الجمـــــــــهوريـــــــــة الجـــــــزائـــريـــة الديـمـــــقـــراطـيـــة الـشـــــــعـبـيـــة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـــــــعـــــليـــــم العـــــــــالي و البـــــــــــحث العـــــــلـــمـــــــــي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جـــــــــــــامعة عمار ثليجي - الأغواط –

Université Amar Thelidji - Laghouat

Faculté de TECHNOLOGIE

PROJET DE FIN DE CYCLE DE MASTER

Filière : Génie Mécanique

Option : Énergie Renouvelable

THÈME

Etude d'un échangeur géothermique

(Refroidissement par évaporation)

Réalisé Par **:**

- **TICHOUCHE NOUSSAIBA IHSSANE**

Jury de soutenance :

Pr MOKHTAR AOUISSI	*Professeur*	*Univ. Laghouat*
Pr MOHAMED TEGGAR	*Professeur*	*Univ. Laghouat*
Dr MOHAMED BELHADJ	*MCA*	*Univ. Laghouat*

Promotion : Juin 2026

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Allah le Tout-Puissant de m'avoir accordé la santé, la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur pour sa disponibilité, ses précieux conseils, ses orientations et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Mes sincères remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

J'adresse aussi mes remerciements à l'ensemble des enseignants du département pour la qualité de leur enseignement et les connaissances qu'ils m'ont transmises durant mon parcours universitaire.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Qu'elles trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance et de ma profonde gratitude.

DÉDICACE

Avant toute chose, je remercie Allah le Tout-Puissant qui m'a accordé la santé, la force, le courage et la patience nécessaires pour accomplir ce travail.

Je dédie ce modeste mémoire à mes très chers parents, qui ont toujours été mon plus grand soutien. Merci pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices, vos encouragements et vos prières qui m'ont accompagnée à chaque étape de mon parcours. Je vous serai éternellement reconnaissante pour tout ce que vous avez fait pour moi.

À mes chers frères et à mes chères sœurs, pour leur affection, leur présence et leur soutien moral. Merci d'avoir partagé avec moi les moments de joie comme les moments de doute, et d'avoir toujours cru en moi. Que ce travail soit pour vous un témoignage de mon amour et de ma profonde gratitude.

À toute ma famille, qui m'a entourée d'encouragements, de bienveillance et de soutien tout au long de mes études.

À mon encadreur ainsi qu'à tous mes enseignants, pour leur disponibilité, leurs précieux conseils et les connaissances qu'ils m'ont transmises durant mon parcours universitaire.

À toutes les personnes qui m'ont aidée, soutenue ou encouragée, de près ou de loin, tout au long de cette aventure académique.

Enfin, je dédie ce travail à moi-même, pour ma persévérance, ma détermination et les efforts fournis afin d'atteindre cet objectif malgré les difficultés rencontrées.

Je souhaite que ce mémoire soit le début d'un avenir rempli de réussite, d'épanouissement et de nouvelles ambitions.

RÉSUMÉ

Cette étude porte sur l'analyse expérimentale des performances thermiques d'un échangeur de chaleur en serpentin en cuivre enterré dans un sol humide. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de l'humidité du sol et du débit de circulation de l'eau sur les échanges thermiques et sur l'amélioration du refroidissement grâce au phénomène d'évaporation.

Le dispositif expérimental est constitué d'un serpentin en cuivre enterré à une profondeur de 30 cm dans un bac rempli de sol humide. De l'eau chaude à une température d'environ 50°C circule dans le tube selon trois débits (8, 16 et 18 ml/s). Les températures d'entrée, de sortie, du sol, de l'air ainsi que l'humidité du sol ont été mesurées toutes les 30 minutes pendant une durée totale de trois heures.

Les résultats montrent que le débit de 8 ml/s offre les meilleures performances de refroidissement grâce à un temps de séjour plus important du fluide dans le serpentin, tandis que le débit de 18 ml/s permet de transférer la plus grande quantité d'énergie thermique. Les performances du système diminuent progressivement au cours du temps en raison de la réduction de l'humidité du sol et de l'atténuation du phénomène de refroidissement par évaporation. Ces résultats confirment qu'un échangeur enterré dans un sol humide constitue une solution simple et économique pour améliorer les échanges thermiques à faible profondeur.

Mots-clés : échangeur thermique enterré, serpentin en cuivre, sol humide, refroidissement par évaporation, transfert de chaleur, géothermie superficielle.

ABSTRACT

This study presents an experimental investigation of the thermal performance of a copper coil heat exchanger buried in moist soil. The main objective is to evaluate the influence of soil moisture content and water flow rate on heat transfer and to improve the cooling process through evaporative cooling.

The experimental setup consists of a copper coil buried at a depth of 30 cm in a container filled with moist soil. Hot water at approximately 50°C circulates through the coil at three different flow rates (8, 16, and 18 ml/s). The inlet and outlet water temperatures, soil and ambient temperatures, as well as soil moisture, were measured every 30 minutes over a total experimental period of three hours.

The results showed that the flow rate of 8 ml/s provided the best cooling performance due to the longer residence time of the water inside the coil, whereas the flow rate of 18 ml/s enabled the transfer of the highest amount of thermal energy. The system performance gradually decreased over time because of the reduction in soil moisture and the weakening of the evaporative cooling effect. These findings demonstrate that a heat exchanger buried in moist soil represents a simple and cost-effective solution for enhancing heat transfer in shallow geothermal applications.

Keywords: buried heat exchanger, copper coil, moist soil, evaporative cooling, heat transfer, shallow geothermal energy.

الملخص

تتناول هذه الدراسة التحليل التجريبي للأداء الحراري لمبادل حراري على شكل ملف نحاسي مدفون في تربة رطبة. ويهدف هذا العمل إلى تقييم تأثير رطوبة التربة ومعدل تدفق الماء على التبادلات الحرارية وتحسين عملية التبريد بالاعتماد على ظاهرة التبريد بالتبخر.

يتكون الجهاز التجريبي من ملف نحاسي مدفون على عمق 30 سم داخل حوض مملوء بتربة رطبة. ويمر داخله ماء ساخن بدرجة حرارة تقارب 50°م عند ثلاثة معدلات تدفق مختلفة (8، 16 و18 مل/ثانية). وقد تم قياس درجات حرارة الدخول والخروج، ودرجة حرارة التربة والهواء، بالإضافة إلى رطوبة التربة، كل 30 دقيقة لمدة ثلاث ساعات .

أظهرت النتائج أن معدل التدفق 8 مل/ثانية حقق أفضل أداء من حيث التبريد نتيجة زيادة زمن مكوث الماء داخل الملف، في حين سمح معدل التدفق 18 مل/ثانية بنقل أكبر كمية من الطاقة الحرارية. كما بينت الدراسة أن أداء النظام ينخفض تدريجياً مع مرور الوقت بسبب انخفاض رطوبة التربة وتراجع تأثير التبريد بالتبخر. وتؤكد هذه النتائج أن استخدام مبادل حراري مدفون في تربة رطبة يمثل حلاً بسيطاً واقتصادياً لتحسين التبادلات الحرارية عند الأعماق السطحية

الكلمات المفتاحية: مبادل حراري مدفون، ملف نحاسي، تربة رطبة، التبريد بالتبخر، انتقال الحرارة، الجيوحرارية السطحية

SOMMAIRE

REMERCIMENTS

Dédicaces

Résumé

ABSTRACT

ملخص

INTRODUCTION GENERALE 1

I. CHAPITRE I : Généralité sur la Géothermique et les échangeurs géothermique 3

I.1.Introduction 4

I.2. Généralités sur la géothermie 4

I.2.1. Définition de la géothermie 4

I.2.2. Types d'énergie géothermique 6

I.2.2.1. La géothermie de surface 6

I.2.2.2. La géothermie profonde 6

I.3. Classification des ressources géothermiques 7

I.3.1. Géothermie haute énergie 7

I.3.2. Géothermie moyenne énergie 8

I.3.3. Géothermie basse énergie (30°C<T°C<90°C) 8

I.3.4. Géothermie très basse énergie 9

I.4. Applications de la géothermie 9

I.4.1. Production d'électricité 9

I.4.2. Chauffage des bâtiments 10

I.4.3. Climatisation 10

I.4.4. Applications industrielles 10

I.4.5. Agriculture (serres) 10

I.4.6. Thermalisme 10

I.5 Avantages et inconvénients de la géothermie 11

I.5.1. Les avantages 11

I.5.2. Les inconvénients 11

I.6. Les échangeurs de chaleur 11

I.7. Principe de fonctionnement.....11
I.8. Les différents types d'échangeurs thermiques 12
I.9. Les échangeurs de chaleur géothermique 13
I.10. Les différents types des échangeurs géothermiques.....13
I.10.1. Échangeur géothermique horizontal.....13
I.10.2. Échangeur verticaux ou sondes géothermique verticales 14
I.10.3. Champs de sondes géothermiques 15
I.10.4. Fondations thermoactives 16
I.11. Classification selon le circuit 17
I.11.1. Système à boucle ouverte 17
I.11.2. Système à boucle fermée 18
I.12. Proposition d'une expérience de refroidissement par évaporation 19
II. Chapitre II : Étude expérimentale d'un échangeur géothermique - refroidissement par évaporation.....20
II.1. Présentation générale 21
II.2. Objectif.....22
II.3. Méthode 22
II.4. Équipement requis 23
II .5. Installation de l'équipement 25
II.6. Théorie 26
II.7. Procédure expérimentale 26
III. Chapitre III :Résultats et discussion 32
III.1 Bilan thermique analytique et méthodes de calcul 33
III.1.1.1 Équation fondamentale du bilan énergétique 33
III.1.1.2 Méthode de calcul de la température de sortie.....33
III.1.1.3 Application théorique du modèle 34
III.1.2 Échangeur eau/sol humide 34
III.1.2.1 Introduction et principes généraux 34
III.1.2.2 Bilan thermique global 35
III.1.2.3 Résistance thermique équivalente 36
III.1.2.4 Couplage chaleur-masse et température du sol humide 36
III.1.3 Rafraîchissement par évaporation dans un sol humide 37

III.1.3.1 Modélisation physique du phénomène 37
III.1.3.2 Chaleur latente de vaporisation 37
III.1.3.3 Évolution de la conductivité thermique du sol 38
III.1.3.4 Couplage pratique avec un échangeur eau/sol 38
III.1.4 Influence de l'humidité sur les performances thermiques 38
III.1.4.1 Effet de l'humidité sur les échanges thermiques 38
III.1.4.2 Effet de l'humidité sur la température de sortie 39
III.1.4.3 Effet de l'humidité sur le différentiel thermique ΔT.....39
III.1.5 Synthèse théorique 40
III.2 Étude Expérimentale : Refroidissement de l'eau dans un serpentin en cuivre en sol humide..... 40
III.2.1 Introduction et Contexte de l'Étude.....
.....40
III.2.2 Données Expérimentales Recueillies.....40
III.2.3 Résumé 42
III.2.4 Méthodologie.....42
III.2.4.1 Appareillage expérimental 42
III.2.4.2 Instrumentation et acquisition de données 43
III.2.4.3 Cadre analytique 43
III.2.4.4 Caractéristiques du sol 43
III.2.5 Analyse énergétique 44
III.2.6 Analyse exergétique.....44
III.2.7 Analyse économique et comparative 45
III.2.8 Synthèse des données.....45
III.2.8.1 Efficacité thermodynamique (ε) 45
III.2.8.2 Analyse exergétique affinée 46
III.2.8.3 Caractérisation thermique (Valeur UA) 46
III.2.8.4 Résumé des changements.....46
III.3 Analyse des résultats et interprétations graphiques 47
III.4 Conclusion générale 57
Références bibliographiques.....58

Liste de figure :

Chapitre I :

Figure (I-1) : Les sources d'énergie géothermique 5
Figure (I-2) : Gradient géothermique 5
Figure (I-3) : La géothermie de surface 6
Figure (I-4) : La géothermie profonde 7
Figure (I-5) : Schéma expliquant la géothermie haute énergie 7
Figure (I-6) : Schéma expliquant la géothermie moyenne énergie 8
Figure (I-7) : Schéma expliquant la géothermie basse énergie 8
Figure (I-8) : Schéma expliquant la géothermie très basse énergie 9
Figure (I-9) : Structure du système de chauffage et de refroidissement géothermique avec pompe à chaleur géothermique 12
Figure (I-10) : Schéma comparatif entre un système géothermique et le sous-sol terrestre 13
Figure (I.11) : Échangeurs horizontaux 14
Figure (I-12) : Échangeur géothermique sur sonde géothermique verticale 15
Figure (I-13) : Échangeur géothermique sur champ de sondes 16
Figure (I-14) : Fondations thermoactives 17

Chapitre II :

Figure (II-1) : Vue globale du montage expérimental 23
Figure (II-2) : réservoir d'eau chaude 23
Figure (II-3) : chauffage électrique 24
Figure (II-4) : tube en cuivre 24
Figure (II-5) : bac expérimental en bois contenant le sol 25
Figure (II-6) : robinet de contrôle et de régulation du débit 25
Figure (II-7) : Cylindre gradué en verre utilisé pour la mesure du débit 26
Figure (II-8) : thermocouples utilisés pour la mesure de la température 26
Figure (II-9) : capteur d'humidité du sol utilisé pour mesurer le taux d'humidité 27
Figure (II-10) : pulvérisateur manuel utilisé pour l'humidification du sol 27

Liste des tableaux

Tableau 1 : Débit Faible — Q v = 8 ml /s 40
Tableau 2 : Débit Moyen — Q_v = 16 ml /s 41
Tableau 3 : Débit Fort — Q_v = 18 ml /s 41

Introduction générale

Depuis plusieurs décennies, les énergies fossiles occupent une place essentielle dans la production mondiale d'énergie. Le pétrole, le gaz naturel et le charbon sont largement utilisés pour répondre aux besoins croissants des secteurs résidentiel, industriel et des transports. Toutefois, l'exploitation intensive de ces ressources a entraîné de nombreuses conséquences environnementales, notamment l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, la pollution de l'air et la dégradation de l'environnement. De plus, les ressources fossiles sont réparties de manière inégale à travers le monde et demeurent limitées, ce qui soulève des inquiétudes quant à leur disponibilité à long terme.

En Algérie, comme dans de nombreux pays, la demande énergétique connaît une croissance continue en raison de l'augmentation de la population, du développement économique et de l'amélioration des conditions de vie. Cette situation conduit à une consommation importante des ressources énergétiques conventionnelles, ce qui renforce la nécessité de rechercher des solutions alternatives capables de répondre aux besoins énergétiques futurs tout en limitant les impacts environnementaux.

Dans ce contexte, les énergies renouvelables apparaissent comme une alternative prometteuse. Elles se distinguent par leur caractère durable et leur faible impact sur l'environnement. Parmi les principales sources d'énergie renouvelable figurent l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse ainsi que l'énergie géothermique. Grâce à leur disponibilité et à leur capacité à réduire les émissions polluantes, ces ressources occupent aujourd'hui une place importante dans les stratégies de transition énergétique.

Parmi ces différentes sources, la géothermie représente une solution particulièrement intéressante pour les applications de chauffage et de refroidissement. Cette technologie repose sur l'exploitation de la chaleur naturellement stockée dans le sous-sol afin d'assurer un transfert thermique efficace. Les systèmes géothermiques, notamment les échangeurs enterrés, permettent de tirer profit des propriétés thermiques du sol pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments et de certaines installations industrielles.

Cependant, malgré leurs avantages, les systèmes géothermiques classiques nécessitent souvent des profondeurs d'enfouissement importantes afin d'obtenir de bonnes performances thermiques. La réalisation de ces installations implique généralement des travaux de forage coûteux et des moyens techniques spécifiques, ce qui peut constituer une contrainte importante dans certaines applications.

Afin de réduire ces contraintes, le présent travail propose une approche expérimentale basée sur l'association d'un échangeur thermique enterré à faible profondeur et du refroidissement par évaporation. Le principe consiste à exploiter l'humidité du sol afin de favoriser le phénomène d'évaporation, capable d'absorber une partie de la chaleur du milieu environnant et d'améliorer ainsi le refroidissement du système.

L'étude expérimentale réalisée porte sur un échangeur constitué d'un tube en cuivre enterré dans le sol à une profondeur d'environ 30 cm. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de l'humidité du sol et du débit de circulation de l'eau sur les performances thermiques du système, ainsi que d'examiner la possibilité d'obtenir un refroidissement efficace tout en limitant la profondeur d'enfouissement et les coûts d'installation.

