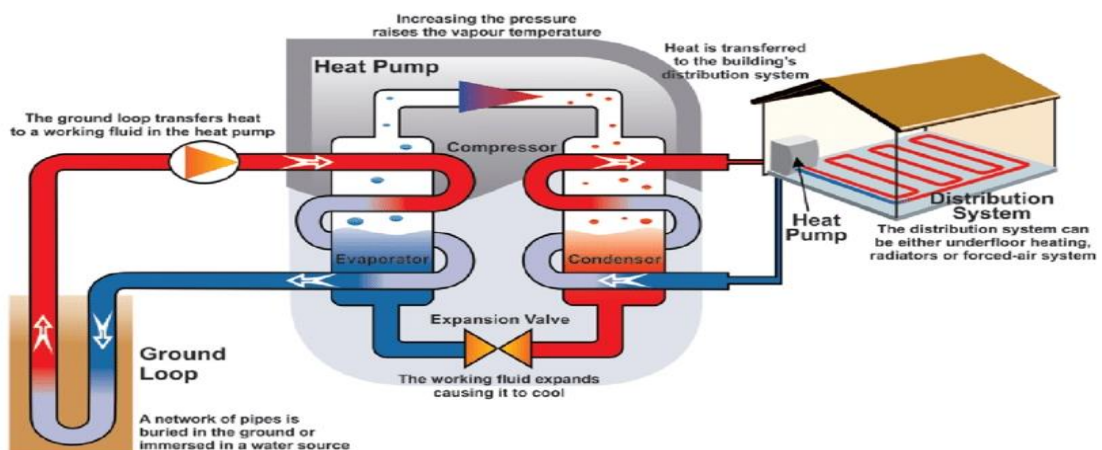
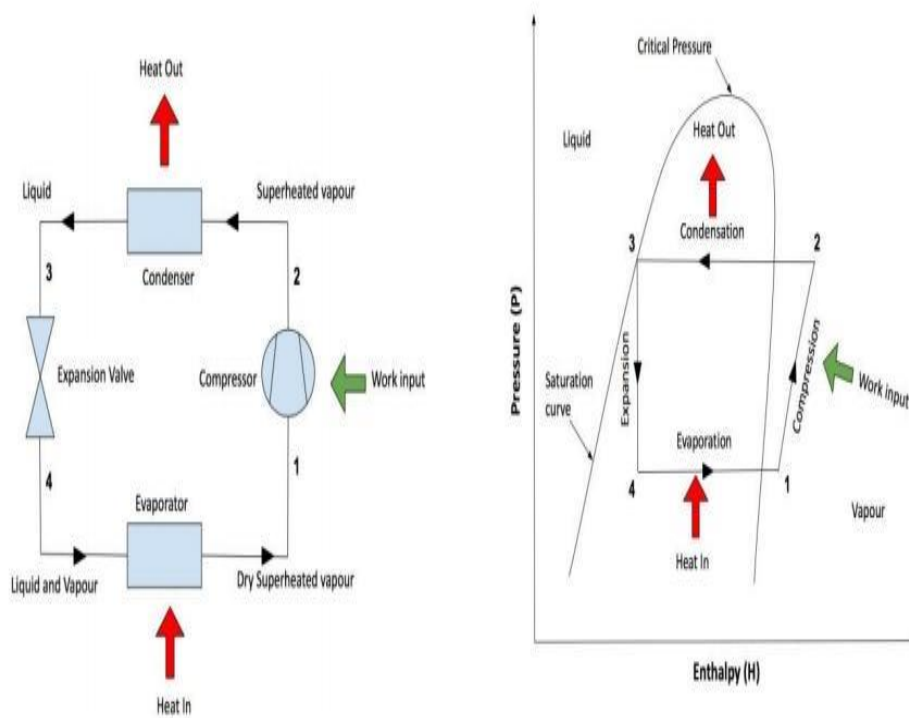


Figure II-3 : Principe de base des systèmes PACG en boucle fermée [56]

La pompe à chaleur, elle fait son truc en suivant le cycle de compression de vapeur, en comptant sur les particularités du gaz frigo qui fait des va-et-vient dans les phases d'évaporation, de compression, de condensation et d'expansion. Ces quatre étapes qui se tiennent la main forment ensemble le cycle de compression de vapeur, qui fait le job pour balancer la chaleur d'un endroit à un autre.

**Figure II.4** : Schéma et cycle de base de la pompe à chaleur [57]

1-2 : Après avoir gobé la chaleur de la source chaude, le liquide frigorigène se fait écraser par un compresseur électrique, ce qui le fait chauffer et monter en pression.

2-3 : Après ce petit écrasement, le fluide frigorigène passe dans le condenseur où il devient liquide en larguant de la chaleur dans l'air, de quoi réchauffer l'endroit.

3-4 : Ensuite, le liquide frigorigène tout comprimé passe par un "détendeur" qui le décompresse pour qu'il atteigne la pression de l'évaporateur. Là, il se transforme en un mélange liquide-gaz tout léger à basse pression.

4-1: Finalement, le fluide frigorigère à basse pression débarque dans l'évaporateur où il se volatilise, passant de liquide à vapeur à pression constante tout en gonflant la chaleur de la source chaude genre sol un peu frisks.

II.2.2.3 Types :

Les pompes à chaleur géothermiques, elles sont triées selon comment elles causent avec le sol. Ça fait trois sortes différentes :

1. **Système sol/sol à expansion directe** : Là-dedans, la pompe à chaleur est branchée direct au sol. Elle utilise des tuyaux planqués dans le sol pour tirer de la chaleur. Le truc, c'est que la chaleur passe direct entre le liquide de la pompe à chaleur et le sol. C'est malin, parce que le sol il reste à peu près à la même température toute l'année.

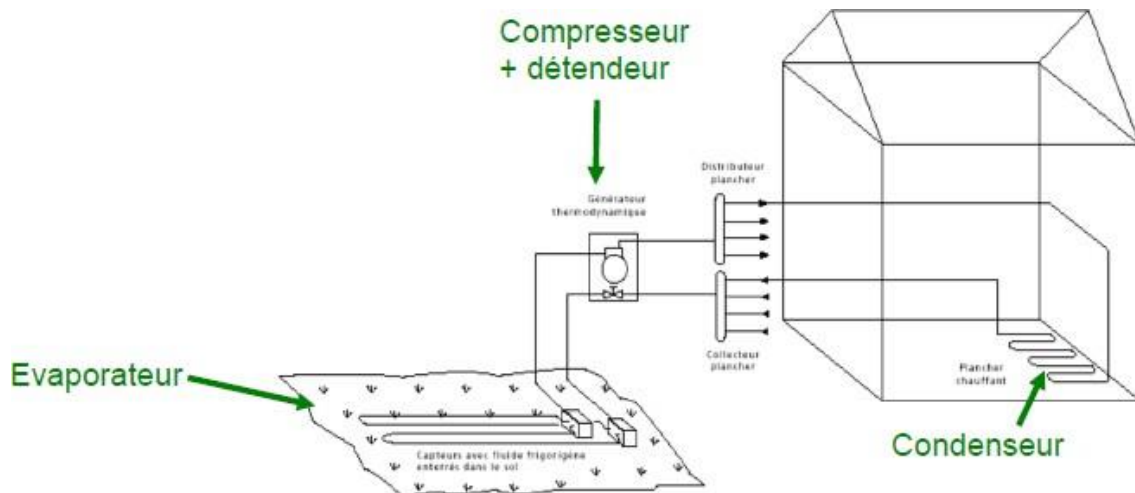


Figure II.5:Exemple de pompe à chaleur sol/sol [32]

2. **Système sol/eau** : Ici, la pompe à chaleur chauffe de capteurs planqués dans le sol pour tirer de la chaleur. Mais à la place de balancer la chaleur directe dans un liquide de la pompe à chaleur, elle la balance dans de l'eau. Cette eau-là peut servir à réchauffer un bâtiment avec un échangeur de chaleur. C'est comme ça qu'on garde les lieux au chaud.

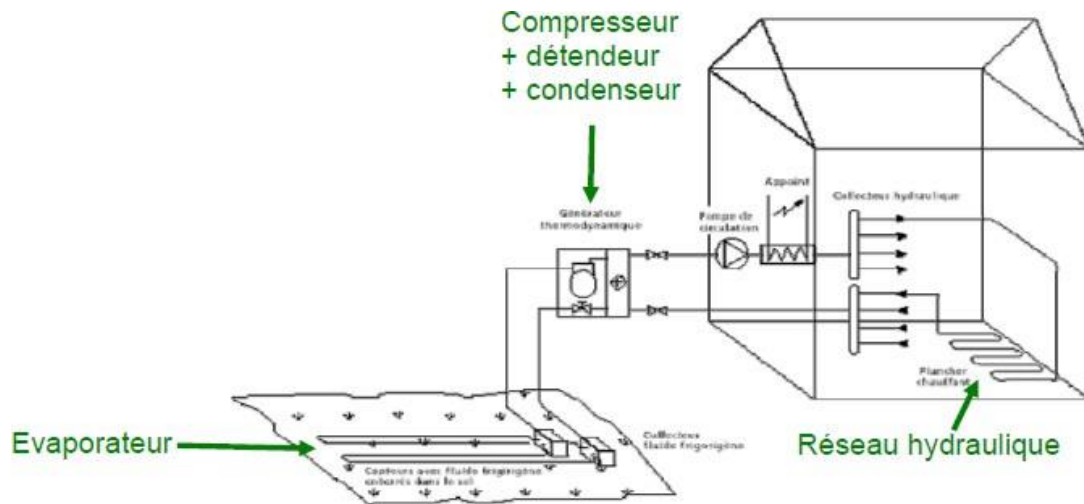


Figure II.6 : exemple de pompe chaleur sol/eau [32]

3. **Système glycol/eau** : Alors là, c'est simple'. On utilise un mélange d'eau et de glycol pour choper la chaleur du sol avec des capteurs géothermique. Ensuite, ce mélange, il passe dans un truc qui chauffe l'eau. Cette eau toute chaude, elle est ensuite utilisée pour chauffer la maison ou pour d'aut' truc. C'est un peu comme si on avait une grosse bouillotte sous la terre.

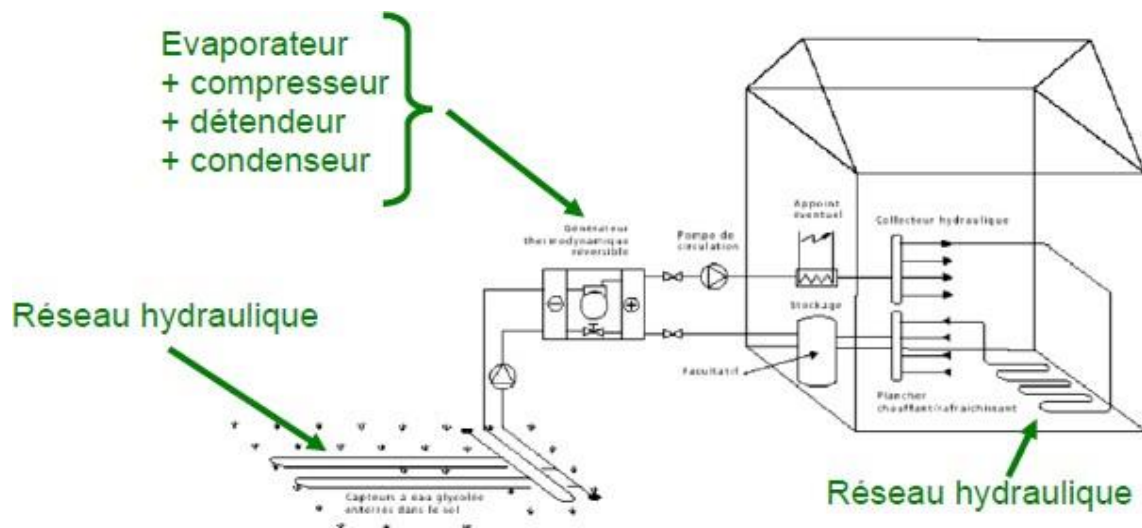


Figure II.7 : Exemple de pompe à chaleur glycol/eau [32]

II.2.2.4 Types de configurations des(PACG) :

Dans un système d'échange de chaleur couplé au sol, un élément crucial est l'échange d'énergie thermique entre le fluide caloporteur, tel que l'eau ou le mélange eau-antigel, et le sol. Ces systèmes sont généralement classés en boucles de forage verticales et en boucles horizontales, le choix optimal dépendant de divers facteurs : [33]

- Propriétés du sol.
- L'espace disponible.
- Profondeur de la source de chaleur.
- Besoins en matière de chauffage et/ou de refroidissement.

II.2.2.4.1 Configuration verticale :

Les systèmes verticaux en boucle fermée impliquent l'insertion d'un tuyau vertical dans un trou foré dans la roche (voir la figure). Ils sont couramment utilisés dans les zones urbaines où l'espace est restreint. Ces forages sont reliés à des pompes à chaleur qui facilitent le processus de compression de la vapeur. Contrairement aux systèmes horizontaux.

Les installations verticales entraînent des coûts initiaux plus élevés en raison des exigences de forage. Néanmoins, ils sont moins encombrants et offrent une efficacité supérieure, avec une durée de vie d'environ 25 ans. En règle générale, une solution antigel circule dans l'échangeur de chaleur, composée d'environ 70 % d'eau et de 30 % d'éthanol en volume afin d'éviter le gel dans les régions extrêmement froides.

La profondeur de forage varie généralement entre 20 et 100 mètres, en fonction des besoins de chauffage ou de refroidissement. Dans les contextes industriels, les profondeurs peuvent atteindre 200 mètres. Le choix de la profondeur appropriée doit également tenir compte des facteurs géologiques et des limites du terrain [34].

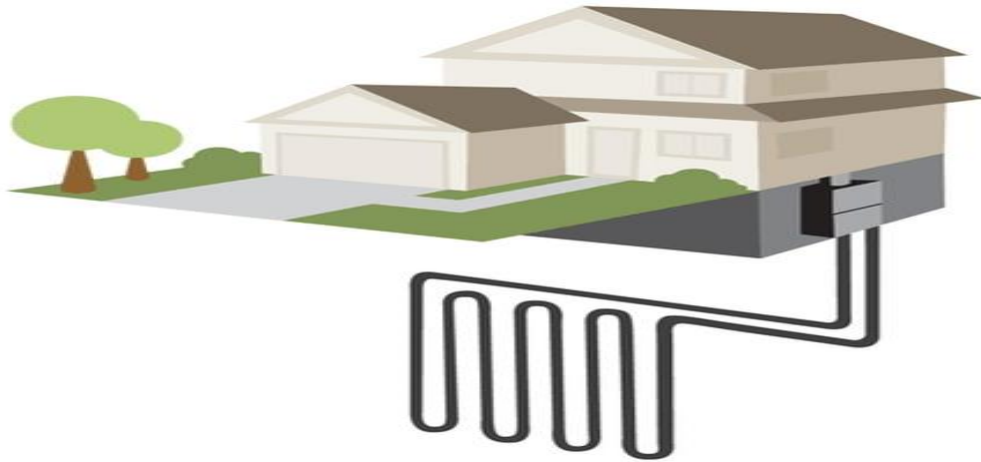


Figure II.8 : configuration Verticale [34]

II.2.2.4.2 Configurations horizontales :

La configuration horizontale pour la pose et l'enfouissement des boucles généralement à 1 ou 2 mètres de profondeur facilite l'installation par rapport aux boucles verticales.

Cette configuration élimine la nécessité de faire appel à un entrepreneur spécialisé dans le forage, ce qui réduit les coûts. Cependant, elle nécessite un espace de terrain important à l'extérieur du bâtiment, ce qui la rend plus courante dans les zones rurales en raison des limitations de terrain dans les zones urbaines. En général, il faut environ 500 mètres carrés de terrain pour une maison familiale. Pour minimiser les besoins en terrain, l'installation de pompes à chaleur géothermiques peut se faire en parallèle, en série ou en spirale [34].

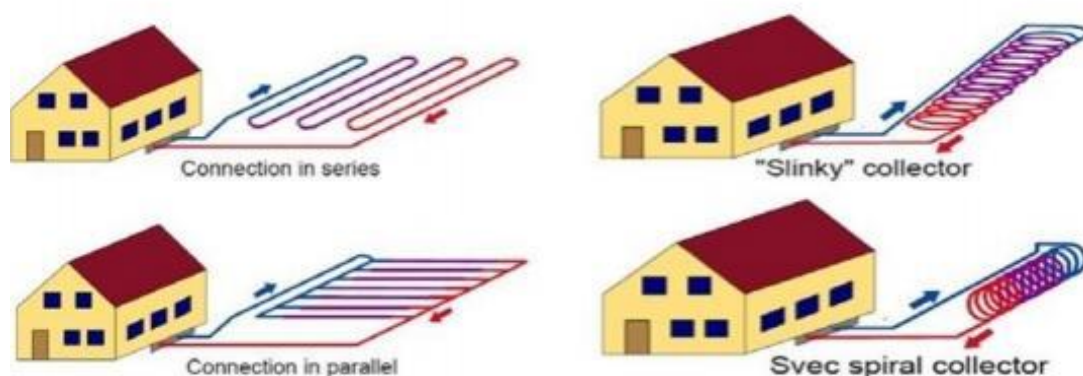


Figure II.9 : configuration Horizontale en séries et en parallèle [34]

II.2.3 La ventilation par des ventilateurs d'échappement géothermie :

La ventilation par des ventilateurs d'échappement géothermie est une méthode qui exploite la chaleur naturelle de la Terre pour refroidir l'air intérieur, généralement utilisée dans les mines de données ou souterraines. Voici comment ne pas le faire : Vous plantez des colonnes ou des tubes pour que l'air puisse circuler entre le sol et à l'intérieur du bâtiment. Les fans sont les stars ici. Ils fonctionnent sous vide dans le puits ou le raccordement et aspirent l'air du sol. Comme l'air du sol est souvent plus frais que l'air extérieur, la température intérieure s'en trouve réduite. C'est une idée utile pour un endroit sûr et froid. Cette approche présente plusieurs avantages :

- **Réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre** : Utilisant une source d'énergie renouvelable gratuite, les appareils électriques conventionnels peuvent s'appuyer sur l'électricité fossile, réduisant ainsi la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.
- **Amélioration du confort thermique et de la qualité de l'air** : la clim géothermique, elle ne fait pas juste du vent frais. Elle dégomme aussi les saloperies du sol, genre les trucs cracra et les odeurs bizarres. Résultat : t'as une atmosphère à l'intérieur qui sent bon le propre, et les gens sont pépères côté confort. C'est genre C'est genre le spa de la maison.
- **Adaptation aux variations climatiques** : La capacité de fonctionner tout au long de l'année, indépendamment des changements saisonniers, est l'un des principaux avantages de la ventilation géothermique. Il réchauffe en été et peut également contribuer au chauffage pendant les mois les plus froids, ce qui le rend adaptable à diverses conditions climatiques



Figure II.10 : La ventilation par des ventilateurs d'échappement géothermie [11]

II.3 Le système de refroidissement passif :

Le refroidissement géothermique passif est réellement connu. À l'exclusion du fait qu'il refroidit les bâtiments avec la différence de température du sol et de la surface extérieure, et le meilleur, c'est que vous n'avez pas besoin de modes néfastes. Essentiellement, ce qu'ils font est de se fier au sol ou aux murs pour révéler la chaleur accumulée ou générée. Ils économisent de l'énergie, offrent un environnement intérieur incroyablement bon et, en plus de cela, sont terminés pour la Terre.

II.3.1 échangeurs de chaleur :

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs essentiels utilisés dans diverses industries pour faciliter le transfert d'énergie thermique entre deux fluides sans les mélanger. Pour ce faire, une paroi solide à forte conductivité thermique est généralement utilisée pour séparer les fluides ou pour permettre un contact direct entre eux. Les moteurs à combustion interne, où le liquide de refroidissement du moteur passe dans les serpentins du radiateur, échange de chaleur avec l'air environnant pour refroidir le liquide de refroidissement et réchauffer l'air entrant, sont un exemple typique d'échangeur de chaleur.

Les échangeurs de chaleur sont largement utilisés dans le génie électrique pour des applications telles que les générateurs de vapeur, les ventilateurs, les échangeurs de chaleur

Pour l'eau de refroidissement et les condenseurs. Par exemple, un générateur de vapeur transforme l'eau d'alimentation en chaleur produite par le cœur d'un réacteur nucléaire. La vapeur d'eau se transforme ensuite en une turbine. Dans un échangeur de chaleur, le transfert de chaleur dépend de la convection de chaque fluide et de la conduction thermique à travers la paroi qui les sépare.

Les ingénieurs utilisent souvent quelque chose appelé "facteur U" pour étudier comment la chaleur se déplace dans les échangeurs de chaleur. C'est comme une sorte de formule à la Newton, mais pour la chaleur. En plus, ils se servent souvent de quelque chose qu'ils appellent la "différence de température moyenne logarithmique" (LMTD) pour voir à quel point la température influence le transfert de chaleur dans ces échangeurs [35].

II.3.1.1 Principal but et fonctions d'un échangeur thermique :

La fonction première d'un échangeur de chaleur, c'est de faire passer l'énergie thermique d'un fluide à un autre, surtout quand ils n'ont pas la même température. Ces échangeurs, ils font plein de boulots différents, notamment :

- Préchauffer ou refroidir des liquides ou des gaz, tels que l'air, afin de contrôler la température des fluides à des points spécifiques d'un processus.
- Fonctionner comme des récupérateurs thermiques, qui visent à maximiser la récupération de l'énergie thermique à partir de la chaleur perdue, sur la base de considérations énergétiques et économiques. Ce concept consiste à valoriser l'énergie thermique d'un procédé en permettant le transfert d'une capacité thermique maximale pour une récupération efficace de la chaleur.
- Les systèmes de réfrigération, qu'ils soient refroidis à l'air ou à l'eau, jouent un rôle essentiel dans la dissipation de l'énergie thermique non recyclable Provenant de divers processus industriels. Les capteurs ou émetteurs thermiques sont des composants cruciaux qui captent et distribuent l'énergie thermique aux utilisateurs finaux. Les capteurs solaires thermiques et les radiateurs domestiques, qui offrent un confort thermique aux bâtiments, sont les exemples les plus courants.
- Les systèmes d'humidification ou les condenseurs partiels sont utilisés pour

condenser la vapeur mélangée à des gaz non condensables, ce qui permet d'obtenir des flux de gaz appauvris en vapeur. Une application courante est la déshumidification de l'air humide dans les unités de traitement de l'air (AHU), avec des utilisations industrielles comprenant la capture des vapeurs organiques dans les Cryo condenseurs ou les condenseurs de fumées que l'on trouve couramment dans les installations de génie chimique.

- Les dispositifs appelés évaporateurs jouent un rôle crucial dans divers processus tels que la production d'énergie mécanique (cycles de Rankine, de Hirn) et les systèmes de réfrigération (cycle de compression, réfrigérateurs). Leur fonction consiste à évaporer le liquide pour faciliter ces processus, y compris la production d'énergie mécanique et frigorifique.
- Équipement utilisé pour congeler ou faire fondre des phases liquides ou gazeuses en utilisant une surface refroidie en dessous du point triple du fluide. Ces appareils ont diverses fonctions, notamment la séparation de substances, le stockage de l'énergie thermique (comme le stockage de glace ou de MCP) et la production de phases solides pour diverses applications. [36,37].

II.3.1.2 Échangeur de chaleur air-sol :

L'utilisation de dispositifs pour chauffer et refroidir les bâtiments en utilisant l'air et le sol a une histoire ancienne, comme les Romains qui avaient des systèmes appelés hypocaustes. Maintenant, on voit de nouveau des gens s'intéresser à cette méthode pour construire et économiser de l'énergie. L'échangeur air/sol aussi connu sous le nom de puits canadien.

En France (ou parfois "puits provençal" pour rafraîchir une maison), a bénéficié de récentes améliorations. Il fonctionne en utilisant l'air qui circule dans un tube enterré à une certaine profondeur pour la ventilation. Grâce à la stabilité de la température du sous-sol comparée à celle de l'air extérieur, l'apport d'air est plus modéré. En hiver, l'air est préalablement réchauffé avant d'être introduit dans la maison, tandis qu'en été, il est refroidi. C'est un système géothermique simple avec une faible consommation d'électricité, principalement dédiée au fonctionnement du ventilateur. Traditionnellement utilisé en Amérique du Nord pour prévenir le gel des habitations en hiver, il compense les pertes de

chaleur imposées par la réglementation française en matière de ventilation. En été, il contribue à abaisser les températures intérieures. Pendant les intersaisons, le système est mis hors service afin de ne pas refroidir la maison lorsqu'on cherche à la chauffer, et l'air entre directement de l'extérieur sans passer par le puits canadien [38].

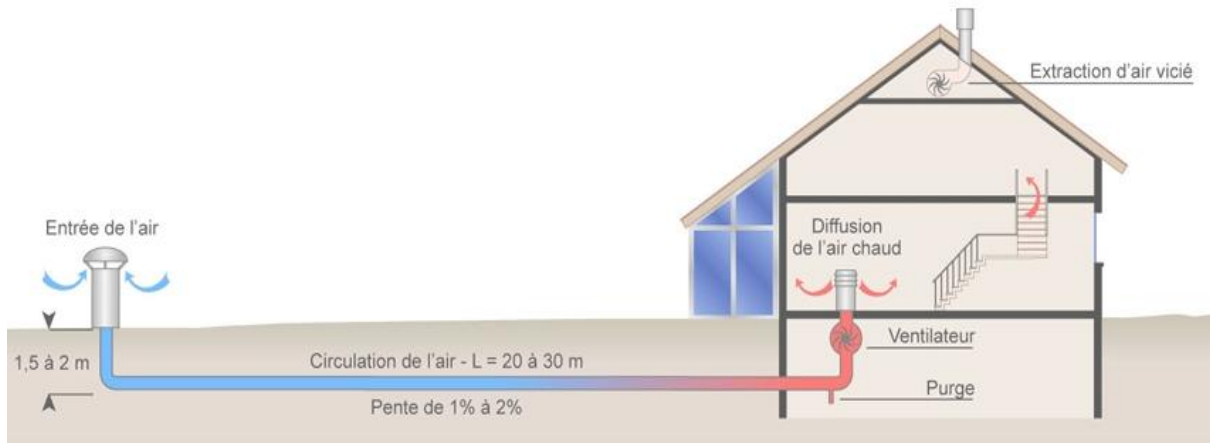


Figure II.11 : Schéma d'un échangeur air/sol [58]

II.3.1.2.1 Principe de fonctionnement du puits canadien :

La façon dont l'air circule dans les tuyaux enterrés, qui sont longs de 25 à 30 mètres et situés à des profondeurs d'un à trois mètres, est très importante. Ce système aide à contrôler les températures à l'intérieur des bâtiments. Ce truc aide à garder la température constante à l'intérieur des bâtiments, On parle de 10 à 18 degrés Celsius toute l'année, alors que dehors, ça peut être complètement fou, genre entre -5 et 45 degrés Celsius. C'est crucial pour que, peu importe le temps dehors, dedans, on reste cool (ou chaud, selon).

Ça évite les montagnes russes de température dans nos maisons, même si dehors c'est un bazar thermique [39]. En été, quand il fait 30°C dehors, le sol reste plus frais, environ à 15°C à deux mètres sous terre. Pour garder la maison fraîche sans utiliser la climatisation, on fait entrer de l'air frais à 20°C à l'intérieur, ce qui aide à baisser la température ambiante [40].

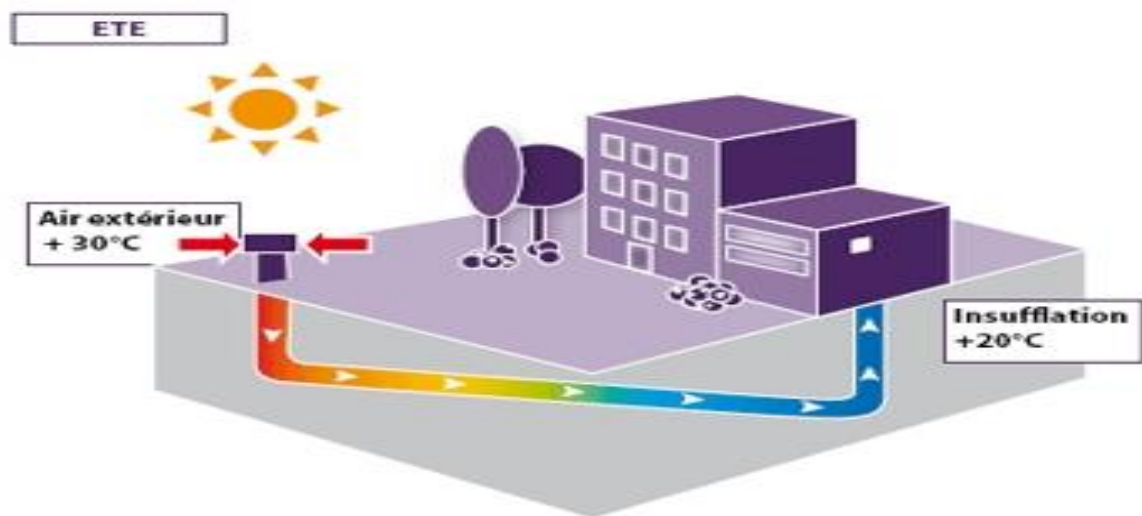


Figure II.12 : Description d'un puits canadien en été [11]

II.3.1.2.2 type les échangeurs air/ sol :

Comprendre les caractéristiques thermiques et physiques du sol, comme sa conductivité thermique, sa densité et sa diffusivité, est important pour concevoir les systèmes d'échange air/sol. De plus, savoir la profondeur de la roche mère, de l'eau et la nature du sol aide à choisir le bon type de système et à concevoir le système complet. Y'a deux principales catégories dans c'te domaine:

- **Boucle ouverte** : Aspirer l'air de dehors à travers des tuyaux pour aérer la maison [41].

