



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique
et Populaire



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
جامعة غرداية

N°
d'enregistrement
...../...../.....

Université de Ghardaïa
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الآلية والكهروميكانيك
Département de d'automatique et d'électromécanique
Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme
Master

Domaine: Sciences et Technologies
Filière: Génie Mécanique
Spécialité: Énergie Renevelables en mécanique

Thème

Étude expérimentale d'un système géothermique-solaire à faible
profondeur pour le chauffage passif et le refroidissement en climat
semi-aride.

Sayah Ben Aissa Aimen Abd Samad

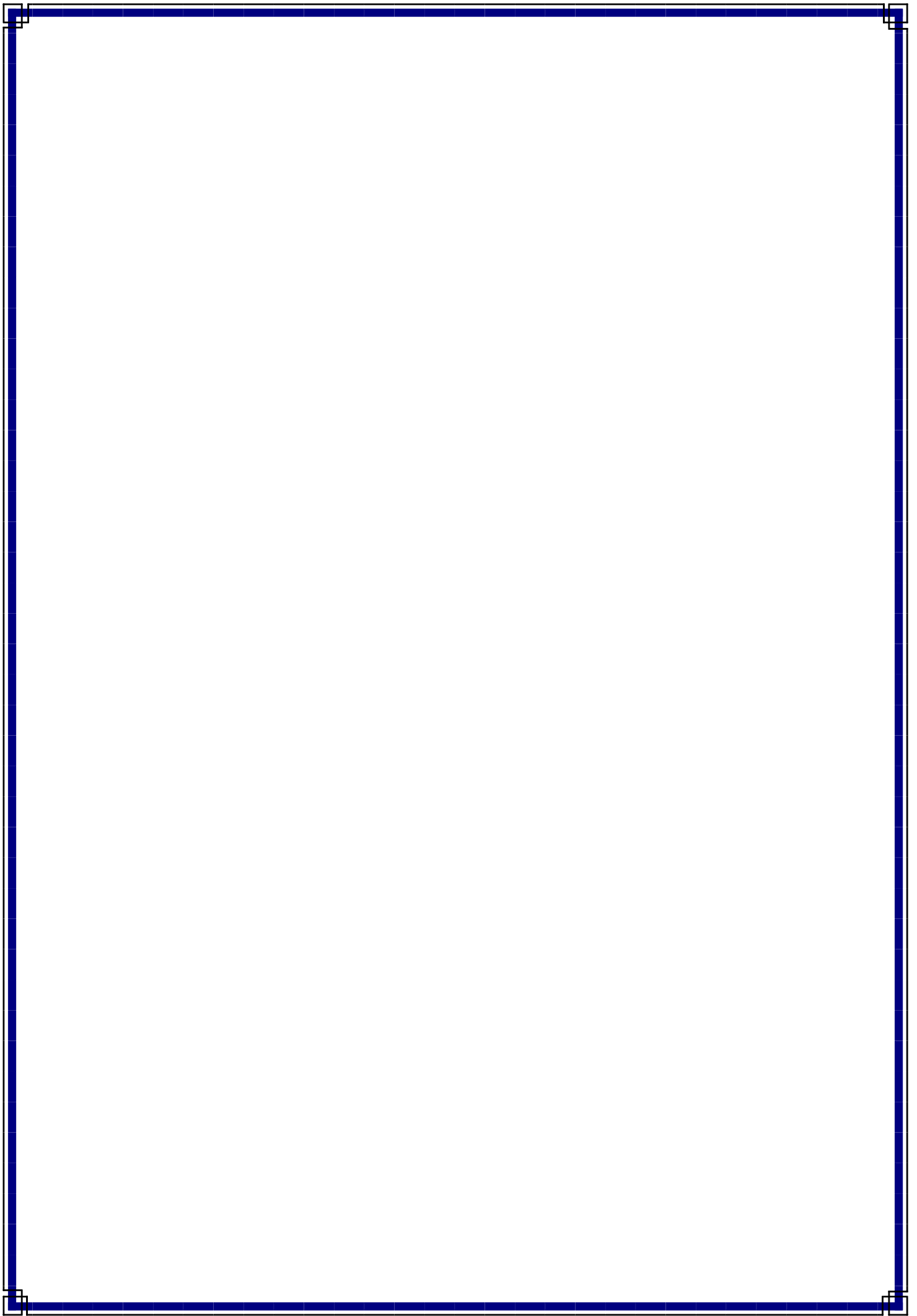
Sendjal Fouzi Ayoub

Soutenue publiquement le : 08/06/2026

Devant le jury composé de:

Tahtah Redha	MCB	Univ. Ghardaïa	Président
Beddar Antar	MRA	URAER. Ghardaïa	Examineur
Aissaoui Fares	MCA	Univ. Ghardaïa	Examineur
Chenini Nadir	Attaché de Recherche	URAER. Ghardaïa	Encadreur
Djeffal Rachid	MRB	CRSTRA Biskra	Co-Encadreur

Année universitaire 2025/2026



بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات وبفضله تنزل الخيرات
والبركات، وبتوفيقه تتحقق المقاصد والغايات، والصلاة
والسلام على أشرف الخلق والمرسلين سيدنا محمد وعلى
آله وصحبه أجمعين

Remerciements

Louange à Dieu qui a permis la réalisation de ce travail et nous a accordé la patience, la force et la détermination nécessaires pour mener à bien notre parcours universitaire.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à notre encadreur **CHENINI Nadir**, à notre co-encadreur **Dr DJEFFAL Rachid**, ainsi qu'à Mr **BENGHANIA Mohammed**, pour leurs précieux conseils, leur disponibilité et leur accompagnement rigoureux tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'études. Leur contribution a été essentielle pour arriver à ce mémoire.

Nous exprimons également notre profonde gratitude aux membres du jury d'examen, qui ont bien voulu accepter d'évaluer ce travail, ainsi qu'à tous les enseignants de la faculté des sciences et de la technologie de l'université de Ghardaïa, pour les connaissances, le savoir-faire et l'expertise qu'ils ont partagées avec nous.

Nos remerciements vont aussi à nos familles et à nos amis, pour leur soutien, leurs encouragements constants et leur présence à nos côtés dans les moments de doute.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

Merci à tous

Dédicaces

Je dédie ce mémoire de Master à :

Mes chers parents pour leurs sacrifices.

Mes sœurs et mon frère

Et tous les professeurs de notre faculté.

Tous mes proches et amis fidèles.

Tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.

À ceux qui ont gravé leurs rêves sur les murs de l'université, qui ont porté leurs cahiers sur le chemin du savoir, à ces étudiants de Gaza qui sont partis avant que l'histoire ne soit complète, avant qu'on n'appelle leurs noms le jour de la remise des diplômes : paix à vos âmes pures. Le rendez-vous est chez un Seigneur qui n'oublie jamais.

SAYAH BEN AISSA Aimen Abd Samad

SENDJAL Fouzi Ayoub

SOMMAIRE

Remerciements.....	I
<i>Dédicaces</i>	II
SOMMAIRE	III
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX	VII
NOMENCLATURES	VIII
Résumé.....	IX
Abstract.....	X
الملخص.....	XI
Introduction Générale	1
Chapitre I : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires	3
Introduction :.....	3
1.1 Principes de la géothermie de faible profondeur :	3
1.2 Le sous-sol comme milieu thermique : gradient et flux de chaleur :.....	4
1.2.1 Le gradient géothermique :	4
1.2.2 Le Flux de chaleur :	6

1.2.3 Caractéristiques thermiques du sous-sol :	7
1.3 Types d'échangeurs géothermiques :	9
1.3.1 Échangeur géothermique horizontal :	9
1.3.2 Échangeur géothermique vertical :	9
1.4 Echangeur de chaleur air-sol (puits canadien) :	10
1.4.1 Applications des échangeurs thermiques air-sol :	11
1.4.2 Fonctionnement en hiver :	11
1.4.3 Fonctionnement en été :	12
1.5 Le gisement solaire : caractéristiques et potentiel énergétique :	13
1.5.1 Le rayonnement solaire (direct, diffus et global) :	13
1.5.1.1 Rayonnement solaire direct :	14
1.5.1.2 Rayonnement diffus :	14
1.5.2 Le Gisement solaire Algérien :	15
Conclusion :	17
Chapitre 2 Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié	18
Introduction :	18
2.1 Situation géographique de la région de Ghardaïa :	18
2.2 Cadre de l'étude expérimentale :	19
2.3 Caractéristiques climatiques de la région d'étude :	20
2.3.1 Variations mensuelles du rayonnement solaire à Adrar, Biskra et Ghardaïa :	23
2.3.2 Variations de la température du sol à différentes profondeurs à Adrar, Biskra et Ghardaïa :	24
2.4 Équipements de mesure :	27
2.4.1 Acquisition Agilent 34972A :	28
2.4.2 Testo 176 T4 :	28
2.4.3 Anémomètre :	29
2.4.5 Thermocouple type k :	30