Ce mémoire est organisé en plusieurs chapitres. Le premier chapitre présente les notions générales relatives à la géothermie et aux échangeurs géothermiques. Le deuxième chapitre est consacré à la description du dispositif expérimental, à la méthodologie adoptée ainsi qu'aux équipements utilisés. Enfin, le dernier chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus ainsi que leur analyse et leur interprétation.

CHAPITRE I :

GÉNÉRALITÉS SUR LA GÉOTHERMIE ET LES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

I.1.Introduction

La géothermie est une source d'énergie renouvelable qui utilise la chaleur présente dans le sous-sol pour répondre aux besoins de chauffage et de refroidissement des bâtiments. C'est une solution intéressante et durable, surtout dans le contexte actuel de la transition énergétique et de la réduction de l'utilisation des énergies fossiles.

Cette technologie repose sur différents systèmes qui permettent d'échanger la chaleur avec le sol, selon les caractéristiques du terrain et les besoins du bâtiment.

Dans ce chapitre, on va présenter les principaux types de systèmes géothermiques ainsi que les différents échangeurs utilisés, afin de comprendre leur fonctionnement et leurs applications.

I.2. Généralités sur la géothermie

I.2.1. Définition de la géothermie

Le terme "géothermie" découle de la fusion des mots grecs "Géo" pour "terre" et "thermie" pour "chaleur". La géothermie se destine à étudier les mécanismes de diffusion de la chaleur de la Terre jusqu'à sa surface et vise à mieux comprendre la structuration, les interactions internes et les manifestations externes de la Terre. **[1]**

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

L'origine principale de cette chaleur interne provient de la désintégration radioactive des éléments radiogéniques, tels que l'uranium (U^{235}, U^{238}), le thorium (Th^{232}) et le potassium (K^{44}), naturellement présents dans les roches de la croûte terrestre et du manteau. Ces éléments, naturellement instables, se désintègrent pour former des éléments fils plus stables, libérant ainsi de l'énergie thermique qui représente près de 90% de l'énergie totale dissipée. La D'autre part, une autre source de dissipation de chaleur à la surface terrestre est associée à l'énergie primitive de la Terre. Cette énergie primitive est la chaleur accumulée lors de l'accrétion des corps célestes qui ont formé la Terre, et cette chaleur continue de se dissiper vers la surface aujourd'hui. Ce processus représente environ 10% de l'énergie thermique totale produite à la surface de la Terre. **[1]**

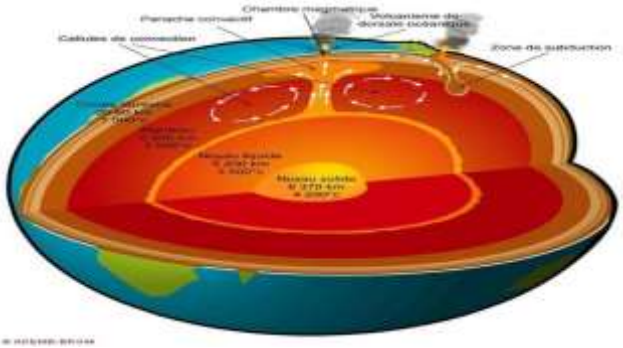


Figure (I-1) : Les sources d'énergie géothermique. [4]

La chaleur de la terre augmente avec la profondeur. Les mesures récentes de l'accroissement de la température avec la profondeur, appelée gradient géothermique, ont montré que cette valeur n'était pas uniforme à la surface du globe. En moyenne, la température croît d'environ3°C pour 100 mètres, mais de nombreuses régions présentent des gradients géothermiques inhabituels : certains peuvent atteindre 10°C pour 100 mètres, tandis que d'autres ne montent que d'1°C pour la même distance. Ces disparités sont influencées par divers facteurs géologiques et géographiques, comme la présence d'activité volcanique, les variations de composition du sol et les structure s géologiques spécifiques.[2]

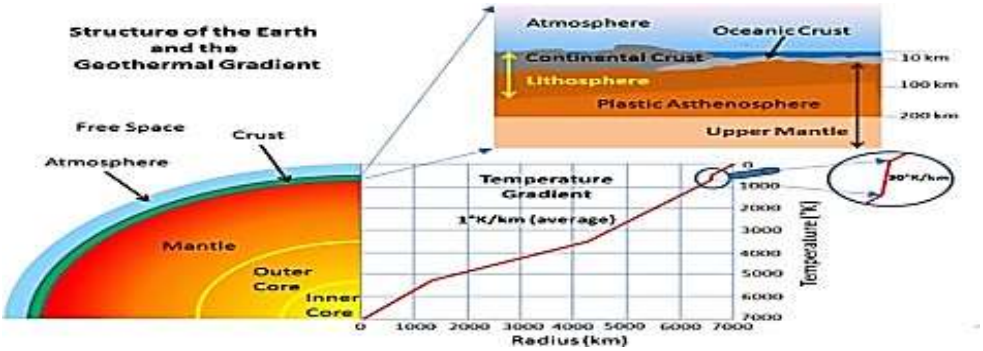


Figure (I-2) : Gradient géothermique. [2]

L'énergie géothermique est l'ensemble des technologies qui permet d'exploiter la chaleur emmagasinée à l'intérieur de la terre. Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte charger de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité. [3]

I.2.2. Types d'énergie géothermique

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

I.2.2.1. La géothermie de surface

Le rayonnement du soleil et le ruissellement de l'eau de pluie permettent au sol de jouer un rôle d'inertie thermique, il y règne à quelques mètres de profondeur une température pratiquement constante tout l'année. La géothermie de surface utilise cette inertie pour obtenir des températures plus basses que les températures à la surface en été, et à l'inverse obtenir des températures plus élevées que les températures à la surface en hiver. En Hiver, la chaleur du sol ou de l'air est captée par une tuyauterie conduisant un fluide caloporteur. La chaleur est restituée dans le logement par la pompe à chaleur. En été, l'excès de chaleur dans la maison est restitué dans l'air par la pompe à chaleur. **[5]**



Figure (I-3) : La géothermie de surface. [6]

I.2.2.2. La géothermie profonde

Le principe est de récupérer la chaleur en profondeur dans les nappes d'eau chaudes. Cette chaleur traverse « l'échangeur de chaleur » (système de pompe à chaleur), où l'excès de Chaleur est rejeté dans le tuyau de rejection. La chaleur restante est envoyée aux radiateurs situés dans le logement. Ce type de géothermie est très pratique pour le chauffage, mais, contrairement à la géothermie de surface, on ne peut pas abaisser la chaleur dans la maison. **[5]**

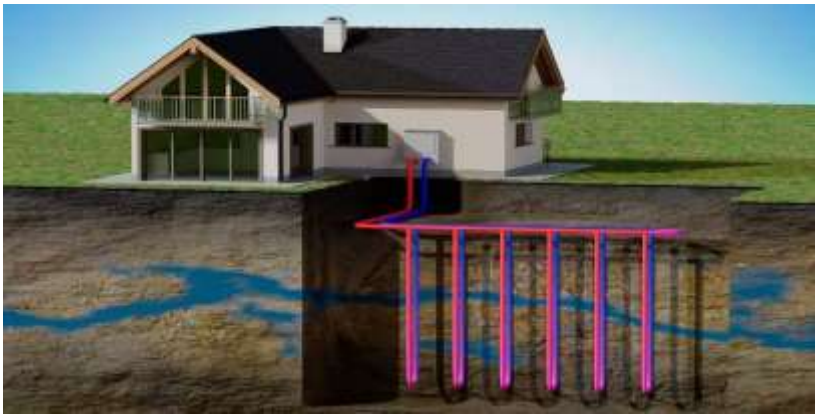


Figure (I-4) : La géothermie profonde. [7]

I.3. Classification des ressources géothermiques

I.3.1. Géothermie haute énergie

La géothermie haute énergie, exploite les gisements de vapeur sèche ou humide (mélange eau et vapeur). Ces gisements se caractérisent par des températures supérieures à 150°C. Les réservoirs généralement localisés au-delà de 1500 mètres de profondeur, On rencontre cette géothermie haute énergie dans les régions volcaniques (volcans) et Sismiques (frontières de plaques) ou le gradient géothermique est particulièrement élevé. La géothermie haute énergie est destinée principalement à la production d'électricité. La vapeur, qui est puisée dans le réservoir géothermique, est déchargée dans une turbine, reliée à un alternateur pour la production d'électricité. La vapeur sèche est directement utilisée alors que la vapeur humide qui est plus fréquente nécessite l'utilisation d'un séparateur. **[8]**

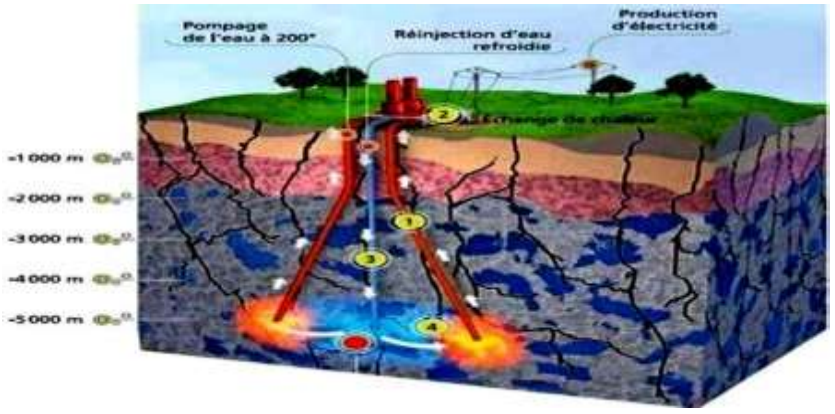


Figure (I-5) : Schéma expliquant la géothermie haute énergie [9]

I.3.2. Géothermie moyenne énergie

La géothermie de moyenne énergie se présente sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à une température comprise entre 90 et 150 °C. Elle se retrouve dans les zones propices à la géothermie haute énergie, mais à une profondeur inférieure à1000 mètres. Elle se situe également dans les bassins sédimentaires, à des profondeurs s'allant de 2000 à 4000 mètres. Pour produire de l'électricité nécessite une technologie qui nécessite l'utilisation d'un fluide intermédiaire. **[10]**

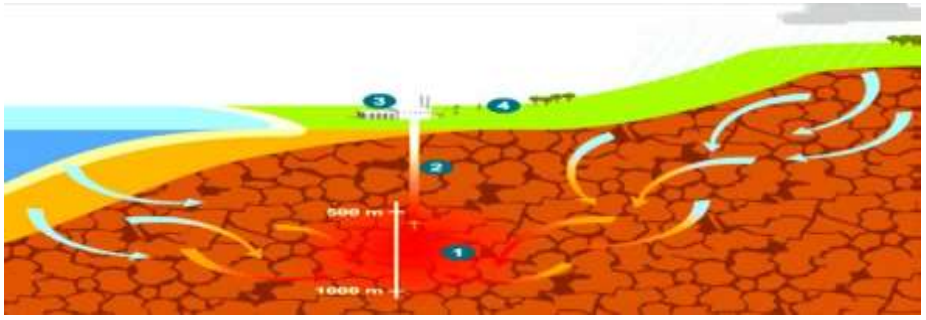


Figure (I-6) : Schéma expliquant la géothermie moyenne énergie.[11]

I.3.3. Géothermie basse énergie (30°C<T°C<90°C)

Les gisements sont localisés entre 1500 et 2500 mètres de profondeur avec des températures allant de 30°C à 90°C. Les réservoirs exploités sont le plus généralement situés des bassins sédimentaires. Cette énergie est principalement utilisée pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur, et certaines applications industrielles. **[12]**

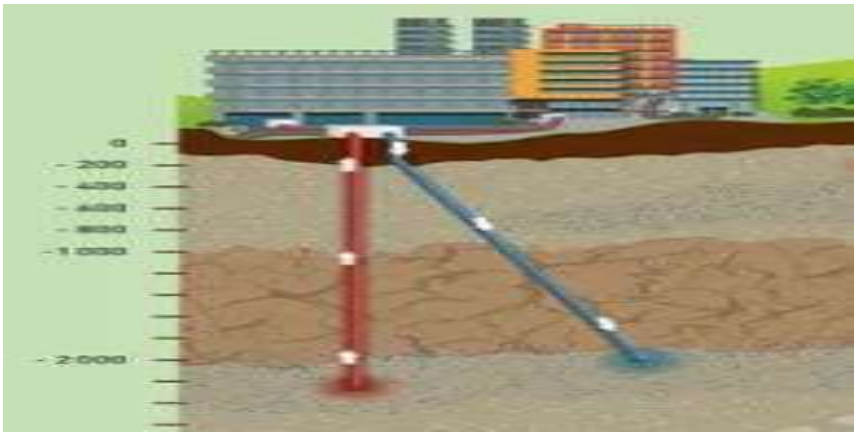


Figure (I-7) : Schéma expliquant la géothermie basse énergie. [13]

I.3.4. Géothermie très basse énergie

La Géothermie dite « très basse énergie » prélève la chaleur du sous-sol à basse température moins de 30 °C à des profondeurs allant jusqu'à 200 mètres. Ce niveau de température ne permet pas une utilisation directe de la chaleur par simple échange mais nécessite l'appoint en surface de pompes à chaleur (PAC) qui augmentent la température à un niveau suffisant pour le chauffage. Elle est utilisée aussi bien dans les maisons individuelles que dans les immeubles collectifs ou les bâtiments commerciaux. **[14]**

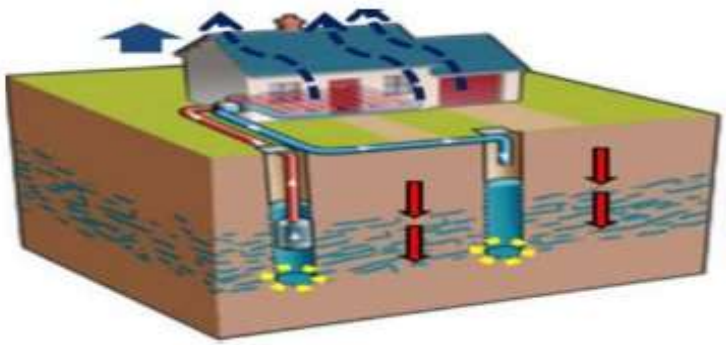


Figure (I -8) :Schéma expliquant la géothermie très basse énergie[15]

I.4. Applications de la géothermie

I.4.1. Production d'électricité

La géothermie permet de produire de l'électricité en utilisant la chaleur provenant de l'intérieur de la Terre. Dans les zones où la température du sous-sol est très élevée, l'eau présente en profondeur est chauffée jusqu'à devenir de la vapeur.

Cette vapeur est ensuite dirigée vers une turbine, qu'elle fait tourner. La turbine est reliée à un générateur qui transforme cette énergie mécanique en électricité. Après cela, la vapeur est refroidie, condensée en eau, puis réinjectée dans le sous-sol pour être réutilisée, ce qui permet un fonctionnement continu et durable.

Ce type de production d'électricité est particulièrement intéressant car il est stable, ne dépend pas des conditions climatiques et présente un faible impact sur l'environnement. **[16]**

I.4.2. Chauffage des bâtiments

La géothermie est largement utilisée pour le chauffage des bâtiments. Elle consiste à récupérer la chaleur du sol à l'aide de systèmes comme les pompes à chaleur, puis à la transférer à l'intérieur des habitations.

Ce système permet de chauffer les maisons de manière efficace, économique et écologique, surtout en hiver, car la température du sol reste stable tout au long de l'année. **[16]**

I.4.3. Climatisation

En plus du chauffage, la géothermie peut aussi être utilisée pour rafraîchir les bâtiments. Le principe est simple : en été, la chaleur à l'intérieur des bâtiments est transférée vers le sol, qui est plus frais.

Cela permet de maintenir une température agréable sans consommer beaucoup d'énergie, contrairement aux systèmes de climatisation classiques. **[16]**

I.4.4. Applications industrielles

Dans le domaine industriel, la géothermie est utilisée pour fournir de la chaleur nécessaire à certains procédés. Par exemple, elle peut servir au séchage, au chauffage de liquides ou à certaines transformations de produits.

Elle permet ainsi de réduire les coûts énergétiques et de limiter l'utilisation des énergies fossiles dans les industries. **[16]**

I.4.5. Agriculture (serres)

La géothermie est aussi utilisée en agriculture, notamment pour chauffer les serres. Grâce à la chaleur du sol, on peut maintenir une température idéale pour les plantes, même en hiver.