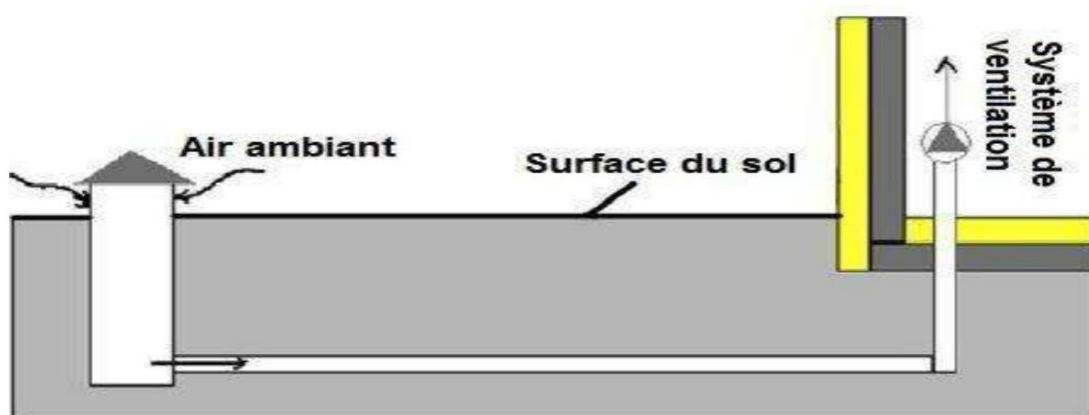


Figure II.13 : Echangeur air sol (système à boucle ouverte) [41]

- **Boucle fermée :** Beaucoup de bâtiments utilisent maintenant des tubes dans la terre pour recycler l'air. Ces tubes sont enterrés sous terre. La température là-bas ne change pas beaucoup toute l'année. Donc, en utilisant ces tubes, les bâtiments n'ont pas besoin autant de climatisation. Ils peuvent aussi utiliser la chaleur ou la fraîcheur de la terre pour chauffer ou refroidir.

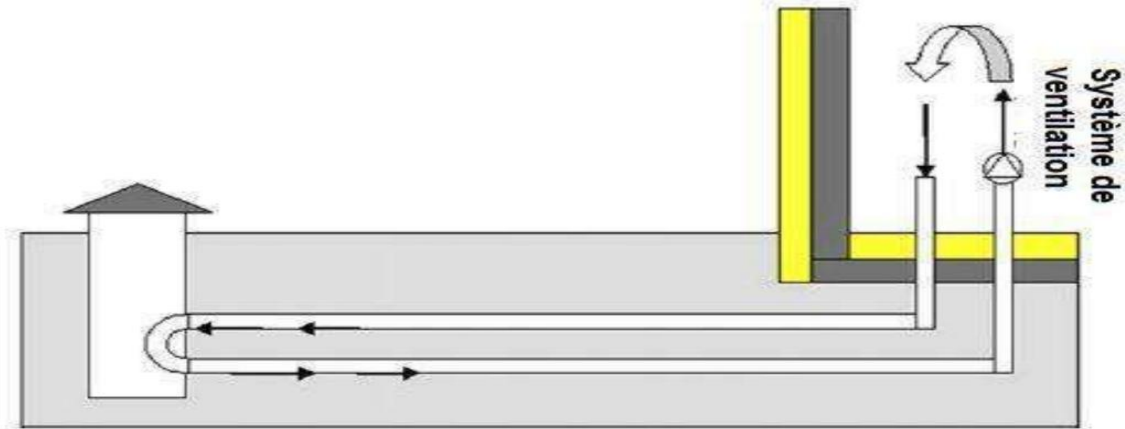


Figure II-14 : Echangeur air sol (système à boucle fermée) [41]

II.3.1.2.3 La forme d'échangeur air/ sol :

- **Echangeur Horizontal :**

Pour le moment, il n'y a pas de règles ou de normes pour aider à mettre en place les capteurs horizontaux dans les installations géothermiques. On peut seulement trouver des conseils et des recommandations pratiques [42].

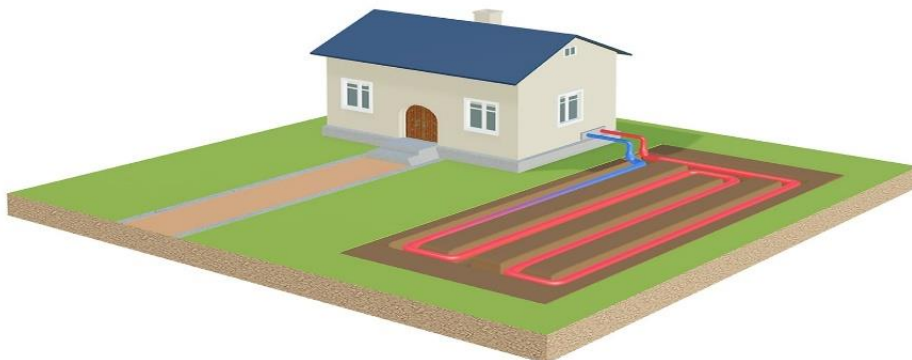


Figure II.15 : Echangeur air sol horizontal

- **Echangeur spirale :**

L'appareil qui échange la chaleur en spirale est fait de deux tubes ronds créés par deux plaques en métal enroulées comme une spirale. On règle l'écart entre ces tubes en fixant de petites pièces sur les plaques, en tenant compte de la quantité de liquide, de la taille des morceaux présents dans les liquides, et des pertes d'énergie. Ces petites pièces contribuent également à générer un mouvement tourbillonnant dans chaque tube, améliorant ainsi l'échange de chaleur [42].

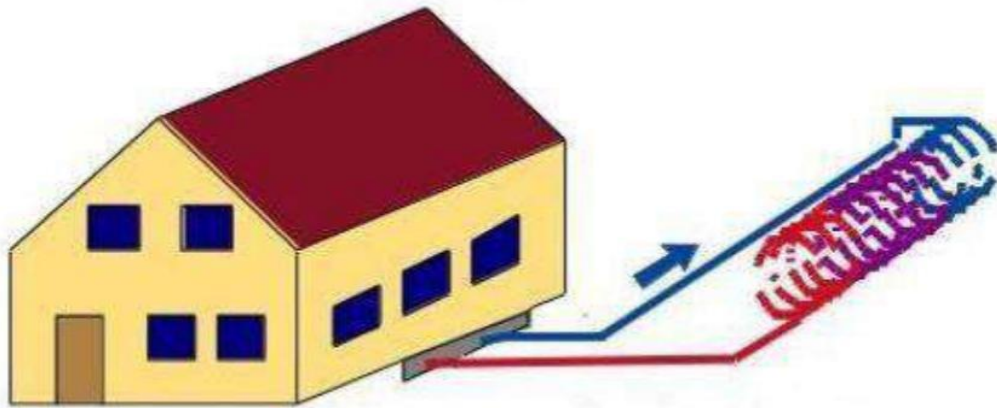


Figure II-16 : ECHANGEUR AIR/SOL SPIRALE [11]

- **Echangeur vertical :**

Les trous profonds, fermés avec du ciment, vont très loin sous terre dans les forages. La température là-bas reste la même toute l'année. À l'intérieur, il y a de l'eau spéciale qui circule. Ces trous prennent moins de place au sol que les capteurs qui sont étendus horizontalement.

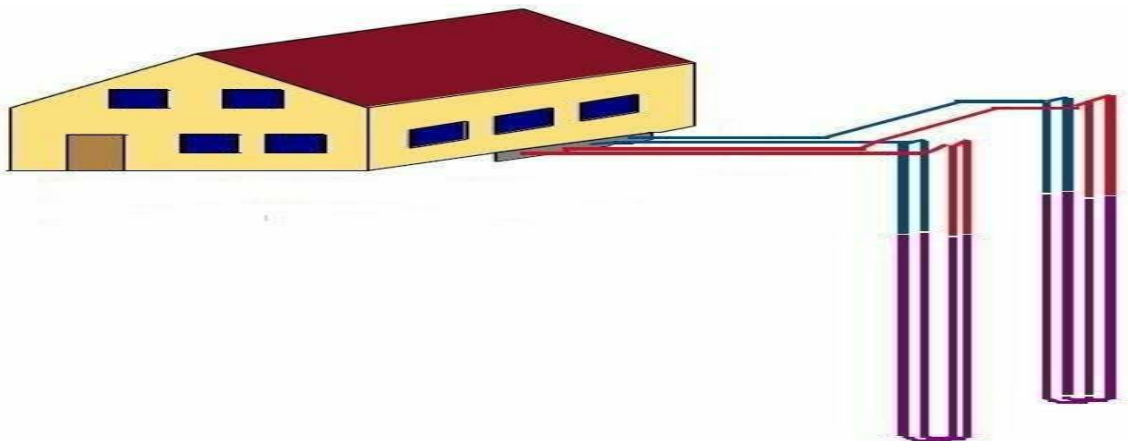


Figure II-17 : ECHANGEUR AIR/SOL VERTICAL [11]**II.4 Conclusion :**

La plupart de l'électricité et de la chaleur que nous utilisons aujourd'hui viennent de sources qui s'épuisent et polluent notre air ou notre eau. Certaines de ces sources émettent même des choses qui sont très mauvaises pour notre santé, comme le charbon ou l'uranium! Il existe d'autres options plus propres et plus sûres. Par exemple, la lumière du soleil ou de vent. Ou même la chaleur qui, simplement, se trouve sous terre. C'est ce qu'on appelle l'énergie géothermique. Puisque cette chaleur ne s'épuise jamais, elle peut nous aider à garder notre maison chaude ou fraîche avec beaucoup moins de bruit à notre planète. En fait, ce serait la prochaine étape probable de nos jours dans les endroits très chauds comme les déserts pour réduire notre consommation car les systèmes de refroidissement sont responsables d'une grande partie de l'électricité consommée d'électricité et nous aidé à garder environnement.

.

Chapitre III:
Impact environnementaux
potentiels liés à la
géothermie

III.1 INTRODUCTION :

C'est sûr qu'en comparaison avec les vieilles méthodes de production d'énergie, la géothermie ne fait pas trop du mal à l'environnement. En fait, bien que les énormes dégâts puissent survenir pendant la construction d'une centrale, une fois que la centrale fonctionne, surtout si la technologie binaire est utilisée, les dégâts sont presque invisibles. Mais, évidemment, il existait des risques. C'est pourquoi nous devons réfléchir à l'impact sur la nature pour que nous puissions le contrôler.

III.2 Impacts sur l'environnement naturel :

III.2.1 Air :

Plusieurs formes de production d'énergie ont un impact considérable en émettant des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les équipements de géothermie Les flashs n'en sont pas moins émetteurs de vapeur, de dioxyde de carbone et de sulfure d'hydrogène, mais aussi, dans certains cas, d'autres substances potentiellement toxiques comme du méthane, du mercure, du radon, De l'ammoniaque et du bore, selon la composition des fluides prélevés [43,44,45,46] .Par exemple, dans le champ géothermal de Cerro Prieto, au Mexique, des études ont révélé que de 2004 à 2012, de 10 400 tonnes de sulfure d'hydrogène, 9 060 tonnes de méthane et 450 500 tonnes de dioxyde de carbone ont été produits en moyenne [46]. De plus, lors du refroidissement à l'eau il est possible que l'évaporation entraîne de faibles émissions de particules. La vapeur se condense [47]. Cette pollution peut entraîner une grave dégradation de l'environnement naturel [48]. Effectivement, les champs hydrothermaux contiennent du sulfure d'hydrogène qui est nocif pour la faune aquatique à des concentrations de 20 ppm. Cette substance a également une odeur particulière à de faibles concentrations, elle est plus lourde que l'air, ce qui favorise son accumulation dans les dépressions, et elle est inflammable et toxique. Il est possible de diminuer les émissions dans l'environnement en utilisant des condenseurs ou en oxydant [46]. Néanmoins, en comparaison avec les autres formes d'énergie, les émissions des centrales géothermiques, notamment pour les centrales géothermiques, sont plus élevées. Les binaires en circuit fermé présentent une vulnérabilité [43]. Effectivement, comme illustré dans le Tableau 1, les émissions de CO₂ et de NO_x pour l'ensemble du cycle de vie d'une centrale géothermique sont similaires à celles de la production d'énergie solaire avec respectivement 79 g/kWh et 0,28 g/kWh. De son côté, les émissions De SO₂ sont

extrêmement faibles, se concentrant principalement sur l'énergie éolienne ou une petite centrale. Hydroélectrique, avec une consommation de 0,02 g/kWh. Néanmoins, il y a un doute quant à l'apport de CO₂ des centrales géothermiques. En fait, certaines recherches ont tendance à démontrer que le CO₂ présent dans les fluides serait également rejeté dans l'atmosphère de manière naturelle et que les centrales ne causeraient pas d'augmentation des émissions, tandis que d'autres études suggèrent que certaines centrales augmenteraient jusqu'à 6 fois les émissions de CO₂ [49]. Il faudrait donc s'en tenir à cette question. En outre, les centrales géothermiques disposant de deux circuits fermés - Ces types, qui sont techniquement réalisables uniquement dans un contexte québécois de géothermie profonde, ont, de leur côté, des niveaux d'émission minimales ou nuls pendant les opérations pour toutes les substances mentionnées ci-dessus [44]. Étant donné que les fluides ne sont jamais en contact avec l'air. De plus, le forage et la construction de la centrale à l'aide de diesel génèrent des émissions polluantes et contribuent à la production de gaz à effet de serre [50].

Selon eux, environ 90% des émissions totales de gaz à effet de serre seraient causées par la construction d'infrastructures. Les activités souterraines se produiraient entre 2 et 10% environ lors de la construction des infrastructures en surface. La plupart des impacts sont donc encore une fois causés pendant la construction, le forage et les phases de tests, notamment par l'utilisation de grandes quantités de diesel pour faire fonctionner la machinerie et par le rejet de gaz indésirables lors du forage ou des tests de débit [44]. Cette affirmation est d'autant plus valable pour les centrales binaires qui, comme nous l'avons vu, ne génèrent presque rien d'émissions lors des activités. En résumé, la géothermie ne produit que très peu, voire pas du tout, de gaz à effet de serre et de gaz toxiques dans l'air. Les émissions principales se produisent pendant les étapes de construction et de test, puis elles sont très faibles pour les systèmes traditionnels et presque nulles pour les centrales binaires. D'ailleurs, le faible niveau d'émissions est l'un des principaux atouts de l'énergie géothermique [47]. Il est même suggéré par certains auteurs que du CO₂ dissous dans l'eau et réinjectée dans le réservoir pourrait permettre de réduire l'apport en gaz rejetés dans l'atmosphère [49].

Tableau III.1 : Émissions de gaz à effet de serre pour l'ensemble du cycle de vie de différentes sources d'énergie. Tiré de l'Agence Internationale de l'Énergie (1998) [55]

Sources d'énergie	Gaz à effet de serre		
	CO ₂	SO ₂	NO _x
	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Charbon (bonnes pratiques)	955	11.8	4.3
Pétrole (bonnes pratiques)	818	14.2	4.0
Gaz naturel	430	-	0.5
Petit hydroélectrique	9	0.03	0.07
Grand hydroélectrique	3.6-11.6	0.009-0.024	0.003-0.006
Éolien	7-9	0.02-0.09	0.02-0.06
Solaire photovoltaïque	98-167	0.2-0.34	0.18-0.30
Solaire thermique électrique	26-38	0.13-0.27	0.06-0.13
Cultures énergétiques	17-18	0.07-0.16	1.1-2.5
Géothermique (moyenne pour tous les types)	79	0.02	0.28

III.2.2 Eau :

L'eau, c'est super sensible aux changements dans l'environnement, donc quand on veut commencer un nouveau truc, faut vraiment penser à comment ça va impacter l'eau. Comme pour tout ce qui concerne la production d'électricité avec la géothermie, les gros soucis ont l'air de surgir surtout quand on construit et qu'on fore. Pendant ces opérations-là, les conséquences peuvent vraiment varier selon le genre de centrale qu'on a en tête.

III.2.2.1 Qualité :

Diverses matières polluantes sont utilisées à divers stades de la création de l'énergie géothermique. En cas de rejet, il est possible que la surface de l'eau ou des eaux souterraines soient polluées. Il est donc essentiel de se préparer à une telle éventualité pour être en mesure d'intervenir rapidement et éviter de graves répercussions sur la santé publique ou sur certains écosystèmes. Premièrement, il existe le forage même et la construction, pour lesquels des quantités importantes de diesel sont utilisées pour produire de l'énergie pour la machinerie et des substances chimiques pour certains processus, tels la

boue activée qui extrait les déchets. Des acides sont également utilisés, ou d'autres substances polluantes potentielles, si l'exigence exige une stimulation. Lors du transport de la manutention ou de l'utilisation de ces substances, il est possible que celles-ci se déversent et contaminent l'eau de surface par ruissellement ou le sol et l'eau souterraine par infiltration [43]. Pendant l'opération, les risques de pollution de l'eau concernent principalement les accidents ou les dommages. En effet, les eaux géothermales peuvent contenir des tas de minéraux toxiques ou d'autres substances, car elles sont composées de quantités variables. Par exemple, ils peuvent contenir en petites quantités. CO₂, SO₂, ammoniac, méthane, chlorure de sodium, bore, arsenic, plomb, cadmium, fer, zinc, manganèse, lithium, aluminium, mercure (concentration) [43]. En outre, des études ont montré que le toluène, le xylène, l'éthylbenzène et le Rn-222 sont émis à des concentrations très faibles. Ces eaux n'entraîneraient très probablement jamais les eaux superficielles à être en contact humain [48]. L'installation de puits et le transport de ces eaux pour la génération d'énergie offrent un nouveau chemin de migration vers la surface des fluides susceptibles d'être pollués et / ou toxiques. L'installation géothermique de Cerro Pietro illustre comment ce type de contamination est possible, avec 88% des saumures résiduelles stockées dans un lagon d'évaporation couvrant 7,2 milles carrés. Par conséquent, ce qui contamine le sol et les aquifères superficiels à proximité. Principalement en raison de la salinité élevée des fluides géothermaux (60 000 ppm de solides totaux dissous) [48]. De plus, les eaux géothermiques ont également une température assez élevée lorsqu'elles sont déversées, elles peuvent donc affecter celle des cours d'eau et altérer les habitats [47]. Ainsi, il est impératif que les eaux souterraines soient maintenues à l'écart des ressources en surface jusqu'à ce qu'elles soient réinjectées, en les stockant de manière appropriée dans des bassins doublés par une membrane imperméable ou en les traitant avant le rejet dans l'organisme [43]. Les fluides peuvent également être réinjectés pour éliminer le transport des fluides et quantités nécessaires. Les centrales peuvent être binaires, Les centrales en circuit fermé, par contre, ne quittent pas le système, à moins d'accidents graves et réinjectent directement l'eau géothermique. Ce type de centrale élimine effectivement les risques d'empoisonnement par le stockage, le traitement et le transport de l'eau géothermique. D'autre part, il est possible que l'eau souterraine soit exsufflée par un coffrage non étanche ou glissé dans l'eau en cas de coffrage en toutes les centrales. À noter qu'aucune contamination de l'eau par coffrage ne s'est jamais manifestée, mais le danger est grand [47]. L'intégrité des coffrages est donc

essentielle pour empêcher ce scénario. De plus, les coffrages étanches sont recommandés Jusqu'à la profondeur du réservoir géothermique pour éviter les infiltrations du fluide dans Les zones supérieures [43] Par conséquent, il est nécessaire que la conception de la centrale prenne en compte les différentes sources possibles de contamination pour éviter les fuites et permettre une intervention rapide en cas d'accident, tels que l'ajout de valves d'isolement pour un tuyau défectueux. En outre, des plans d'urgence doivent être établis et les ressources nécessaires rendues disponibles en cas d'accident. En outre, un suivi en temps réel doit être effectué pour empêcher le risque de se développer dans un problème majeur. Ces procédures aideront à réduire la probabilité que toute conséquence soit à l'encontre d'autres utilisateurs de la ressource compromise. D'autre part, la production de ces centrales entraîne des risques environnementaux et des risques liés à l'exposition à ces institutions les ressources en eau. L'emploi de quantités considérables d'eau, Plus précisément lors de la phase de développement, et le risque d'un déversement de substances potentiellement toxiques pourrait mettre en péril la qualité et la quantité de la production. Toutefois, différentes mesures relatives au design, à la planification, au suivi et aux bonnes pratiques de gestion des fluides permettent de diminuer ce risque et d'assurer une protection adéquate des ressources en eau.

III.2.2.2 Quantité :

Si, lors de la survenance des trous et des fractures, des forages et des fracturations se produisaient, l'eau serait injectée en grandes quantités, surtout si le réservoir n'est pas déjà plein. Dans le cas d'une très grande perméabilité du réservoir, il peut être difficile de connaître les quantités d'eau nécessaires. La condensation en centrales de refroidissement par eau nécessite également une grande quantité d'eau.

De plus, les centraux flashes nécessitent de grandes quantités d'eau pour remplacer l'eau, convertie en vapeur lors de la réinjection [43][45][47] La moitié du liquide pompé a été évaporée dans l'air [47]. Cependant, il n'est pas nécessaire de consommer de l'eau de qualité. Par exemple, chez les geysers aux Etats-Unis on réinjecte de l'eau usée traitée pour maintenir la pression dans le container. En outre, les centrales binaires, ce qui sont fermées, et qui sont généralement refroidies par de l'air, ne perdent pratiquement pas d'eau, donc généralement pas besoin d'un supplément d'eau [43] [45] [47] De manière et qui sont généralement refroidies par de l'air, ne perdent pratiquement pas d'eau donc la

disponibilité d'eau pour l'eau des écosystèmes, pour les loisirs ou pour l'eau potable. Dans les deux cas dès que l'eau est introduite dans le réservoir elle n'est plus en mesure de circuler dans le milieu aquatique il convient toutefois de souligner que par rapport à d'autres moyens de production d'énergie, les besoins en eau pour tout le cycle de vie d'une centrale géothermique sont faibles (de 0,01 à 0,73 gallons par kWh contre 0,26 à 1,53 gallons pour une centrale au charbon, 0,24 à 0,98 gallons pour une centrale au charbon). La consommation de gaz naturel varie de 0,07 à 1,12 gallons par kWh pour une centrale solaire. Les activités d'une centrale géothermique ne sont généralement pas soumises à des problèmes d'utilisation d'eau, et en particulier lorsqu'il s'agit d'une centrale binaire. Avant d'effectuer les prélèvements, il faut cependant s'assurer que les quantités d'eau requises pour les besoins de la centrale ne compromettent pas les besoins des autres activités qui dépendent de la même source d'eau. Il faudra prendre en compte tous les autres usages dans les analyses et les plans de gestion des eaux, ainsi que la saisonnalité, pour éviter les prélèvements pendant les périodes d'étiage. D'autres méthodes de refroidissement peuvent aussi diminuer les besoins en eau de la centrale, telles que l'emploi de concentrés géothermiques ou d'air [45].

III.2.3 Flore et faune :

La centrale géothermique tout comme toute construction se fait sur un environnement et impacte sans l'ombre d'un doute sur l'écosystème. Les activités telles que le déboisement du site et des routes d'accès ainsi que le forage des puits entraînent une perte végétale considérable [43]. Ces changements de la structure superficielle affectent les habitats et peuvent éventuellement exclusivement contraindre certains organismes à l'extérieur. De plus, dans le cas des centrales à sec, l'air peut transporter des minéraux. En Californie, des minéraux provenant des tours de refroidissement ont été retrouvés 1200 m sous terre. En outre, en raison de cette activité, la végétation et les rivières ont été affectées. Encore une fois, ce n'est pas une préoccupation pour les centrales au binaire car les minéraux ne sont jamais exposés à l'atmosphère. En outre, l'un des atouts des centrales géothermiques par rapport à d'autres types de centrales réside dans la possibilité de reboiser une partie de la surface du terrain après la réalisation des forages. Il est donc conseillé de faire des études de végétation et de mettre en place un plan de reboisement avant de commencer des projets afin de réduire au minimum l'impact sur la faune et la flore locale.

III.2.4 Déchets solides :

Même si l'énergie géothermique ne produit pas beaucoup de déchets solides, il peut être l'aspect le plus ciblé qui a un impact négatif sur l'écosystème. Le forage entrainera les boues et les débris, qui peuvent être mélangés avec des substances polluantes [43] [47]. C'est une action étendue, notamment pour les centrales thermiques à vapeur. Il existe des centrales en binaire que les substances potentiellement polluantes en taille peuvent être en contact avec l'environnement naturel en surface. Par conséquent, ces substances doivent être conservées sans fuir pour la sécurité [47]. Les déchets solides générés par les centrales géothermiques sont très faibles lorsque l'installation est en opération, car les substances sont recyclables dans le système ou n'entrent jamais en contact avec les corps d'eau, la terre ou l'air, ou dans de si faibles concentrations. Pour être problématiques. Il est possible de déverser des substances extraites des fluides, telles que des minéraux dissous, des sulfures, des silicates ou des carbonates, en cas d'accident. Il est donc essentiel de prendre connaissance des substances potentielles présentes dans les fluides et de mettre en place un plan de mesures d'urgence adéquat en cas de déversement accidentel. Une autre source de déchets solides résulte de l'accumulation de substances radioactives sur les filtres, qui peut se produire même dans des concentrations diluées après la réaction de l'eau avec la roche. Il est nécessaire de les retirer et de les stocker dans un site contrôlé pour éviter une contamination supplémentaire des travailleurs et de l'environnement naturel. A Soultz-Sous-Forêts, les zones de site avec élimination et stockage des matières radioactives collectées et traitées ont été zonées. En outre, une coopération avec l'agence nationale française de gestion des déchets nucléaires est établie; la collecte, la caractérisation et le traitement ultérieur de ces déblais sont également achevés. Les déchets sont à manipuler avec précaution après le traitement des fluides. Lorsqu'il s'agit de traiter les fluides, les déchets solides constituent une autre source de déchet. On estime que la quantité est égale à 1 kg par m³ d'eau traitée. Ces déchets peuvent contenir des métaux lourds, de ce fait, ils sont préjudiciables à l'écosystème [43]. L'extraction des puits pour produire de l'énergie par géothermie peut occasionner des déchets solides qui risquent de détruire la nature. Il est donc recommandé de les identifier et de les traiter correctement pour éviter la contamination par ruissellement ou infiltration. Bien que les quantités de déchets solides dérivant d'autres sources soient en général faibles, il est important de les connaître, car les

Déchets solides dissous peuvent être toxiques et il est donc impératif de contrôler leur gestion. De plus, des mesures doivent être prises en cas de déversement accidentel.

III.2.5 Sol :

Forer des puits pour la géothermie peut avoir des répercussions potentiellement significatives sur le sol et le sous-sol. Ces effets environnementaux sont distincts des autres, car le risque pour les organismes vivants en surface est moindre, mais il est tout de même nécessaire de les mentionner ici.

III.2.5.1 Glissements de terrain :

La production d'électricité par géothermie comporte un risque environnemental en termes de sismicité, pouvant engendrer des mouvements de terrain. En effet, ces opérations peuvent accroître l'activité sismique, ce qui, dans des conditions propices, peut provoquer des mouvements de terrain. Il est rare de se retrouver face à ce type d'événement, mais il est toujours essentiel de réaliser une caractérisation géologique adéquate avant le début du projet, et de localiser le site et les puits afin d'éviter toute interaction avec des failles déjà présentes [47].

III.2.5.2 Subsidence :

La subsidence fait référence à l'affaissement de la surface du sol, pouvant varier de quelques centimètres à quelques mètres au fil des ans. Il s'agit d'un processus lent et très répandu, se produisant généralement lorsque les prélèvements d'eau souterraine dépassent la recharge naturelle. Dans les zones tectoniquement actives ou dans les réservoirs constitués de sables non consolidés, de limon, d'argiles ou de graviers, la subsidence est couramment observée. L'affaissement peut impacter la stabilité des bâtiments dans la région, y compris celle des installations géothermiques.

Selon certains auteurs, on observe des signes de subsidence dans presque tous les domaines de production d'énergie géothermique, à divers niveaux. Cependant, d'autres écrivains affirment que la réinjection des fluides permet de maintenir la pression dans le système et d'éviter la subsidence. Par exemple, des anomalies tissulaires. Niveaux de sol d'environ 18 cm par an ont été observés dans le champ géothermal de Cerro Pietro, où il est connu que le volume de vapeur extrait dépasse largement la réinjection. L'exploitation des fluides

géothermiques est influencée par la répartition spatiale et temporelle de la subsidence, laquelle évolue en fonction du champ géothermique. Cette subsidence semble être confinée géographiquement par un réseau de failles. Un exemple notable et probablement le plus significatif de subsidence est observé au site de Wairakei, en Nouvelle-Zélande, où ce phénomène a causé des affaissements de plusieurs mètres de sol. Son amplification résulte d'une fracture naturelle profonde du système de la faille alpine qui traverse le terrain. La subsidence dans cette région a donc affecté les infrastructures, les chemins de fer, les canaux d'irrigation et les terrains des villages voisins. Les effets de ce phénomène peuvent être réduits en maintenant la pression dans le réservoir par réinjection. Cependant, si la subsidence est due à la perte de chaleur provoquant la contraction des roches, cette méthode ne peut pas y remédier. Il peut être difficile de distinguer la subsidence d'origine anthropique de celle qui se produit naturellement, surtout dans les régions à activité tectonique. Selon la littérature, maintenir la pression du système par réinjection, comme c'est le cas pour les centrales binaires, peut réduire la subsidence à un niveau minimal, voire nul. Cette approche aide à éviter des modifications importantes de la structure en surface, ce qui contribue à minimiser les impacts sur les infrastructures existantes

III.2.5.3. Séismicité :

L'un des principaux risques associés à la construction de systèmes géothermiques en roche fracturée (EGS – Enhanced Géothermal System) est l'augmentation potentielle de l'activité sismique locale.

il s'agit même du seul défi majeur. En effet, la stimulation du réservoir par fracturation hydraulique, la manipulation de l'eau et la réinjection de fluides peuvent entraîner une augmentation de l'activité sismique locale. Ces différents processus hydromécaniques se produisent lors des échanges de fluide et au niveau des plans de faille, généralement en exploitant la pression interstitielle [51] [45]. Par exemple, l'interaction entre des fluides refroidis et la roche à température plus élevée peut provoquer une contraction des surfaces de faille, ce qui peut entraîner des mouvements le long des failles. En raison de l'interaction entre les fluides refroidis et la roche chaude, la contraction thermique peut provoquer des fractures et accroître la sismicité. De plus, l'injection de fluides peut générer de nouvelles fissures dans la roche lorsque la pression augmente. L'introduction de fluides extérieurs au système, avec des propriétés différentes des fluides du milieu, peut également

entraîner des changements chimiques sur les surfaces des failles, modifiant ainsi le Coefficient de friction de ces surfaces [45]. La conductivité et le risque de séisme semblent être fortement influencé par les fractures naturelles préexistantes. Certains écrivains soutiennent que les premières injections perturbent le système et augmentent la sismicité, ce qui établit un équilibre où l'activité sismique demeurera stable, voire diminuera.