2.5 Description du dispositif expérimental et de la chaîne d'acquisition :	30
2.6 Traitement et organisation des données :	31
2.7 Visualisation et analyse graphique des séries de mesures :	32
Conclusion :	33
CHAPITRE 3 : ANALYSE ET DUSCUSION	34
Introduction :	35
3.1 Paramètres géométriques et thermophysiques :	35
3.2 Présentation du dispositif EAHE mis en œuvre :	35
3.3 Analyse mathématique de l'échangeur de chaleur air-sol :	37
3.3.1 Nombre de Reynolds :	38
3.3.2 Nombre de Prandtl :	38
3.3.3 Nombre de Nusselt :	38
3.3.4 Détermination de h :	39
3.3.5 Résistance thermique totale :	40
3.3.6 Température de l'air en sortie de l'EAHE :	40
3.4 Optimisation hivernale d'EAHE par l'effet de serre localisé :	41
3.4.1 Problématique des performances hivernales à Ghardaïa :	41
3.4.2 Principe de l'amélioration proposée : table en bois-verre :	41
3.4.3 Mécanisme de transfert thermique vers le tube vertical :	42
3.5 Réduction des apports thermiques estivaux sur l'EAHE par barrières passives :	45
3.6 Analyse des performances thermiques hivernales :	47
Conclusion :	48
Conclusion Générale	49
Références bibliographiques	50

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : évolution du gradient de température au sein du globe.	5
Figure 1-2 : gradient de température d'une zone ou forage en Algérie (El Menia).	6
Figure 1-3 : Flux géothermique dans l'Algérie.	7
Figure 1-4 : échangeur horizontal	9
Figure 1-5 : Echangeur vertical	10
Figure 1-6 : Schéma simplifié du puits canadien	10
Figure 1-7 : Description d'un puits canadien en hiver.	12
Figure 1-8 : Description d'un puits canadien en été.....	12
Figure 1-9 : Composantes solaires.....	14
Figure 1-10 : Cartographie du potentiel solaire annuel pour les régions d'Afrique et du Moyen-Orient [Harsarapama et al., 2020]	15
Figure 1-11 : Carte d'irradiation horizontale globale.	16
Figure 2-1 : Localisation géographique de la wilaya de Ghardaïa.	19
Figure 2-2 : Localisation du site expérimental et emplacement de l'échangeur de chaleur air-sol (source : Google Earth).....	20
Figure 2-3 : Données climatique de la zone d'étude (à rectifié).....	21
Figure 2-4 : Variations mensuelles du GHI.....	23
Figure 2-5 : Fluctuation des températures du sol à Adrar.....	25
Figure 2-6 : Fluctuation des températures du sol à biskra.....	25
Figure 2-7 : Fluctuation des températures du sol à ghardaia.....	26
Figure 2-8 : variation des températures en fonction du temps dans trois localités : Adrar, Ghardaïa et Biskra.	27

Figure 2-9 : station radiométrique installé à UARER (Ghardaïa).	27
Figure 2-10 : Acquisition Agilent 34972A	28
Figure 2-11 : Testo 176T4.	29
Figure 2-12 : Anémomètre de type Pro'sKit MT-4615.	29
Figure 2-14 : Thermocouple type k.	30
Figure 2-15 : Schéma synoptique du dispositif expérimental d'acquisition thermique.	31
Figure 2-17 : aperçu de l'OriginePro.	33
Figure 3-1 : Vue ensemble du système EAHE.	36
Figure 3-2 : Vue du système d'échangeur air-sol (EAHE), en référence aux principaux instruments de mesure (anémomètre, sonde TESTO 176 T4, système d'acquisition Agilent 34972A) et aux dimensions caractéristiques.	37
Figure 3-3 : Evolution de température de sous-sol à Ghardaïa.	41
Figure 3-4 : Étapes pour créer une zone de capture solaire et un système d'isolation périmétrique.	42
Figure 3-5 : Évolution des températures de l'air ambiant, de la surface du sol et du sol sous table du 11/03/2026, ciel nuageux.	43
Figure 3-6 : Évolution des températures de l'air ambiant, de la surface du sol et du sol sous table du 15/03/2026, sous un ciel de nuages légers.	44
Figure 3-7 : Évolution horaire des températures du 15 Mai 2026.	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : propriétés thermiques des principaux types de sol.	8
Tableau 2-1 : Les températures mensuelles moyennes à Ghardaïa (2025).	22
Tableau 3-1 : récapitulatif des paramètres du système.	35
Tableau 3-2 : Corrélations du nombre de Nusselt issues de la littérature pour les écoulements laminaires et turbulents en convection forcée.	39
Tableau 3-3 : calcul des paramètres de transfert convectif (Re, Nu, h)	40
Tableau 3-4 : Résumé des plages de température mesurées à différents points du système pendant l'été et l'hiver.	47