Cela permet d'améliorer la production agricole et de cultiver des produits toute l'année, indépendamment des conditions climatiques. **[16]**

I.4.6. Thermalisme

Le thermalisme est l'une des plus anciennes utilisations de la géothermie. Il consiste à utiliser les eaux chaudes naturelles pour les bains, les soins et la détente.

Ces eaux sont souvent riches en minéraux et sont utilisées dans les centres thermaux pour leurs bienfaits sur la santé et le bien-être. **[16]**

I.5. Avantages et inconvénients de la géothermie

I.5.1. Les avantages :

- ♣ Ressource énergétique locale qui ne nécessite pas de transport
- ♣ Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement
- ♣ Capacités de production importantes comparées aux autres énergies renouvelées
- ♣ Énergie de base, généralement, indépendant des conditions climatiques. **[17]**

I.5.2. Les inconvénients :

- ♣ Coûts d'investissement et de maintenance très élevés.
- ♣ L'utilisation de la géothermie reste particulière, proche notamment des zones volcaniques.
- ♣ Risque de glissement de terrain. **[17]**

I.6. Les échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs utilisés pour faire passer la chaleur d'un fluide chaud vers un autre fluide plus froid sans les mélanger directement. Le transfert thermique se fait à travers une surface qui sépare les deux fluides et permet l'échange de chaleur entre eux.

Ce type de système est très utilisé dans plusieurs domaines, notamment le chauffage, le refroidissement, la climatisation et certaines applications industrielles. Le principe est simple : lorsqu'il existe une différence de température entre deux fluides, la chaleur se déplace naturellement du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid.

L'efficacité de l'échange dépend de plusieurs paramètres comme la température des fluides, la surface d'échange ou encore le matériau utilisé dans la fabrication de l'échangeur. Grâce à leur capacité à récupérer et transférer l'énergie thermique, les échangeurs de chaleur permettent d'améliorer les performances énergétiques tout en réduisant les pertes de chaleur dans les installations. **[18]**

I.7. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des échangeurs géothermique est basé sur l'utilisation de la température naturelle du sol, qui reste presque stable à partir d'une certaine profondeur. Le système contient des conduites enterrées dans lesquelles circule un fluide caloporteur. Lorsque ce fluide passe dans les tubes, il échange de la chaleur avec le terrain qui l'entoure.

En période froide, le fluide récupère la chaleur stockée dans le sol puis la transporte vers le bâtiment pour assurer le chauffage. En été, le fonctionnement est inversé : la chaleur provenant du bâtiment est transférée vers le sol afin de refroidir l'air intérieur. Ce transfert thermique se fait

naturellement grâce à la différence de température entre le sol et le fluide circulant dans les conduites.

Selon les besoins et les conditions du terrain, les échangeurs géothermiques peuvent être installés horizontalement, verticalement ou dans des forages profonds. Ces systèmes sont appréciés pour leur bonne efficacité énergétique et leur capacité à assurer un chauffage et un refroidissement de manière plus durable. **[18]**



Figure (I-9) : Structure du système de chauffage et de refroidissement géothermique avec pompe à chaleur géothermique [19]

I.8. Les différents types d'échangeurs thermiques

Le fonctionnement d'un échangeur thermique se fait grâce à deux principaux dispositifs :

• Les plaques.

• Les tubes.

Il en existe d'autres types, tels que les échangeurs thermiques à ailettes, à bloc ou encore à spirales. Cependant, pour les systèmes de chauffage ou d'eau chaude des logements, ce sont surtout ceux à plaques et ceux munis de tubes qui sont principalement employés. De plus, les échangeurs thermiques ne fonctionnent pas tous avec la même nature de fluide. Ils peuvent donc être de type :

• Eau/eau

• Vapeur d'eau/eau

• Huile/eau

• Eau/air

• Huile/air

• Air/air

I.9. Les échangeurs de chaleur géothermique

Les échangeurs de chaleur géothermiques sont des systèmes utilisés pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments en exploitant la température naturelle du sol. Ils permettent le transfert de chaleur entre le terrain et un fluide circulant dans des conduites enterrées.

Dans ce contexte, les circuits souterrains peuvent être classés selon leur configuration. On distingue d'abord les circuits ouverts et les circuits fermés. Dans un circuit ouvert, l'eau souterraine est utilisée directement comme source ou puits de chaleur, tandis que dans un circuit fermé, un fluide circule en boucle sans contact direct avec les eaux souterraines. une autre classification se fait selon la disposition des conduites dans le sol. On distingue alors les systèmes horizontaux et verticaux, qui sont généralement des systèmes à boucle fermée, choisis selon l'espace disponible et les conditions du terrain. **[18]**

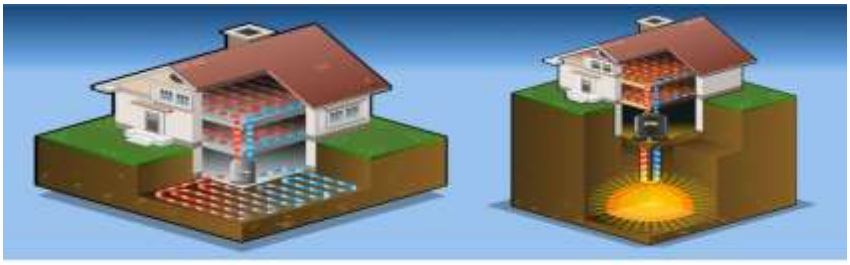


Figure (I.10) : Schéma comparatif entre un système géothermique et le sous-sol terrestre [20]

I.10. Les différents types des échangeurs géothermiques

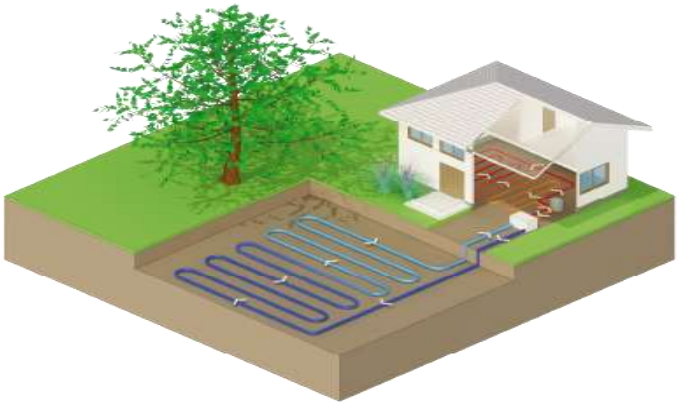
I.10.1. Échangeur géothermique horizontal

Les échangeurs horizontaux sont constitués de boucles de tubes enterrées à faible profondeur (de 0,6 à 1,2 mètres) et raccordées en surface à une pompe à chaleur (PAC). Dans les boucles, circule en circuit fermé un mélange d'eau et d'antigel.

La PAC transfère la chaleur prélevée dans le fluide vers le bâtiment à chauffer (mode chauffage) ou injecte la chaleur en provenance d'un bâtiment dans l'eau (mode rafraîchissement).

A cette profondeur, l'énergie prélevée du proche sous-sol se renouvelle à la fois par la surface (ensoleillement, infiltration de l'eau de pluie…) et par la profondeur (conduction dans le terrain).

Ce type d'échangeur présente l'avantage d'être relativement simple à installer et de nécessiter un coût de réalisation moins élevé que les systèmes géothermiques verticaux, car il ne demande pas de forages profonds. Cependant, son installation nécessite une surface de terrain importante afin de permettre l'enfouissement des différentes boucles. De plus, les performances thermiques peuvent être influencées par les variations climatiques et les conditions de la couche superficielle du sol. **[21]**



Capteurs horizontaux

Profondeur : 0.6 à 1.20 m

Température : 6 – 15 ℃

Figure (I-11) : Échangeurs horizontaux [22]

Applications :

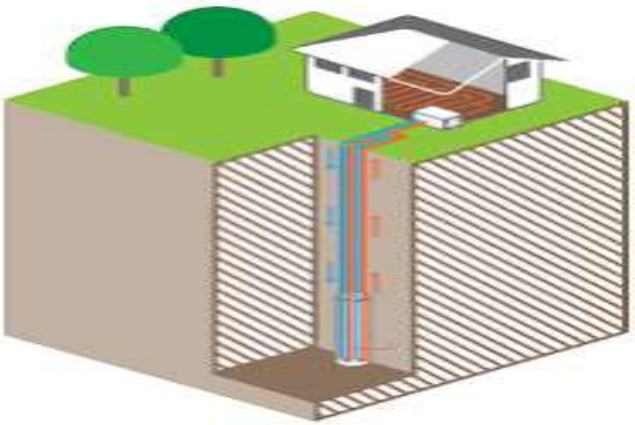
- Maisons individuelles
- Zones rurales
- Terrains avec grande surface disponible

I.10.2. Échangeur verticaux ou sondes géothermique verticales

Une sonde verticale est constituée d'un échangeur (tube en U, ou double U, en polyéthylène), contenant fluide caloporteur, descendu dans un forage scellé par du ciment et de la bentonite. la longueur et le nombre de sondes varient en fonction des besoins et du type de terrain.

Ce type d'échangeur s'adresse aux maisons individuelles et aux petits ensembles collectifs ou immeubles de bureaux

Ce type d'échangeur offre de bonnes performances thermiques et une grande stabilité tout au long de l'année. Cependant, son principal inconvénient réside dans son coût d'installation très élevé, dû aux forages profonds nécessaires à sa mise en œuvre. De plus, les travaux de forage sont complexes, nécessitent des équipements spécialisés et peuvent être difficiles à réaliser selon la nature du terrain. **[21]**



Profondeur : jusqu'à 100 m

Température : 12 – 17 °C

Figure (I-12) : Échangeur *géothermique sur sonde géothermique verticale* [23]

Applications :

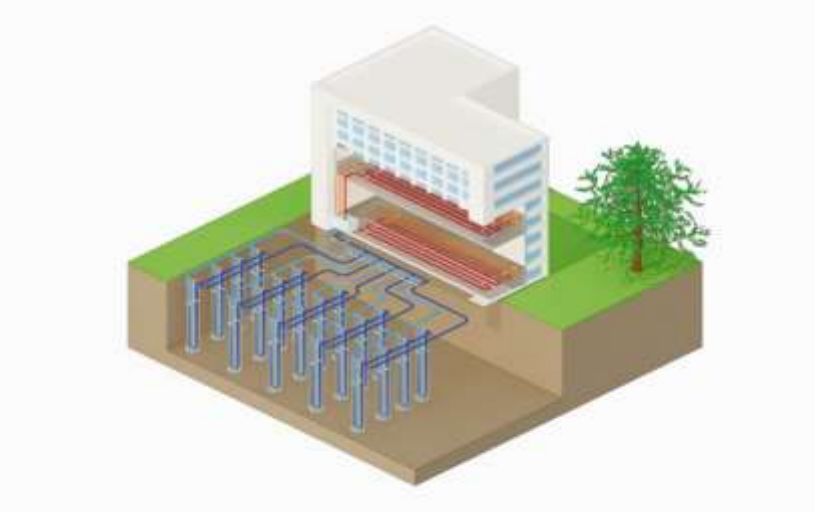
- Immeubles
- Bâtiments industriels
- Zones urbaines à espace limité

I.10.3. Champs de sondes géothermiques

Les champs de sondes sont composés de plusieurs sondes verticales reliées entre elles afin d'augmenter la capacité d'échange thermique du système. Ils sont utilisés lorsque les besoins énergétiques du bâtiment sont importants.

Ce type de système est souvent installé dans les grandes infrastructures nécessitant une puissance thermique élevée.

Ce système permet d'assurer une capacité d'échange thermique élevée et de répondre aux besoins énergétiques importants des grands bâtiments. Cependant, sa mise en œuvre nécessite un grand nombre de forages, ce qui augmente considérablement le coût d'installation. Les travaux de forage sont souvent longs et complexes, nécessitant des équipements spécialisés ainsi qu'une étude préalable du terrain, ce qui peut rendre le projet difficile à réaliser dans certains sites. **[21]**



Profondeur : environ 100 m

Température : 12 -15 °C

Figure (I-13) : Échangeur *géothermique sur champ de sondes* [23]

Applications :

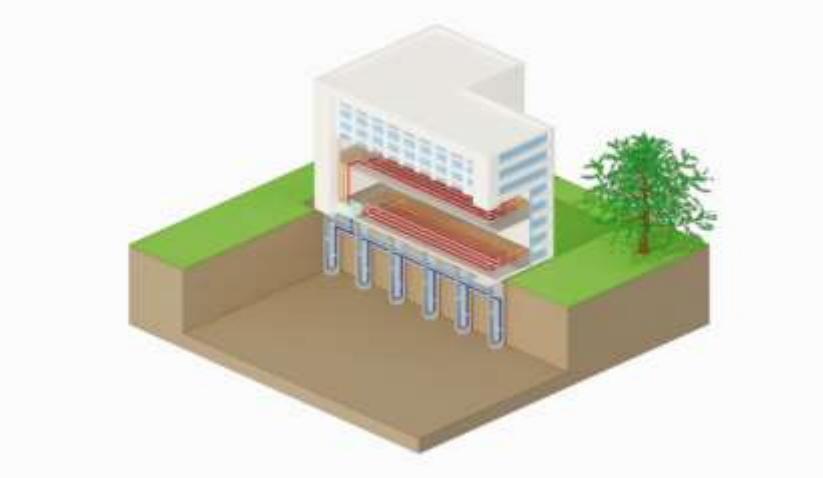
- Universités
- Hôpitaux
- Centres commerciaux

I.10.4. Fondations thermoactives

Le principe des fondations thermoactives consiste à intégrer un système de tubes en polyéthylène à l'intérieur des éléments de fondation du bâtiment, comme les pieux, les dalles ou les parois en béton en contact avec le sol. À l'intérieur de ces tubes circule un fluide caloporteur en circuit fermé permettant de réaliser un échange thermique avec le terrain.

Ce système permet d'utiliser les fondations du bâtiment non seulement comme élément structurel, mais aussi comme source d'échange de chaleur pour le chauffage ou le refroidissement des bâtiments.

Ce système présente l'avantage de valoriser les fondations du bâtiment pour assurer à la fois un rôle structurel et un échange thermique avec le sol. Cependant, sa réalisation nécessite une étude et une conception précises dès le début du projet. De plus, les coûts d'installation peuvent être élevés et toute intervention ou réparation après la construction du bâtiment reste difficile et complexe. **[21]**



Profondeur : jusqu'à 30 m

Température : 12 °C

Figure (I-14) : Fondations thermoactives [24]

Applications :

- Immeubles modernes
- Bureaux
- Grandes constructions

I.11. Classification selon le circuit

I.11.1. Système à boucle ouverte

Le système à boucle ouverte utilise directement l'eau souterraine pour réaliser l'échange thermique. L'eau est pompée depuis un puits, utilisée dans le système puis rejetée ou réinjectée dans le sol.

Ce type d'installation présente une bonne efficacité énergétique grâce au contact direct avec l'eau souterraine. Cependant, son fonctionnement dépend fortement de la disponibilité et de la qualité de l'eau.

Cependant, la réalisation des puits peut entraîner une augmentation du coût d'installation, notamment lorsque la nappe phréatique se trouve à une grande profondeur. De plus, la qualité de l'eau doit être contrôlée régulièrement afin d'éviter certains problèmes de fonctionnement et d'entretien. **[25]**

Applications :

- Grandes installations
- Bâtiments industriels
- Centres commerciaux

I.11.2. Système à boucle fermée

Dans le système à boucle fermée, un fluide circule dans des conduites fermées enterrées dans le sol sans contact direct avec l'eau souterraine. Le transfert de chaleur se fait uniquement à travers les parois des tubes.

Ce système est le plus utilisé dans les installations géothermiques modernes car il est stable, sécurisé et nécessite peu d'entretien.