On a donc été prouvé que l'administration d'une injection augmente la fréquence des microséismes, c'est-à-dire des tremblements de terre mesurant moins de 3 sur l'échelle de Richter, souvent inaudibles pour les êtres humains [51] [44] [45]. Pendant les périodes d'injection, le nombre de microséismes a augmenté de façon significative lors de tests préliminaires d'injection à Berlin, au Salvador. Cependant, la question de l'induction de tremblements de terre de plus grande ampleur par la fracturation hydraulique, les prélèvements d'eau et la réinjection demeure encore ouverte. Il est difficile de prouver le lien entre la production d'électricité par géothermie et les séismes de plus de 3 sur l'échelle Richter, car les centrales géothermiques sont souvent situées dans des zones où l'activité sismique est naturelle. Selon certains auteurs, il est possible que l'injection provoque des séismes de plus grande ampleur, tandis que d'autres suggèrent que ce sont plutôt la mise en place et l'opération qui en sont responsables. L'utilisation d'un système géothermique développé a peu d'impact sur la fréquence des séismes majeurs [44]. Le système géothermique développé de Soultz-Sous-Forêts, en France, est souvent cité en exemple : plus de 20 stimulations importantes ont été réalisées sans augmentation significative de l'activité sismique. De plus, bien que les études réalisées sur les installations du champ géothermique des Geysers, aux États-Unis, montrent une augmentation de l'activité sismique peu ample avec l'injection, la fréquence des événements plus ample reste stable depuis 1985 – malgré d'intensification de l'injection. L'auteur considère qu'il est possible de soutenir que même en cas d'un séisme de plus de 3 MI, le séisme n'est pas capable de provoquer des dommages à l'infrastructure qui a été construite, car la fréquence de tels séismes serait trop élevée. Un séisme a été causé par des activités liées à la production d'électricité à partir de la géothermie et il a eu un impact sur la construction humaine [52]. La fréquence et l'ampleur de plusieurs de ces séismes peuvent susciter des inquiétudes parmi la population locale. Landau, par exemple, en Allemagne le régulateur a réduit les pressions d'injection pour arrêter les activités sismiques enregistrées, provoquant des controverses publiques. De même, un tremblement de terre de magnitude 3.4 près d'un puits d'injection à Bâle, en Suisse, a causé de l'effroi dans l'ensemble de la population

locale et a interrompu les travaux d'exploration d'un projet de construction de centrale, sans aucun dommage humain [52].

Il apparaît que les tremblements de terre majeurs se produisent à la périphérie de la zone d'injection, souvent bien après qu'elle a cessé. La plupart des scientifiques affirment maintenant que seuls les tremblements de terre dévastateurs surviendraient dans des régions délimitées par un réseau de failles largement développé ou un grand nombre de failles actives. La nature de leur évolution n'a pas encore été enregistrée, mais des études de données filtrant la valeur des séismes majeurs, commençant à 6 et se terminant par "indéfini", indiquent à quelles profondeurs ils se produisent, dans aucune circonstance, à 5-10 km ou plus. Seulement là, vous pouvez faire un plein d'énergie pour déplacer les masses de roches occupant des séismes aussi importants [52].

D'autres auteurs, qui proposent des mesures ou des études pour diminuer l'impact, tout en augmentant, quantitativement et qualitativement, le nombre d'établissements proposant une cure, dans le même temps que jugent, quant-à-eux, la réduction du risque de séisme associée : développer de nouvelles méthodes de stimulation « douces » qui augmenteraient le volume du réservoir sans augmenter le risque de séisme; imposer des méthodes de suivi de l'activité sismique, avant le commencement des activités; accompagner tout cela d'un système d'instruments de mesure efficace, de suivi en temps réel de l'activité macrosismique et de modélisation accompagnée à chaque étape, de la fracturation à la mesure. Le suivi pourra servir de base à un système d'alerte précoce pour les séismes. Ils proposent, de leur côté, une méthode en trois étapes pour minimiser le risque de séisme. Dans un premier temps, il est recommandé de limiter la portée des opérations de fracturation hydraulique à quelques centaines de mètres afin de réduire l'activité sismique induite. Ensuite, il est conseillé d'éviter les zones densément peuplées, ainsi que les régions à activité sismique naturelle élevée, et de placer les réservoirs à au moins un kilomètre des failles régionales ou majeures. Enfin, il est possible d'utiliser des modèles probabilistes pour évaluer la stratégie de développement la plus efficace. Par exemple, à Bâle, la stimulation de zones de fracturation plus petites en plusieurs étapes aurait présenté un profil de risque plus favorable que la stimulation massive.

Par ailleurs, il est indispensable d'effectuer des études géologiques et tectoniques afin de sélectionner un site pour implanter les centrales géothermiques à une distance sécuritaire des failles majeures, car des failles préexistantes pourraient accroître le risque de

déclencher des séismes plus importants. Certains auteurs considèrent également que la micro sismicité engendrée par la stimulation d'un réservoir pourrait constituer une opportunité pour favoriser le développement du réservoir. En effet, une méthode adéquate pourrait permettre de stimuler un volume de roche plus important par la dilatation causée par les injections.

L'exploitation des systèmes géothermiques pour la production d'électricité semble provoquer une augmentation de l'activité sismique de faible magnitude. Cependant, des études supplémentaires sont nécessaires pour comprendre le lien entre les événements sismiques de plus grande ampleur et l'injection ou la réinjection de fluides. Les événements ressentis semblent être une caractéristique des systèmes géothermiques en question, mais le comportement sismique à long terme de ces systèmes reste non documenté. Bien que certaines mesures aient été prises pour atténuer l'impact de la construction et de l'exploitation des centrales géothermiques sur la sismicité régionale, des recherches approfondies sont nécessaires pour proposer de nouvelles stratégies.

D'autre part, il apparaît que si les tremblements de terre provoqués par la production d'électricité géothermique n'affectent pas les édifices, ils risquent d'alarmer la population. Par conséquent, dès le début de la décision, il est essentiel de l'informer à la fois des dangers et des avantages de la construction d'une centrale géothermique.

III.3 Chaleur non renouvelable perdue :

Une perte non durable de chaleur est l'un des moins étudiés effets secondaires de la production d'électricité géothermique. Généralement, l'opération est réalisée en pompant ou en injectant une grande quantité d'eau chaude dans les formations profondes. La chaleur fait s'évaporer un autre fluide, puis l'eau de refroidissement est pompée en sens inverse à travers le liquide refroidi pour reprendre la pression tout en étant réchauffée par la roche, qui est ensuite réutilisée. On peut refroidir le système à long terme en remplaçant de grandes quantités d'eau chaude par des fluides refroidis ou provenant de la surface. [44][48]. Ce phénomène peut résulter d'une surexploitation, comme c'est le cas dans le champ géothermique de Cerro Prieto, Mexicali, Mexique, où le réservoir est en déclin [48]. Il est probablement le seul domaine où les centrales binaires ont un impact plus significatif que les autres types de centrales. Selon l'Association internationale de géothermie, certains Réservoirs sédimentaires et systèmes géothermiques ouvragés doivent donc être considérés

comme des ressources non renouvelables [44]. Cependant, selon certaines projections, le réservoir pourrait retrouver 95% de son état initial après l'arrêt des opérations, sur une échelle de temps similaire au cycle de vie d'une centrale. Autrement, le réservoir ne pourrait retrouver son état initial que sur une durée infinie [46]. Pour améliorer la gestion de la ressource, il serait envisageable de mettre en place des plans fixant les niveaux de production géothermique acceptables à l'échelle nationale ou régionale pour des périodes déterminées, éventuellement sur plusieurs centaines d'années. Cela permettrait de modérer les ouvertures et les fermetures des centrales afin de maintenir un niveau de production durable. Il est important de réduire au minimum la baisse prématurée de la température et de la pression afin d'assurer une gestion durable du réservoir grâce à l'utilisation de stratégies de production et d'injection adaptées et flexibles. Une méthode efficace consiste à se concentrer progressivement sur une ressource connue. En utilisant les connaissances et les simulations des premières étapes, il est possible de planifier des forages plus profonds en les orientant vers les zones les plus appropriées, tout en gérant l'injection pour optimiser le maintien de la pression et limiter la perte de chaleur immédiate.

III.4 Aménagement du territoire :

III.4.1 Bruit :

Comme pour la plupart des autres activités, la construction et l'exploitation de la centrale géothermique engendreront des niveaux de bruit susceptibles d'être nocifs. Les niveaux les plus élevés, qui peuvent atteindre 115 dBA, sont générés au cours des opérations de forage, de stimulation et de test. Cet effet est donc temporel en vertu du présent argument, même s'il peut toujours être atténué grâce au recours à des sourdines. Comme pour l'effet temporel, la production électrique à 900 m de la centrale serait d'environ 54 à 83 dBA selon la prévision. De plus, les principales sources de bruit seraient respectivement le transformateur, la turbine et la tour de refroidissement, en particulier si la conduite est à air. Ainsi, c'est un argument temporel, mais il peut aussi être atténué avec la distance. Divulguer de la vapeur en cas d'urgence impliquait des niveaux de bruit plus élevés, il est donc possible qu'une telle perturbation soit périodique. Toutefois, les mesures d'atténuation telle que les sécheresses et des programmes de reboisement bien situés pourraient réduire le niveau de bruit en dessous de 65 dBA, il ne serait donc pas une nuisance pour les voisins. Au titulaire du site, les niveaux de bruit ne faisaient pas plus de

28 dBA, ce qui, en soi, est à peine un chuchotement lorsque Signal d'autres autrices. La pollution sonore n'était donc pas un problème majeur dans l'utilisation de l'énergie géothermique. En fait, il était facile de le maintenir en dessous de ce qui était tolérable dans de nombreux cas, même si cela nécessitait en utilisant des aménagements appropriés dans certaines situations. Les phases préliminaires aux opérations nécessitent une attention particulière à l'impact sonore des activités.



Figure III.1 : Exemples de centrales géothermiques. A : Installations de conduits au sol près de la centrale de Wairakei, Nouvelle-Zélande. B : Tours de refroidissement, centrale de Rotokawa, Nouvelle-Zélande. C : centrale de Wairakei, Nouvelle-Zélande. D : centrale de Nesjavellir, Islande [55]

III.4.2 changements dans le paysage :

Les centrales géothermiques peuvent, en raison de leur taille, impact sur le visage d'un Pays. Les pipelines, les tours de refroidissement, les bassins de stockage, le bâtiment et les Lignes de transmission sont de grandes infrastructures qui se dressent facilement dans le

paysage [45] même à une certaine distance. Les vastes zones de routes ont souvent besoin d'être construites, et les zones boisées doivent parfois être nettoyées pour ouvrir un espace pour les installations.

De plus, Le recours aux véhicules, l'équipement de construction, et les forages secourus causeront un problème visuel temporaire. En outre, il y a la pollution lumineuse en raison de l'éclairage la nuit, qui pourrait interférer avec les activités alimentaires à proximité. Comme déjà mentionné, la qualité du paysage peut être affectée par Ca s'il s'agit d'une centrale vapeur. Toutefois, la production d'électricité géothermique doit contenir ce qui suit : la plupart des infrastructures nécessaires pour soutenir la production d'électricité géothermique sont bien plus « faciles » pour s'adapter ou transformer à leur environnement que la majeure partie des autres modèles de production [45] [54]. En fait, il est possible de façonner les tuyaux et les lignes de transmission, de dissimuler certaines d'entre eux ou de colorer tout le tuyau de tuyaux avec une couleur correspondante à l'architecture environnante [45]. En outre, une bonne planification du site où s'érige une structure et l'utilisation des matériaux locaux peuvent également atténuer une visibilité excessive des installations. Après qu'on a effectué les forages initiaux, le terrain peut aussi être refacturé, et une cohabitation partielle avec d'autres usages du sol, tels que l'agriculture. Il est donc possible que l'implantation d'une centrale géothermique ait un impact important sur le paysage local, mais une planification minutieuse du développement et la mise en place de mesures d'harmonisation permet de minimiser facilement cet impact.

III.4.3 La valorisation du sol :

La plupart de la surface du sol doit être aménagée pour la construction de la centrale géothermique, la plupart étant établie dans des zones éloignées et sensibles. Par exemple, une seule installation pourrait s'étendre jusqu'à 5 à 10 km² ou encore, devoir aménager des voies d'accès, en cas d'absence, ou encore, forer à des endroits dispersés. Les modifications sur l'agencement morphologique et l'utilisation du sol peuvent affecter les activités en région et sur la faune et la flore locales. Cependant, c'est en quantité peu importante relativement à ce qui est nécessaire pour le développement de l'énergie hydroélectrique. En effet, les cinq principaux réservoirs d'Hydro-Québec ont des superficies allant de 625 à 4 318 km². Il est également essentiel de s'assurer que les lieux sont bien aménagés lors du forage et de la construction du système géothermique pour Réduire le conflit avec d'autres utilisateurs. Alors que la construction de centrales

géothermiques exige un grand espace initial, environ 2 % de la surface continue d'être utilisée une fois les travaux de construction et de forage terminés. En outre, certaines technologies permettent de forer plusieurs puits à partir d'un même site, ce qui limite la surface totale requise pour l'usine. En outre, les tuyaux peuvent être placés sur des élingues et autres supports, ce qui permet une utilisation multiple compatible telle que l'agriculture ou les pâturages. Ainsi, l'exploitation de l'énergie géothermique pour la production d'électricité peut non seulement engager des infirmités environnementales des changements dans le paysage et avoir un impact sur la planification de l'utilisation du sol. De plus, les opérations, en particulier la construction, peuvent produire des niveaux de bruit susceptibles d'affecter la faune environnante et les habitations voisines. Toutefois, l'adoption de mesures adéquates et une planification de l'aménagement du territoire adéquate peuvent aisément diminuer ces effets à des niveaux habituellement permis. La géothermie est, en effet, l'une des formes de production d'énergie qui s'adapte le mieux à son environnement.

III.5 Conclusion :

Conclusions Les impacts de la production d'énergie géothermique sur l'environnement naturel sont multiples. Cependant, il convient de noter que les étapes restantes du forage, des tests et de la construction sont celles qui posent les plus grands risques à l'environnement. Par conséquent, des études doivent être menées et connaître parfaitement la situation de l'environnement avant de lancer les premières phases. Les impacts sur l'environnement physique en particulier devraient être atténués grâce aux mesures de contrôle de l'érosion, de la gestion des déchets solides et de la réduction du bruit. Il est essentiel de veiller à ce que la perte de végétation soit réduite au minimum reconnaissable et de permettre aux experts de vérifier que des pratiques de restauration appropriées sont suivies.

CHAPITRE IV :
MODELISATION ET
SIMULATION
NUMERIQUE

IV.1 Description du problème :

La configuration du problème étudié est une conduite cylindrique en forme de U avec une section circulaire constante placée en profondeur $Z=5\text{m}$ [59]. Dans lequel le fluide circule. Ce conduit à une longueur horizontale $L=0.1\text{m}$ et diamètre $D= (0.04\text{m}, 0.06\text{m}, 0.08\text{m})$ et d'épaisseur $e=0.02\text{m}$, Le liquide qui pénètre dans le conduit est à température $T_a=303\text{K}$, température de sol constante $T_s=283\text{K}$.

Pour le modèle mathématique, on prend en compte les hypothèses les plus fréquemment employées dans ce genre de problème. Nous supposons donc que :

- ✓ L'écoulement du fluide est considéré turbulent.
- ✓ L'échange thermique se fait en régime stationnaire.
- ✓ Il n'existe aucune réaction chimique.
- ✓ En considérant que la température du tube est équivalente à celle du sol.

Le tableau IV.1 présente les caractéristiques géométriques et thermiques du modèle numérique.

Tableau IV.1 : Les caractéristiques géométriques et thermiques
Du modèle numérique

Paramètre	valeur
Hauteur du puits	5 m
Distance entre le des deux tuyaux	0.1 m
Diamètre du tuyau	(0.04, 0.06, 0.08) m
Épaisseur des tuyaux	0.002 m
La conductivité thermique du sol	3.5 w/mk [59]
La conductivité thermique des tuyaux	204 w/mk
La capacité thermique du sol	910 J/kg.k
Masse volumique du fluide	998.2 kg/m ³
Masse volumique de sol	1950 kg/m ³
Température du fluide	303 K
Température de la terre	283 K
La conductivité thermique du fluide	0.6 w/mk

IV.2 Equation :

IV.2.1 Equation de Navier-Stokes :

- Equation de continuité (conservation de la masse) :

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (\text{IV.1})$$

- Equation de la conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2 u + \rho g \quad (\text{IV.2})$$

IV.2.2 Modélisation de la turbulence :

Le modèle traditionnel de turbulence k-epsilon développé par Launder et Spalding (1974) suppose que les contraintes de Reynolds sont proportionnelles aux gradients de vitesse moyens, tandis que la viscosité turbulente est proportionnelle à la vitesse.

Les équations de transport k et ϵ du modèle standard de turbulence k- ϵ sont fournies de la manière suivante :

- **K :**

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + p_k - \epsilon \quad (\text{IV.3})$$

- **Epsilon :**

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u \cdot \nabla \epsilon = \nabla \cdot \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} p_k - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (\text{IV.4})$$

Ou :

- k est l'énergie cinétique turbulent
- ν_t est la viscosité turbulente
- σ_k est le nombre de Prandtl turbulent pour k
- p_k est la production de l'énergie cinétique turbulente
- ϵ est le taux de dissipation de k
- σ_ϵ est le nombre de prandtl turbulent pour ϵ
- $C_{\epsilon 1}$ et $C_{\epsilon 2}$ sont des constantes du modèle

Table IV.2 : Les constantes par défaut utilisées dans le code Fluent.

C_u	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	σ_k	σ_ϵ
0.09	1.44	1.92	1	1.3

- La viscosité turbulente

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (\text{IV.5})$$

- Le nombre de Prandtl (Pr) :

Analyse la réaction thermique du fluide. On le définit comme la relation entre la viscosité cinématique du fluide et sa capacité à diffuser la chaleur.

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda_f} \quad (\text{IV.6})$$

- Le nombre de Reynolds (Re) :

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} \quad (\text{IV.7})$$

IV.2.3 Equation générale de transport :

On peut représenter l'équation générale du transport qui explique le principe de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie de la manière suivante [60] :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \text{div}(\rho \cdot U \cdot \phi) = \text{div}(\Gamma_\phi \cdot \text{grad} \phi) + S_\phi \quad (\text{IV.8})$$

Dans les équations précédentes ;

$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi)$: Le taux de change ou l'accumulation.

$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot U \cdot \phi)$: Le flux de convection.

$\frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_\phi \cdot \text{grad} \phi)$: Le Flux de diffusion.

S_ϕ : Terme source.

IV.2.4 Équation de la roche et du sol :

L'équation de la conductivité thermique de la roche et du sol peut être exprimée comme suit :

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (\text{IV.9})$$

IV.3 Simulation numérique :

La simulation numérique en mécanique des fluides (CFD : computationnelle dynamique des fluides) est considérée comme l'un des outils de conception les plus importants d'aujourd'hui et est largement utilisée dans l'industrie. La décision d'utiliser cette méthode numérique dépendra Le type et la complexité du problème à résoudre dépendent principalement de la nature du fluide, du comportement thermodynamique, de la modélisation du milieu et du problème stationnaire.

Notre logiciel de calcul de dynamique des fluides est intuitif mais très puissant, ce qui accélère le développement de produits. Comme les pressions pour optimiser les produits augmentent, les produits Ansys CFD vous donnent la possibilité de faire des progrès incroyables grâce à l'innovation. Et la marge d'erreur diminue rapidement. Vous aurez confiance en vos résultats car il s'agit des solveurs les plus précis et les plus fiables du secteur.

IV.4 Définition d'ANSYS Inc:

Ansys, Inc développe des logiciels de simulation numérique. Le siège social de l'entreprise se trouve à Canonsburg, en Pennsylvanie, aux États-Unis. Ses principaux produits sont des logiciels qui utilisent la méthode des éléments finis pour résoudre des modèles préalablement établis. Déterminés La société a de nombreuses succursales à travers le monde, en particulier en Europe Plus en AS.



Figure IV.1 : logo de l'entreprise

IV.5 Différentes étapes simulation :

En fait, vous sembliez discuter des différentes étapes de la simulation numérique. En voici une courte explication :

➤ **Problème et Préparation:**

- Identifier et formuler le problème à simuler: cela pourrait inclure des définitions pour des conditions initiales et aux limites, des propriétés de matériaux, etc.

- Préparer les données qui sont nécessaires pour la simulation, y compris la géométrie du système à simuler, les paramètres physiques, et bien plus encore.

➤ **CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et Maillage:**

- Utiliser un logiciel de CAO pour créer la géométrie du système à simuler ou importer cette géométrie à partir du logiciel

- Création d'un maillage ou une grille. Les maillages divisent la géométrie en éléments finis ou en volumes finis.

➤ **Restitution Numérique:**

- Discrétiser les équations physiques régissant le problème en équations numériques. Cela est courant dans plusieurs méthodes telles que les différences finies, les éléments finis, les volumes finis, etc.

- Résoudre les équations numériques obtenues ci-dessus. Il sert à obtenir une solution numérique du problème

➤ **Post-Traitement:**

-Analyser les résultats de la simulation. Cela consiste à extraire les informations à partir des résultats. Cela peut impliquer la visualisation des résultats qui peut être inclus dans des graphiques, des vidéos, des tableaux, etc. En plus de cela, cela peut inclure l'interprétation des résultats. Ceci pourra permettre à l'utilisateur de tirer des conclusions sur le système simulé.



Figure IV.2 : les différentes étapes d'une simulation

IV.6 Description et modélisation du problème:

Ce travail examine le transfert de chaleur stationnaire 2d dans un tube géothermique type U avec trois diamètres différents pour trois Reynolds différentes.

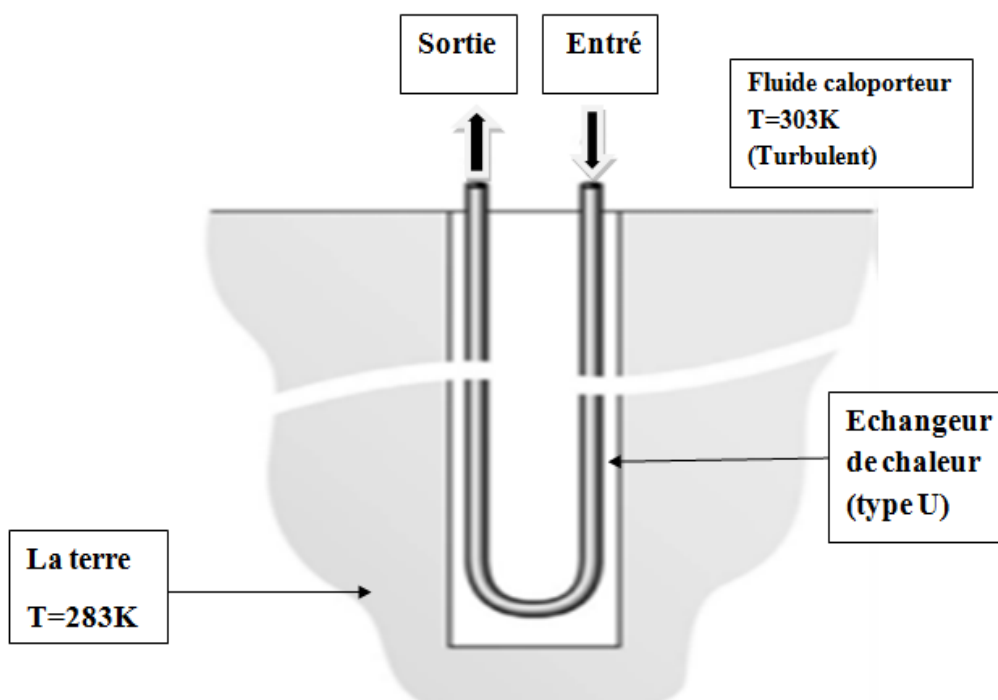


Figure IV.3 : Position du problème

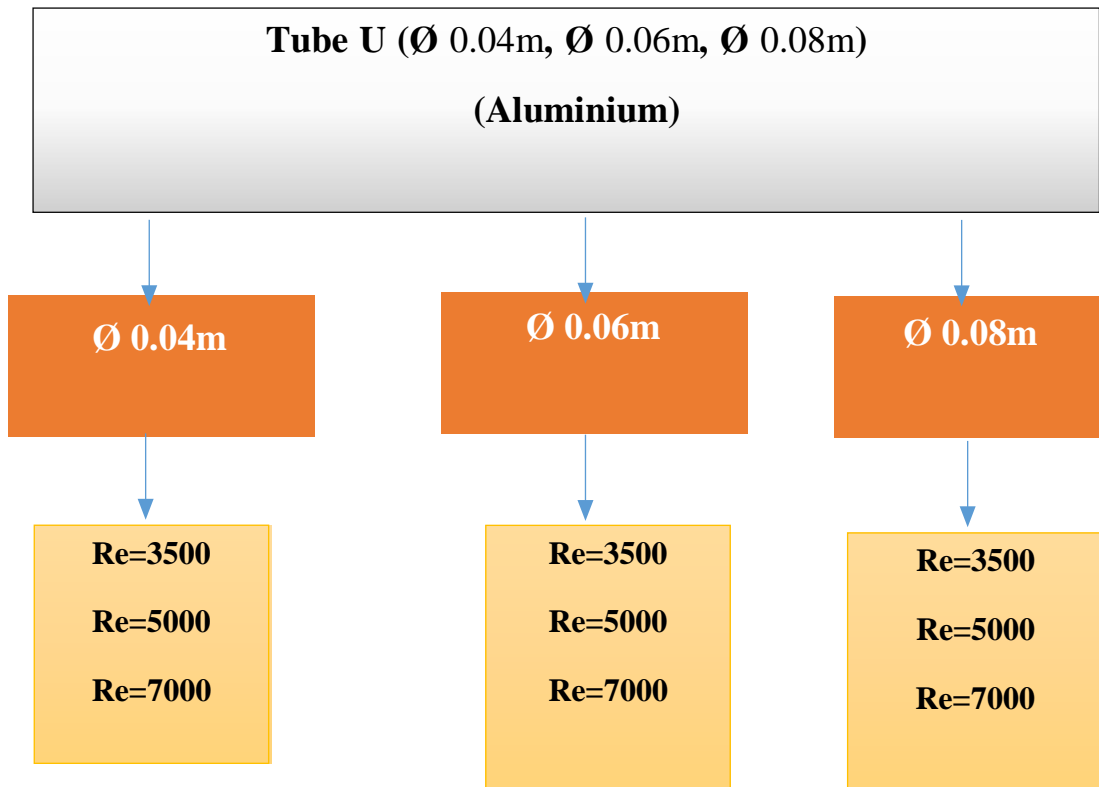


Figure IV.4 :L'aspect de travail est illustré dans l'organigramme suivant.

Les trois valeurs de diamètre ont été choisies en fonction de recherches antérieures sur le même sujet. La modification de la vitesse a permis de contrôler et de modifier la valeur du Reynold.

Les caractéristiques de l'ordinateur utilisé pour réaliser la simulation sont les suivantes :

Dell latitude 7490 i5-8250U, RAM 8Go, System 64 bits

IV.7 Mise en place d'un système d'analyse Fluide en 2d:

Pour mettre en place un « Système d'Analyse », c'est-à-dire une série de calculs pour une simulation Fluent.

V.7.1 Création de la géométrie en Ansys :

V.7.1.1 La première étape :

- Ouvreur Ansys sélectionné pour la mécanique de fluide (fluent) :

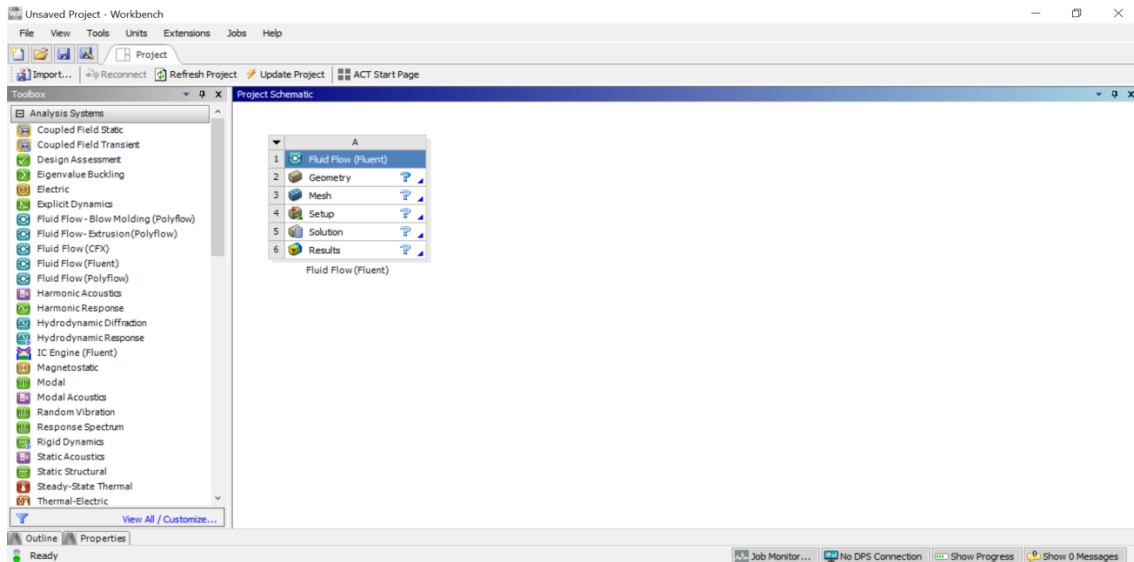


Figure IV.5 : page de projet in workbench

V.7.1.2 La deuxième étape dans le modèle de design :

- La forme de la géomètre est définie en deux plans et en 1D.