NOMENCLATURES

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
Q	Quantité de chaleur qui pénètre dans le matériau de stockage	<i>J</i>
C_p	Capacité calorifique spécifique	<i>J/kg.K</i>
M	La masse	<i>kg</i>
T	Température	<i>°c / K</i>
ΔT	Différence de température	<i>K</i>
λ	Conductivité thermique	<i>W/m.K</i>
ΔH_r	L'enthalpie de la réaction	<i>J/mol</i>
L	Hauteur du cylindre	<i>m</i>
ρ	Masse volumique	<i>kg/m³</i>
T	Temps	<i>s / h</i>
Q_h	La puissance thermique	<i>KWh</i>
A	Diffusivité thermique	<i>m²/s</i>
R	Résistance	<i>Ω</i>
I	Courant	<i>A</i>
U	Tension	<i>V</i>
P	Puissance	<i>W</i>
E	Émissivité thermique des parois	<i>-</i>
V	Volume	<i>m³</i>
φ	Flux de chaleur	<i>W</i>
n_A	Le nombre de moles du produit A	<i>mol</i>
D	Diamètre	<i>m</i>

Résumé

Cette étude vise à évaluer un système hybride combinant la géothermie de surface et l'énergie solaire pour améliorer le chauffage passif et le refroidissement dans le climat semi-aride de la région de Ghardaïa. Les travaux sont basés sur un échangeur de chaleur souterrain à air (EAHE) qui exploite la stabilité thermique du sol pour modérer la température de l'air fourni aux bâtiments. Les caractéristiques climatiques du site, y compris les températures de l'air et du sol, le rayonnement solaire et la vitesse du vent, ont été analysées, et la performance thermique du système a été évaluée à l'aide de capteurs météorologiques précis et d'équipements d'acquisition de données. Le transfert de chaleur à l'intérieur du conduit a été examiné plus en détail au moyen de modèles mathématiques et de nombres sans dimension, tels que les nombres de Reynolds et de Nusselt. Pour améliorer les performances du système, une enceinte en verre à cadre en bois a été installée à l'entrée pendant l'hiver afin d'exploiter l'effet de serre et d'augmenter la température de l'air entrant. En été, le conduit vertical au-dessus du sol a été isolé et la surface du sol autour de l'entrée a été recouverte de matériaux isolants afin de réduire le gain de chaleur externe. Les résultats montrent que le système a maintenu une température de l'air relativement stable entre 22 °C et 27 °C malgré d'importantes variations climatiques externes, et que les améliorations proposées ont amélioré l'efficacité du chauffage en hiver et la performance de refroidissement en été, tout en réduisant la consommation d'énergie conventionnelle. L'étude confirme que le couplage de l'énergie solaire avec l'énergie géothermique de surface offre une solution efficace et durable pour atteindre le confort thermique dans les régions désertiques et réduire la demande énergétique des bâtiments.

Mots-clés : géothermie, solaire, chauffage passif, refroidissement, échangeur, efficacité, énergie conventionnelle

Abstract

This study aims to evaluate a hybrid system combining surface geothermal power and solar energy to improve passive heating and cooling in the semi-arid climate of the Ghardaïa region. The work is based on an underground air heat exchanger (EAHE) that exploits the thermal stability of the ground to moderate the temperature of the air supplied to the buildings. The climatic characteristics of the site, including air and ground temperatures, solar radiation, and wind speed, were analyzed, and the thermal performance of the system was evaluated using precise meteorological sensors and data acquisition equipment. Heat transfer within the conduit was examined in more detail using mathematical models and dimensionless numbers such as Reynolds and Nusselt numbers. To improve the system's performance, a wooden-framed glass enclosure was installed at the entrance during winter in order to harness the greenhouse effect and increase the temperature of the incoming air. In summer, the vertical conduit above the ground was insulated and the floor surface around the entrance was covered with insulating materials to reduce external heat gain. The results show that the system maintained a relatively stable air temperature between 22°C and 27°C despite significant external climatic variations, and that the proposed improvements improved heating efficiency in winter and cooling performance in summer. While reducing conventional energy consumption. The study confirms that the coupling of solar energy with surface geothermal energy offers an effective and sustainable solution to achieve thermal comfort in desert regions and reduce the energy demand of buildings.

Keywords: geothermal, solar, passive heating, cooling, exchanger, efficiency, conventional energy.