Cependant, son installation peut nécessiter des travaux importants, notamment lorsque les conduites sont placées à grande profondeur. Dans certains cas, les opérations de forage peuvent augmenter considérablement le coût du système, ce qui représente l'un de ses principaux inconvénients. **[25]**

Applications :

- Maisons
- Bâtiments résidentiels
- Systèmes de chauffage et climatisation

I.12. Proposition d'une expérience de refroidissement par évaporation

- Après avoir présenté les différents types d'échangeurs géothermiques, nous avons constaté que la majorité de ces systèmes nécessitent des forages profonds ainsi que des équipements spécialisés, ce qui augmente considérablement le coût de l'installation. Les échangeurs verticaux, les champs de sondes et plusieurs systèmes géothermiques modernes demandent des profondeurs importantes pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres afin d'obtenir de bonnes performances thermiques. De plus, la réalisation de ces systèmes nécessite souvent des études techniques et des moyens matériels importants.
- Pour cette raison, nous avons proposé une expérience plus simple basée sur le refroidissement par évaporation avec une faible profondeur d'environ 30 cm seulement. Cette approche a pour objectif de réduire les coûts de réalisation tout en étudiant la possibilité d'obtenir un effet de refroidissement naturel grâce aux propriétés thermiques du sol et au phénomène d'évaporation.
- Le principe de cette expérience repose sur l'échange thermique entre l'eau, le sol et l'air humide présent dans le milieu. Lorsque l'eau s'évapore, elle absorbe une quantité de chaleur provenant du milieu environnant, ce qui provoque une diminution de la température. Ainsi, le phénomène d'évaporation joue un rôle important dans le refroidissement du système.
- L'humidité du sol représente également un facteur essentiel dans cette expérience. Plus le taux d'humidité du sol est élevé, plus le phénomène d'évaporation devient important. Cette augmentation de l'évaporation favorise davantage l'absorption de chaleur, ce qui contribue à diminuer la température de l'eau au cours de son passage dans le système. Par conséquent, la différence de température ΔT entre l'entrée et la sortie devient plus importante, ce qui signifie que la température de sortie est inférieure à la température d'entrée.
- Cette méthode présente plusieurs avantages, notamment la simplicité de réalisation, le faible coût d'installation ainsi que la réduction des travaux de forage par rapport aux systèmes géothermiques classiques. Elle permet également d'étudier l'influence de différents paramètres comme l'humidité du sol, la température ou le débit sur les performances du refroidissement.
- L'étude détaillée de cette expérience, ainsi que les résultats expérimentaux obtenus, seront présentées de manière plus approfondie dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II :

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE D'UN ÉCHANGEUR GÉOTHERMIQUE (REFROIDISSEMENT PAR ÉVAPORATION)

II.1. Présentation générale

Les systèmes géothermiques font partie des technologies utilisées dans le domaine de l'échange de chaleur et du refroidissement, car ils reposent sur l'exploitation du sol pour aider à réduire les températures et transférer la chaleur d'un milieu à un autre. Ces systèmes ont fait l'objet d'une grande attention ces dernières années en raison de leur rôle dans la réduction de la consommation d'énergie et de leur utilisation potentielle dans plusieurs domaines, tels que le refroidissement des bâtiments et certaines applications industrielles et énergétiques.

Les échangeurs de chaleur géothermiques reposent généralement sur l'enfouissement des tuyaux à l'intérieur du sol afin de tirer parti des propriétés thermiques de la Terre. Plus la profondeur d'enfouissement est grande, meilleurs et plus stables sont les résultats thermiques. Cependant, cela nécessite des opérations de forage profondes et coûteuses, en plus de la difficulté de réalisation et de la nécessité de moyens et d'équipements spéciaux.

Le problème de la profondeur est l'une des difficultés les plus importantes pour ce type de système, car l'augmentation de la profondeur entraîne directement une augmentation du coût et de la complexité du processus d'installation, en particulier dans les projets pilotes ou les applications aux capacités limitées.

De là est né le besoin de rechercher des solutions alternatives qui permettraient de réduire la profondeur de forage tout en maintenant de bonnes performances thermiques. C'est pourquoi, dans cette étude, un système basé sur la combinaison d'un échangeur de chaleur enterré à une profondeur relativement faible et d'un refroidissement par évaporation a été proposé.

L'idée du refroidissement par évaporation est basée sur la pulvérisation d'eau sur le sol afin d'augmenter l'humidité, car l'évaporation de l'eau absorbe une partie de la chaleur du milieu environnant, ce qui contribue à améliorer le processus de refroidissement et à réduire les températures.

Cette étude a été réalisée grâce à une installation expérimentale qui permet d'étudier l'influence de l'humidité et du débit du sol sur la performance thermique du système, et de suivre l'évolution de la température pendant le fonctionnement de l'échangeur de chaleur.

II.2. Objectif

L'objectif de cette étude est de vérifier l'efficacité du refroidissement par évaporation dans un échangeur géothermique enterré à faible profondeur.

Le travail consiste à observer si le système proposé permet réellement de diminuer la température de l'eau circulant dans le tube en cuivre enterré malgré la faible profondeur d'enfouissement.

Pour cela, un système d'arrosage a été utilisé afin d'augmenter l'humidité du sol et favoriser l'évaporation autour du tube enterré. L'étude permet ainsi d'analyser l'effet de l'humidité du sol sur le refroidissement et de voir si le refroidissement par évaporation peut améliorer les performances thermiques du système.

Des essais ont également été réalisés avec différentes valeurs de débit afin d'étudier leur influence sur la variation de température entre l'entrée et la sortie du système.

II.3. Méthode

Le travail expérimental réalisé consiste à faire circuler de l'eau chaude dans un tube en cuivre enterré dans le sol afin d'étudier la variation de température entre l'entrée et la sortie du système.

Le montage expérimental est composé d'un réservoir contenant l'eau chaude, d'un tube en cuivre enterré dans le sol à une profondeur d'environ 30 cm, de thermocouples pour mesurer les températures ainsi que d'un système permettant de régler le débit de circulation de l'eau.

Afin d'améliorer le refroidissement, le sol a été humidifié par arrosage pour favoriser le refroidissement par évaporation autour du tube enterré.

Les températures d'entrée et de sortie ont été mesurées à l'aide des thermocouples. La différence de température a été déterminée à partir de la relation suivante :

$\Delta T = T_{entrée} - T_{sortie}$

La quantité de chaleur échangée sera déterminée à partir de la relation suivante :

$Q = \dot{m}\, Cp\, \Delta T$

Cette relation permet de déterminer la quantité de chaleur perdue par l'eau pendant son passage dans le tube en cuivre enterré.

Plusieurs essais ont été réalisés avec différentes valeurs de débit afin d'étudier l'influence du débit et de l'humidité du sol sur les performances thermiques du système.

II.4. Équipement requis



Figure (II-1) : Vue globale du montage expérimental

II.4.1. Réservoir d'eau chaude

Destiné à stocker l'eau chauffée avant son introduction dans le système expérimental.



Figure (II-2) : réservoir d'eau chaude

II.4.2. Dispositif de chauffage électrique

Utilisé pour chauffer l'eau jusqu'à la température souhaitée avant les essais.



Figure (II-3) : chauffage électrique

II.4.3. Tube en cuivre

Enterré dans le sol et servant d'échangeur thermique principal du système.

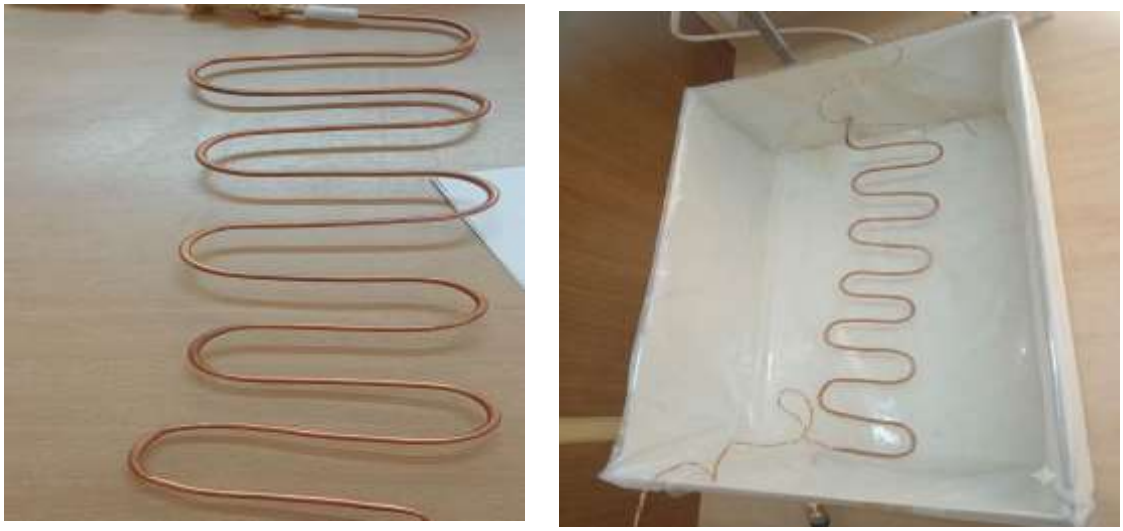


Figure (II-4) : tube en cuivre

II.4.4. Bac rempli de sol

Utilisé pour contenir la terre et assurer l'installation stable du tube enterré.



Figure (II-5) : bac expérimental en bois contenant le sol

II.4.5. Robinets de régulation

Permettent de contrôler l'ouverture du circuit et de régler le débit selon les conditions expérimentales.



Figure (II-6) : robinet de contrôle et de régulation du débit

II.4.6. Débitmètre

Utilisé pour mesurer et fixer les différentes valeurs de débit appliquées durant les essais.



Figure (II-7) : Cylindre gradué en verre utilisé pour la mesure du débit

II.4.7 Thermocouples

Capteurs de température placés à l'entrée, à la sortie, dans le sol et dans l'environnement pour suivre les variations thermiques.



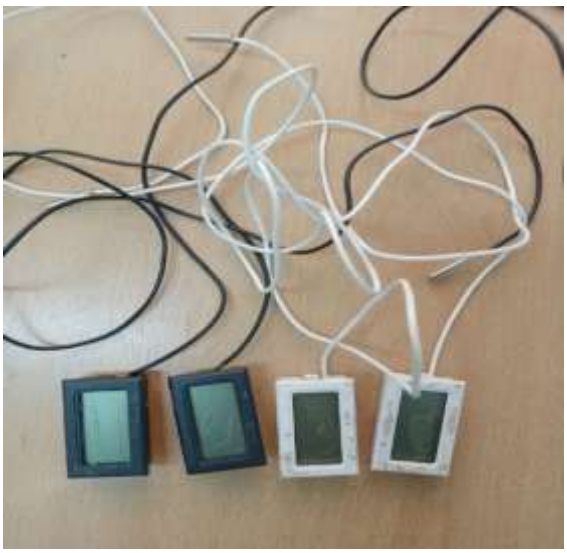


Figure (II-8) : thermocouples utilisés pour la mesure de la température

II.4.8. Capteur d'humidité du sol

Utilisé pour mesurer le taux d'humidité du sol durant les essais expérimentaux afin d'évaluer l'effet de l'arrosage sur le refroidissement par évaporation.



Figure (II-9) : capteur d'humidité du sol utilisé pour mesurer le taux d'humidité

II.4.9. Système d'arrosage

Permet d'humidifier le sol afin d'améliorer le refroidissement par évaporation



Figure (II-10) : pulvérisateur manuel utilisé pour l'humidification du sol

II .5. Installation de l'équipement

II.5.1. Préparation du bac de sol

Un bac en bois a été fabriqué spécialement pour l'expérience afin de contenir le sol et permettre l'installation du système expérimental dans de bonnes conditions.

II.5.2. Installation du tube en cuivre

Le tube en cuivre a été placé à l'intérieur du bac puis enterré dans le sol à une profondeur d'environ 30 cm. Ce tube représente l'élément principal de l'échange thermique dans le système.

II.5.3. Préparation de l'eau chaude et remplissage du réservoir

Avant le début des essais, l'eau a été chauffée à l'aide d'un dispositif de chauffage. Après le chauffage, le réservoir a été rempli avec l'eau chaude afin d'alimenter le système pendant le fonctionnement de l'expérience.

II.5.4. Installation des conduites et des robinets

Les conduites ont été installées entre le réservoir et le tube en cuivre afin d'assurer la circulation de l'eau dans le système. Des robinets ont également été montés sur le circuit afin de contrôler l'écoulement de l'eau et régler les différentes valeurs du débit pendant les essais expérimentaux.

II.5.5. Installation des thermocouples

Des thermocouples ont été placés à différents endroits du montage afin de mesurer les températures pendant l'expérience. Les capteurs ont été installés à l'entrée et à la sortie du tube ainsi qu'au niveau du sol.

II.5.6. Installation du capteur d'humidité

Un capteur d'humidité a été placé dans le sol afin de mesurer le taux d'humidité pendant les essais expérimentaux.

II.5.7. Humidification du sol

Avant le début des essais, le sol a été humidifié jusqu'à atteindre un taux d'humidité élevé. Ensuite, l'humidité du sol diminue progressivement pendant l'expérience à cause du phénomène d'évaporation autour du tube enterré.

II.5.8. Réalisation des essais expérimentaux

Après l'installation complète du système, plusieurs essais ont été réalisés avec différentes valeurs de débit afin d'étudier l'influence du débit et de l'humidité du sol sur les performances thermiques du système.

II.5.9. Suivi des mesures expérimentales

Pendant chaque essai, les températures et l'humidité du sol ont été suivies et notées afin d'observer l'évolution des mesures pendant le fonctionnement du système. Chaque valeur de débit a été testée séparément afin de comparer les résultats obtenus dans les différentes conditions expérimentales.

II.6. Théorie

Le fonctionnement de cette étude repose principalement sur le transfert de chaleur entre l'eau chaude circulant dans le tube en cuivre et le sol qui entoure le tube enterré. Lorsque l'eau chaude traverse le tube, une partie de sa chaleur est transférée vers le milieu extérieur, ce qui provoque une diminution de la température de l'eau à la sortie.

Dans cette étude, le refroidissement est amélioré grâce au phénomène d'évaporation. Le principe du refroidissement par évaporation repose sur l'humidification du sol par arrosage. Lorsque l'eau présente dans le sol s'évapore, elle absorbe une partie de la chaleur du milieu environnant, ce qui provoque une diminution de la température autour du tube enterré.

La variation de température entre l'entrée et la sortie du système est déterminée par la relation suivante :

$\Delta T = T_{entrée} - T_{sortie}$

Avec :

- ΔT : différence de température entre l'entrée et la sortie (°C)
- $T_{entrée}$: température de l'eau à l'entrée du tube (°C)
- T_{sortie}: température de l'eau à la sortie du tube (°C)

Cette relation permet de déterminer la diminution de température obtenue pendant le passage de l'eau dans le tube enterré.

La quantité de chaleur échangée est donnée par la relation suivante :

$Q = \dot{m}\, Cp\, \Delta T$

Avec :

- Q : quantité de chaleur échangée (W)
- $\dot{M}$: débit massique de l'eau (kg/s)
- Cp : chaleur spécifique de l'eau (J/kg·°C)
- ΔT : différence de température entre l'entrée et la sortie (°C)

Cette relation permet de calculer la quantité de chaleur perdue par l'eau pendant son passage dans le tube en cuivre enterré.

Le débit joue également un rôle important dans les performances thermiques du système. Lorsque le débit augmente, le temps de contact entre l'eau et le sol devient plus court, ce qui peut réduire l'échange thermique. Par contre, lorsque le débit diminue, le temps de contact devient plus long et le refroidissement peut être amélioré.

II.7. Procédure expérimentale

II.7.1. Préparation du système

Avant le début des essais expérimentaux, l'ensemble du montage a été vérifié afin de s'assurer du bon fonctionnement des équipements utilisés pendant l'expérience. Les différentes conduites ont été contrôlées pour éviter toute fuite d'eau durant la circulation dans le système. Les thermocouples ainsi que le capteur d'humidité ont également été vérifiés avant le démarrage des essais. Avant l'ajout du sol et du tube en cuivre, l'intérieur du bac a été recouvert par une bâche plastique afin d'éviter les fuites d'eau pendant les essais expérimentaux.

II.7.2. Chauffage de l'eau

L'eau utilisée dans l'expérience a été chauffée à l'aide du dispositif de chauffage jusqu'à atteindre la température souhaitée avant les essais. Cette étape permet d'obtenir une eau chaude capable de transférer sa chaleur pendant son passage dans le tube enterré.

II.7.3. Remplissage du réservoir

Après le chauffage, l'eau chaude a été versée dans le réservoir afin d'alimenter le système expérimental pendant le fonctionnement. Le réservoir permet d'assurer l'alimentation continue du circuit en eau chaude pendant les essais réalisés.