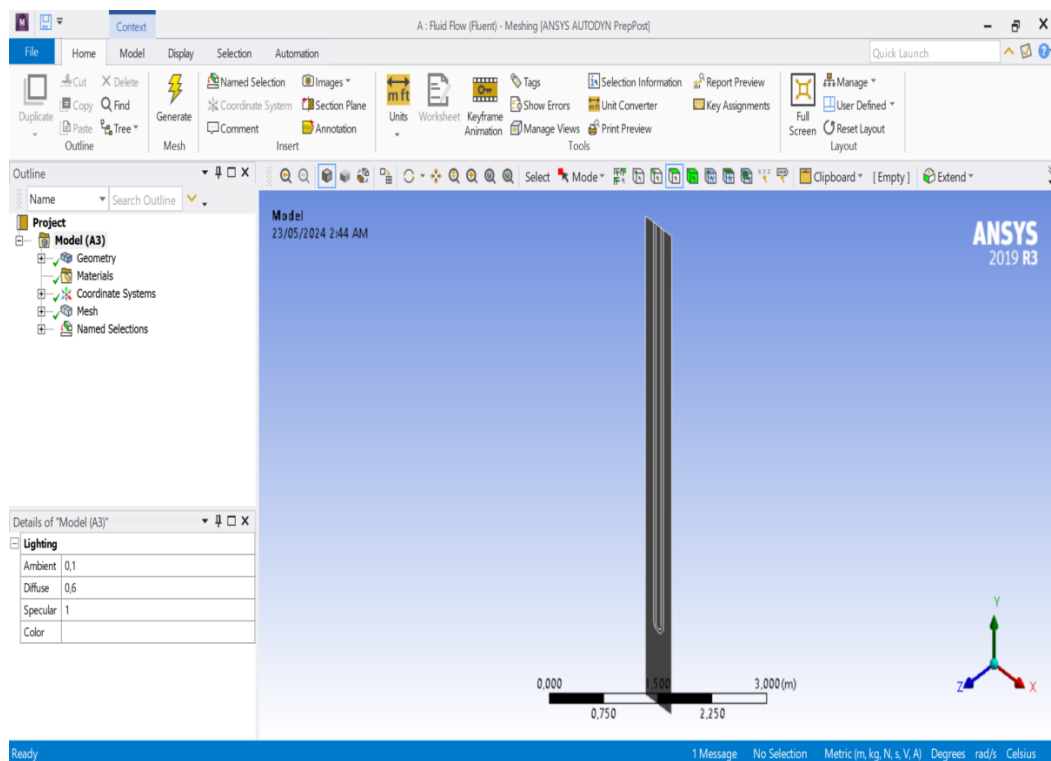


Figure IV.6 : La géométrie est présentée en deux plans et en 1D.

V.7.2 Maillage :

Développement et adaptations du maillage autour du profil. Il est très important d'avoir un maillage de très grande qualité pour des simulations numériques efficaces, car cette étape est indispensable pour la procédure du calcul être acceptable et utilisable, et donc obtenir des conclusions.

1. En cliquant sur Maillage, puis choisis Maillage.
2. Repérage des conditions aux limites :

La première étape est de repérer les parties de la géométrie afin :

- Déterminer les conditions sur le maillage aux niveaux des diverses sélections.
- Et de définir la condition aux limites du problème tel que des (entrées, sorties, ...)
- De nommer les différentes parties de la géométrie.

Dans le domaine de l'étude du transfert de chaleur, nous optons pour une division régulière des éléments dans une forme plus petite, avec une augmentation de la division à l'intérieur et à l'extérieur. Cette méthode est fréquente. Le maillage est fréquent dans le domaine. Le domaine de la recherche sur le transfert thermique.

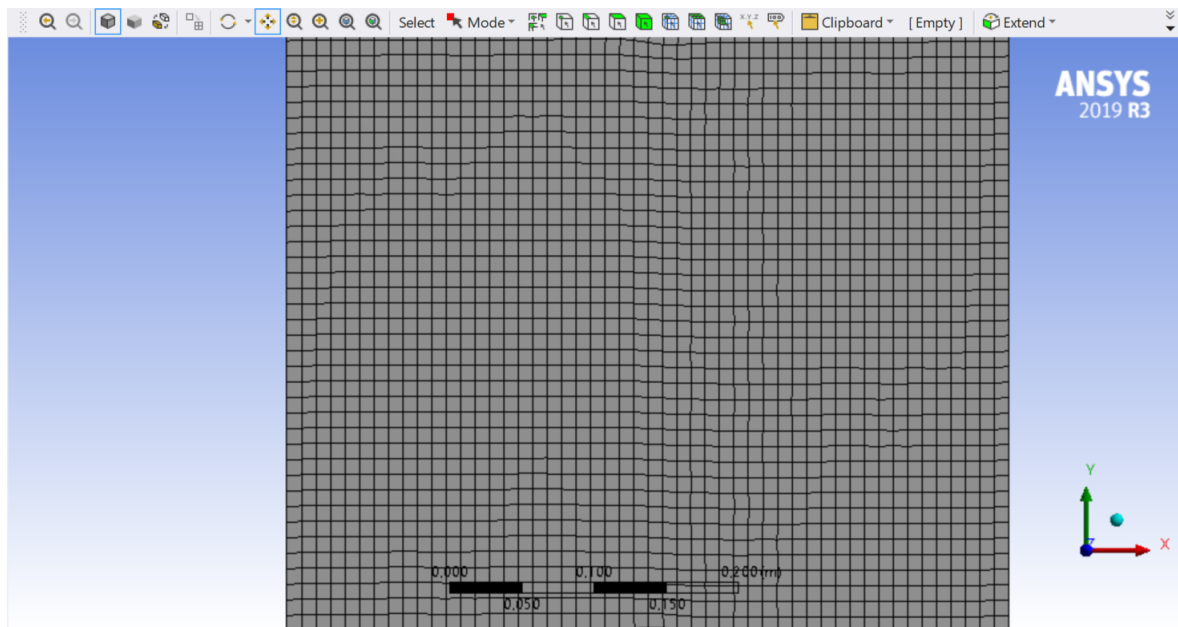


Figure IV.7 : Le premier maillage $D=0.04m$

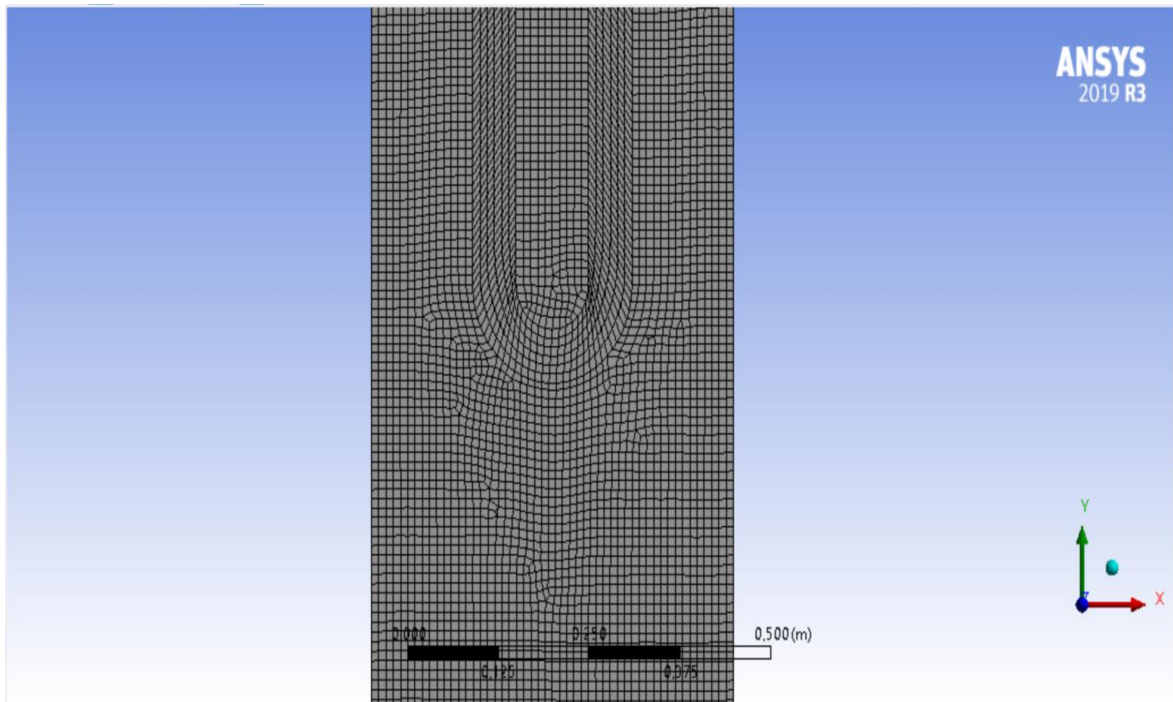


Figure IV.8 : Le deuxième maillage $D=0.06m$

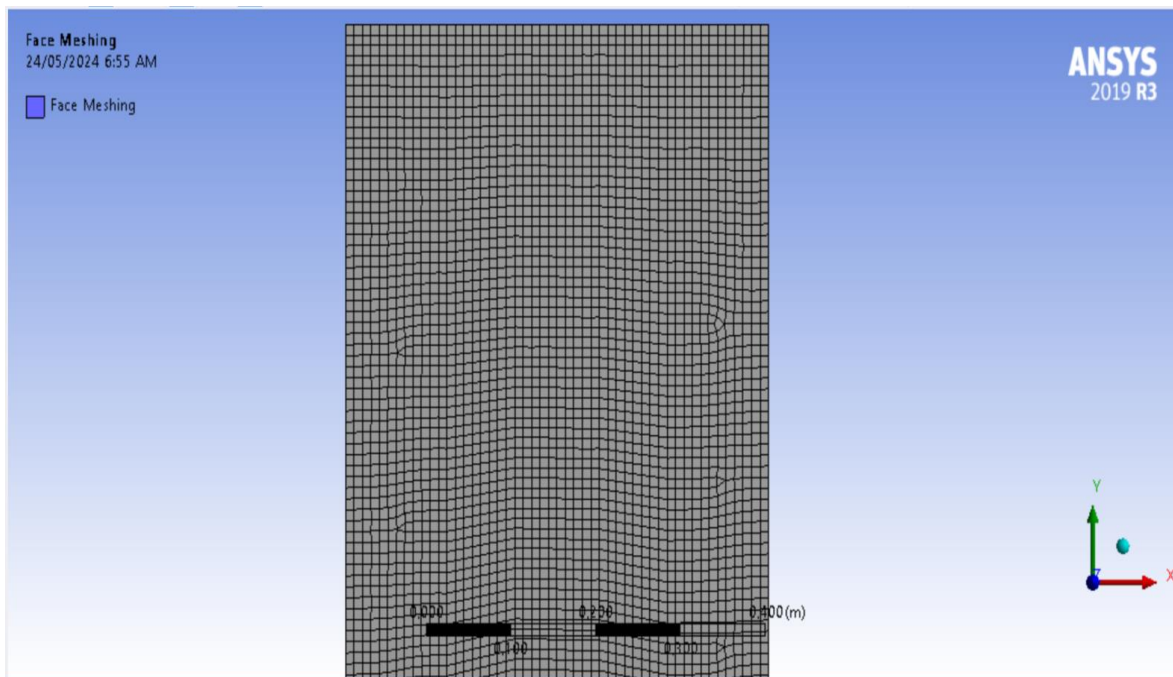


Figure IV.9 : Le troisième maillage $D=0.08m$

V.7.2.1 Vérifiez la taille de maillage :

Le tableau ci-dessous résume les résultats précédents de maillages générés :

Tableau IV.2: résultats de maillage générés

	Elements	Nœuds
Tube U \varnothing 0.04m	29790	64830
Tube U \varnothing 0.06m	35376	70761
Tube U \varnothing 0.08m	47457	84200

V.8 Mettre en place le problème sous Fluent :

V.8.1 Présentation de code fluent:

Le système de code Le solveur Fluent est largement employé dans l'industrie à travers le globe. La méthode des volumes finis est utilisée pour créer Fluent, un code de calcul qui simule les mouvements de fluides compressibles, incompressibles, statiques ou in statiques, en utilisant différents phénomènes physiques tels que le transfert de chaleur, la turbulence, les mouvements dans les machines tournantes et les moteurs thermiques dans des géométries complexes.

V.8.2 différentes étapes de simulations sous Fluent:

Les différentes étapes de simulation comprennent :

✓ **Setup**  :

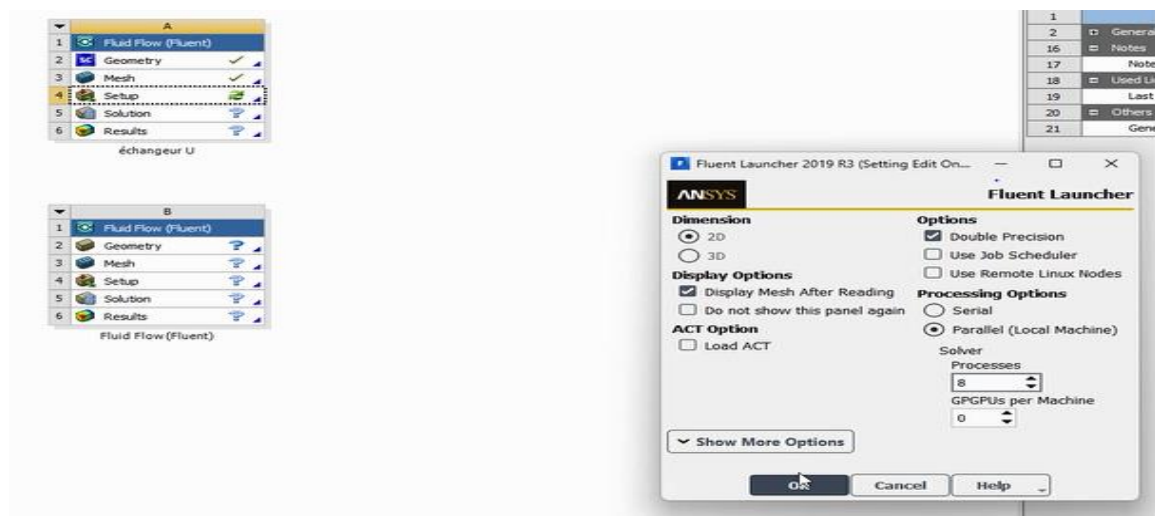
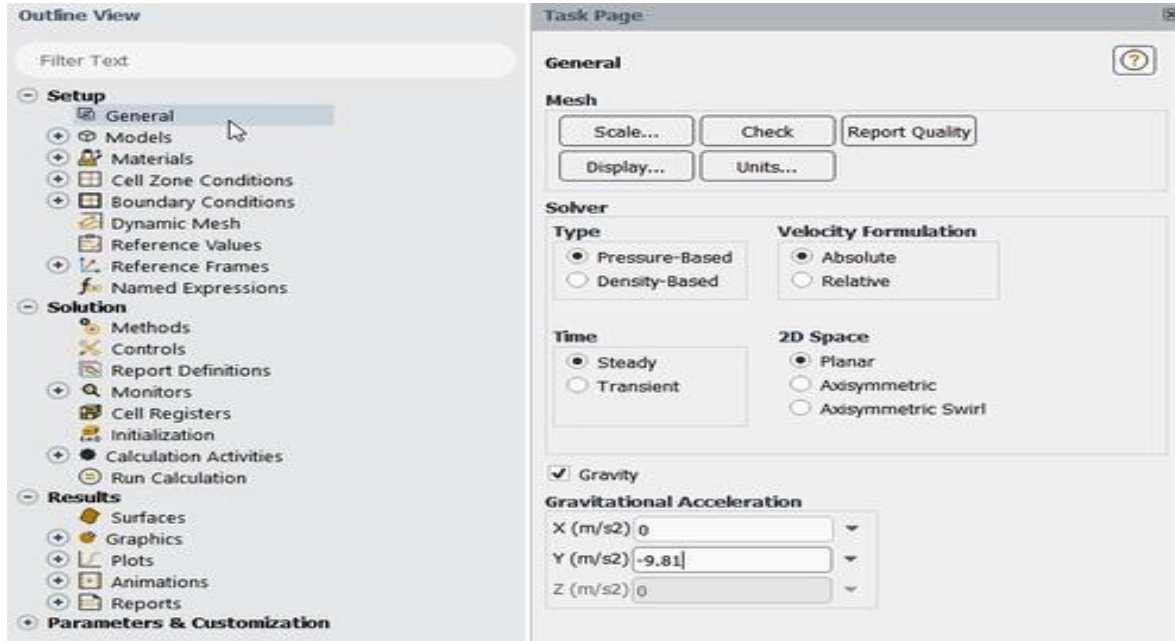


Figure IV.10 : Les informations sur la page setup

1. General :

Dans ces étapes on choisit les paramètres de solver (type, velocity formulation, time, 2D space, gravity) :

**Figure IV.11** : Les informations sur la page général

2. Models :

Au cours de cette étape, on détaille le genre de l'écoulement :

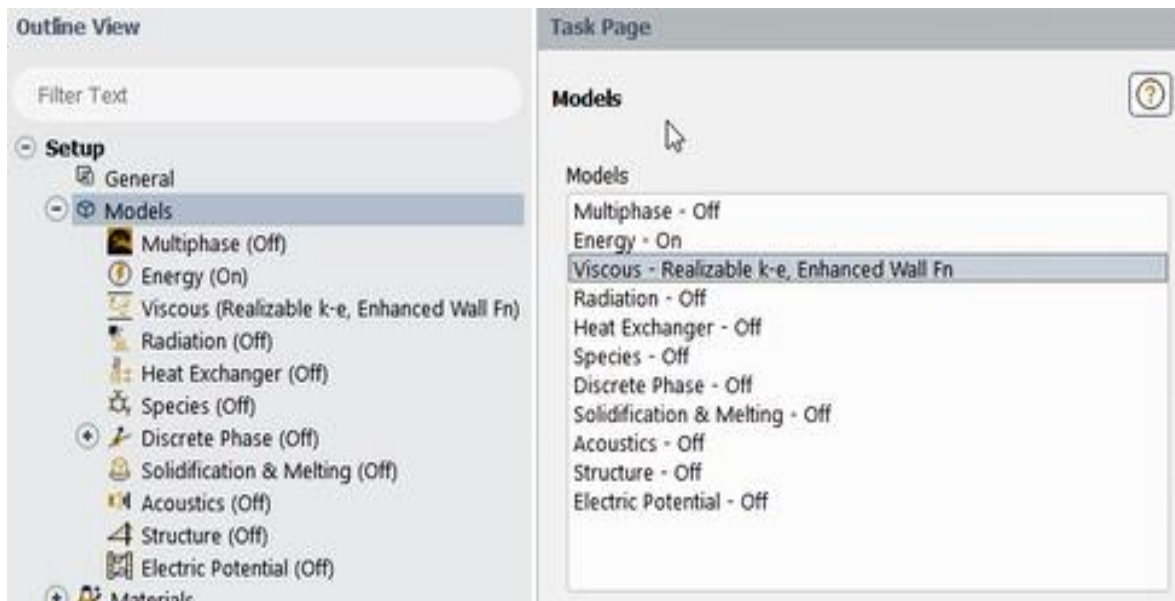


Figure IV.12 : précise le type de l'écoulement

3. Materials :

Au moment de sélectionner le type de fluide et ses caractéristiques spécifiques, dans notre cas, c'est le water-liquide.

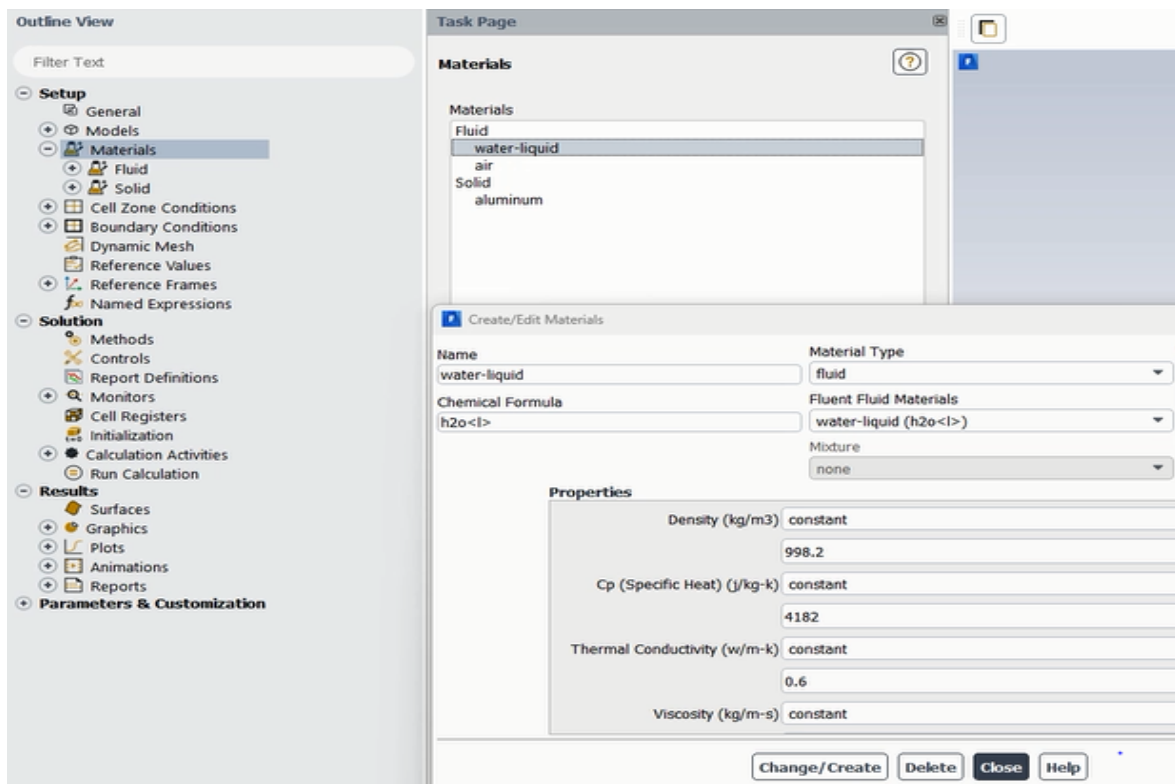


Figure IV.13 : choisir le type de fluide

4. Conditions aux limites : Boundary Conditions

Dans cette itération, les conditions spécifiques auxquelles l'écoulement est limité sont données telles que la vitesse et la température. Grâce à ce qui précède, il est possible de comprendre des conditions du genre qu'une personne peut avoir si elle effectue un travail de modélisation numérique d'un problème en mécanique des fluides, même le plus compliqué. En réalité, les étapes de modélisation numérique comprennent la conception de la géométrie, la génération du maillage et la conduite du problème en «fluent». La Convergence et même le post-traitement des données de simulation sont également étroitement liés les uns aux autres.

CHAPITRE V :
RESULATATS ET
DISCUSSIONS

V.1 Résultats et discussions :

V.1.1 Effet du diamètre et de vitesse de fluide :

Afin d'étudier l'impact du diamètre du conduit et du débit de fluide sur l'efficacité de l'échangeur de chaleur verticale type U, nous allons réaliser trois simulations pour différentes valeurs de diamètre (0,04m ; 0,06m ; 0,08m). Chaque valeur de diamètre sera représentée par trois Reynolds (3500 ; 5000 ; 7000).

V.1.1.1 première cas (D=0.04m) :

➤ Champs de température :

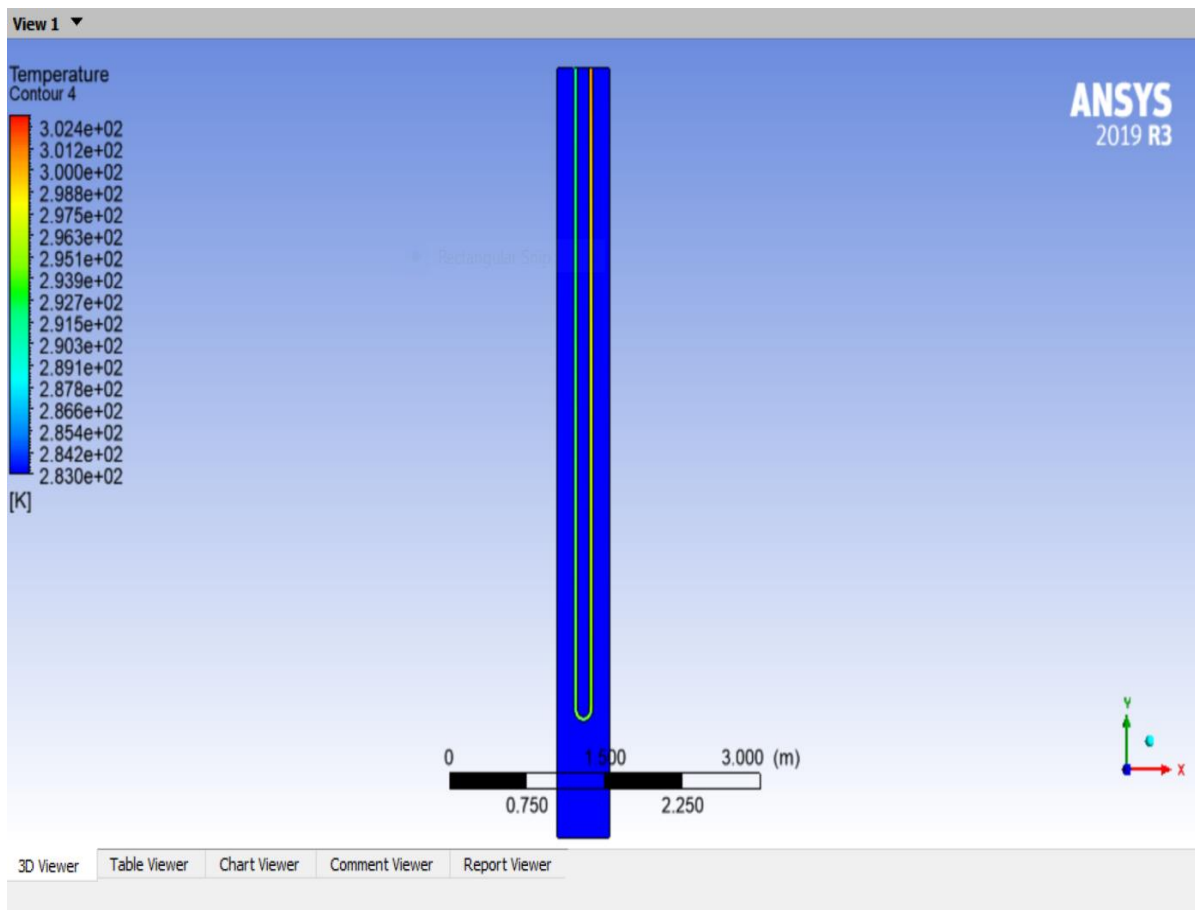


Figure V.1 : Champ de température ($\varnothing = 0.04m$; $R_e = 3500$)

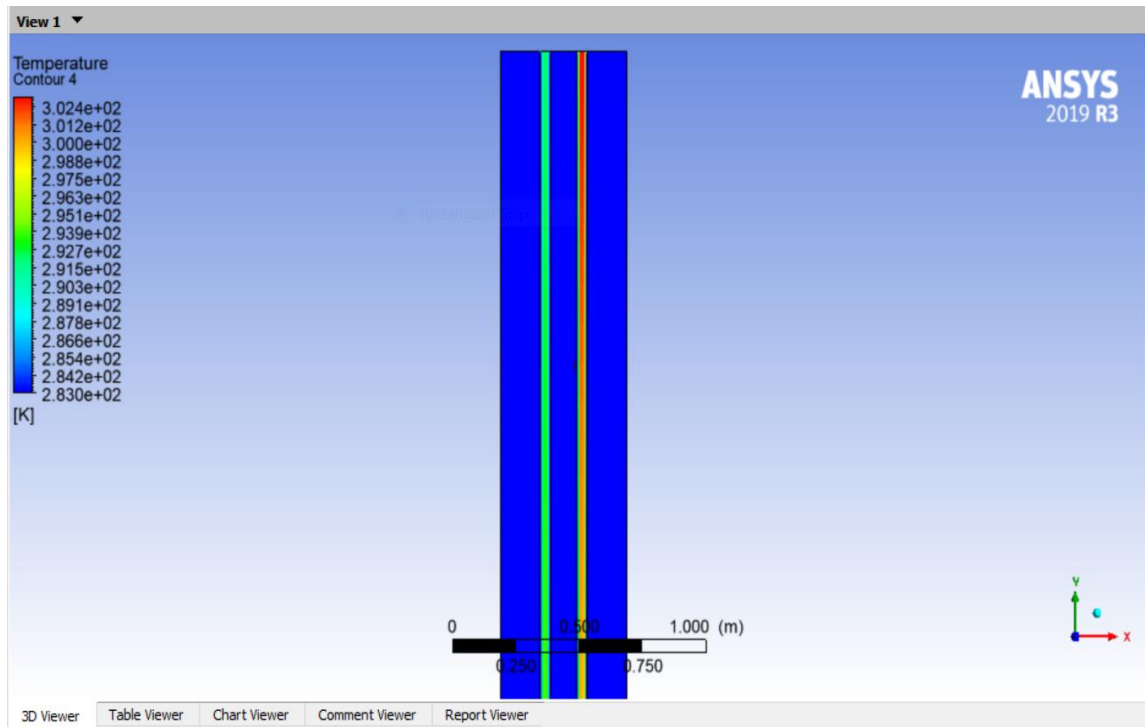


Figure V.2 : Champ de température avec zoom ($\varnothing = 0.04m ; R_e = 3500$)