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم نظام هجين يجمع بين الطاقة الحرارية الأرضية السطحية والطاقة الشمسية لتعزيز التدفئة والتبريد السلبي في المناخ شبه - الجاف لمنطقة غرداية. يعتمد العمل على مبادل حراري للهواء - التربة تحت الأرض (EAHE) يستغل الاستقرار الحراري للأرض لتخفيف درجة حرارة الهواء المزود للمباني. تم تحليل الخصائص المناخية للموقع، بما في ذلك درجات حرارة الهواء والتربة والإشعاع الشمسي وسرعة الرياح، وتم تقييم الأداء الحراري للنظام باستخدام أجهزة استشعار الأرصاد الجوية الدقيقة ومعدات جمع البيانات. تم فحص انتقال الحرارة داخل القناة بشكل أكبر من خلال النماذج الرياضية والأرقام عديمة الأبعاد، مثل أرقام رينولدز ونوسلت. لتحسين أداء النظام، تم تركيب حاوية زجاجية ذات إطار خشبي-عند المدخل خلال فصل الشتاء لتسخير ظاهرة الاحتباس الحراري وزيادة درجة حرارة الهواء الوارد. في الصيف، تم عزل القناة الرأسية فوق-الأرضية وتم تغطية سطح الأرض حول المدخل بمواد عازلة لتقليل اكتساب الحرارة الخارجية. أظهرت النتائج أن النظام حافظ على درجة حرارة هواء مستقرة نسبياً بين 22 °C و 27 °C على الرغم من التغيرات المناخية الخارجية الكبيرة، وأن التحسينات المقترحة عززت كفاءة التدفئة في الشتاء وأداء التبريد في الصيف، مع تقليل استهلاك الطاقة التقليدية. وتؤكد الدراسة أن اقتران الطاقة الشمسية بالطاقة الحرارية الأرضية السطحية يوفر حلاً فعالاً ومستداماً لتحقيق الراحة الحرارية في المناطق الصحراوية وخفض الطلب على الطاقة في المباني.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الحرارية الأرضية، الطاقة الشمسية، التدفئة السلبية، التبريد، المبادل الحراري، الكفاءة، الطاقة التقليدية.

Introduction Générale

L'exploitation rationnelle des ressources énergétiques dans les régions arides, notamment dans le contexte désertique algérien, s'impose aujourd'hui comme un enjeu majeur pour réduire la consommation énergétique des bâtiments et atténuer les pics de charges thermiques. De ce point de vue, les échangeurs de chaleur air-sol (EAHE) représentent une solution passive prometteuse, permettant à l'inertie géothermique d'être utilisée comme réservoir naturel pour le préchauffage en hiver ou le refroidissement de l'air ventilé en été.

Avec son climat désertique chaud, la région de Ghardaïa offre des conditions particulièrement adaptées à l'étude de ce type de système, avec un fort rayonnement solaire, des températures estivales élevées et des sols calcaires nus aux propriétés thermiques favorables. L'Unité de Recherche en Énergies Renouvelables Appliquées (URAER-Ghardaïa) fournit un prototype EAHE équipé, complété par une station de mesure radiométrique et un système d'acquisition de données, permettant la caractérisation détaillée du transfert de chaleur air-sol dans des conditions réelles.

À partir de ce cadre expérimental, ce mémoire décrit d'abord le contexte environnemental et le système de mesure, puis modélise et analyse la performance thermique de l'échangeur de chaleur, en intégrant deux stratégies d'optimisation saisonnière, effet de serre localisé à l'entrée de l'échangeur de chaleur en hiver et isolation passive du tube vertical et de la surface du sol en été. L'objectif global est de démontrer l'importance de ces améliorations pour améliorer l'efficacité de l'évaluation d'impact environnemental en milieu désertique et de proposer une base méthodologique adaptée à son déploiement dans les bâtiments basse énergie.

Chapitre I : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires

Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires

Introduction :

L'exploitation des énergies renouvelables, en particulier le couplage entre rayonnement solaire et géothermie superficielle, constitue aujourd'hui une réponse essentielle aux enjeux de la transition énergétique. Dans un contexte mondial marqué par la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, la conception des bâtiments à haute performance environnementale repose sur l'utilisation de systèmes passifs capables d'améliorer les ressources naturelles locales. Cette approche est d'une importance stratégique dans les régions arides et semi-arides, comme le sud de l'Algérie, où l'abondance des champs solaires et la stabilité thermique du sous-sol offrent des opportunités exceptionnelles pour le chauffage et la climatisation.

Ce premier chapitre, intitulé «Etude expérimentale d'un système géothermique -solaire à faible profondeur pour le chauffage passif et le refroidissement en climat semi-aride », vise à établir le cadre conceptuel nécessaire à la compréhension des phénomènes physiques impliqués. Nous commencerons par l'étude de la géothermie superficielle, en explorant les propriétés thermophysiques du sous-sol, véritable réservoir thermique naturel, ainsi que les mécanismes de transfert de chaleur (gradient et flux géothermique). Une attention particulière sera portée aux différentes technologies des échangeurs, en particulier le puits canadien, dont le principe repose sur l'inertie thermique du sol.