II.7.4. Humidification du sol

Avant le début des essais, le sol a été humidifié progressivement par arrosage jusqu'à obtenir un taux d'humidité élevé autour du tube enterré. Cette étape est importante dans l'expérience, car le refroidissement étudié repose principalement sur le phénomène d'évaporation. Pendant le fonctionnement du système, l'eau présente dans le sol commence progressivement à s'évaporer, ce qui provoque une diminution de l'humidité au cours du temps.

II.7.5. Réglage du débit

Le débit de circulation de l'eau a été réglé à l'aide des robinets installés sur le circuit. Trois valeurs différentes de débit ont été utilisées pendant les essais expérimentaux afin d'étudier leur influence sur le refroidissement et sur la variation de température entre l'entrée et la sortie du système.

II.7.6. Mise en circulation de l'eau

Après le réglage du débit, l'eau chaude a été mise en circulation dans les conduites puis dans le tube en cuivre enterré dans le sol. Pendant son passage dans le tube, l'eau échange une partie de sa chaleur avec le sol humide entourant le tube enterré.

II.7.7. Mesure des températures

Les températures ont été mesurées à l'aide des thermocouples placés à différents endroits du système. Les mesures ont principalement été effectuées à l'entrée et à la sortie du tube afin de suivre l'évolution de la température pendant les essais expérimentaux. D'autres mesures ont également été réalisées au niveau du sol.

II.7.8. Suivi de l'humidité du sol

Le taux d'humidité du sol a été suivi pendant toute la durée des essais expérimentaux à l'aide du capteur d'humidité. Les mesures obtenues permettent d'observer l'évolution de l'humidité avec le phénomène d'évaporation pendant le fonctionnement du système.

II.7.9. Réalisation des essais expérimentaux

Les essais expérimentaux ont été réalisés avec trois valeurs différentes de débit afin de comparer les résultats obtenus dans chaque condition expérimentale. Ces essais permettent d'étudier l'influence du débit et de l'humidité du sol sur les performances thermiques du système.

II.7.10. Collecte des données expérimentales

Pendant chaque essai, les différentes valeurs de température et d'humidité ont été notées afin de permettre l'analyse des résultats expérimentaux. Les données obtenues seront utilisées par la suite pour calculer la variation de température ainsi que la quantité de chaleur échangée dans le système.

CHAPITRE III :

RÉSULTATS ET DISCUSSION

III.1 Bilan thermique analytique et méthodes de calcul

III.1.1.1 Équation fondamentale du bilan énergétique

Le fonctionnement d'un échangeur thermique enterré repose sur le principe fondamental de conservation de l'énergie. La chaleur transportée par le fluide circulant à l'intérieur du tube est progressivement transférée vers le sol environnant à travers la paroi de l'échangeur. Dans un sol humide, ce transfert thermique devient plus complexe en raison de la présence simultanée de phénomènes de conduction thermique et d'évaporation de l'eau contenue dans les pores du sol.

Afin de représenter les différents échanges énergétiques présents dans le système, un bilan thermique global peut être établi sur un volume de contrôle entourant l'échangeur. L'équation générale du bilan énergétique s'écrit sous la forme :

$$Q_{conduction} + Q_{liquide} = Q_{tube} + (\dot{m_v} \times l_v)$$

Où :

- $Q_{conduction}$ représente le flux thermique transmis par conduction dans le sol ;
- $Q_{liquide}$ correspond à la contribution thermique associée à l'eau présente dans le milieu ;
- Q_{tube} désigne la chaleur transférée par le tube échangeur ;
- $\dot{m_v}$ représente le débit massique de vapeur produite ;
- L_v est la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

Cette relation montre que la chaleur fournie par le fluide ne sert pas uniquement à élever la température du sol, mais également à provoquer l'évaporation d'une partie de l'humidité présente dans le milieu. Une fraction de l'énergie thermique est donc consommée sous forme de chaleur latente, ce qui contribue à limiter l'augmentation de température autour du tube et à améliorer les performances du système.

III.1.1.2 Méthode de calcul de la température de sortie

La température du fluide caloporteur le long de l'axe de l'échangeur s'obtient par intégration du flux thermique linéaire sur une longueur totale L. La formule de la température de sortie (T_s) obéit à la solution analytique

Suivante :

$$T_{sortie} = T_{sol,eff} + (T_{entrée} - T_{sol,eff}) \times e^{-L \div (m_{fluide} \times Cp \times R_{total})}$$

Où :

$T_{entrée}$: Température d'injection du fluide caloporteur à l'entrée de la boucle (°C).

$T_{sol,eff}$: Température effective de la couche de sol locale, abaissée de manière stationnaire par l'effet de rafraîchissement adiabatique (°C).

m_{fluide} : Débit massique du fluide circulant à l'intérieur du tube (kg/s).

C_p: Capacité thermique massique du fluide caloporteur utilisé (J/(kg·K)).

R_{total}: Résistance thermique globale équivalente (somme des résistances de film, de paroi de tube et de matrice de sol humide couplée) (m· K/W).

III.1.1.3 Application théorique du modèle

L'équation précédente permet de prévoir qualitativement le comportement thermique de l'échangeur avant la réalisation des essais expérimentaux. Elle montre que la température de sortie dépend directement des caractéristiques géométriques du système ainsi que des propriétés thermiques du milieu environnant.

Dans le cas de la présente étude, l'eau circule à une température initiale de 50 °C à travers un serpentin en cuivre enterré dans un sol humide. Sous l'effet du transfert thermique, la température du fluide diminue progressivement le long du tube jusqu'à atteindre une valeur plus faible à la sortie.

Le refroidissement obtenu dépend principalement de la différence de température entre le fluide et le sol, de l'humidité du milieu ainsi que du débit de circulation. Lorsque le sol reste suffisamment humide, l'évaporation absorbe une partie de l'énergie thermique transférée et contribue à maintenir un niveau élevé d'échange thermique.

Ainsi, cette modélisation constitue une base théorique permettant de comprendre les phénomènes observés expérimentalement et d'interpréter les variations de température enregistrées au cours des essais.

III.1.2 Échangeur eau/sol humide

III.1.2.1 Introduction et principes généraux

Les échangeurs de chaleur enterrés constituent une solution efficace pour transférer l'énergie thermique entre un fluide caloporteur et le sol environnant. Leur fonctionnement

repose sur l'exploitation de l'inertie thermique du sol ainsi que sur sa capacité à absorber ou à restituer de la chaleur selon les conditions de fonctionnement.

Dans cette étude, l'échangeur utilisé est constitué d'un tube en cuivre disposé sous forme de serpentin et enterré dans un sol humide. Le choix du cuivre est principalement lié à sa conductivité thermique élevée, qui facilite les échanges de chaleur entre le fluide circulant à l'intérieur du tube et le milieu extérieur.

Lorsque l'eau chaude circule dans le serpentin, une partie de son énergie thermique est transférée à travers la paroi du tube vers le sol. Ce transfert se poursuit tant qu'il existe une différence de température entre le fluide et le milieu environnant. Plus cette différence est importante, plus l'échange thermique est intense.

Dans un sol humide, les performances de l'échangeur sont généralement améliorées grâce à la présence d'eau dans les pores du sol. Cette humidité favorise la conduction thermique et participe également aux phénomènes d'évaporation qui contribuent au refroidissement du système.

III.1.2.2 Bilan thermique global

L'analyse énergétique d'un échangeur de chaleur repose sur l'évaluation de la quantité de chaleur transférée entre le fluide et le milieu extérieur. Cette quantité peut être déterminée à partir de la différence de température mesurée entre l'entrée et la sortie du tube.

Le flux thermique transféré est exprimé par la relation suivante :

$$\Phi = \dot{m_e} \times C_{p,e} \times (T_e - T_s)$$

Où :

- Φ représente le flux thermique transféré (W) ;
- m_e : est le débit massique de l'eau (kg/s) ;
- C_P : : est la capacité thermique massique de l'eau (J/kg.K) ;
- T_e : est la température d'entrée ;
- T_s : est la température de sortie.

Cette équation montre que la puissance thermique dissipée dépend directement du débit de circulation ainsi que de la différence de température entre l'entrée et la sortie du système.

Pour une température d'entrée constante, une augmentation du différentiel thermique ΔT traduit une amélioration des performances de refroidissement de l'échangeur.

III.1.2.3 Résistance thermique équivalente

Le transfert de chaleur entre le fluide et le sol est limité par plusieurs résistances thermiques successives. Ces résistances correspondent aux différentes étapes traversées par la chaleur depuis l'intérieur du tube jusqu'au milieu environnant.

La résistance thermique globale peut être exprimée par :

$$R_{total} = R_{conv,int} + R_{tube} + R_{sol}$$

Où :

- $\boldsymbol{R_{con,int}}$ représente la résistance de convection entre l'eau et la paroi interne du tube
- $\boldsymbol{R_{tube}}$ représente la résistance de conduction à travers le cuivre ;
- $\boldsymbol{R_{sol}}$ représente la résistance thermique du sol.

Dans le cas présent, la résistance associée au cuivre reste très faible en raison de sa conductivité thermique élevée. Ainsi, la résistance du sol constitue généralement la principale limitation au transfert thermique.

Lorsque le sol contient suffisamment d'humidité, sa conductivité thermique augmente, ce qui réduit la résistance thermique globale et améliore les performances de l'échangeur.

III.1.2.4 Couplage chaleur-masse et température du sol humide

Dans un sol humide, le transfert thermique n'est pas uniquement gouverné par la conduction de la chaleur. Il est également influencé par les transferts de masse liés à la présence d'eau dans le milieu.

Sous l'effet de la chaleur provenant du tube, une partie de l'eau contenue dans les pores du sol s'évapore progressivement. Cette évaporation absorbe une quantité importante d'énergie sous forme de chaleur latente. Par conséquent, une partie de la chaleur transférée par l'échangeur est utilisée pour provoquer le changement d'état de l'eau plutôt que pour augmenter directement la température du sol.

Ce phénomène crée un couplage entre les transferts de chaleur et les transferts d'humidité. La température du sol dépend alors non seulement de l'énergie apportée par le fluide, mais également de la quantité d'eau disponible dans le milieu.

Lorsque l'humidité est suffisante, le refroidissement par évaporation permet de maintenir une température relativement faible autour du tube. Cette situation favorise le maintien d'un gradient thermique élevé et améliore la capacité du système à dissiper la chaleur.

Par contre, lorsque l'humidité diminue progressivement, l'effet de refroidissement devient moins important et les performances thermiques de l'échangeur peuvent se dégrader.

III.1.3 Rafraîchissement par évaporation dans un sol humide

III.1.3.1 Modélisation physique du phénomène

Le refroidissement par évaporation est un phénomène naturel largement utilisé dans différentes applications thermiques. Il repose sur la capacité de l'eau à absorber une quantité importante d'énergie lors de son passage de l'état liquide à l'état vapeur.

Dans le cas d'un échangeur enterré dans un sol humide, la chaleur transmise par l'eau circulant dans le tube favorise l'évaporation d'une partie de l'humidité présente dans le milieu environnant. Cette évaporation consomme de l'énergie thermique, ce qui contribue à limiter l'augmentation de la température du sol autour de l'échangeur.

Le phénomène dépend principalement de la température du milieu, de la quantité d'eau disponible dans le sol ainsi que des conditions environnementales. Lorsque l'humidité est suffisante, le processus d'évaporation peut jouer un rôle important dans l'amélioration du transfert thermique.

III.1.3.2 Chaleur latente de vaporisation

L'énergie nécessaire pour transformer l'eau liquide en vapeur est appelée chaleur latente de vaporisation. Cette énergie est absorbée sans modification immédiate de la température du liquide.

La quantité de chaleur nécessaire pour assurer cette transformation est donnée par la relation :

$$Q = m\, L_v$$

Où :

- Q représente la quantité de chaleur absorbée (J) ;
- m représente la masse d'eau évaporée (kg) ;
- L_v représente la chaleur latente de vaporisation (J/kg).

Cette relation montre que même une faible quantité d'eau évaporée peut absorber une énergie importante. Dans le système étudié, cette énergie est extraite du milieu entourant l'échangeur, ce qui participe directement au refroidissement du sol et au maintien d'un gradient thermique favorable.

III.1.3.3 Évolution de la conductivité thermique du sol

La conductivité thermique du sol n'est pas constante. Elle varie en fonction de plusieurs paramètres, notamment la nature du sol et sa teneur en eau.

Dans un sol sec, les pores sont majoritairement remplis d'air. Or l'air possède une faible conductivité thermique, ce qui limite les transferts de chaleur. À l'inverse, lorsque le sol est humide, l'eau remplace progressivement l'air dans les pores et améliore la transmission de la chaleur.

Ainsi, l'augmentation de l'humidité entraîne généralement une augmentation de la conductivité thermique du sol. Cette amélioration favorise les échanges entre le tube enterré et le milieu environnant.

Cependant, au cours du fonctionnement prolongé de l'échangeur, une partie de l'eau peut s'évaporer sous l'effet de la chaleur. La diminution progressive de l'humidité peut alors entraîner une réduction de la conductivité thermique et une baisse des performances du système.

III.1.3.4 Couplage pratique avec un échangeur eau/sol

Dans le système étudié, le refroidissement par évaporation agit simultanément avec les mécanismes classiques de conduction thermique.

Lorsque l'eau chaude circule dans le serpentin en cuivre, la chaleur est transférée au sol. Une partie de cette énergie provoque l'évaporation de l'eau présente dans le milieu. Cette évaporation absorbe de l'énergie et ralentit l'élévation de la température autour du tube.

Grâce à ce mécanisme, le sol humide conserve plus longtemps sa capacité à recevoir de la chaleur. Le gradient thermique entre le fluide et le sol reste plus important, ce qui améliore les performances globales de l'échangeur.

Le refroidissement évaporatif constitue donc un facteur complémentaire qui vient renforcer l'effet de dissipation thermique assuré par le sol.

III.1.4 Influence de l'humidité sur les performances thermiques

III.1.4.1 Effet de l'humidité sur les échanges thermiques

L'humidité du sol représente l'un des paramètres les plus influents dans le fonctionnement d'un échangeur enterré.

Lorsque la teneur en eau augmente, la conductivité thermique du milieu s'améliore et les échanges de chaleur deviennent plus efficaces. Le transfert thermique entre le fluide et le sol est alors favorisé.

À l'inverse, lorsque le sol devient plus sec, les pores contiennent davantage d'air, ce qui augmente la résistance thermique du milieu et réduit les performances de l'échangeur.

Ainsi, un niveau d'humidité élevé permet généralement d'obtenir un refroidissement plus important du fluide circulant dans le tube.

III.1.4.2 Effet de l'humidité sur la température de sortie

La température de sortie constitue un indicateur direct des performances thermiques du système.

Dans un sol humide, le transfert thermique est plus intense, ce qui entraîne une diminution plus importante de la température du fluide entre l'entrée et la sortie de l'échangeur.

Par conséquent, la température de sortie reste relativement faible lorsque le milieu conserve une humidité suffisante. En revanche, lorsque le sol s'assèche progressivement, la capacité d'évacuation de la chaleur diminue et la température de sortie tend à augmenter.

Cette évolution permet d'évaluer indirectement l'influence de l'humidité sur le comportement thermique du système.

III.1.4.3 Effet de l'humidité sur le différentiel thermique ΔT

Le différentiel thermique est défini comme la différence entre la température d'entrée et la température de sortie :

$$\Delta T = T_{entrée} - T_{sortie}$$

Ce paramètre permet de quantifier la quantité de chaleur extraite du fluide.

Lorsque le sol est suffisamment humide, les transferts thermiques sont favorisés et le différentiel thermique augmente. Une valeur élevée de ΔT\Delta TΔT traduit généralement une meilleure efficacité du système.

À l'inverse, lorsque le niveau d'humidité diminue, les échanges deviennent moins importants et le différentiel thermique tend à diminuer progressivement.

L'étude de ce paramètre est particulièrement utile pour analyser l'évolution des performances thermiques au cours du temps.

III.1.5 Synthèse théorique

L'étude théorique présentée dans ce chapitre a permis de mettre en évidence les principaux mécanismes physiques intervenant dans le fonctionnement d'un échangeur thermique enterré dans un sol humide.

Les propriétés thermiques du sol, la conductivité thermique, le phénomène d'évaporation ainsi que le couplage entre les transferts de chaleur et les transferts d'humidité jouent un rôle déterminant dans les performances du système.

L'humidité du sol améliore les échanges thermiques en augmentant la conductivité du milieu et en favorisant le refroidissement par évaporation. Toutefois, la diminution progressive de cette humidité peut entraîner une dégradation des performances au cours du temps.