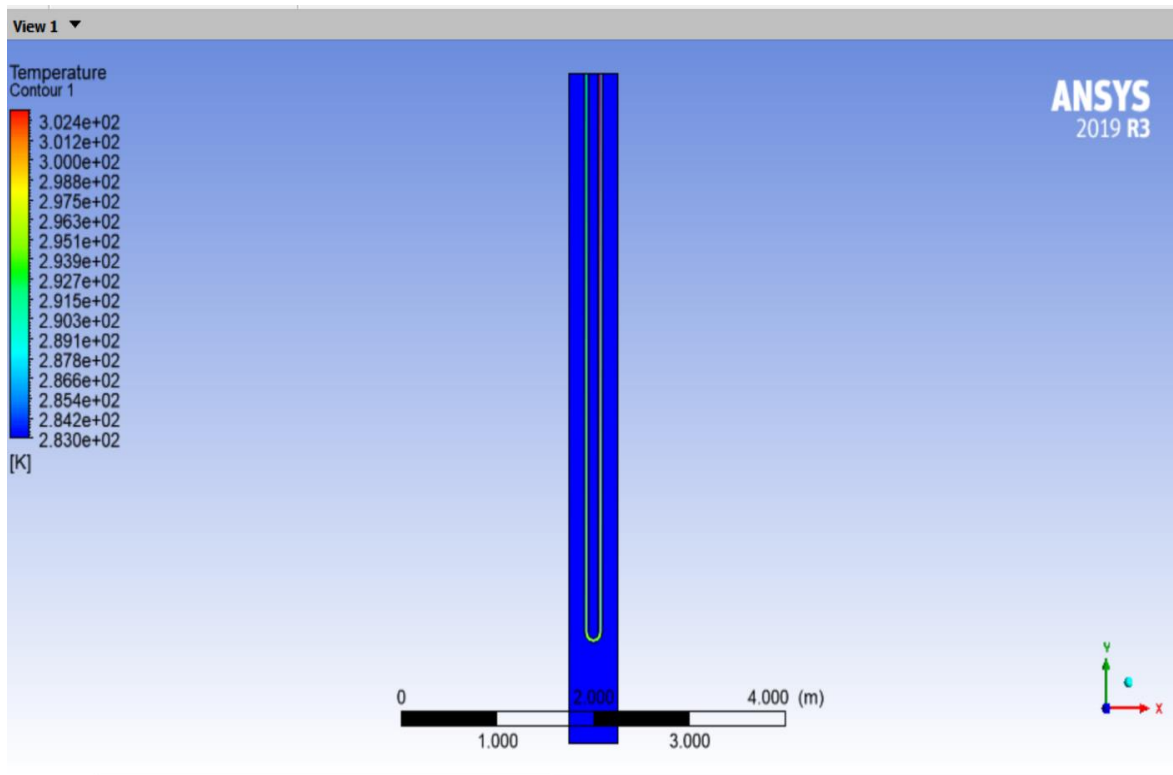


Figure V.3 : Champ de température ($\varnothing = 0.04m ; R_e = 5000$)

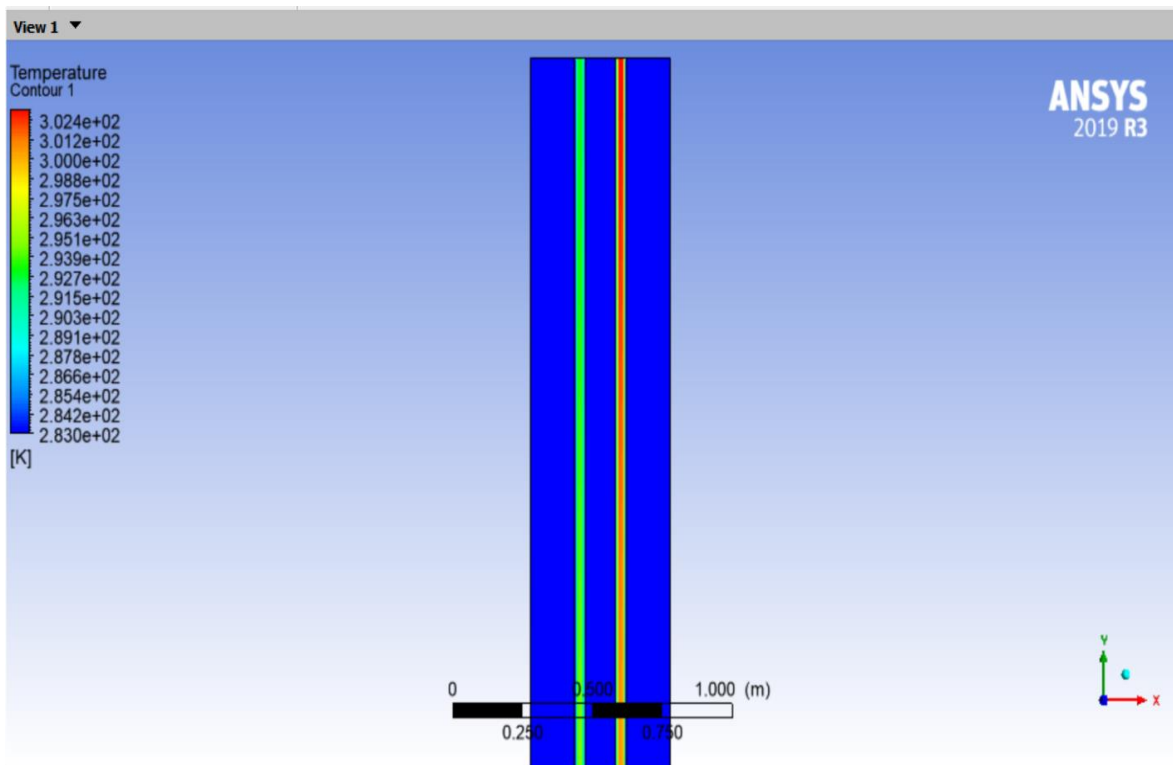


Figure V.4 : Champ de température avec zoom ($\varnothing = 0.04m ; R_e = 5000$)

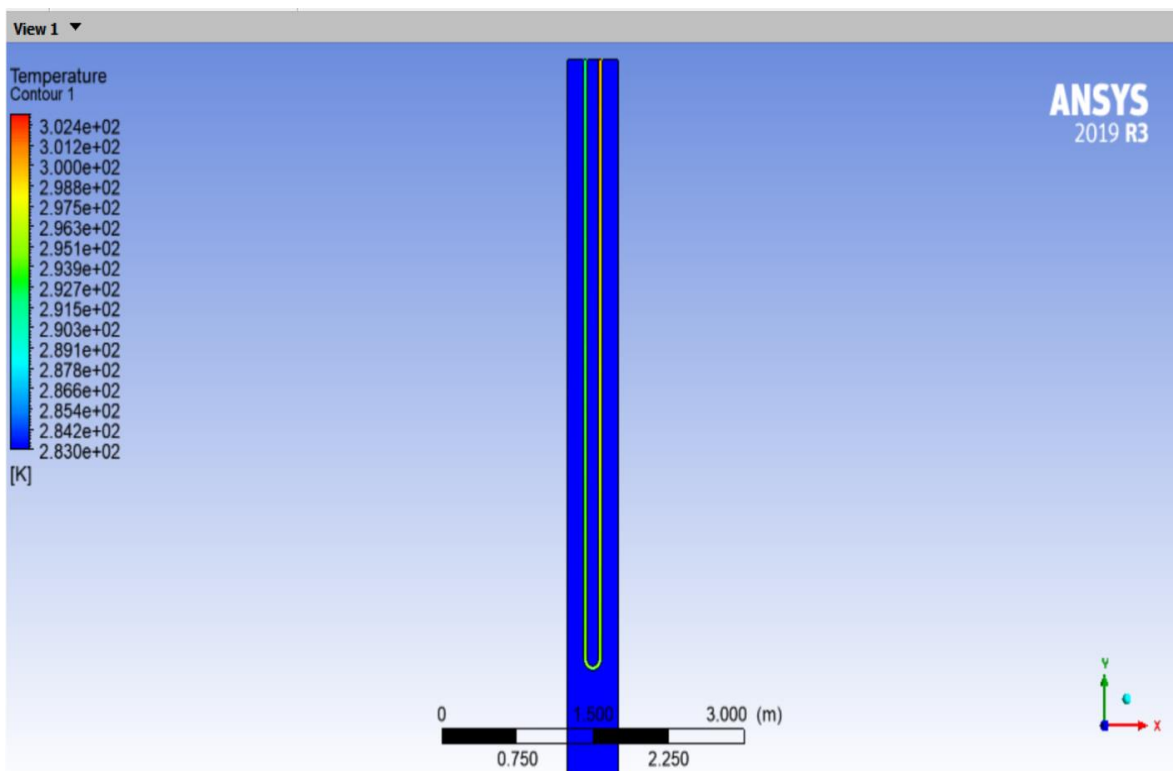


Figure V.5 : Champ de température ($\varnothing = 0.04m ; R_e = 7000$)

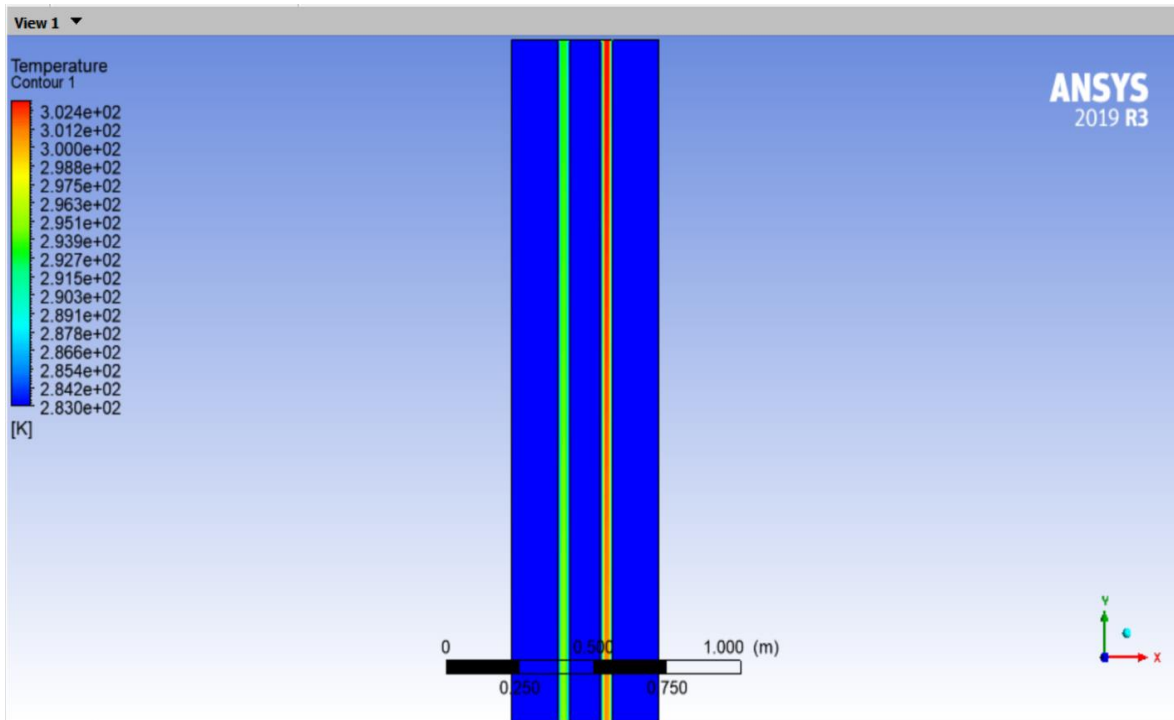


Figure V.6 : Champ de température avec zoom ($\varnothing = 0.04m ; R_e = 7000$)

➤ **Champ de vitesse :**

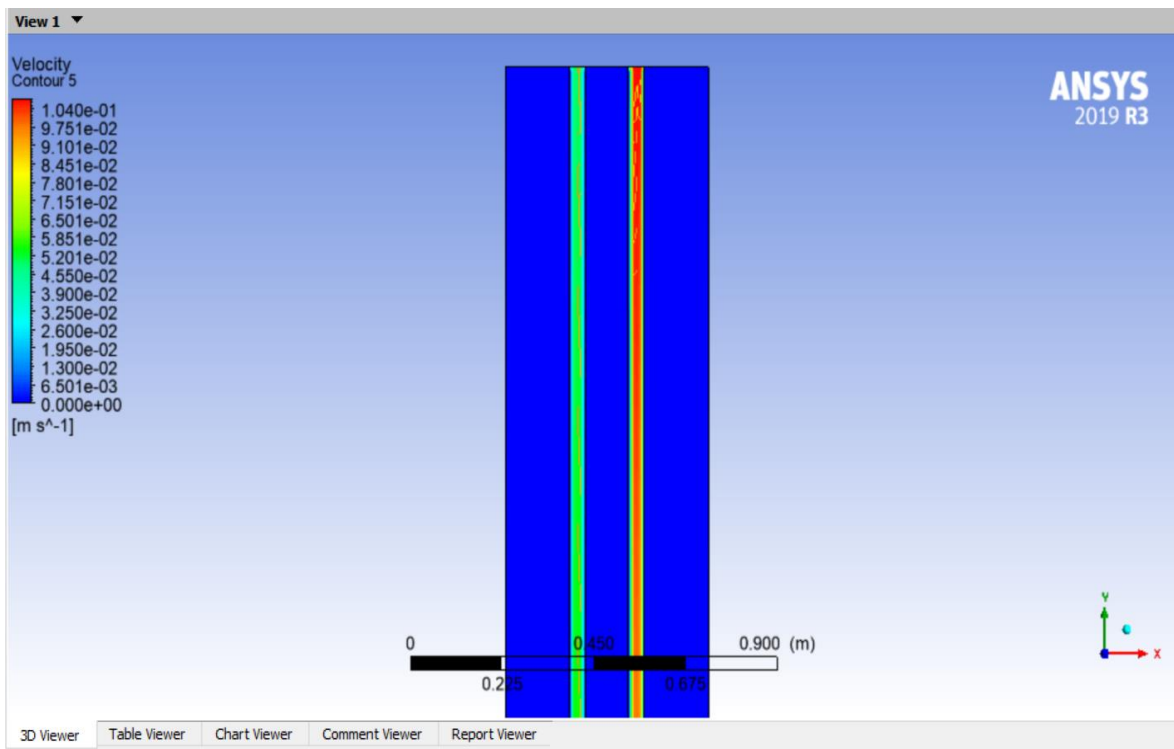


Figure V.7 : Champ de vitesse ($\varnothing = 0.04m ; R_e = 3500$)

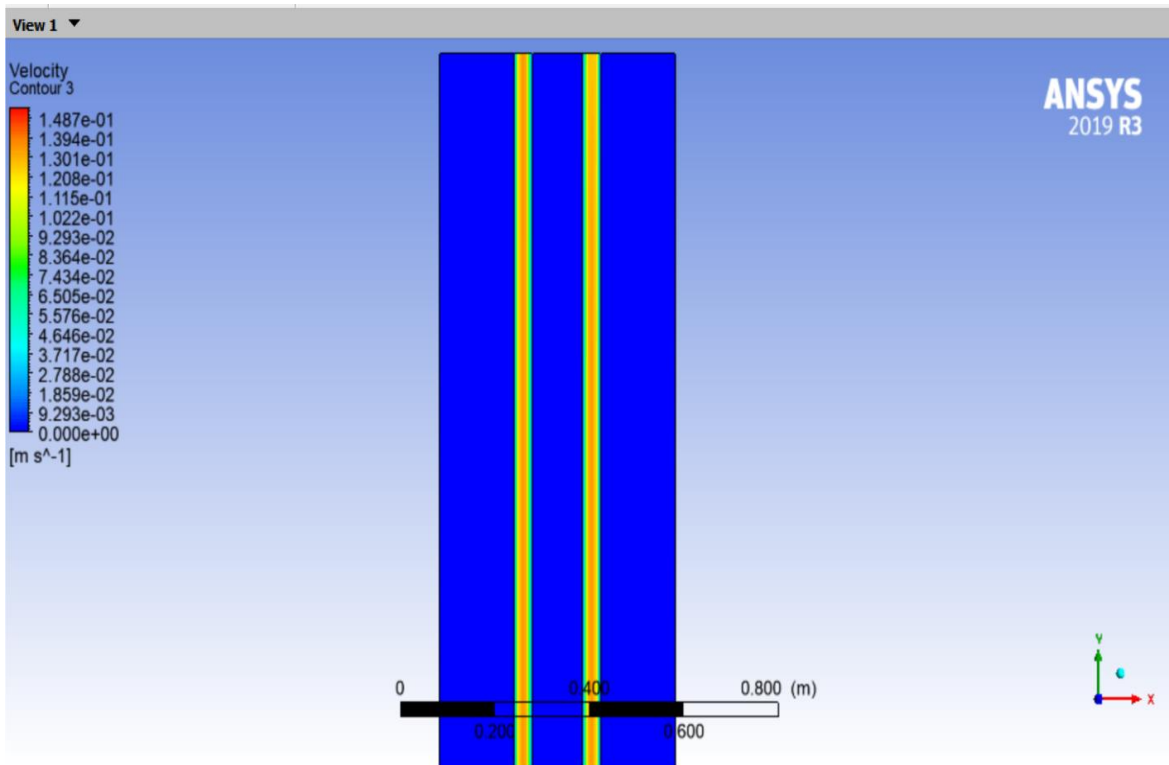


Figure V.8 : Champ de vitesse ($\varnothing = 0.04m ; R_e = 5000$)

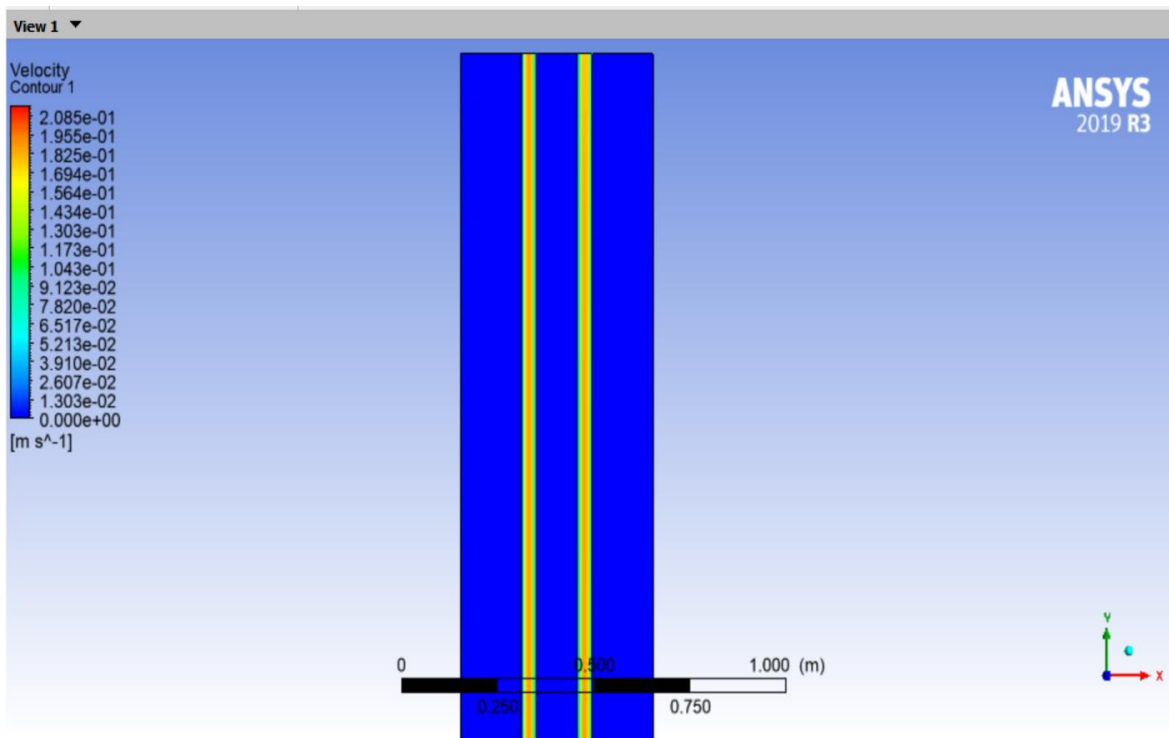


Figure V.9 : Champ de vitesse ($\varnothing = 0.04m ; R_e = 7000$)

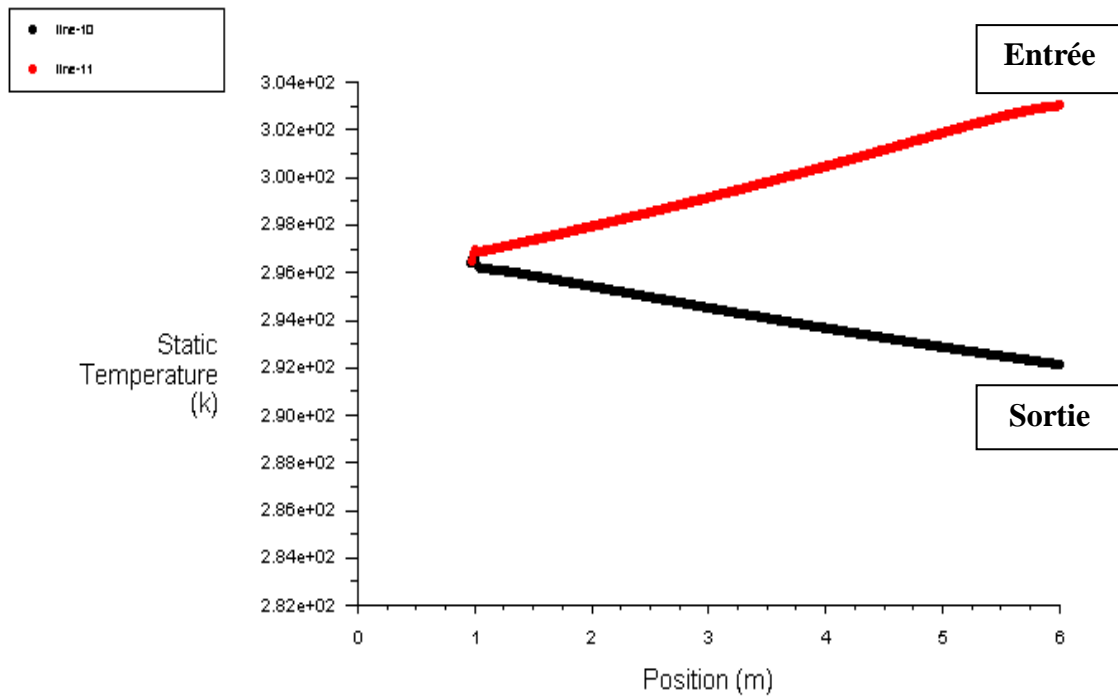


Figure V.10 : évolution de température pour $\phi = 0.04m$ et $R_e = 3500$

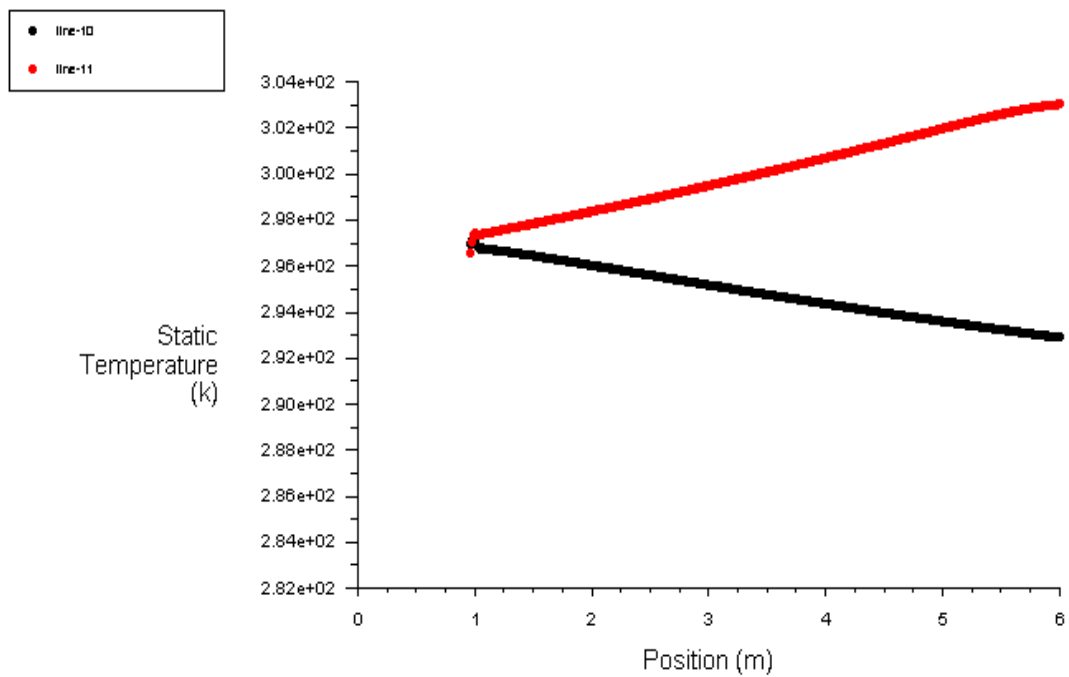


Figure V.11 : évolution de température pour $\phi = 0.04m$ et $R_e = 5000$

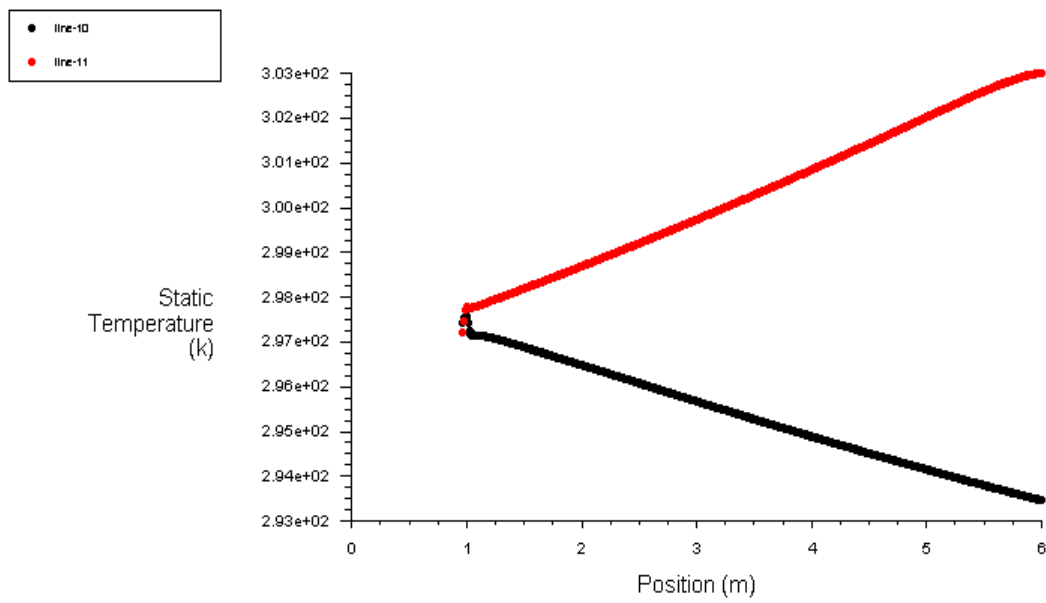


Figure V.12 : évolution de température pour $\phi = 0.04m$ et $R_e = 7000$

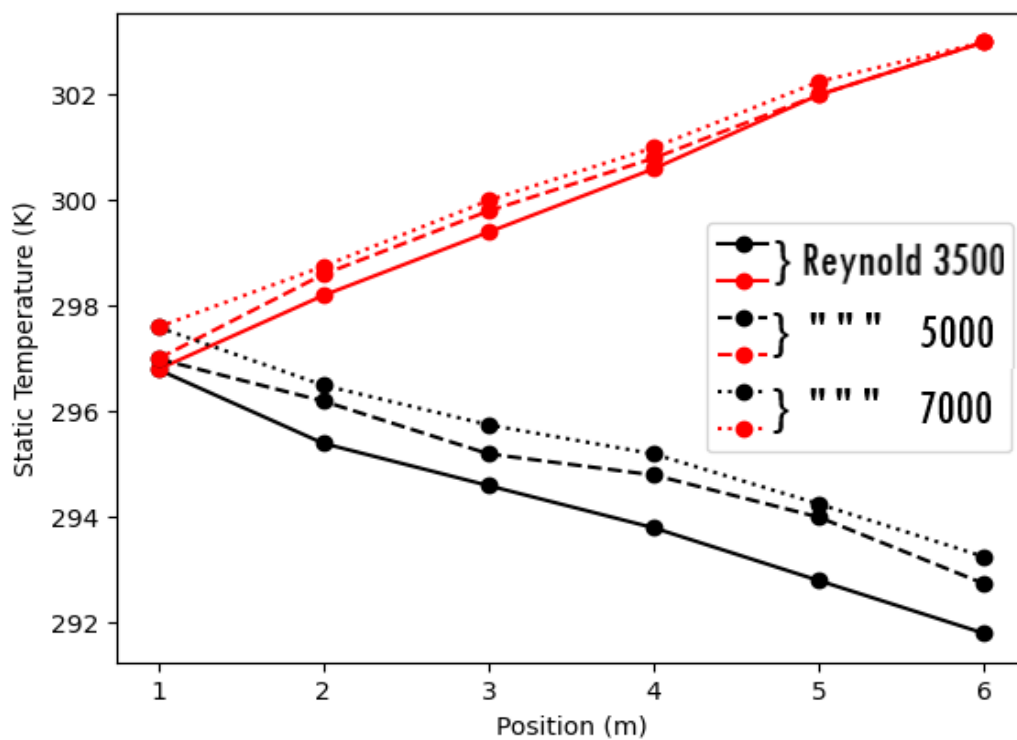


Figure V.13 : comparaison évolution de température pour $\phi = 0.04m$ et différente Reynolds

La figure (V.13) illustre la variation de la température dans l'échangeur de chaleur de l'entrée à (303 k) jusqu'à la sortie en fonction du diamètre du tube (0.04 m) et en fonction du nombre de Reynolds (3500 ; 5000 ; 7000).

1. Dans le cas du diamètre (0.04 m) et le Reynolds ($Re=3500$), on a obtenu une température à la sortie de (291,7 k) avec une baisse de (11.3).
2. Dans le cas du le diamètre (0.04 m) et le Reynolds ($Re=5000$), on a obtenu une température à la sortie de (292.74 k) avec une baisse de (10.26).
3. Dans le cas (0.04 m) et le Reynolds ($Re=7000$), on a obtenu une température à la sortie de (293,25 k) avec une baisse de (9.75).

Les résultats les plus satisfaisants ont été obtenus dans le cas n°1 ($D = 0.04m$) avec un nombre de Reynolds $Re = 3500$.

Dans toute augmentation du nombre de Reynolds entraine une augmentation de la température à la sortie, et inversement, Ce qui indique que la relation entre ces deux variables est une relation proportionnelle direct.