Dans une seconde partie, nous analyserons les caractéristiques du champ solaire. L'objectif sera de définir les composantes du rayonnement (direct, diffus et global) et d'évaluer le potentiel énergétique exceptionnel de l'Algérie. Cette base théorique est essentielle pour aborder, dans les chapitres suivants, le dimensionnement et l'analyse expérimentale des systèmes de captage de chaleur.

1.1 Principes de la géothermie de faible profondeur :

L'énergie géothermique est une source d'énergie renouvelable qui provient de la chaleur naturelle de la Terre. Cette chaleur est principalement produite dans le noyau terrestre, où les températures pourraient dépasser 5 000 °C [1]. Cela est dû à la désintégration radioactive d'éléments tels que l'uranium, le thorium et le potassium.

La chaleur de la Terre se propage lentement vers la surface, cela crée une zone peu profonde, où la température reste stable toute l'année. Cette caractéristique permet d'utiliser l'énergie géothermique de surface de diverses manières. On peut produire de l'électricité, chauffer des bâtiments ou même les refroidir. Pour le refroidissement, on utilise des systèmes

Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires

qui échangent l'air avec le sol ou des pompes à chaleur réversibles. Ces méthodes offrent une climatisation naturelle et économique. Un des grands avantages de l'énergie géothermique est qu'elle est fiable. Elle produit de l'énergie de manière stable et continue, contrairement à l'énergie solaire ou éolienne.

Il existe différents types de systèmes géothermiques. On distingue généralement les systèmes profonds des systèmes peu profonds. Les systèmes profonds nécessitent de forer des puits très profonds. Cela permet d'atteindre de l'eau chaude ou de la vapeur dans des réservoirs souterrains.

Dans certaines régions, les conditions géothermiques ne sont pas favorables. C'est là que les systèmes géothermiques améliorés entrent en jeu. Cette technologie vise à améliorer la circulation de la chaleur dans les roches souterraines. Cela permet d'exploiter la chaleur même dans des zones où elle ne l'était pas naturellement, la géothermique offre ainsi une alternative renouvelable et fiable pour répondre à nos besoins énergétiques [2].

1.2 Le sous-sol comme milieu thermique : gradient et flux de chaleur :

Le sous-sol est un accumulateur thermique naturel qui revêt une grande importance dans les applications liées aux énergies renouvelables, notamment dans les systèmes de chauffage et de refroidissement géothermiques. Ce rôle repose sur un ensemble de propriétés physiques propres au sol, dont les plus importantes sont le gradient thermique du sol, l'inertie thermique et la capacité thermique [3].

1.2.1 Le gradient géothermique :

Chaque site a son propre gradient de température exprimé en °C/km. Les travaux de mine ont montré que la température augmente progressivement avec la profondeur [4].

Le gradient thermique varie d'un site à un autre, il est généralement compris entre 10 à 40 °C/km en moyenne dans les zones stables. Cependant, il peut être nettement plus élevé dans les zones anormales ou instables (limites de plaques lithosphériques) [4].

Le graphique ci-dessous montre que l'évolution du gradient de température vers le centre de la Terre dépend des structures géologiques que l'on traverse.

Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires

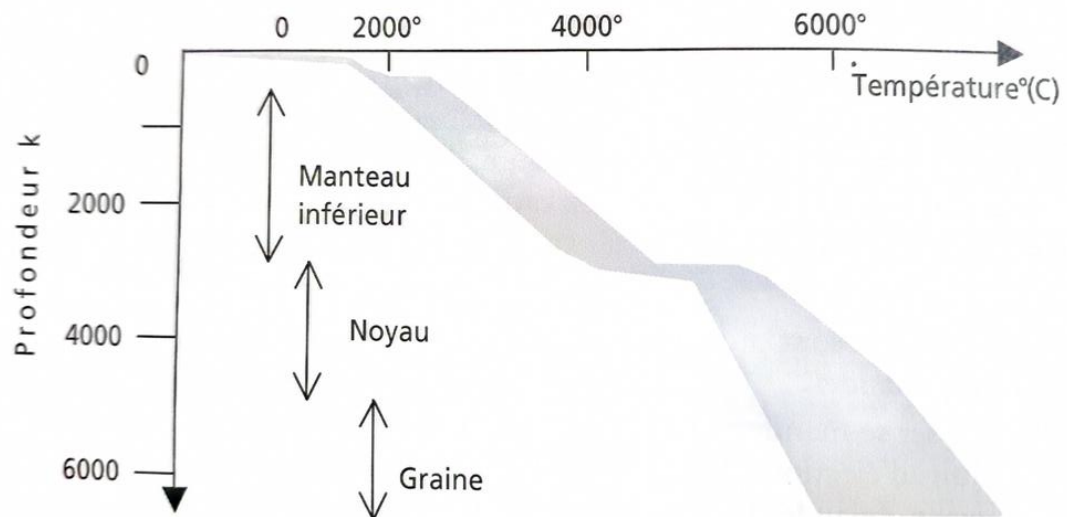


Figure 1-1 : évolution du gradient de température au sein du globe [1].