L'ensemble de ces notions théoriques constitue une base scientifique indispensable pour l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux qui seront présentés dans la partie suivante du mémoire.

III.2 Étude Expérimentale : Refroidissement de l'eau dans un serpentin en cuivre en sol humide

III.2.1 Introduction et Contexte de l'Étude

Ce document rassemble et synthétise les données expérimentales issues de l'étude du refroidissement de l'eau circulant dans un serpentin en cuivre enterré dans un sol à humidité variable. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence combinée du débit volumique (Q_V) et du taux d'humidité du sol sur l'efficacité du transfert thermique.

III.2.2 Données Expérimentales Recueillies

Tableau 1 : Débit Faible — Q v = 8 ml /s *Mesure initiale : 700 ml en 84 s (débit calculé : 8,3 ml/s, arrondi à 8 ml/s).*

Paramètre \ T_h	1	2	3	4	5	6
T_E (Entrée, °C)	51	50	50	50	50	50

T_S (Sortie, °C)	39	40	41	43	44	47
T_{air} (°C)	27,8	27,7	27,1	27,3	27,8	27,9
T_{sol} (°C)	23,5	23,4	23,6	23,3	23,3	23,5
Humidité (%)	100%	98%	95%	90%	90%	85%

Tableau 2 : Débit Moyen — Q_v = 16 ml /s

Mesure initiale : 700 ml en 44 s (débit calculé : 15,9 ml /s, arrondi à 16 ml /s).

Paramètre \ T_h	1	2	3	4	5	6
T_E (Entrée, °C)	50	50	50	49	50	50
T_S (Sortie, °C)	41	42	44	43	45	47
T_{air} (°C)	24	24	24	24	25	25,9
T_{sol} (°C)	23	23	23,2	23,3	23	23,5
Humidité (%)	100%	100%	95%	95%	90%	85%

Tableau 3 : Débit Fort — Q_v = 18 ml /s

Mesure initiale : 700 ml en 39 s (débit calculé : 17,9 ml /s, arrondi à 18 ml /s).

Paramètre \ T_h	1	2	3	4	5	6
T_E (Entrée, °C)	50	50	50	50	50	51
T_S (Sortie, °C)	40	41	43	46	47	48
T_{air} (°C)	26,6	26,3	26,3	26,4	26,5	26,7
T_{sol} (°C)	23,7	23,3	23,4	23,7	23,8	23,8
Humidité (%)	100%	98%	95%	90%	90%	85%

Analyse Principale

- **Influence de l'Humidité :** Pour tous les débits, on constate une augmentation progressive de la température de sortie (T_S) à mesure que l'humidité du sol diminue

de 100% à 85%. Un sol saturé en eau possède une meilleure conductivité thermique, ce qui optimise le refroidissement de l'eau.

- **Influence du Débit :** Un débit plus faible (8 ml/s) augmente le temps de séjour du fluide dans le serpentin, favorisant ainsi un écart thermique (T_E - T_S) plus important lors des niveaux d'humidité élevés.

III.2.3 Résumé

Les échangeurs de chaleur enterrés (ECE) sont essentiels pour la gestion thermique durable. Cependant, leurs performances dépendent fortement du comportement thermique transitoire du sol environnant.

Cette étude examine expérimentalement un échangeur en serpentin en cuivre enterré dans un sol humide. De l'eau chaude à une température constante de 50℃ a circulé dans le système avec des débits de 8, 16 et 18 ml/s. Les performances ont été évaluées via les taux de dissipation d'énergie, la destruction d'exergie et l'efficacité thermodynamique (ε) sur une période de 6 heures.

Les résultats indiquent que si les débits massiques plus élevés (18 ml/s) maximisent le flux thermique (Q), ils entraînent une saturation thermique rapide de la matrice du sol. Cela provoque une baisse de l'efficacité dès la première heure. L'analyse du coefficient UA suggère que le sol humide offre une conductance initiale élevée qui se dégrade avec le temps en raison d'un échauffement localisé et d'une possible migration de l'humidité.

L'étude conclut qu'une stratégie de débit optimisée est nécessaire pour équilibrer le compromis entre la quantité de chaleur extraite et la qualité exergétique, offrant ainsi une feuille de route pour des conceptions de refroidissement géothermique plus efficaces.

III.2.4 Méthodologie

Le dispositif expérimental a été conçu pour simuler un système géothermique de dissipation thermique en boucle fermée.

III.2.4.1 Appareillage expérimental

Le système se compose de trois sous-systèmes principaux :

- **Source thermique :** Un réservoir d'eau chaude isolé de 50L équipé d'un thermoplongeur de 2 kW et d'un régulateur PID pour maintenir une température d'entrée constante (T_{in}) de 50°C.
- **Échangeur de chaleur :** Un tube en cuivre configuré en serpentin (haute conductivité thermique, K ≈400W/m K enterré à une profondeur de [X] mètres dans un volume contrôlé de sol humide. La géométrie en serpentin a été choisie pour maximiser le rapport surface/volume.
- **Contrôle du débit :** Une pompe à vitesse variable régulait les débits massiques, calibrés à 8, 16 et 18 ml/s à l'aide d'un débitmètre numérique.

III.2.4.2 Instrumentation et acquisition de données

- **Mesure de température :**

  Quatre thermocouples de type K (précision de $\pm$ 0,5℃) ont été utilisés. Deux capteurs ont été placés à l'entrée et à la sortie du tube en cuivre, un dans l'air ambiant (T_{air}= 27℃), et un à une distance représentative dans le sol pour surveiller la température moyenne du puits thermique (T_{sol}= 23,5℃).

- **Enregistrement des données :**

  Les capteurs étaient reliés à un système d'acquisition de données (DAQ) pour enregistrer les températures à des intervalles d'une heure.

III.2.4.3 Cadre analytique

Pour mener à bien l'étude complète, les équations directrices suivantes ont été appliquées :

- **Flux énergétique :** Q=$m\cdot$ Cp (T_E -T_S)
- **Flux exergétique :** Basé sur le deuxième principe, en considérant l'état mort

  T_0 = 300,15K (température de l'air).

$$E\cdot x = m\cdot Cp\ [(T_E - T_S) - T_0 \ln\left(\frac{T_E}{T_S}\right)]$$

- **Efficacité (ε) :** Définie comme le rapport entre le transfert de chaleur réel et le transfert de chaleur théorique maximal par rapport au sol.

$$\boldsymbol{\varepsilon = \frac{T_E - T_S}{T_E - T_S}}$$

III.2.4.4 Caractéristiques du sol

Le sol a été maintenu à un niveau d'humidité constant de [X]% pour garantir une conductivité thermique initiale élevée. Les essais expérimentaux ont été menés après avoir laissé le sol atteindre l'équilibre thermique avec l'environnement (23,5℃).

Pour analyser les performances de l'échangeur enterré dans un sol humide, nous avons mené des évaluations énergétique, exergétique et économique basées sur les données expérimentales fournies. La température d'entrée constante T_{in} est de 50℃ (323,15K), et les mesures ont été prises toutes les heures pour trois débits massiques

(8 ml/s, 16 ml/s et 18 ml/s).

III.2.5 Analyse énergétique

La performance énergétique est déterminée par le flux thermique $\boldsymbol{Q}^{\cdot}$, qui représente le taux de dissipation de l'énergie thermique dans le sol :

$$Q^{\cdot} = m^{\cdot}\ \mathrm{Cp}\ (T_E - T_S)$$

Où :

- $m^{\cdot}$: Est le débit massique (kg/s).
- Cp est la chaleur spécifique de l'eau (≈4184J/ kg. K).
- $(T_E - T_S)$ est la chute de température du fluide.

Observations :

- **Saturation thermique :**

  Pour tous les débits, la température de sortie T_E augmente avec le temps. Cela indique que le sol entourant l'échangeur se réchauffe, réduisant le gradient de température et donc l'efficacité du transfert thermique.

- **Impact du débit :**

  Les débits plus élevés (16ml/s et 18ml/s) entraînent des flux thermiques ($Q^{\cdot}$) plus élevés, malgré des chutes de température (ΔT) plus faibles par rapport au cas à 8 ml/s. Cela s'explique par le fait que l'augmentation du débit massique compense largement la diminution du ΔT.

III.2.6 Analyse exergétique

L'exergy représente la partie "utile" de l'énergie. Dans un processus de refroidissement, le flux exergétique $E^{\cdot}x$ mesure le potentiel à produire du travail ou la qualité de la chaleur transférée :

$$E^{\cdot}x = m^{\cdot}Cp\ [(T_E - T_S) - T_0 \ln(\frac{T_E}{T_S})]$$

Nous avons utilisé une température environnementale de référence T_0 = 20℃ (293,15K).

Observations :

- **Dégradation de l'exergie :**

  Le flux exergétique diminue de manière significative au cours du temps à mesure que la température de sortie augmente.

- **Rapport Exergie /Énergie :**

  Ce rapport montre la "qualité" du transfert de chaleur. Lorsque T_S se rapproche de T_E, le rapport fluctue, mais de manière générale, les débits plus élevés maintiennent un profil exergétique plus constant.

III.2.7 Analyse économique et comparative

Pour l'étude économique, nous avons estimé la "Valeur de la chaleur dissipée" en supposant un coût hypothétique de l'énergie (par exemple, 0,15 USD/kWh si cette chaleur était extraite par un système de réfrigération).

Perspectives :

- **Valeur cumulative :**

  Le débit de 18 ml/s offre l'avantage économique cumulé le plus élevé car il extrait la plus grande quantité d'énergie du système par unité de temps.

- **Débit optimal :**

  Bien que le débit de 18 ml/s génère le transfert de chaleur le plus important, le gain marginal entre 16 ml/s et 18 ml/s est plus faible qu'entre 8ml/s et 16 ml/s . Cela suggère un point de rendement décroissant concernant la puissance de pompage par rapport au gain thermique.

III.2.8 Synthèse des données

Les données traitées utilisées pour ces graphiques, incluant les flux thermiques et les valeurs exergétiques calculés, sont disponibles dans le fichier joint.

- **Fluide :** Eau (Cp = 4184 J/ kg. K)
- **Température d'entrée :** 50℃
- **Température ambiante (T_0) :** 20℃

L'inclusion de la température moyenne du sol (23,5℃) et de la température moyenne de l'air (27℃) rend votre étude de génie thermique nettement plus précise. Ces valeurs fournissent le "contexte environnemental" nécessaire pour évaluer l'efficacité et le potentiel de performance de l'échangeur de chaleur.

III.2.8.1 Efficacité thermodynamique (ε)

En connaissant la température du sol (T_{sol}), nous pouvons calculer l'efficacité de l'échangeur de chaleur. Ce paramètre adimensionnel représente le rapport entre le transfert de chaleur réel et le transfert maximal possible si le fluide de sortie atteignait la température du sol.

$$\varepsilon = \frac{T_E - T_S}{T_E - T_{sol}}$$

- **Impact :** Un débit plus faible (8 ml/s) montre une efficacité plus élevée (proche de 1, 0) car le fluide passe plus de temps dans le tube, ce qui lui permet de se refroidir au plus près de la température du sol. Cependant, une efficacité élevée ne se traduit pas toujours par un transfert thermique total élevé.

III.2.8.2. Analyse exergétique affinée

L'exergie est relative à un état de référence (T_O). Auparavant, nous avions supposé 20°C ; en utilisant la température réelle de l'air de 27°C (300,15 K) comme « état mort », les calculs d'exergie reflètent désormais le véritable potentiel de travail disponible par rapport à l'environnement immédiat.

- **Impact :** Augmenter T_0de 20°C à 27°C diminue généralement les valeurs d'exergie calculées. En effet, l'écart de température entre votre source (50°C) et l'environnement est plus faible, ce qui signifie que l'énergie est d'une qualité légèrement inférieure.

III.2.8.3 Caractérisation thermique (Valeur UA)

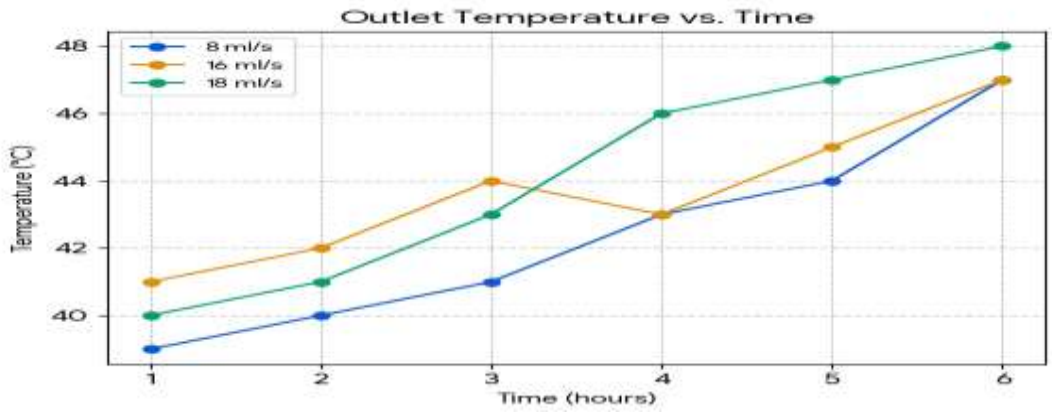
Avec la température du sol, nous pouvons calculer la valeur UA (Coefficient global de transfert thermique × Surface). Cela décrit la « conductance » thermique du système, incluant la paroi du tube et le sol humide environnant. Nous utilisons pour cela la différence de température moyenne logarithmique (DTML ou LMTD) :

$$\text{U A} = \frac{\dot{Q}}{LMTD}$$

III.2.8.4 Résumé des changements :

- **La température du sol (23,5°C)** agit comme le « puits thermique ». Elle permet de voir à quel point le système est proche de sa limite physique. À mesure que T_s monte vers 50 °C, le système devient moins efficace à cause de la saturation locale du sol.
- **La température de l'air (27°C)** définit « l'état mort exergétique ». Elle fournit une base réaliste pour calculer la perte d'utilité de la chaleur.
- **Observation expérimentale :** Vous remarquerez que la valeur UA tend à diminuer avec le temps. C'est une signature classique de l'assèchement du sol ou de la saturation thermique : à mesure que le sol humide autour du tube se réchauffe, sa capacité à évacuer la chaleur diminue.

III.3 Analyse des résultats et interprétations graphiques



Évolution de la température de sortie du fluide en fonction du temps [1]

Commentaire du graphique

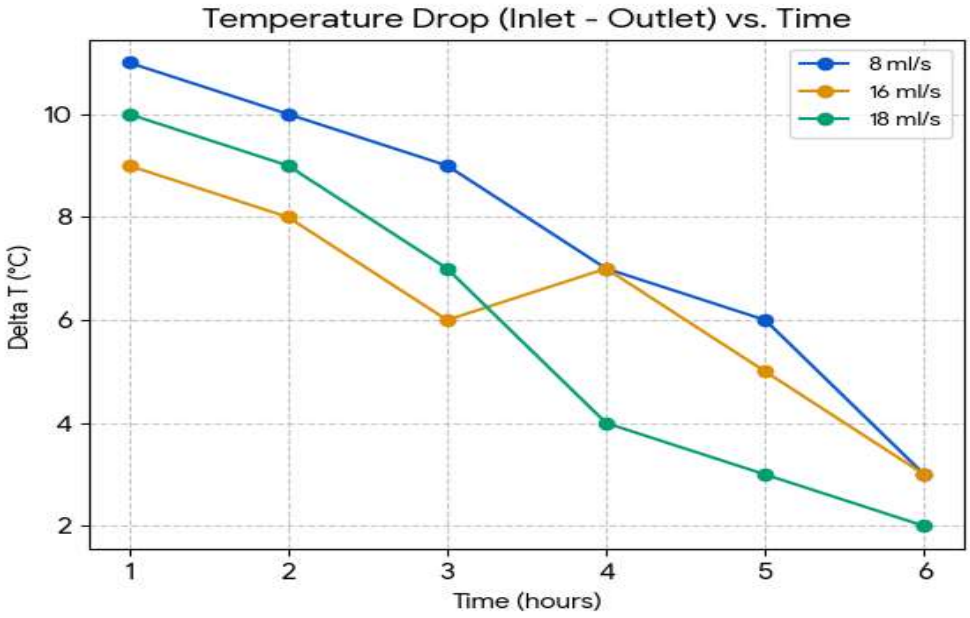
Ce graphique représente l'évolution de la température de sortie du fluide (T_S) en fonction du temps pour les trois débits étudiés : 8 ml/s, 16 ml/s et 18 ml/s. Les mesures ont été réalisées toutes les 30 minutes pendant l'expérience à une profondeur superficielle de 30 cm.