V.1.1.2 deuxième cas ($D=0.06m$) :

➤ Champs de température :

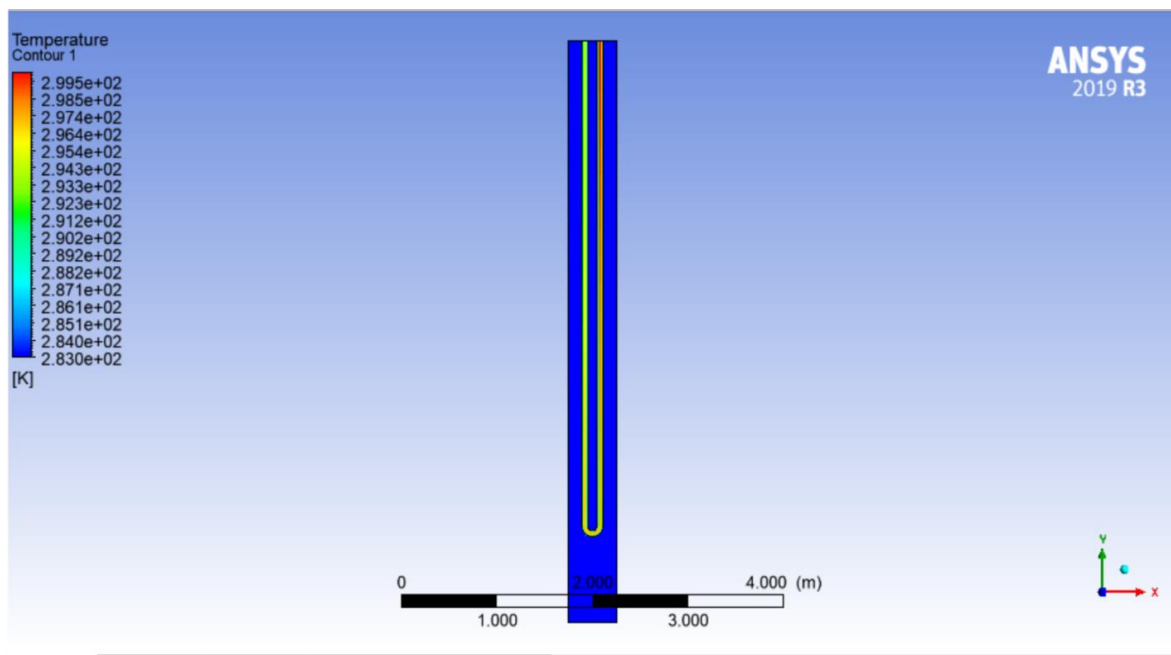


Figure V.14 : Champ de température ($\phi = 0.06m$; $R_e = 3500$)

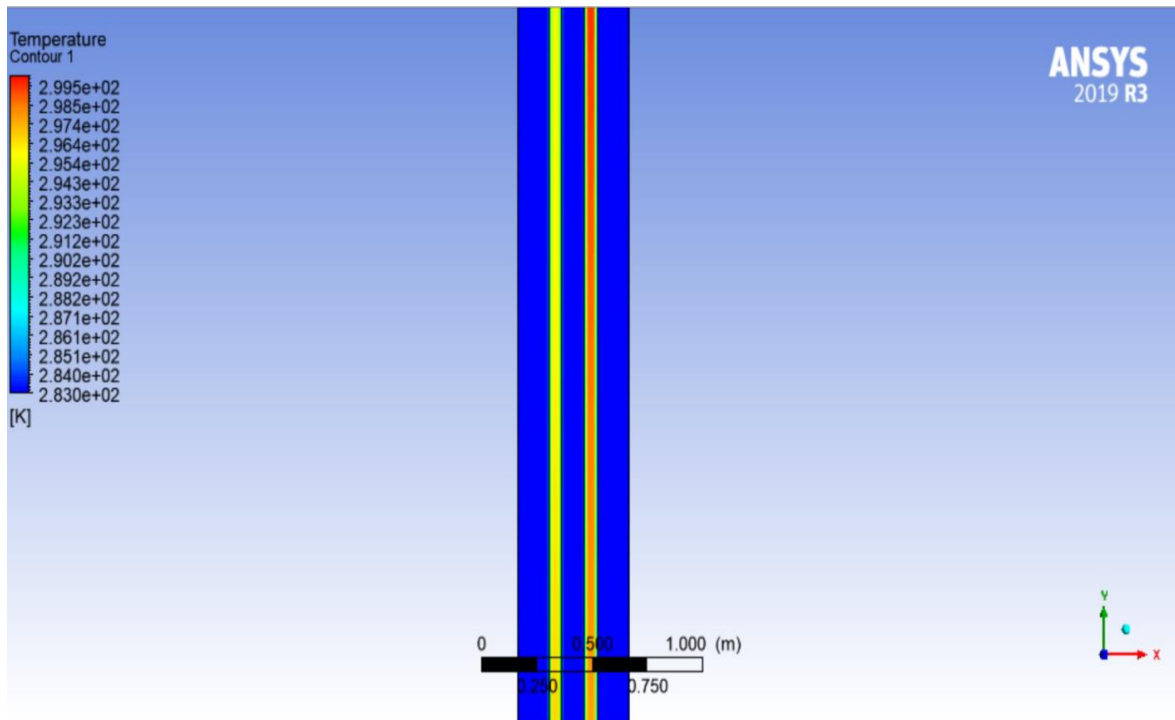


Figure V.15 : Champ de température avec zoom ($\varnothing = 0.06m ; R_e = 3500$)

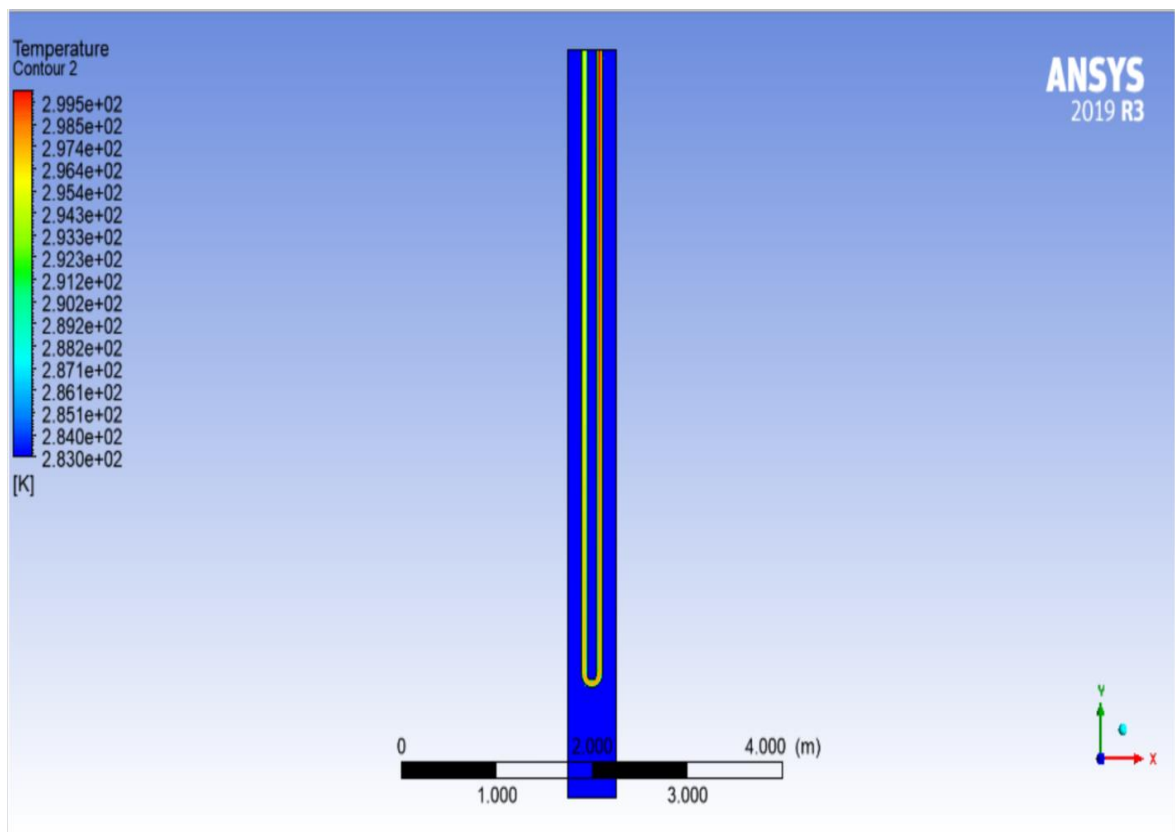


Figure V.16 : Champ de température ($\varnothing = 0.06m ; R_e = 5000$)

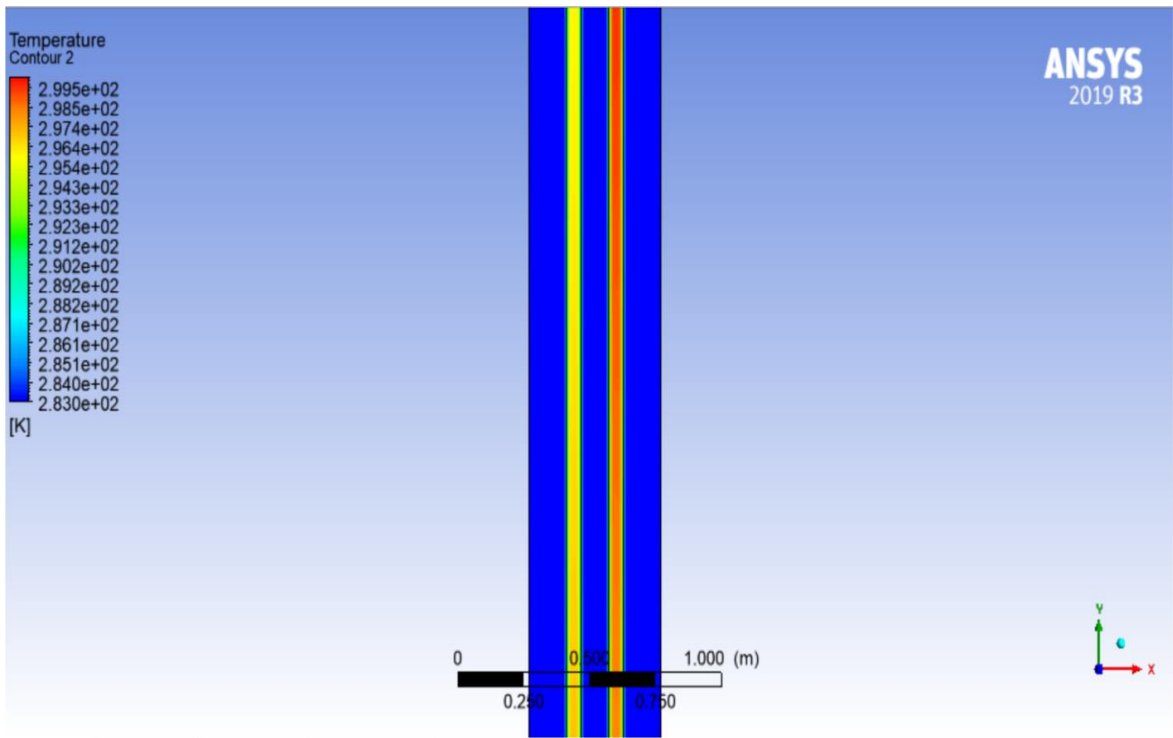


Figure V.17 : Champ de température avec zoom ($\varnothing = 0.06m ; R_e = 5000$)

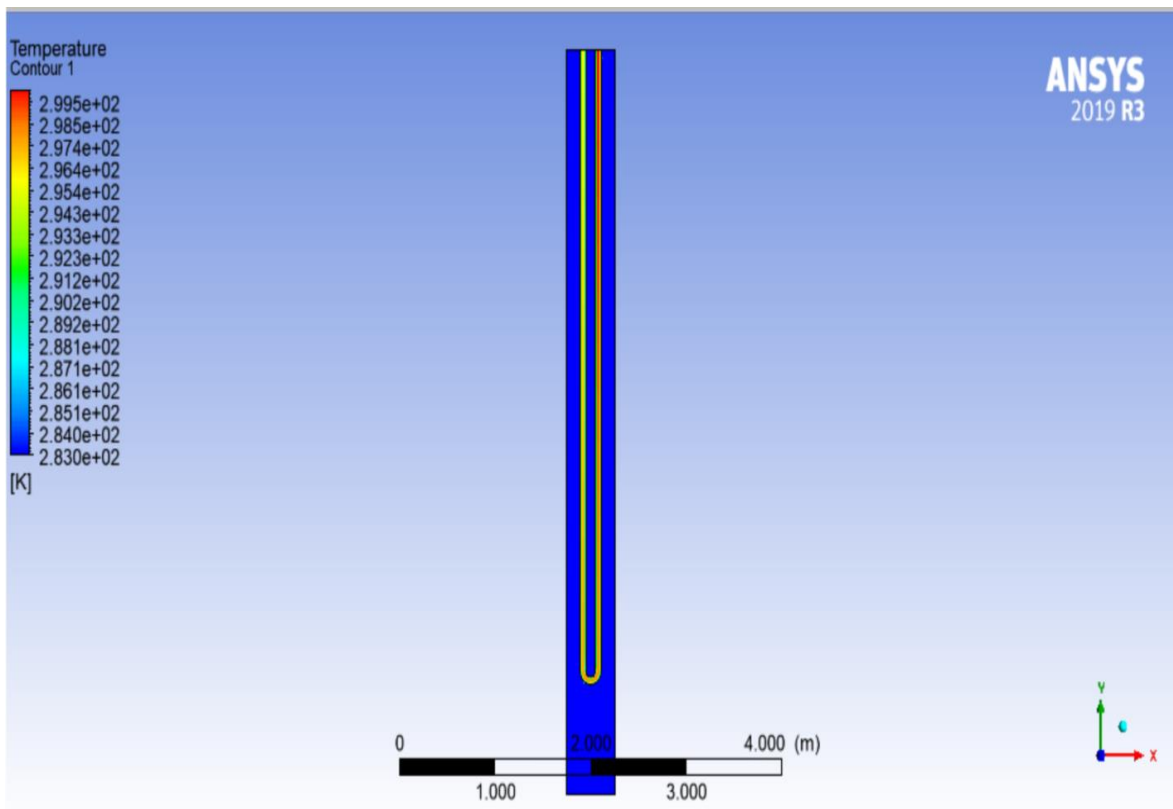


Figure V.18 : Champ de température ($\varnothing = 0.06m ; R_e = 7000$)

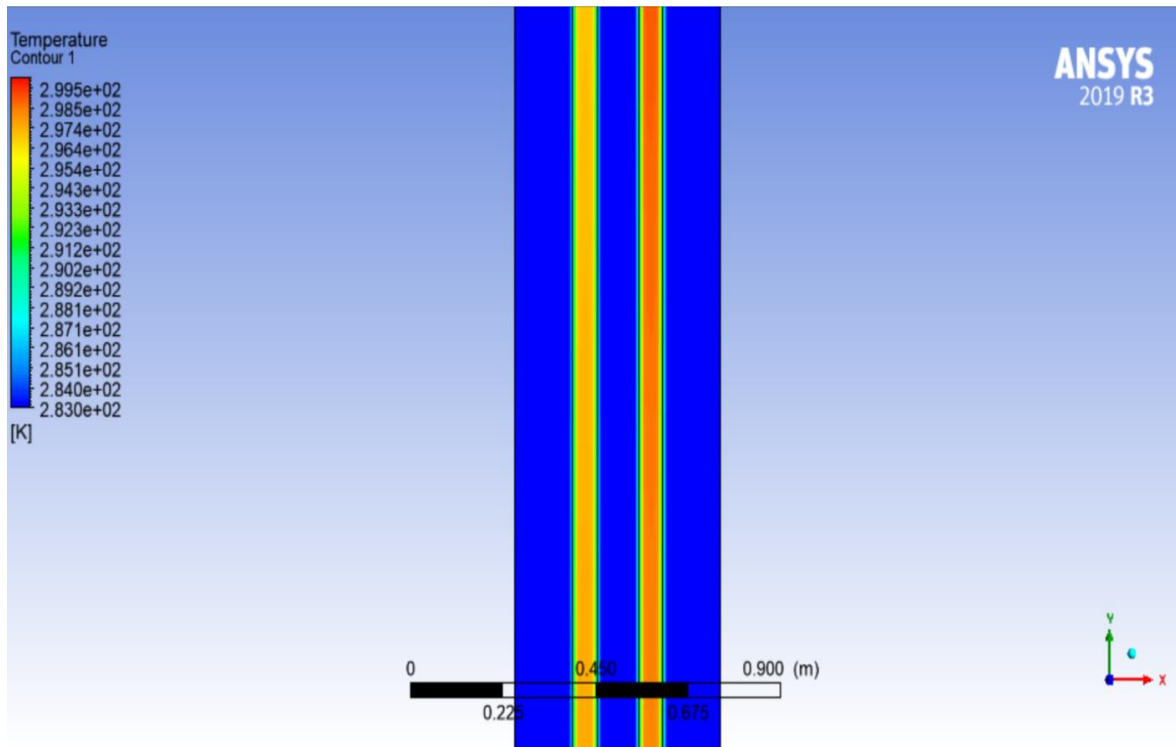


Figure V.19 : Champ de température avec zoom ($\varnothing = 0.06m ; R_e = 7000$)

➤ **Champ de vitesse :**

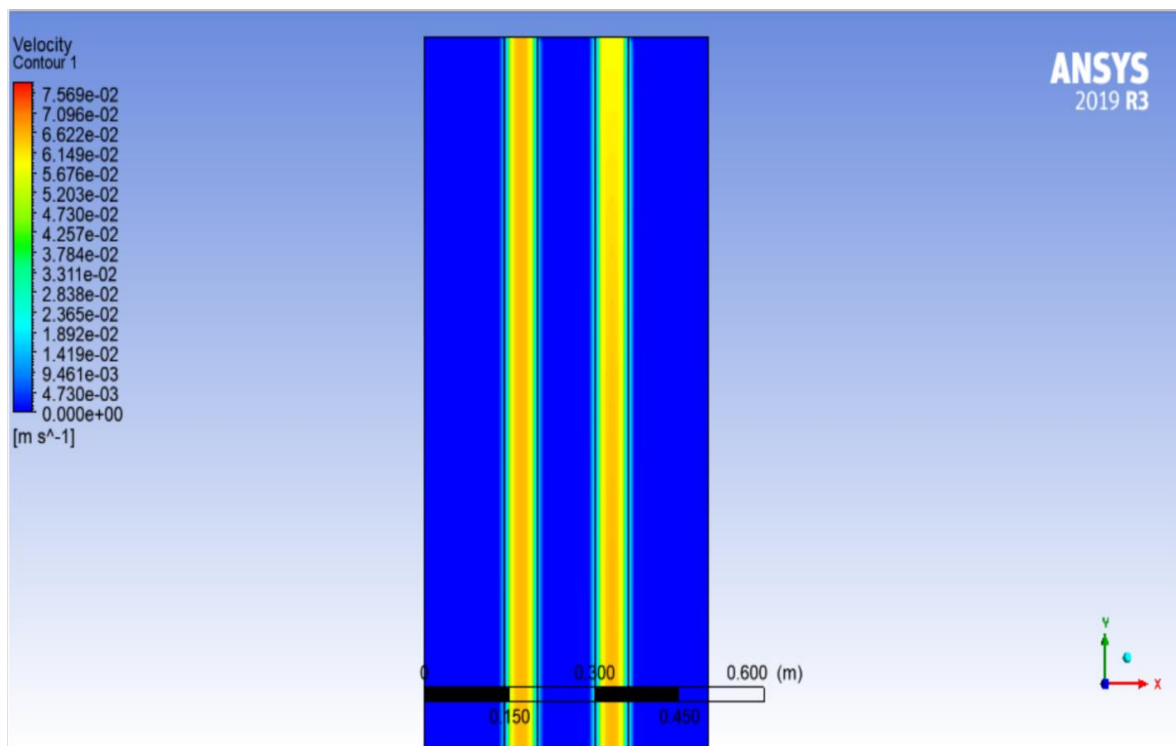


Figure V.20 : Champ de vitesse ($\varnothing = 0.06m ; R_e = 3500$)

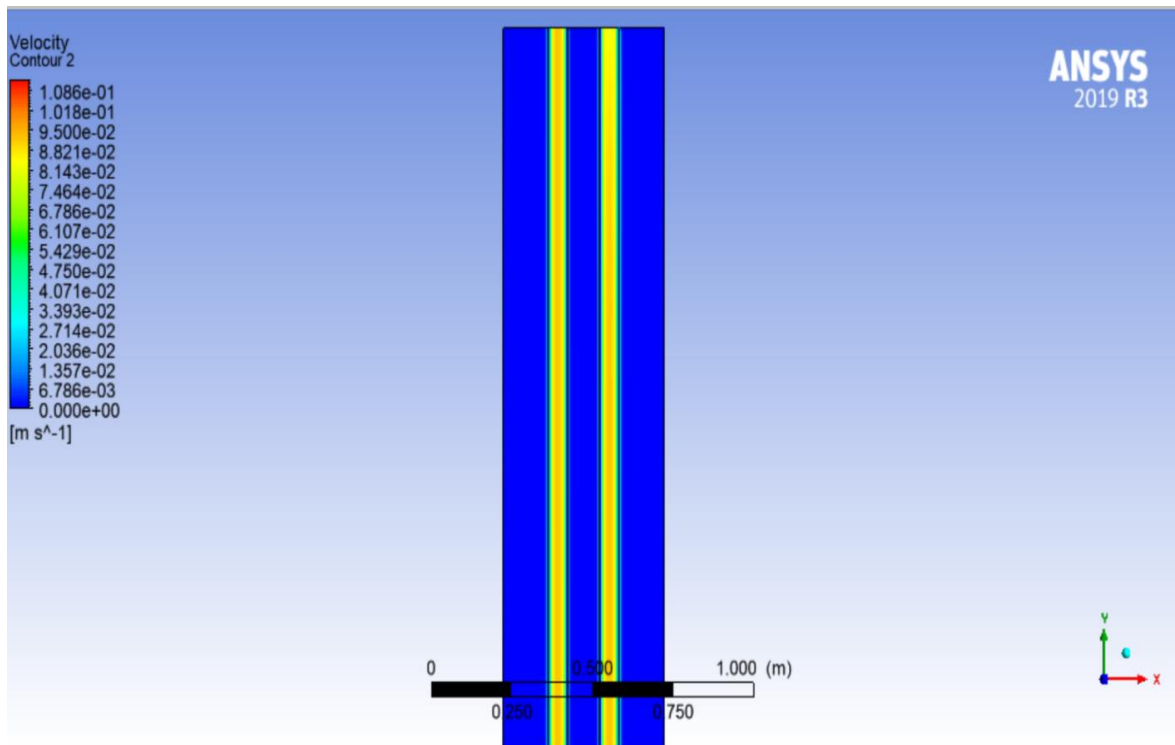


Figure V.21 : Champ de vitesse ($\varnothing = 0.06m ; R_e = 5000$)

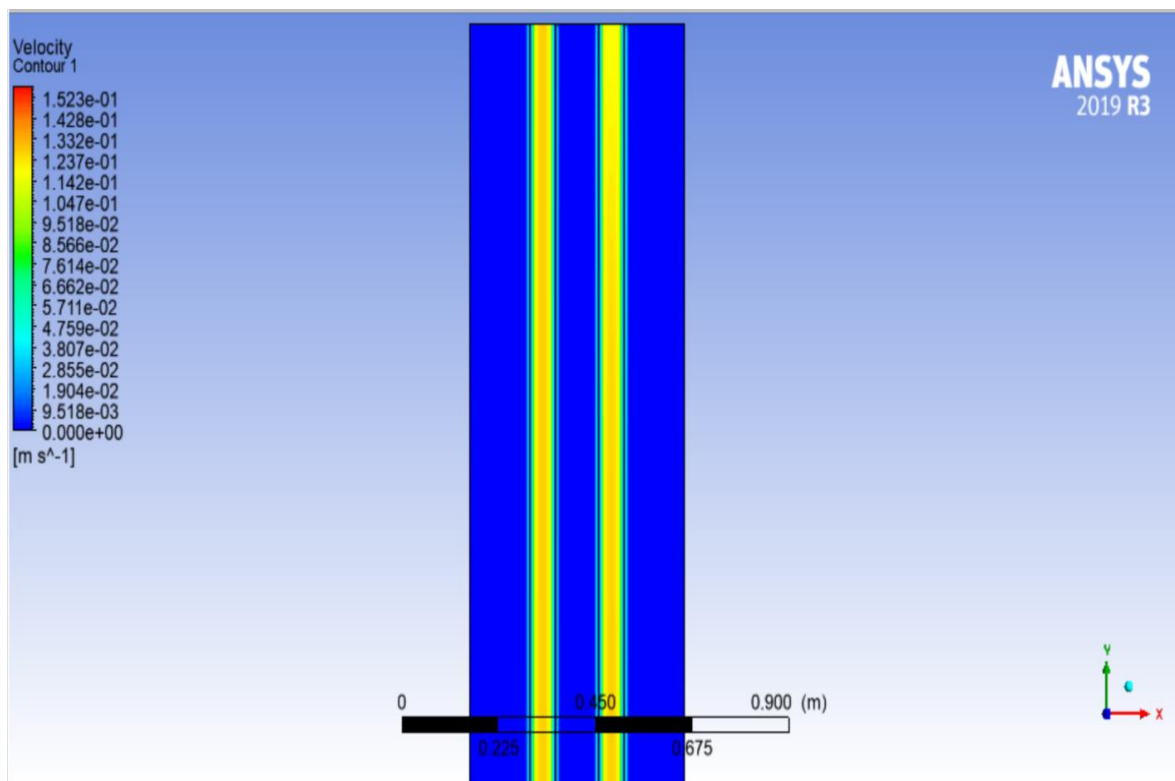


Figure V.22 : Champ de vitesse ($\varnothing = 0.06m ; R_e = 7000$)

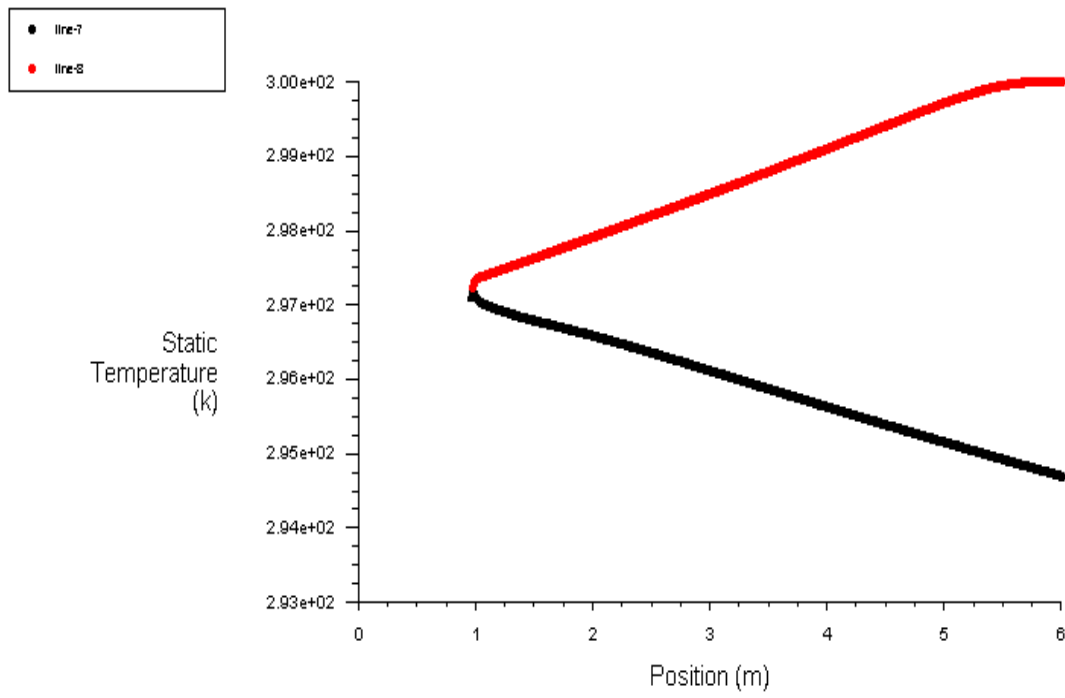


Figure V.23 : évolution de température pour $\varnothing = 0.06m$ et $R_e = 3500$

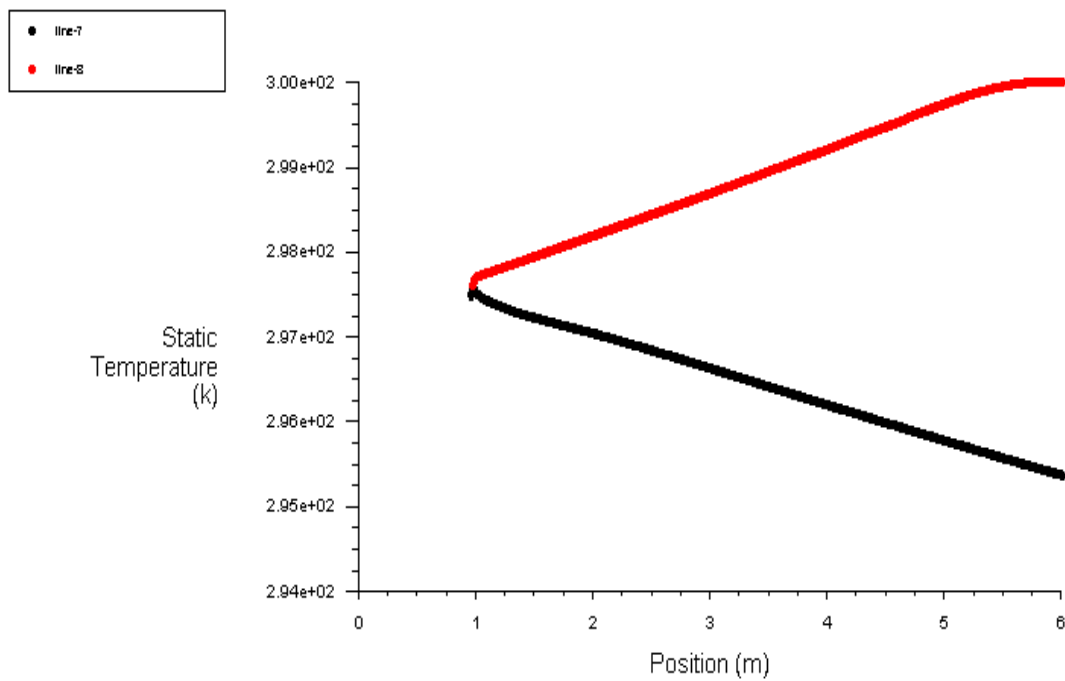


Figure V.24 : évolution de température pour $\varnothing = 0.06m$ et $R_e = 5000$