Ce gradient joue un rôle essentiel dans le transfert de chaleur. Sa compréhension est fondamentale dans plusieurs domaines, tels que la météorologie, la géophysique et la science des matériaux.

- Il s'exprime par la relation [1] :

$$\text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{q_G}{\lambda} \quad (1-1)$$

- et la température avec la profondeur est donnée par [1] :

$$T(z) = T_s + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot z \quad (1-2)$$

Où :

$T(z)$: température (°C) à une profondeur (km) données.

T_s : température moyenne du sol en surface (°C).

$\text{grad}T$: gradient de température en °C/km.

z : profondeur en km.

Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires

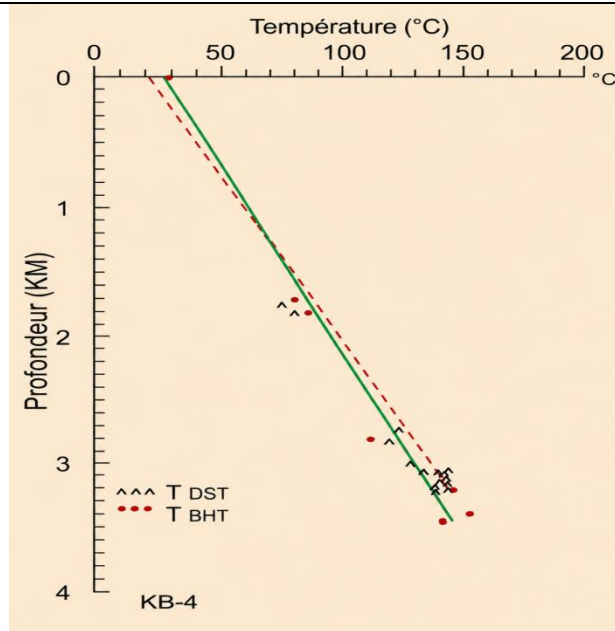


Figure 1-2 : gradient de température d'une zone ou forage en Algérie (El Menia) [5].

1.2.2 Le Flux de chaleur :

L'existence du gradient géothermique témoigne de la dissipation en surface d'une certaine quantité de chaleur issue des couches profondes de la Terre. La quantité de chaleur dissipée par unité de surface et de temps définit le flux géothermique [1].

Dans un milieu solide où la chaleur se propage par conduction, le flux géothermique est déterminé par l'expression suivante :