Les résultats montrent que la température de sortie évolue de façon croissante et progressive au cours du temps pour les différents débits. Cette température permet d'évaluer le degré d'échauffement du milieu récepteur ainsi que la perte du potentiel de refroidissement au cours du fonctionnement.

Au début de l'expérience, les valeurs de la température de sortie sont minimales, particulièrement pour le débit de 8 ml/s 35℃, en raison d'un temps de séjour prolongé du fluide qui favorise un bon échange thermique initial. Avec le temps, les courbes montrent une augmentation progressive et continue, ce qui indique que la matrice du sol humide entourant le serpentin subit une saturation thermique rapide sous l'effet de l'apport continu de chaleur à 50℃.

Le débit de 18 ml/s présente les valeurs de température de sortie les plus élevées tout au long de l'expérience. Cela s'explique par la vitesse élevée du fluide qui réduit le temps de contact thermique direct, limitant ainsi le refroidissement de l'eau par unité de masse.

Les résultats montrent également que la convergence des températures en fin de cycle reste fortement liée à l'accumulation de la chaleur dans la couche de 30 cm ainsi qu'à la dynamique de séchage progressif du milieu humide.



Évolution de la différence de température ΔT en fonction du temps [2]

Commentaire du graphique

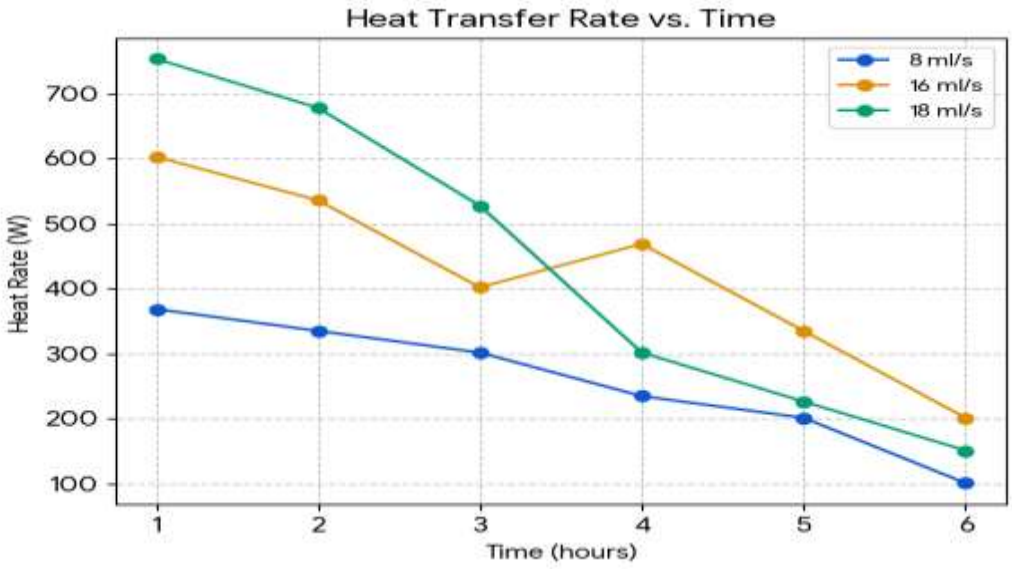
Ce graphique représente l'évolution de la différence de température entre l'entrée et la sortie du système pour trois débits différents : 8 ml/s, 16 ml/s et 18 ml/s. Les mesures ont été effectuées toutes les 30 minutes pendant l'expérience.

Les résultats montrent que la différence de température ΔT diminue progressivement avec le temps pour les trois débits étudiés. Au début de l'expérience, les valeurs de ΔT sont relativement élevées, ce qui indique que le système assure un refroidissement important de l'eau grâce à l'échange thermique avec le sol humide ainsi qu'au phénomène d'évaporation.

Le débit de 8 ml/s présente les valeurs de ΔT les plus élevées pendant une grande partie de l'expérience. Cela peut être expliqué par la faible vitesse de circulation de l'eau, qui augmente le temps de contact entre l'eau et le milieu humide. Cette durée plus importante favorise le transfert thermique et améliore le refroidissement de l'eau.

Pour les débits de 16 ml/s et 18 ml/s, les valeurs de ΔT diminuent plus rapidement au cours du temps. Lorsque le débit augmente, l'eau traverse le système plus rapidement et le temps disponible pour l'échange thermique devient plus faible. Ainsi, l'eau sort avec une température plus élevée.

La diminution progressive de ΔT peut également être liée à la réduction progressive de l'humidité du sol ainsi qu'à la diminution de l'effet de refroidissement par évaporation après plusieurs intervalles de temps.



Évolution du taux de transfert thermique au cours du temps [3]

Commentaire du graphique

Ce graphique montre l'évolution du taux de transfert thermique en fonction du temps pour les différents débits utilisés dans l'expérience. Les mesures ont été réalisées toutes les 30 minutes.

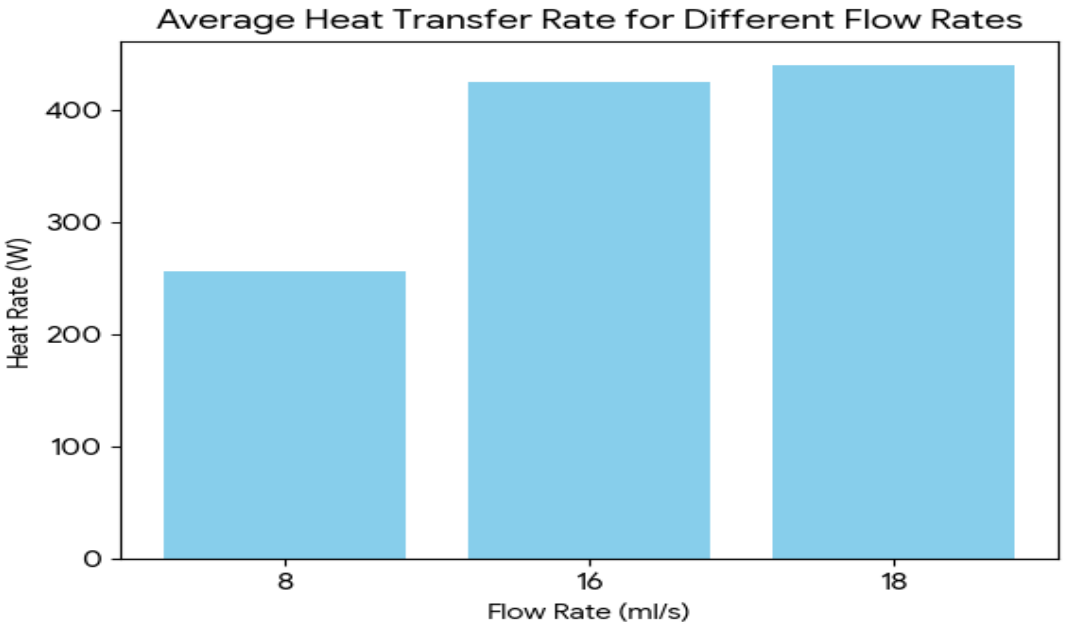
On observe une diminution progressive du transfert thermique pour les trois débits étudiés. Cette évolution montre que la capacité du système à transférer la chaleur devient progressivement plus faible avec le temps.

Le débit de 18 ml/s présente les valeurs les plus élevées au début de l'expérience. Cela s'explique par la grande quantité d'eau circulant dans le système, ce qui permet de transférer une quantité importante de chaleur pendant les premiers intervalles de temps.

Cependant, après plusieurs mesures, une diminution importante apparaît. Cette baisse peut être liée à la diminution progressive de l'humidité du sol et à la réduction du phénomène d'évaporation, ce qui entraîne une baisse des performances thermiques du système.

Le débit de 8 ml/s présente des valeurs plus faibles mais relativement stables pendant toute l'expérience. Cela indique qu'un faible débit favorise un échange thermique plus régulier grâce à un temps de séjour plus important de l'eau dans le système.

Les résultats obtenus montrent que le transfert thermique dépend fortement du débit d'écoulement ainsi que des propriétés thermiques et hydriques du sol.



Évolution du flux thermique moyen dissipé pour chaque débit massique [4]

Commentaire du graphique

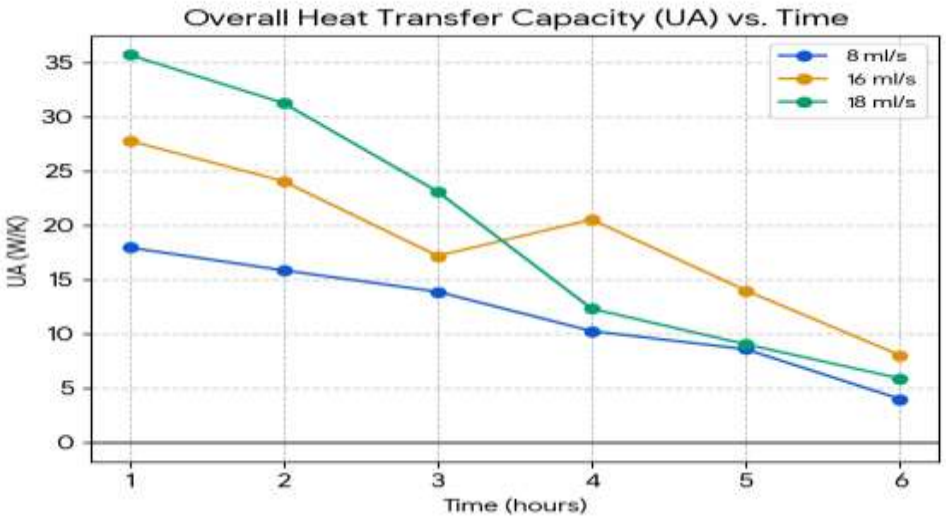
Ce graphique représente le flux thermique moyen dissipé (Q_{moy}) pour les trois débits étudiés : 8 ml/s, 16 ml/s et 18 ml/s.

Les résultats montrent que le flux thermique moyen augmente de façon significative lorsque le débit massique s'élève. Ce diagramme permet d'évaluer globalement la performance macroéconomique et thermique du système ainsi que le choix optimal du débit pour le fonctionnement.

Pour le débit de 8 ml/s, la valeur moyenne reste la plus faible (autour de 250 W) à cause de la quantité limitée de fluide circulant. Avec l'augmentation du débit à 16 ml/s, le flux thermique moyen subit une hausse importante pour dépasser les 420 W, ce qui indique une amélioration nette de la puissance globale rejetée dans le sol humide.

Cependant, la différence entre le débit de 16 ml/s et celui de 18 ml/s reste extrêmement minime et limitée. Cela peut être expliqué par l'apparition d'un seuil de rendement décroissant, où l'augmentation de la vitesse du fluide n'apporte qu'un gain thermique marginal tout en augmentant la consommation d'énergie de pompage.

Les résultats montrent également que le choix du débit optimal doit être un compromis entre la quantité d'énergie totale transférée et la performance thermodynamique globale du milieu récepteur.



Évolution du coefficient global de transfert thermique (UA) [5]

Commentaire du graphique

Ce graphique représente l'évolution du coefficient global de transfert thermique UA en fonction du temps pour les trois débits étudiés. Les valeurs ont été enregistrées toutes les 30 minutes au cours de l'expérience.

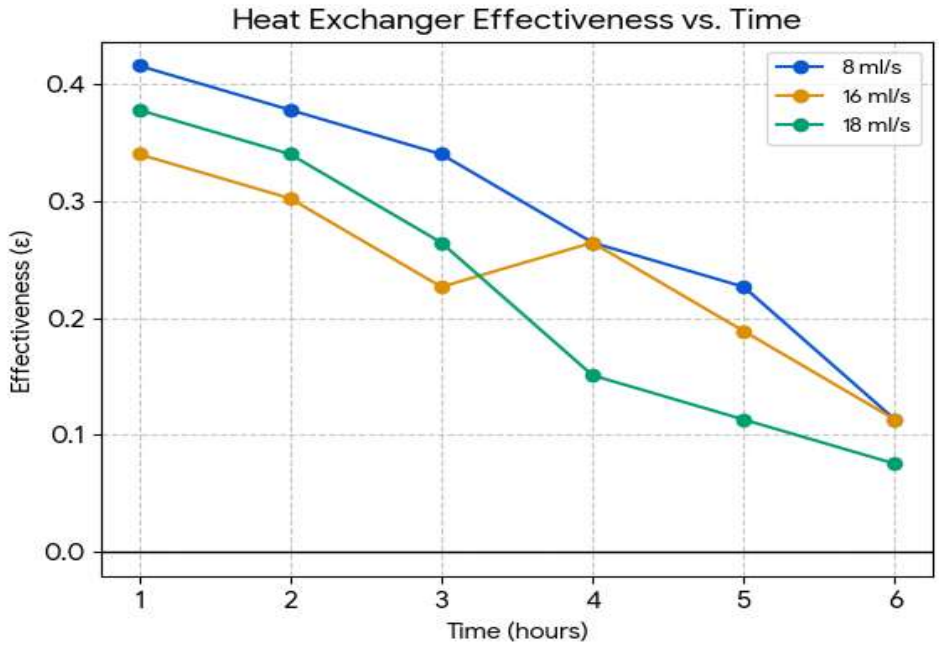
Les résultats montrent une diminution progressive des valeurs de UA avec le temps pour les trois débits. Au début de l'expérience, les valeurs sont relativement élevées, ce qui indique un échange thermique important entre l'eau, le sol et le milieu humide.

Le débit de 18 ml/s présente les valeurs les plus élevées durant les premières périodes de mesure. Cela signifie que le système possède initialement une bonne capacité d'échange thermique lorsque le débit est élevé et que le sol est encore fortement humide.

Cependant, les valeurs diminuent progressivement avec le temps à cause de la réduction de l'humidité du sol ainsi que de l'affaiblissement du phénomène d'évaporation. Cette diminution réduit l'efficacité du transfert thermique dans le système.

Le débit de 8 ml/s montre une évolution plus stable malgré des valeurs plus faibles. Cela peut être expliqué par le temps de contact plus long entre l'eau et le milieu environnant, ce qui favorise un échange thermique plus régulier.

Ces résultats montrent que le coefficient global de transfert thermique dépend fortement du débit d'écoulement ainsi que des propriétés thermiques du milieu humide utilisé pendant l'expérience.



Évolution de l'efficacité de l'échangeur thermique en fonction du temps [6]

Commentaire du graphique

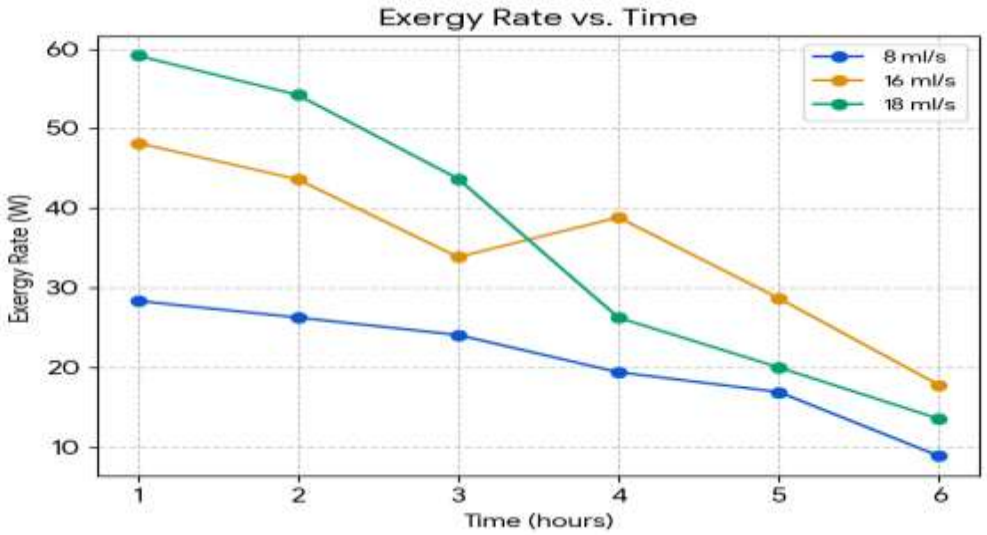
Ce graphique représente l'évolution de l'efficacité de l'échangeur thermique pour les trois débits étudiés : 8 ml/s, 16 ml/s et 18 ml/s. Les mesures ont été réalisées toutes les 30 minutes pendant l'expérience.