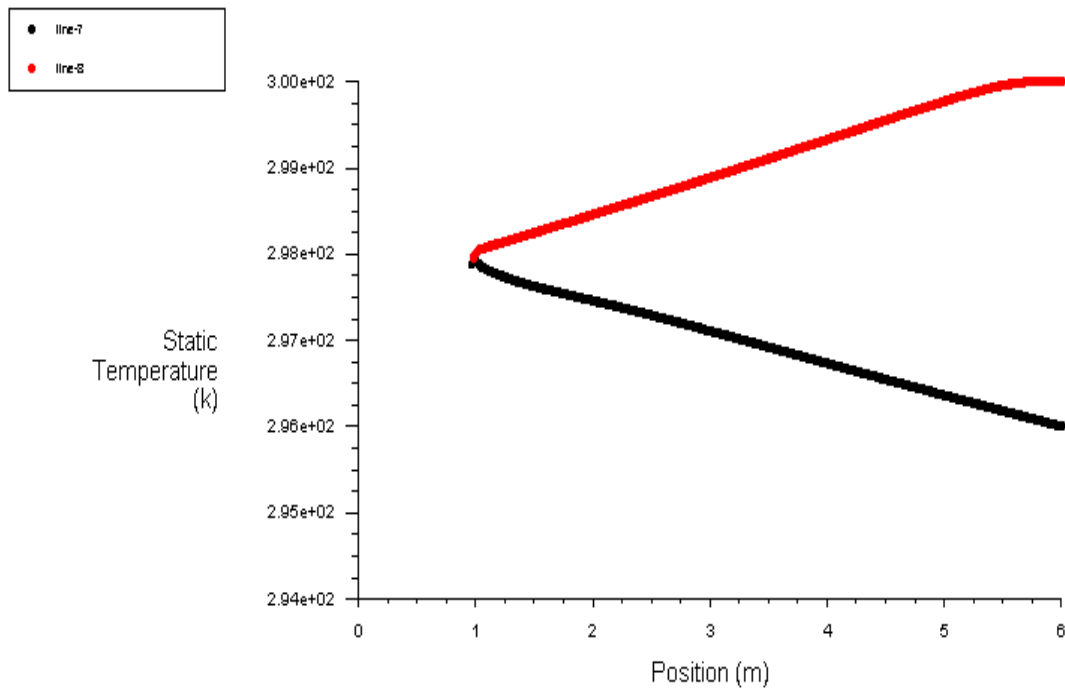


Figure V.25 : évolution de température pour $\phi = 0.06m$ et $R_e = 7000$

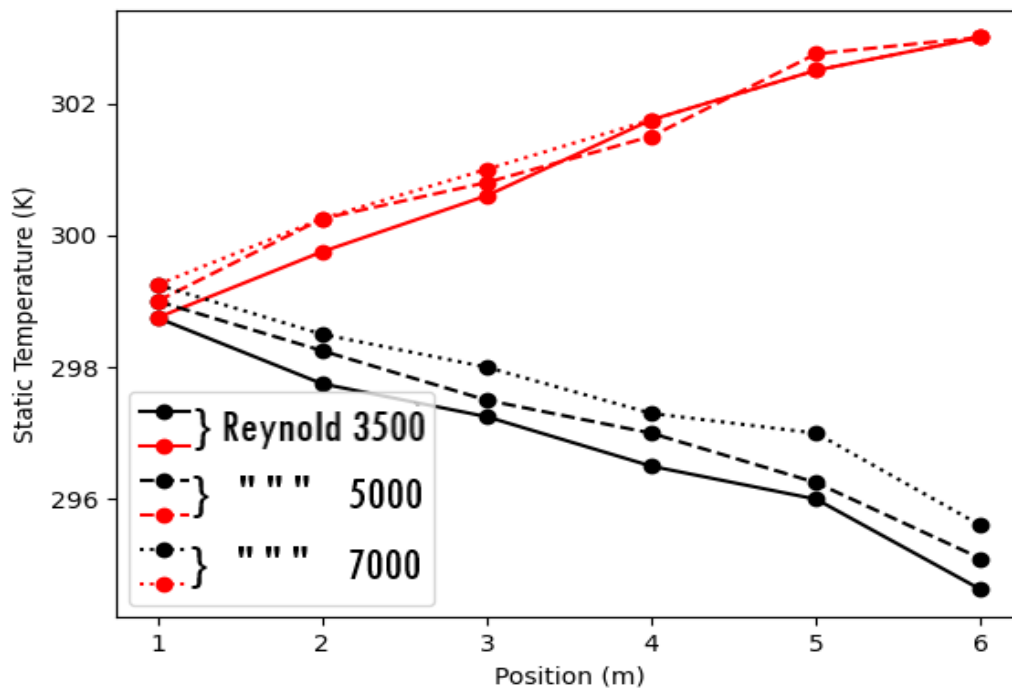


Figure V.26 : comparaison évolution de température pour $\phi = 0.06m$ et différente Reynolds

La (figure V.26) illustre la variation de la température dans l'échangeur de chaleur de l'entrée à (303 k) jusqu'à la sortie en fonction du diamètre du tube (0.06 m) et en fonction du nombre de Reynolds (3500 ; 5000 ; 7000).

1. Dans le cas du diamètre (0.06 m) et le Reynolds ($Re=3500$), on a obtenu une température à la sortie de (294.36 k) avec une baisse de (8.64).
2. Dans le cas du diamètre (0.06 m) et le Reynolds ($Re=5000$), on a obtenu une température à la sortie de (295.1 k) avec une baisse de (7.9).
3. Dans le cas du diamètre (0.06 m) et le Reynolds ($Re=7000$), on a obtenu une température à la sortie de (295.78 k) avec une baisse de (7.22).

Les résultats les plus satisfaisants ont été obtenus dans le cas n°1 ($D=0.06m$) et Reynolds $Re=3500$.

Dans toute augmentation du nombre de Reynolds entraîne une augmentation de la température à la sortie, et inversement, Ce qui indique que la relation entre ces deux variables est une relation proportionnelle direct.

Lorsqu'on compare le premier cas (0.04 m) et le deuxième cas (0.06 m), on constate que l'augmentation du diamètre est liée à une augmentation de la température en sortie avec toutes les valeurs de Reynolds.

V.1.1.3 troisième cas ($D=0.08m$) :

➤ Champs de température :

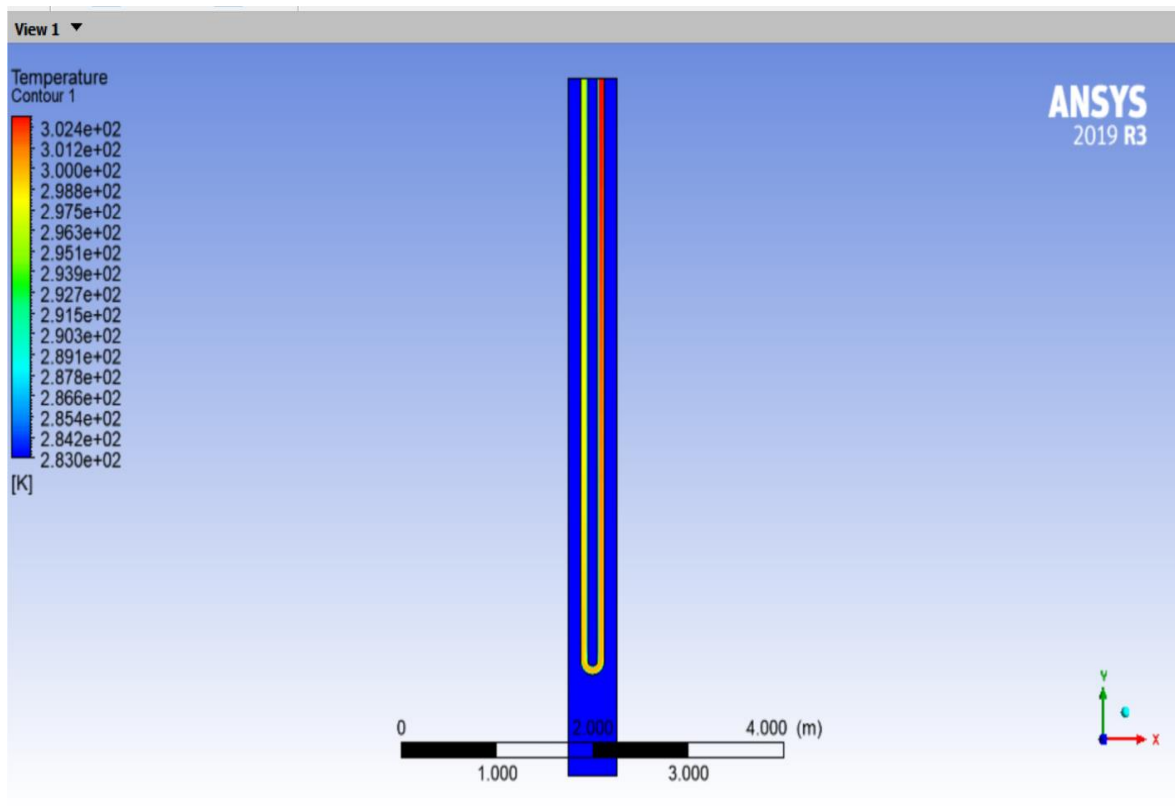


Figure V.27 : Champ de température ($\phi = 0.08m ; R_e = 3500$)

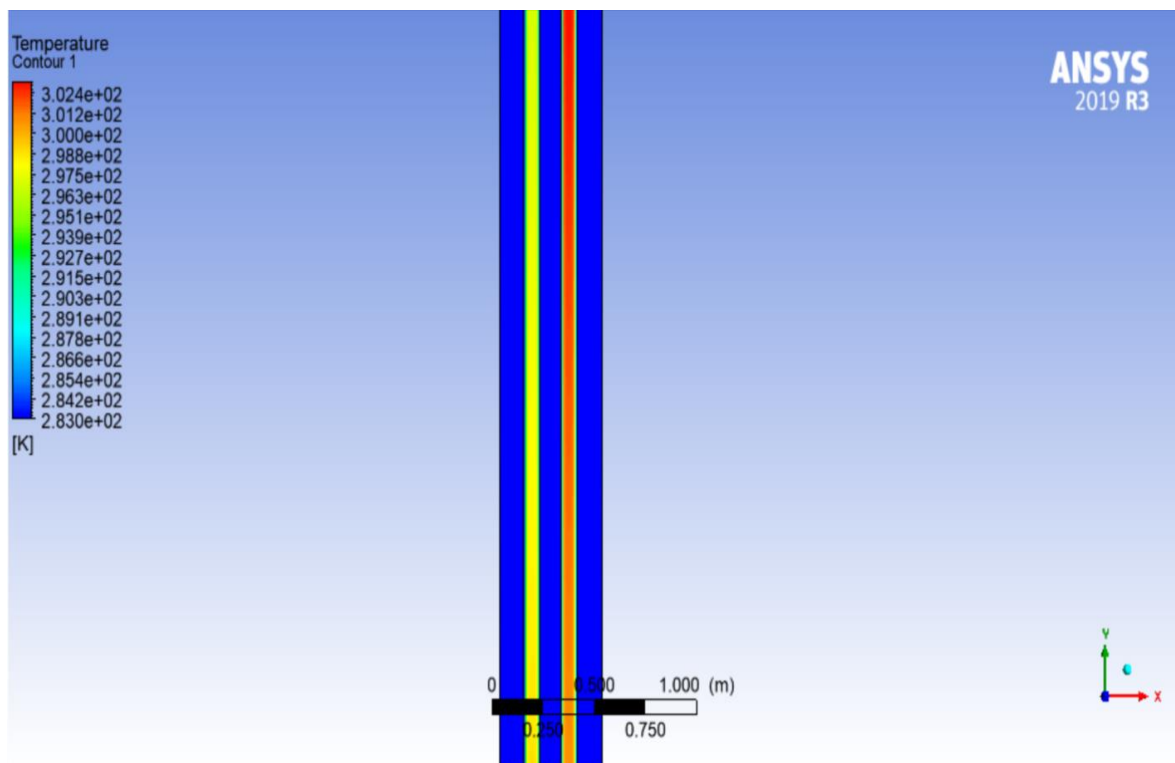


Figure V.28 : Champ de température avec zoom ($\phi = 0.08m ; R_e = 3500$)

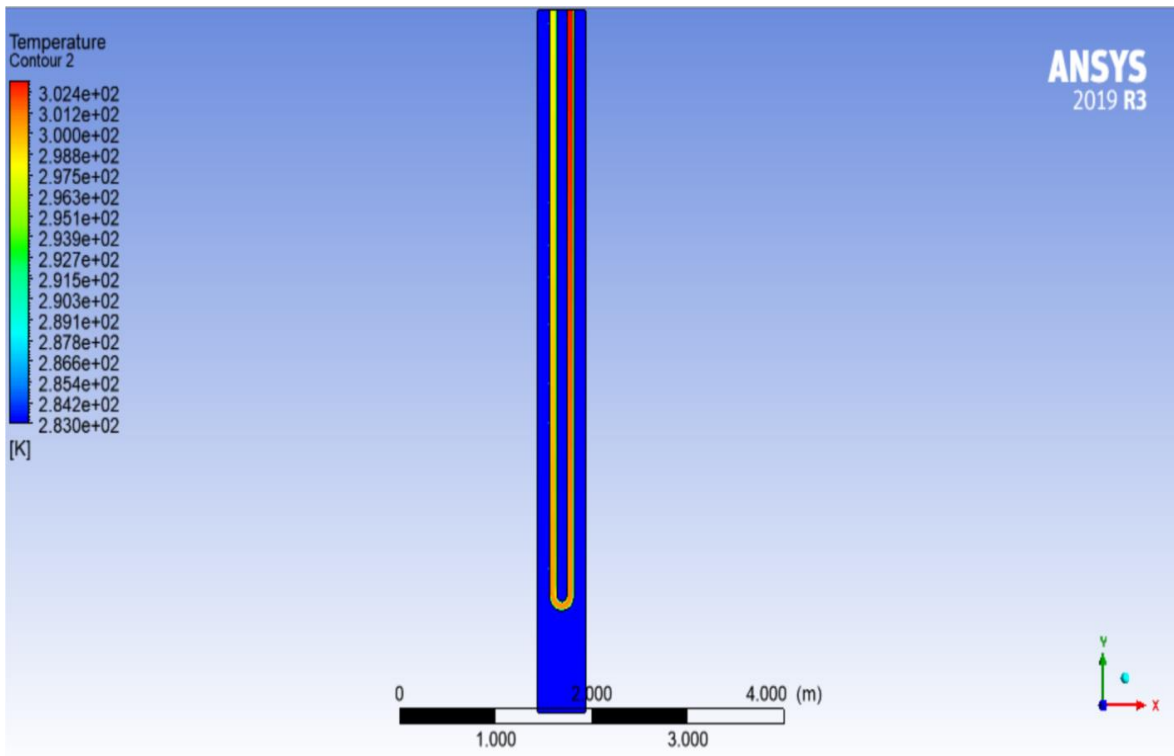


Figure V.29 : Champ de température ($\phi = 0.08m ; R_e = 5000$)

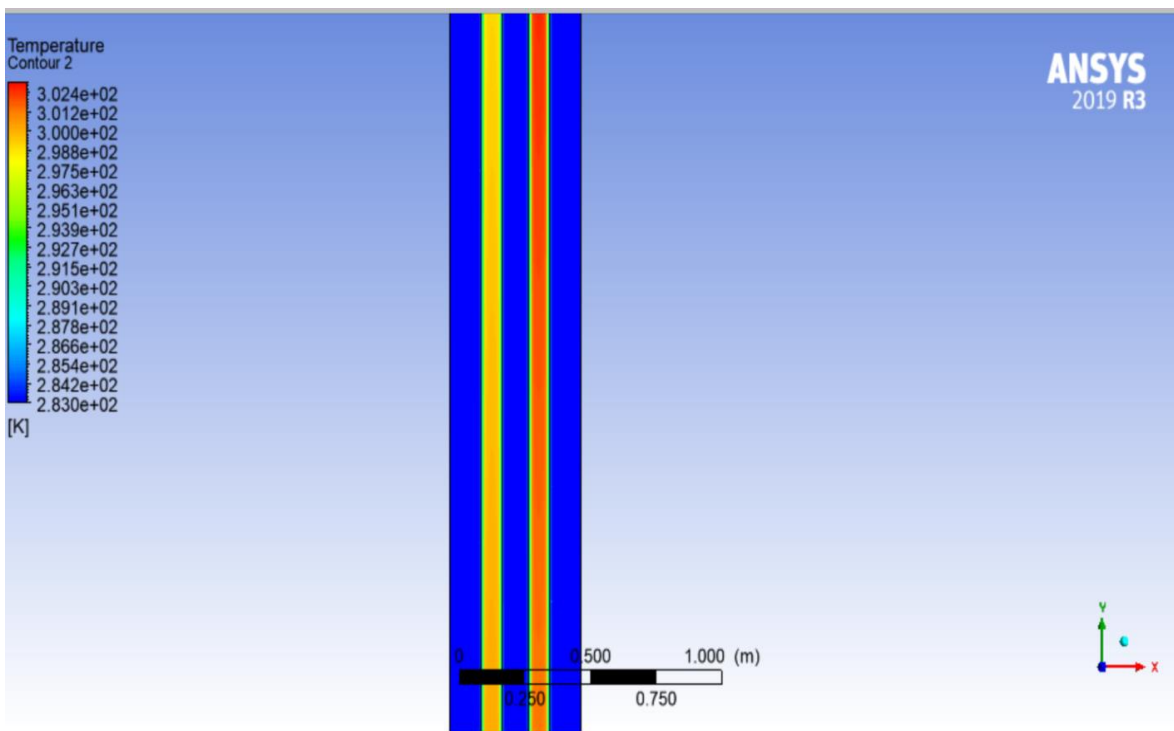


Figure V.30 : Champ de température avec zoom ($\phi = 0.08m ; R_e = 5000$)

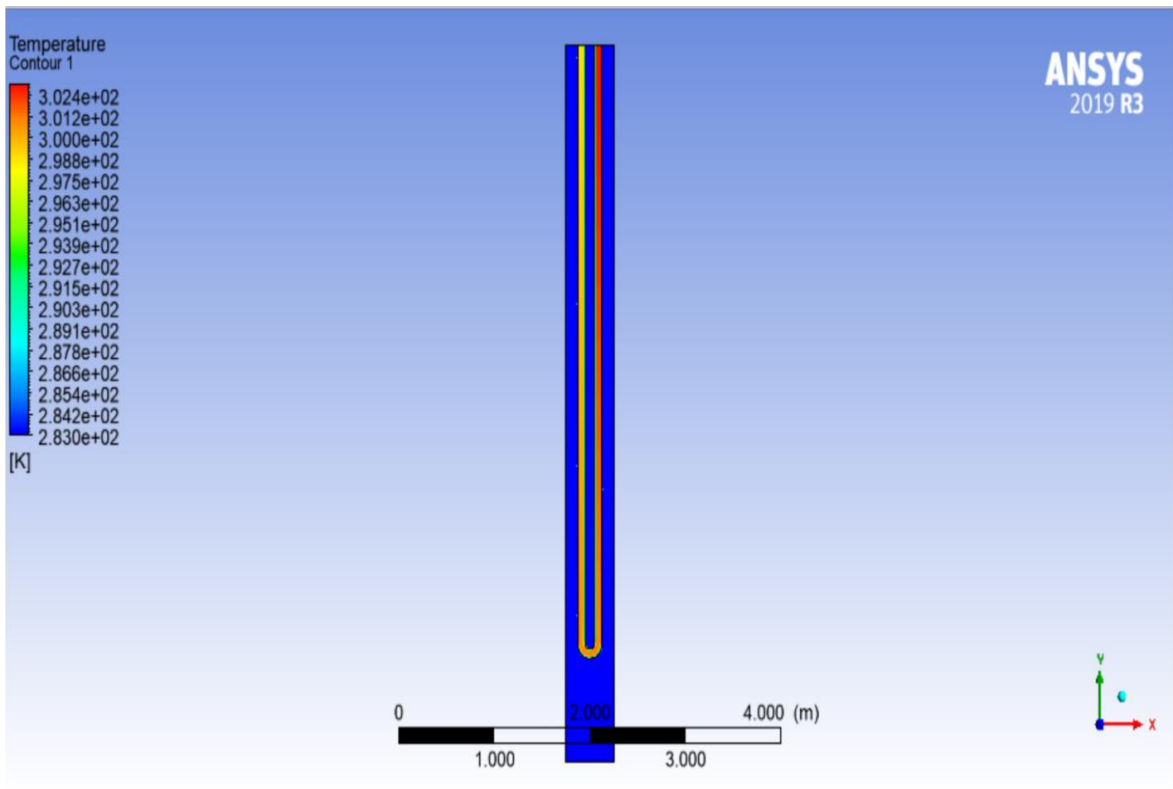


Figure V.31 : Champ de température ($\phi = 0.08m ; R_e = 7000$)

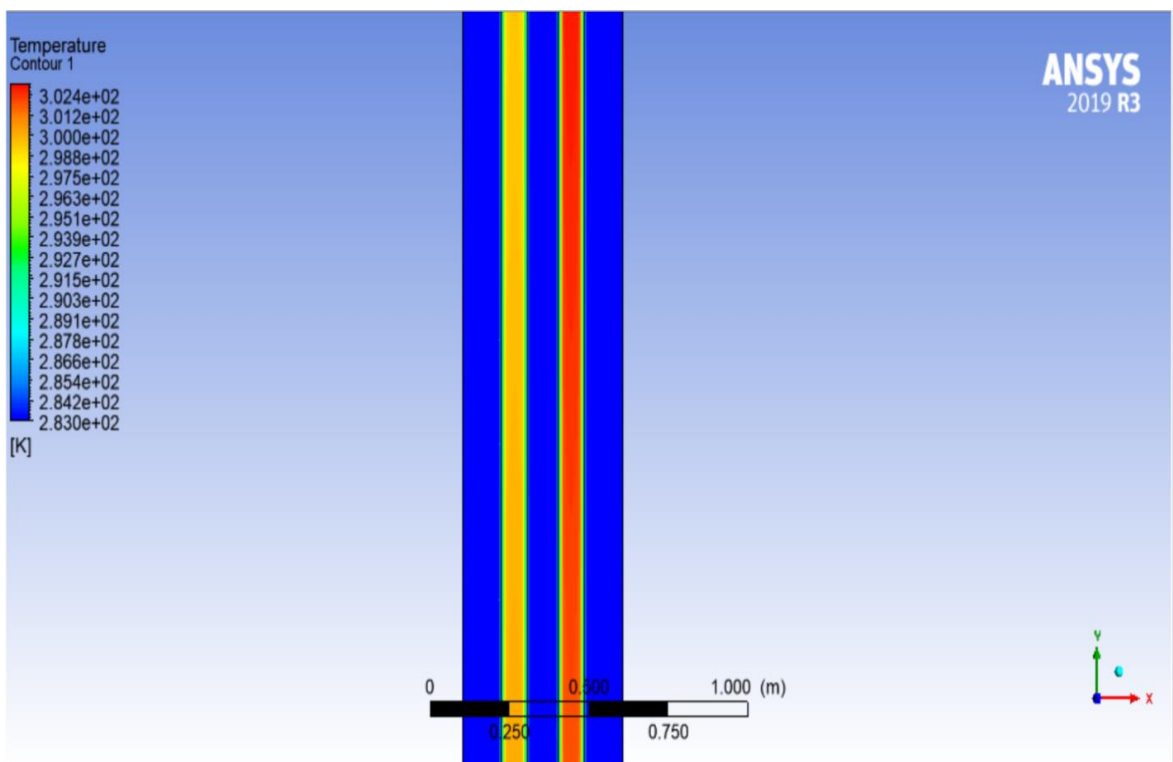
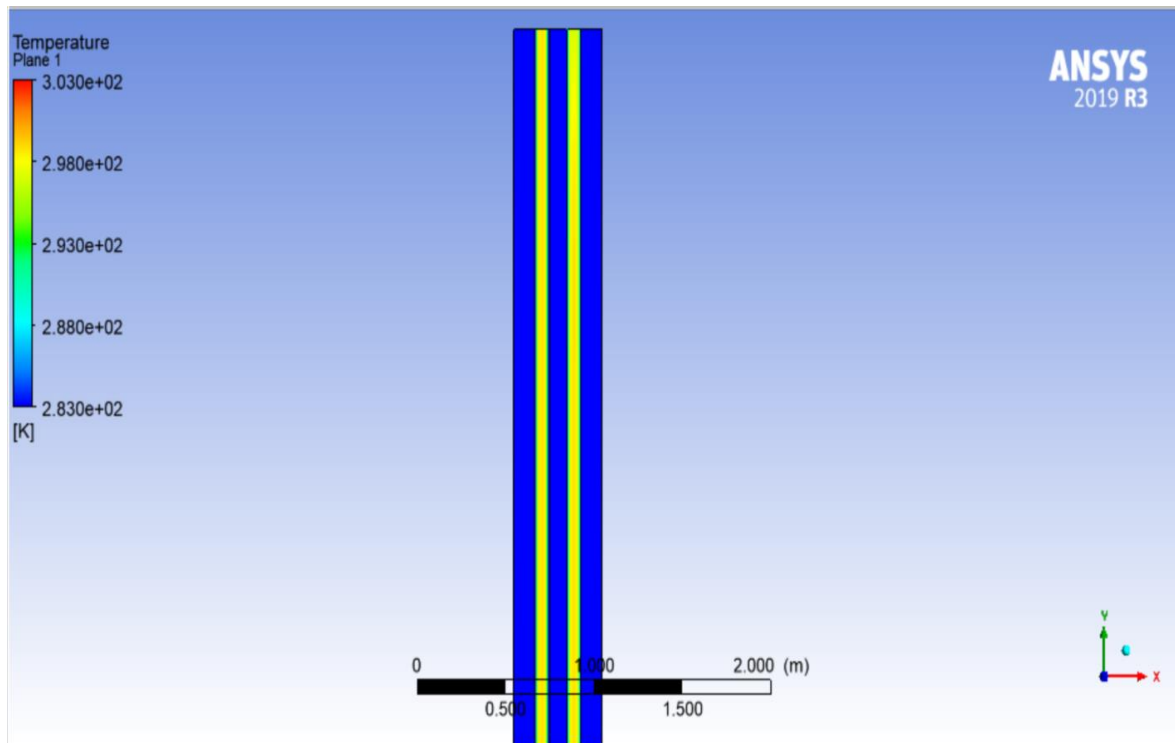
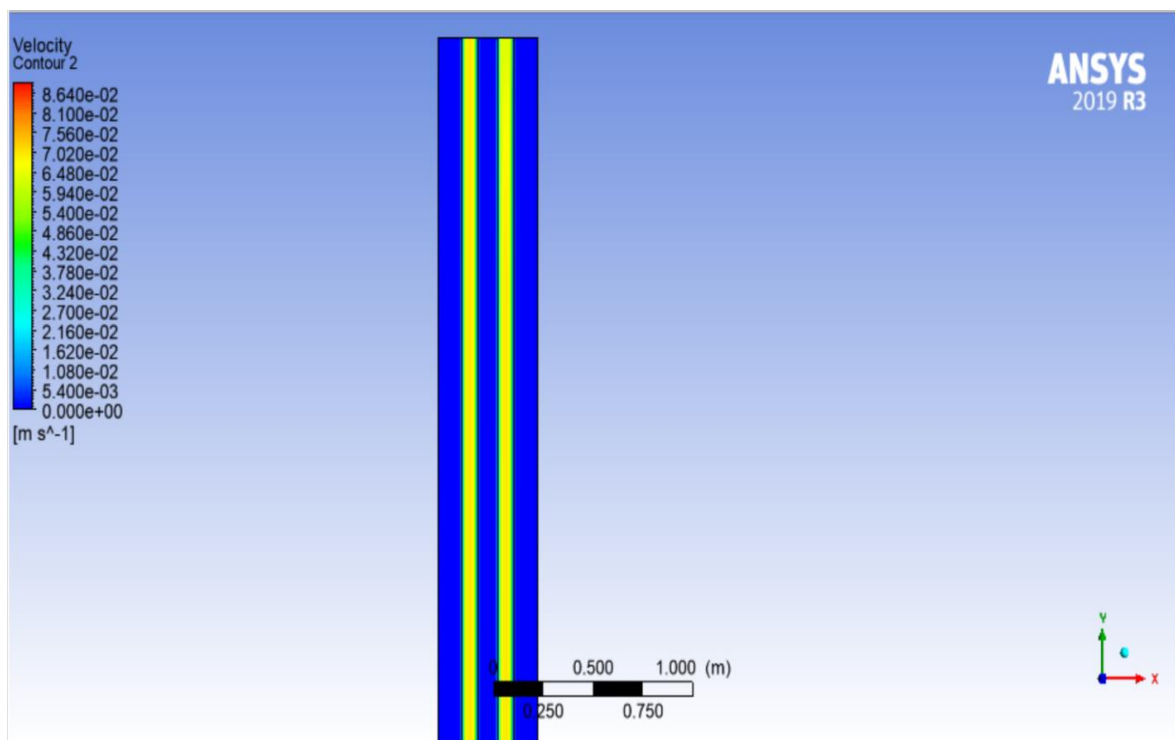


Figure V.32 : Champ de température avec zoom ($\phi = 0.08m ; R_e = 7000$)

➤ **Champ de vitesse :****Figure V.33 :** Champ de vitesse ($\phi = 0.08m ; R_e = 3500$)**Figure V.34 :** Champ de vitesse ($\phi = 0.08m ; R_e = 5000$)