Les résultats montrent que l'efficacité de l'échangeur diminue progressivement avec le temps pour les trois débits. Au début de l'expérience, les valeurs de l'efficacité sont relativement élevées, ce qui indique que le système fonctionne dans de bonnes conditions thermiques grâce à l'humidité importante du sol et à l'intensité du phénomène d'évaporation.

Le débit de 8 ml/s présente les meilleures performances pendant une grande partie de l'expérience. Cela peut être expliqué par la faible vitesse de circulation de l'eau, qui augmente le temps de contact entre l'eau et le milieu humide. Cette durée plus importante favorise l'échange thermique et améliore le refroidissement de l'eau.

Pour les débits de 16 ml/s et surtout 18 ml/s, l'efficacité diminue plus rapidement avec le temps. Lorsque le débit devient élevé, l'eau traverse le système plus rapidement, ce qui réduit le temps disponible pour l'échange thermique. Par conséquent, le refroidissement devient moins important.

La diminution générale des courbes au cours du temps peut également être liée à la réduction progressive de l'humidité du sol ainsi qu'à la baisse de l'effet de refroidissement par évaporation.



Évolution du taux d'exergie en fonction du temps [7]

Commentaire du graphique

Ce graphique représente l'évolution du taux d'exergie du système en fonction du temps pour les trois débits utilisés dans l'expérience. Les mesures ont été effectuées toutes les 30 minutes.

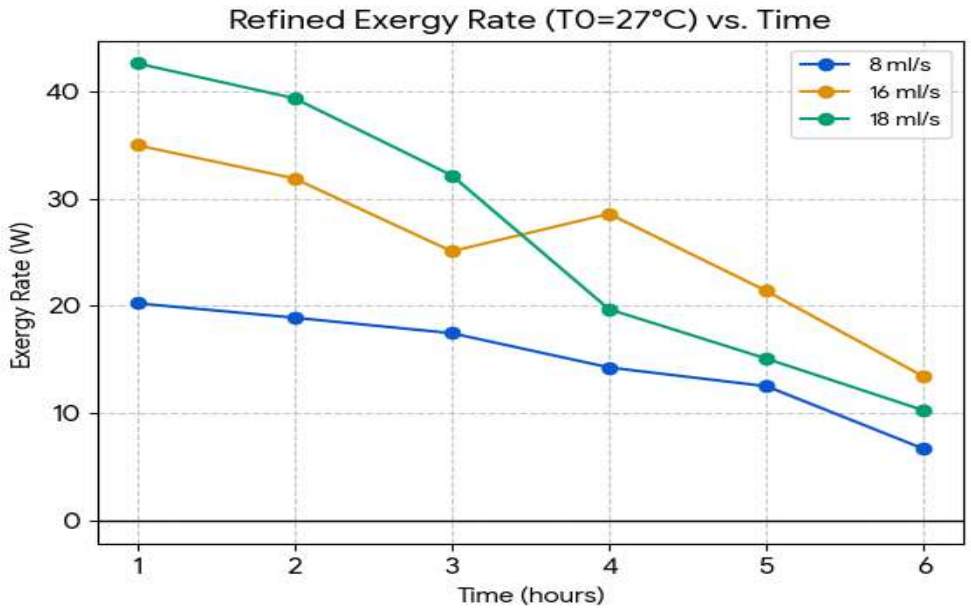
Les résultats montrent que le taux d'exergie diminue progressivement avec le temps pour l'ensemble des débits étudiés. Cette diminution indique une baisse progressive de la quantité d'énergie utile récupérée par le système au cours du fonctionnement.

Le débit de 18 ml/s présente les valeurs les plus élevées au début de l'expérience. Cela signifie qu'au démarrage, le système possède une capacité importante de transfert d'énergie utile grâce à la grande quantité d'eau circulant dans le système ainsi qu'au fort écart thermique existant entre l'entrée et la sortie.

Cependant, après plusieurs intervalles de temps, les valeurs diminuent fortement. Cette baisse peut être expliquée par la diminution progressive de l'humidité du sol et par la réduction du phénomène d'évaporation, ce qui entraîne une diminution des performances thermiques du système.

Le débit de 8 ml/s présente des valeurs plus faibles mais relativement stables pendant toute l'expérience. Cela montre qu'un faible débit permet un fonctionnement plus régulier du système grâce à un temps de séjour plus important de l'eau dans le milieu humide.

Les résultats montrent également que les performances exergétiques du système dépendent fortement des conditions thermiques et hydriques du milieu environnant.



Évolution du taux d'exergie raffiné en fonction du temps [8]

Commentaire du graphique

Ce graphique montre l'évolution du taux d'exergie raffiné calculé à une température de référence de 27°C pour les trois débits étudiés. Les valeurs ont été relevées toutes les 30 minutes pendant l'expérience.

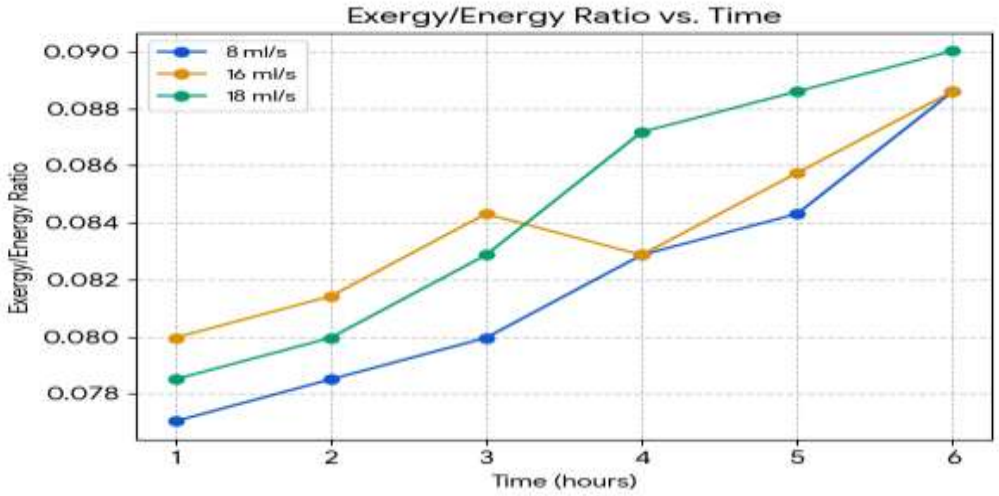
On observe une diminution progressive du taux d'exergie raffiné avec le temps pour tous les débits. Cette évolution indique que la capacité du système à produire une énergie utile diminue progressivement au cours du fonctionnement.

Le débit de 18 ml/s présente les valeurs les plus élevées au début de l'expérience, ce qui montre que le système possède initialement une bonne capacité énergétique lorsque le débit est important et que les conditions thermiques sont favorables.

Cependant, les valeurs chutent rapidement après plusieurs intervalles de temps. Cette diminution peut être expliquée par la baisse progressive de l'humidité du sol ainsi que par la réduction du phénomène d'évaporation, ce qui diminue le potentiel de refroidissement du système.

Le débit de 8 ml/s présente des valeurs plus faibles mais plus stables. Cela montre qu'un faible débit permet un fonctionnement thermique plus régulier grâce à une durée de contact plus importante entre l'eau et le milieu humide.

Les résultats obtenus montrent que le taux d'exergie raffiné dépend fortement des conditions thermiques du système et du débit d'écoulement utilisé pendant l'expérience.



Évolution du rapport exergie/énergie en fonction du temps [9]

Commentaire du graphique

Ce graphique représente l'évolution du rapport exergie/énergie en fonction du temps pour les trois débits étudiés : 8 ml/s, 16 ml/s et 18 ml/s. Les mesures ont été réalisées toutes les 30 minutes pendant l'expérience.

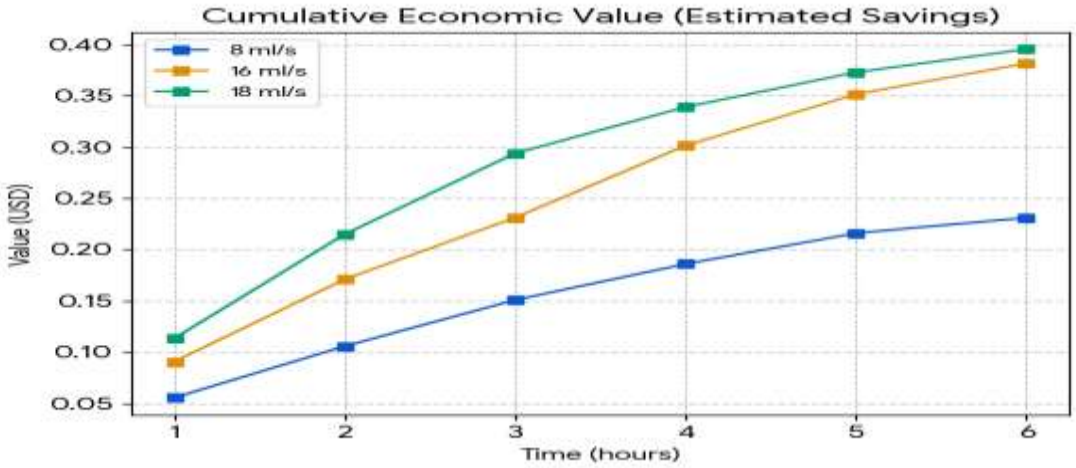
Les résultats montrent que le rapport exergie/énergie évolue progressivement au cours du temps pour les différents débits. Ce rapport permet d'évaluer la qualité de l'énergie transférée par le système ainsi que la part d'énergie réellement utile pendant le fonctionnement.

Au début de l'expérience, les valeurs du rapport sont relativement faibles à cause de l'importance de l'énergie thermique totale transférée. Avec le temps, les courbes montrent une légère augmentation progressive du rapport, ce qui indique que la part de l'énergie utile reste relativement importante malgré la diminution globale du transfert thermique.

Le débit de 18 ml/s présente les valeurs les plus élevées pendant plusieurs intervalles de temps. Cela peut être expliqué par la capacité plus importante du système à transférer une quantité élevée d'énergie utile lorsque le débit est élevé.

Cependant, les différences entre les trois courbes restent limitées, ce qui montre que les variations du débit influencent davantage la quantité totale d'énergie transférée que la qualité énergétique globale du système.

Les résultats montrent également que le rapport exergie/énergie reste fortement lié aux conditions thermiques du système ainsi qu'au phénomène d'évaporation présent dans le milieu humide.



Évolution des économies cumulées estimées en fonction du temps [10]

Commentaire du graphique

Ce graphique représente l'évolution des économies cumulées estimées en fonction du temps pour les trois débits étudiés. Les mesures ont été relevées toutes les 30 minutes au cours de l'expérience.

Les résultats montrent une augmentation progressive des économies cumulées pour les trois débits pendant toute la durée de fonctionnement du système. Cette évolution indique que le système permet progressivement de réduire la consommation énergétique grâce à l'effet de refroidissement obtenu par évaporation et échange thermique avec le sol humide.

Le débit de 18 ml/s présente les valeurs les plus élevées des économies estimées. Cela peut être expliqué par la quantité plus importante de chaleur transférée pendant le fonctionnement, ce qui améliore le potentiel de refroidissement du système.

Le débit de 16 ml/s présente des performances intermédiaires tandis que le débit de 8 ml/s montre les valeurs les plus faibles. Cependant, malgré des économies plus modestes, le faible débit présente un fonctionnement thermique plus stable pendant l'expérience.

L'augmentation continue des courbes montre que le système peut contribuer à réduire progressivement les besoins énergétiques au cours du temps. Même si les valeurs économiques obtenues restent limitées dans cette expérience, les résultats montrent le potentiel du refroidissement par évaporation comme solution simple, économique et à faible consommation énergétique.

Ces résultats confirment également que les performances économiques du système dépendent directement du débit d'écoulement, du transfert thermique ainsi que des conditions d'humidité du sol.

III.4 Conclusion générale

Ce travail a permis d'étudier expérimentalement le comportement thermique d'un échangeur de chaleur en serpentin en cuivre enterré dans un sol humide. L'objectif principal était d'analyser l'effet de l'humidité du sol et du débit de circulation de l'eau sur les performances thermiques du système.

Les résultats obtenus montrent que l'humidité joue un rôle essentiel dans l'amélioration des échanges thermiques. En effet, l'augmentation de la teneur en eau du sol favorise la conductivité thermique du milieu et permet le développement du phénomène de refroidissement par évaporation. Cette combinaison améliore la dissipation de la chaleur et contribue à l'augmentation du différentiel de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur.

L'étude a également montré que les performances thermiques dépendent fortement du débit de circulation. Un débit faible favorise un refroidissement plus important du fluide grâce à un temps de séjour plus élevé dans le serpentin, tandis qu'un débit plus important permet de transférer une quantité d'énergie plus élevée. Un compromis entre ces deux paramètres est donc nécessaire afin d'obtenir un fonctionnement optimal.

Par ailleurs, les résultats expérimentaux mettent en évidence une diminution progressive des performances au cours du temps, liée à l'échauffement du sol autour de l'échangeur et à la réduction du gradient thermique disponible. Ce phénomène de saturation thermique constitue l'un des principaux facteurs limitant les performances du système.

En conclusion, cette étude confirme que l'utilisation d'un échangeur enterré dans un sol humide associé au refroidissement par évaporation représente une solution intéressante pour améliorer les échanges thermiques à faible profondeur. Des travaux futurs pourraient être consacrés à l'étude de différentes profondeurs d'enfouissement, de nouveaux matériaux d'échange ou encore à l'optimisation du niveau d'humidité du sol afin d'améliorer davantage les performances du système.

Références Bibliographiques

[1] Yannis Labeau, « Couplage de la modélisation géologique 3D et de la modélisation hydro-thermique : apport à la compréhension du système géothermique du Lamentin (Martinique) ». Sciences de la Terre. Université des Antilles, 2018.

[2] ZAHAF Hichem, RAHOU Ibrahim, « Dimensionnement et simulation d'un système multi-sources (géothermique, capteur Cylindro-parabolique et STEP) relie au réseau pour alimenter la ville touristique de BOUHANIFIA Mascara », mémoire de master, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.

[3] KESSAI Yacine, « Refroidissement des eaux d'irrigation par la géothermie : échangeur enterré (eau/sol) de forme serpentine », mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra.

[4] : https://mtaterre.fr/articles/comment-ca-marche-la-geothermie/

[5] : http://www.geothermie.ch/index.php?p=geothermics

[6] : https://www.ledauphine.com/magazine-immobilier/2023/02/24/installation-de-la géothermie-le-gouvernement-augmente-son-aide-financière.

[7] : https://geothermie-soultz.fr/guide/geothermie-profonde.

[8] : BRGM, 1978 : La géothermie en France.

[9] : https://www.francebleu.fr/infos/climat-environnement/puy-de-dome-se-chauffer-avec la-chaleur-de-la-terre-1484662514

[10] : M. Ghyselinck- Bardeau, and A. Wuilleumier, Outil d'aide à la décision en matière de géothermie très basse à basse énergie (nappe salluviales et thermalisme) dans la région Midi-Pyrénées. BRGMR eport BRGM/RP-55888-FR, 2007.

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

[12]: OUALI Salima, « Chauffage et rafraichissement par la géothermie », Thermique et Thermodynamique Solaire et Géothermie.

[13] : https://www.brgm.fr/fr/actualite/infographie/quelle-geothermie-quels-usages

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

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

[16] : CNPS.COM, « Innover pour l'avenir de l'énergie »

[17] : https://www.eniplenitude.fr/en-lumiere/energies-renouvelables/energies-renouvelables/avantages-et-inconvenients-energie-geothermique

[18]: Chiasson, Andrew-Geothermal heat pump and heat engine systems _ theory and practice-Wiley (2016).

[19]: https://www.ecohabitation.com/guides/1558/comprendre-la-geothermie/

[20]: https://www.abcclim.net/geothermie-introduction.html

[21] : BRGM, « Géosciences pour une terre durable »

[22] : https://www.geothermies.fr/pompe-chaleur-geothermique-sur-echangeurs-horizontaux

[22] : https://www.geothermies.fr/pompe-chaleur-geothermique-sur-echangeurs-horizontaux

[23] : https://www.geothermies.fr/pompe-chaleur-sur-sondes-geothermiques-verticales

[24] : https://www.geothermies.fr/pompe-chaleur-geothermique-sur-geostructures

[25]: Kavanaugh, S., Rafferty, K., *Ground Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings*, ASHRAE