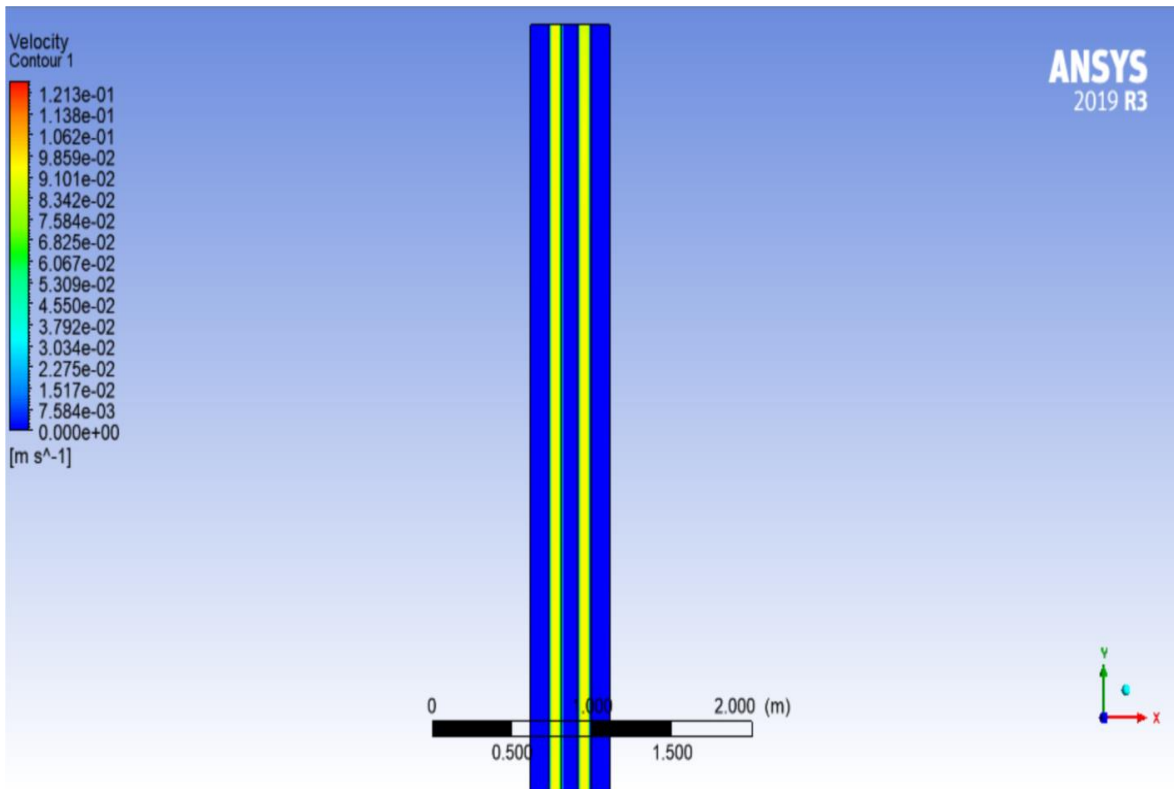


Figure V.35 : Champ de vitesse ($\phi = 0.08m ; R_e = 7000$)

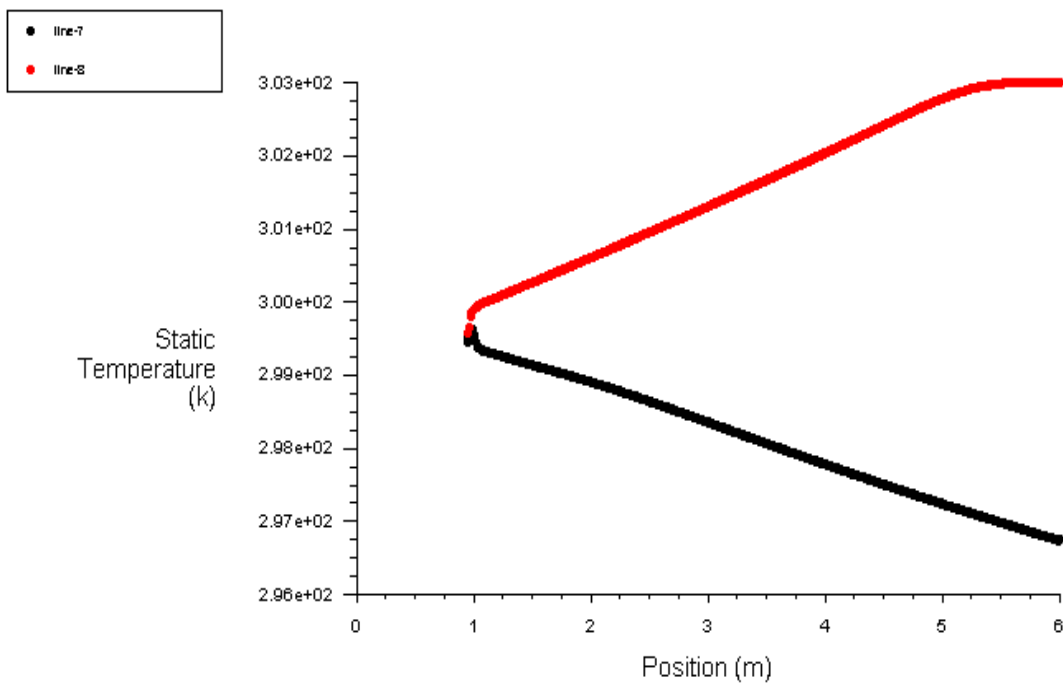


Figure V.36 : évolution de température pour $\phi = 0.08m$ et $R_e = 3500$

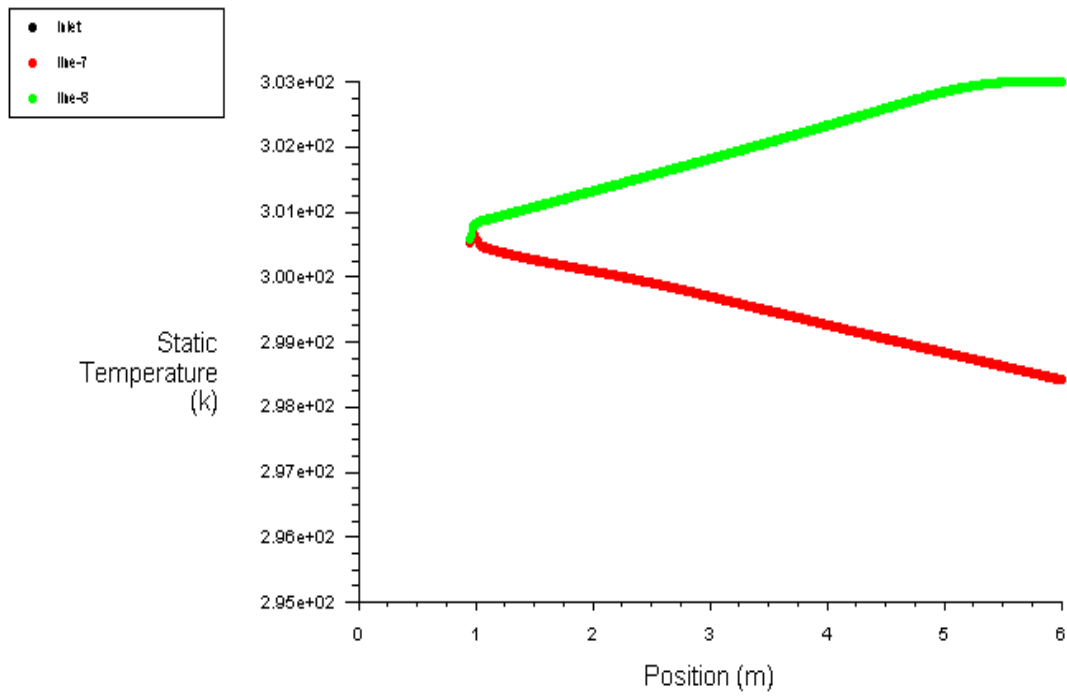


Figure V.37 : évolution de température pour $\phi = 0.08m$ et $R_e = 5000$

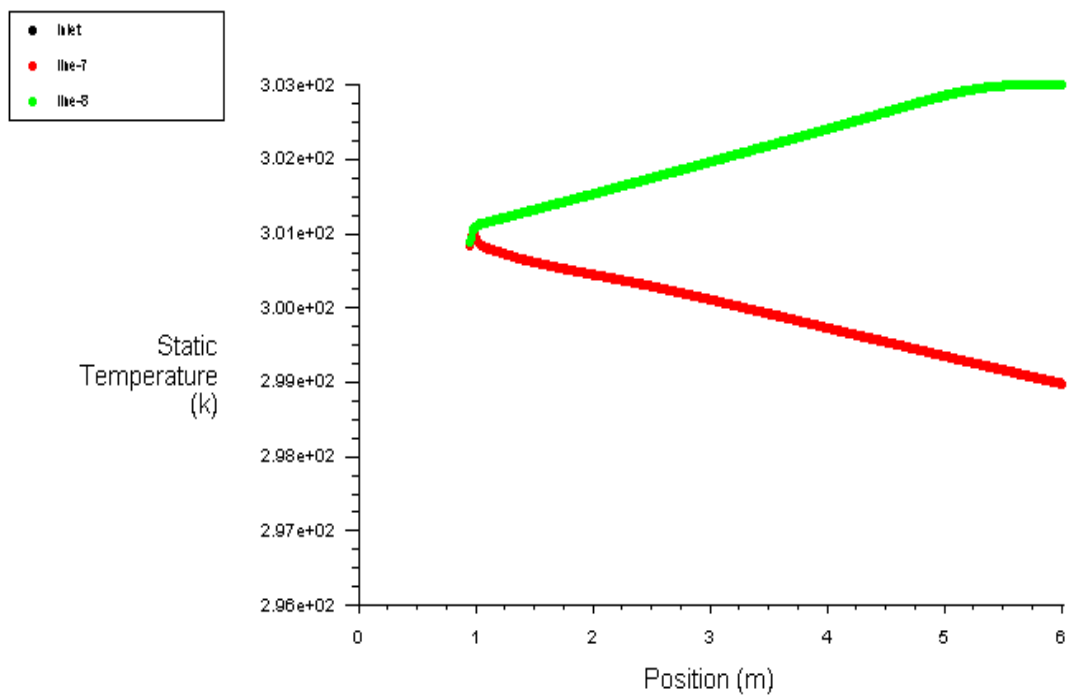


Figure V.38 : évolution de température pour $\phi = 0.08m$ et $R_e = 7000$

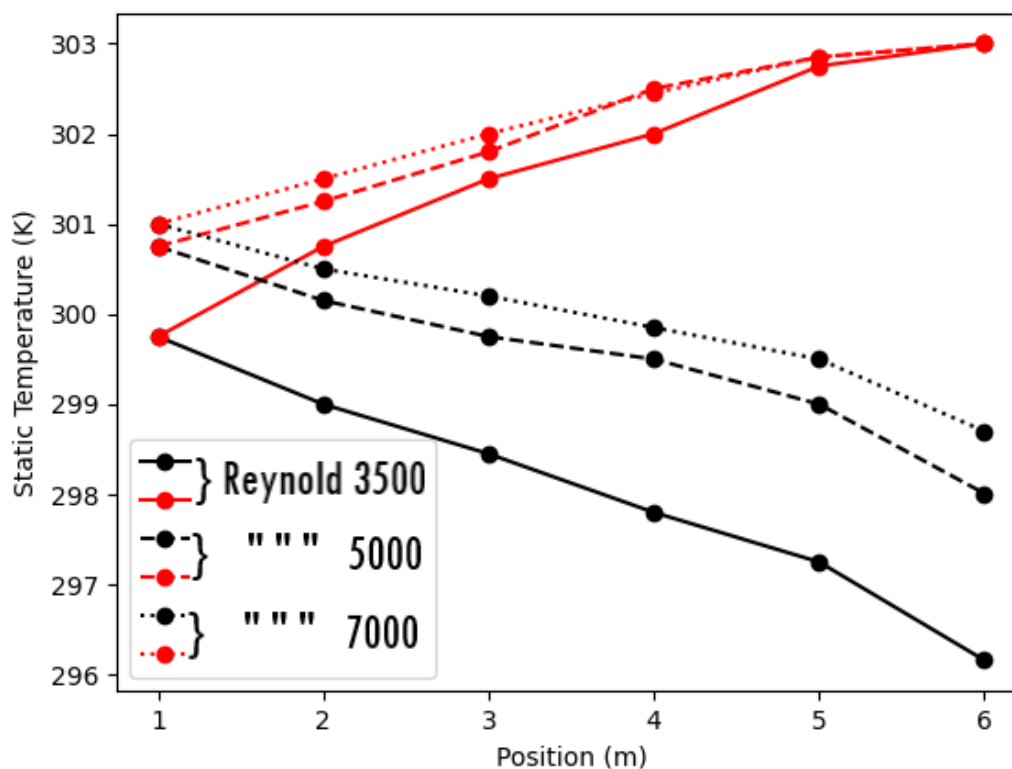


Figure V.39 : comparaison évolution de température pour $\phi = 0.08m$ et différents Reynolds

La (figure V.39) illustre la variation de la température dans l'échangeur de chaleur de l'entrée à (303 k) jusqu'à la sortie en fonction du diamètre du tube (0.08 m) et en fonction du nombre de Reynolds (3500 ; 5000 ; 7000).

1. Dans le cas du diamètre (0.08 m) et le Reynolds ($Re=3500$), on a obtenu une température à la sortie de (296.16 k) avec une baisse de (6.84).
2. Dans le cas du diamètre (0.08 m) et le Reynolds ($Re=5000$), on a obtenu une température à la sortie de (298.01 k) avec une baisse de (4.99).
3. Dans le cas du diamètre (0.08 m) et le Reynolds ($Re=7000$), on a obtenu une température à la sortie de (298.7 k) avec une baisse de (4.3).

Les résultats les plus satisfaisants ont été obtenus dans le cas n°1 ($D = 0.08m$) et Reynolds $Re = 3500$.

Dans toute augmentation du nombre de Reynolds entraîne une augmentation de la température à la sortie, et inversement, Ce qui indique que la relation entre ces deux variables est une relation proportionnelle directe.

V.1.2 comparaison les trois meilleur cas :

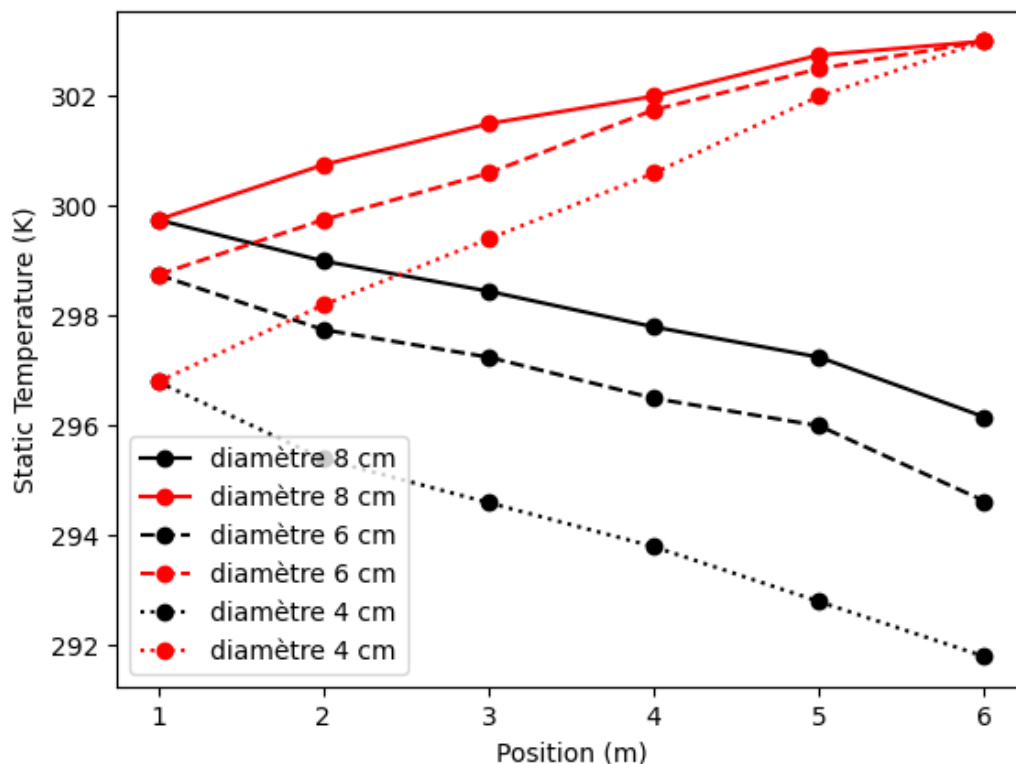


Figure V.40 : Evolution de température pour les trois meilleurs résultats

La figure (V.40) illustre la variation de la température dans l'échangeur de chaleur de l'entrée à (303 k) jusqu'à la sortie en fonction du diamètre du tube et du nombre de Reynolds

1. Dans le cas du diamètre (0.04 m) et le Reynolds ($Re=3500$), on a obtenu une température à la sortie de (291,7 k) avec une baisse de (11.3).
2. Dans le cas du diamètre (0.06 m) et le Reynolds ($Re=3500$), on a obtenu une température à la sortie de (294.36 k) avec une baisse de (8.64).
3. Dans le cas du diamètre (0.08 m) et le Reynolds ($Re=3500$), on a obtenu une température à la sortie de (296.16 k) avec une baisse de (6.84).

Les résultats les plus satisfaisants ont été obtenus dans le cas n°1 ($D=0.04m$) et Reynolds $Re=3500$.

Lorsqu'on compare les cas 1 (0.04 m) et 2 (0.06 m) et 3 (0.08 m), on constate que l'augmentation du diamètre du tube entraîne une augmentation de la température en sortie, pour toutes les valeurs de nombre de Reynolds.

L'augmentation de la surface d'échange est entraînée par l'augmentation du diamètre du tube. De plus, l'augmentation du nombre de Reynolds provoque une augmentation de la vitesse du fluide, Ce qui ne permet pas de laisser suffisamment de temps pour l'échange thermique, cela entraîne une diminution de l'efficacité de l'échangeur.

Tableau V.1 : La température à la sortie pour tous les cas

Diameter [m]	Reynolds	Vitesse [m/s]	Temperature de sortie [k]
0.04	3500	0.0879	291.7
	5000	0.1256	292.74
	7000	0.1758	293.25
0.06	3500	0.0586	294.36
	5000	0.084	295.1
	7000	0.1172	295.78
0.08	3500	0.044	296.16
	5000	0.063	298.01
	7000	0.088	298.7

De ce qui a été mentionné précédemment, nous constatons que :

La performance de l'échangeur de chaleur type U augmente avec le nombre de Reynolds réduit et le diamètre du canal réduit. Lorsque le diamètre du canal augmente, cela entraîne

une augmentation de la surface d'échange. Et l'augmentation du nombre de Reynolds Cela entraîne de l'augmentation de la vitesse du fluide Cela ne permet pas de laisser suffisamment de temps pour l'échange thermique, ce qui entraîne une diminution de l'efficacité de l'échangeur.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Actuellement notre planète est confrontée à diverses pollutions et vagues de réchauffement climatique qui mettent en péril la vie sur terre, créent beaucoup de problèmes pour le climat et l'écosystème. L'exploitation excessive des combustibles fossiles tels que le gaz, le pétrole et le charbon amène cette pollution. On les considère comme énergie épuisable, à long terme est impossible de sauvegarder. Cela a incité les hommes à rechercher des alternatives pour des énergies propres en grande partie renouvelables. Dans des proportions variables, l'énergie géothermique est l'une des meilleures sources d'énergie renouvelable que l'on trouve aujourd'hui dans des secteurs divers comme l'amélioration du sol, les utilisations de chauffage ou de climatisation.

Dans cette étude, notre attention est portée sur son utilisation dans des applications de refroidissement en utilisant un échangeur vertical de chaleur de type U.

Nous avons mené une étude qui a été effectuée pour étudier l'influence de la vitesse et du diamètre du tube sur l'efficacité de l'échangeur. Après l'analyse CFD effectuée avec le logiciel ANSYS Fluent, les résultats suivants ont été obtenus. L'échangeur présente les meilleures performances quand la vitesse du fluide diminue et le diamètre du canal diminue, pourvu que le tube ait un matériau avec une conductivité thermique optimale pour améliorer la conductance thermique. Le type d'échangeur de chaleur type U a présenté les meilleures performances. Le diamètre annulaire du tube $D = 0.04$ m et le nombre de Reynolds de 3500. Lors de la sortie, la température était de 291,7 K, avec un écart de 11.3 entre l'entrée 303 K et la sortie.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie :

1. Anjou, C. (2018). L'énergie géothermique: représentations, enseignements et contextes aux Antilles et dans la zone caraïbe (Doctoral dissertation, Université des Antilles).
2. Drid, M. M. Etude paramétrique des performances de l'échangeur de chaleur air-sol pour les applications de refroidissement (Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla).
3. Carte géothermie Production d'électricité. (n.d.). Pfeeree.eb2a.com. Récupéré le 20 février 2024, sur <https://pfeeree.eb2a.com>
4. Matek, B. (2016). Annual US & Global Geothermal Power Production Report, Geothermal Energy Association, Washington, USA, 36pp.
5. Andre-Concept. (2021, January 15). Pompe à chaleur Géothermique. Retrieved from <https://andre-concept.com/pac-geothermie>.
6. MEHDID, C. E. (2021). Comportement thermo-physique d'un puits canadien: application aux sites de l'oasis algérien (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra).
7. Cuny, M. (2017). Etude de l'impact des conditions géologiques et climatiques sur l'efficacité énergétique des systèmes géothermiques de surface (Doctoral dissertation, Université de Strasbourg)
8. Dounane, B., & Hathat, B. (2011). Conception et analyse de fonctionnements d'un échangeur air sol.
9. Combasson, M. (2023, October 21). Quelles sont les différences entre la géothermie haute énergie et la géothermie basse énergie? Drill-i. <https://drill-i.com/quelles-sont-les-differences-entre-la-geothermie-haute-energie-et-la-geothermie-basse-energie/>
10. Ait Ouali, A., Issaadi, A., Maizi, D., Ayadi, A., & Bouhdjar, A. (2019). Geothermal potential in the Ouarsenis-Biban-Kabylie (North Central Algeria): hot spring catalogue. *Arabian Journal of Geosciences*, *12*, 1-8.
11. Drid, M. M. Etude paramétrique des performances de l'échangeur de chaleur air-sol pour les applications de refroidissement (Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla).
12. puits proven.al. (n.d.). https://www.aeu.fr/fr/web_puiprov/puiprov.html

13. HATRAF, Nesrine (2014) Etude systématique et optimisation des performances d'une chaîne énergétique utilisant un capteur solaire à air et un échangeur enterré pour le chauffage solaire et le rafraîchissement par la géothermie. Doctoral thesis, Université Mohamed Khider– Biskra.
14. Géothermie : applications pour la production de chaleur et le chauffage. (n.d.). Récupéré sur <http://www.developpementdurable.org/guide/enr/geothermie.html>
15. Mohamed, S. A. A. D. E. D. I. N. E. Identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un échangeur air/sol enterré (Doctoral dissertation).
16. Ouali, S., Hadjiat, M. M., Ait-Ouali, A., Salhi, K., & Malek, A. (2018). Cartographie et caractérisation des ressources géothermiques de l'Algérie. *Journal of Renewable Energies*, 21(1), 54-61.
17. Ouali, S. (2005). Étude géothermique du sud de l'Algérie (Doctoral dissertation, Boumerdès).
18. SAYAD, A. (2020). Etude expérimentale d'un échangeur eau-air dans la région de Biskra; Utilisation de la géothermie pour la climatisation des habitats.
19. Mauger, R. (2017). Le droit de la transition énergétique, une tentative d'identification (Doctoral dissertation, Université Montpellier).
20. Axelsson, G. (2012). Sustainable geothermal utilization. *Proceedings of the Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells*, Santa Tecla, El Salvador, 11-17.
21. Rees, S. J. (2016). An introduction to ground-source heat pump technology. In *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems* (pp. 1-25). Woodhead Publishing.
22. Quora. (Accessed: 04-May-2017). What is the difference between a heat sink and a heat spreader?
23. BATI, T. A. (2004). PROJET DE RECHERCHE INTEGRE 6.2.
24. Ressource Naturel Canada. (2002). Les systèmes géothermiques commerciaux. Retrieved from <https://www.geothermieboreale.com/manuels/guideacheteur/guide-acheteur-commercial.pdf>
25. Bernier, M. A. (2006). Closed-loop ground-coupled heat pump systems. *Ashrae Journal*, 48(9), 12-25.

-
26. Béranger, B. (2013). Les pompes à chaleur. Editions Eyrolles.
 27. Chiasson, A. D. (2016). *Geothermal heat pump and heat engine systems: Theory and practice*. John Wiley & Sons.
 28. Stober, I., & Bucher, K. (2013). *Geothermal energy*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi, 10, 978-3.
 29. Yoon, S., Lee, S. R., Xue, J., Zosseder, K., Go, G. H., & Park, H. (2015). Evaluation of the thermal efficiency and a cost analysis of different types of ground heat exchangers in energy piles. *Energy Conversion and Management*, 105, 393-402.
 30. Richard, M. A., Giroux, B., Gosselin, L., Kendall, J., Malo, M., Mathieu-Potvin, F. & Raymond, J. (2016). Intégration de la géothermie profonde dans le portefeuille énergétique canadien.
 31. Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2015). *Ground-source heat pumps: fundamentals, experiments and applications*. Academic Press.
 32. Nahi, K. (2017). Application de la simulation numérique dans l'étude technique de la géothermie par nappes horizontale de tuyauterie appliquée à un projet immobilier mixte de commerces, bureaux et hôtel.
 33. Ascione, F., Bellia, L., & Minichiello, F. (2011). Earth-to-air heat exchangers for Italian climates. *Renewable energy*, 36(8), 2177-2188.
 34. HACINI, K., & Benatiallah, A. L. I. (2023). Etude de la performance du refroidissement d'un habitat en site saharien à l'aide d'un système d'énergie géothermique (Doctoral dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).
 35. Thome, J. R. (2004). Engineering data book III. *Wolverine Tube Inc, 2010*.
 36. Bontemps, A., Garrigue, A., Goubier, C., Huetz, J., Marvillet, C., Mercier, P., & Vidil, R. (1974). *Echangeurs de chaleur*. Ed. Techniques Ingénieur.
 37. SAYAD, A. (2020). Etude expérimentale d'un échangeur eau-air dans la région de Biskra; Utilisation de la géothermie pour la climatisation des habitats.
 38. Amitrano, D. (2006). Eléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit «puits canadien».
 39. Belloufi, Y. (2012). Modélisation d'un échangeur air/sol dont le but de rafraichissement des locaux (Master's thesis).

-
40. Le puits canadien : solution environnementale, Site Web : consulté le 13/02/2014 http://conseils.xpair.com/consulter_parole_expert/puits_canadien_solution_environneme_ntale.htm.
 41. Bisoniya, T. S., Kumar, A., & Baredar, P. (2013). Experimental and analytical studies of earth–air heat exchanger (EAHE) systems in India: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 238-246.
 42. BELLOUFI, Y. (2017). Etude théorique et expérimentale de l'exploitation de la géothermie dans le réchauffement ou le refroidissement d'un fluide caloporteur utilisé pour le confort thermique de l'habitat (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
 43. Adaweh, A. B., & Idleh, M. R. (2015). Project Evaluation of Geothermal Resources. In *Proceedings of the World Geothermal Congress 2015*. Presented at the World Geothermal Congress.
 44. Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2018). What is geothermal energy?. In *Renewable Energy* (pp. Vol1_302-Vol1_328). Routledge.
 45. DiPippo, R. (1991). Geothermal energy Electricity generation and environmental impact. *Energy Policy*, 19(8), 798-807.
 46. González, Z., González, D., & Kretzschmar, T. (2015). First Approach of Environmental Impact Assessment of Cerro Prieto Geothermal Power Plant, BC Mexico. In *World Geothermal Congress*.
 47. Kagel, A., Bates, D., & Gawell, K. (2005). A guide to geothermal energy and the environment.
 48. Quintero-Núñez, M., Cuaya-Simbro, M. E., Canales-Rodriguez, M. A., Garcia-Cueto, O. R., Santillán-Soto, N., Ojeda-Benítez, S., & Velázquez-Limón, N. (2015). A Comparative Study on the Environmental Impacts of a Binational Geothermal System: Imperial Valley, CA., USA and Cerro Prieto, Mexicali Valley, BC, México. In *World Geothermal Congress, Melbourne, Australia*.
 49. Aksoy, N., Gok, O. S., Mutlu, H., & Kilinc, G. (2015, April). CO2 emission from geothermal power plants in Turkey. In *Proceedings World Geothermal Congress* (p. 2015).
 50. Lacirignola, M., & Blanc, I. (2013). Environmental analysis of practical design options for enhanced geothermal systems (EGS) through life-cycle assessment. *Renewable energy*, 50, 901-914.
 51. Cuenot, N., Dorbath, C., & Dorbath, L. (2008). Analysis of the microseismicity induced by fluid injections at the EGS site of Soultz-sous-Forêts (Alsace, France): implications for the characterization of the geothermal reservoir properties. *Pure and applied geophysics*, 165, 797-828.

52. Majer, E. L., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B., & Asanuma, H. (2007). Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. *Geothermics*, 36(3), 185-222.
53. Abbasi, S. A., & Abbasi, N. (2000). The likely adverse environmental impacts of renewable energy sources. *Applied energy*, 65(1-4), 121-144.
54. Mutia, T. M., & Simboyi, H. (2015). Environmental Audit Score-Card for Menengai Geothermal Project, Kenya: 2011-2013. In Proceedings of the World Geothermal Congress 2015. Presented at the World Geothermal Congress.
55. Lavoie, R., Malo, M., & Raymond, J. (2015). Impacts environnementaux potentiels liés à la géothermie profonde: Rapport final.
56. Brocato, E., Branchesi, M., Cappellaro, E., Covino, S., Grado, A. N. I. E. L. L. O., Greco, G., & (GRAWITA-GRAvitational Wave Inaf TeAm). (2018). GRAWITA: VLT Survey Telescope observations of the gravitational wave sources GW150914 and GW151226. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 474(1), 411-426.
57. Rees, S. J. (2016). An introduction to ground-source heat pump technology. In *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems* (pp. 1-25). Woodhead Publishing.
58. **SID, I., KHERFI, I., & BOUBLEL, N.** UTILISATION DES ECHANGEURS AIR-SOL POUR LE CHAUFFAGE ET LE RAFRAICHISSEMENT DES BATIMENTS: ETUDE DE MODELISATION-SIMULATION (Doctoral dissertation)
59. Kim, E. J., Roux, J. J., Rusaouen, G., & Kuznik, F. (2010). Numerical modelling of geothermal vertical heat exchangers for the short time analysis using the state model size reduction technique. *Applied Thermal Engineering*, 30(6-7), 706-714.