$$q = k * gradT \quad (1-3)$$

Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires

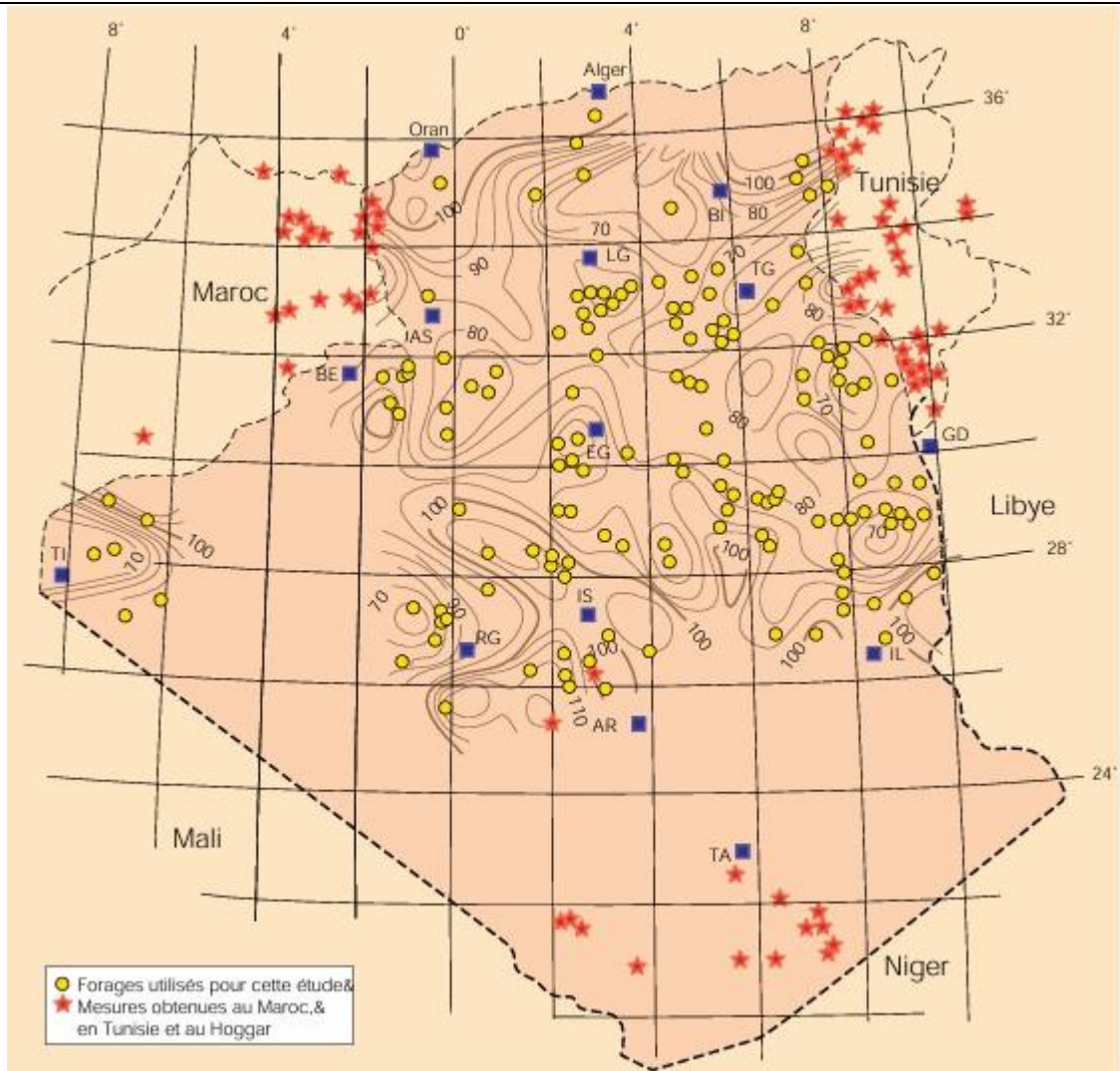


Figure 1-3 : Flux géothermique dans l'Algérie [5].

Le flux géothermique s'exprime en W/m^2 , et sa valeur moyenne à l'échelle mondiale est de l'ordre de $0.06 W/m^2$. Ce flux de chaleur est plus de 1000 fois inférieur à celui apporté par le soleil sur la Terre ; et est donc difficilement exploitable directement [1].

1.2.3 Caractéristiques thermiques du sous-sol :

Exploitation d'une ressource géothermale, ou « gisement », requiert impérativement trois éléments : une source de chaleur, un mode de prélèvement de la chaleur au niveau de la source et un système assurant le transfert de la chaleur depuis la source jusqu'à l'utilisateur.

La source de chaleur est caractérisée par son niveau de température du réservoir et par la nature géologique du milieu de stockage. La température est directement dépendante du gradient géothermique local, lequel varie selon le contexte tectonique et la profondeur du

Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires

forage. Ce paramètre thermique constitue le critère déterminant pour la sélection des applications énergétiques appropriées : la production d'électricité, chauffage direct ou assisté par pompes à chaleur, tandis que la géothermie très basse températures ($< 30^{\circ}\text{C}$) à faible profondeur permet le refroidissement passif des bâtiments via des échangeurs air-sol [6].

Le mode de prélèvement, pour les milieux aquifères s'effectue par extraction du sous-sol du fluide géothermal contenu dans la roche encaissante, le réservoir doit pouvoir laisser circuler le fluide chaud vers la surface. Pour les milieux non aquifères, l'extraction thermique repose sur un système d'échange indirect via un fluide caloporteur exogène (sonde géothermiques, roches profondes fissurées) [6].

Le transfert de l'énergie géothermique vers la surface s'effectue principalement par l'intermédiaire de forages d'extraction. Pour les réservoirs aquifères, le fluide géothermal naturel (eau ou vapeur) contenu dans les formations poreuses et perméables sert directement de fluide caloporteur transport la chaleur du sous-sol vers l'installation de surface. Pour les roches profondes fracturées, de l'eau de surface est injectée dans un puits d'injection et récupérée après échange par des puits producteurs [6].

En ce qui concerne les calculs tenant compte des phénomènes cycliques, tels que le cycle annuel, l'utilisation de la valeur moyenne de la diffusivité thermique, estimée à environ $0,0023 \text{ m}^2/\text{h}$, constitue un choix approprié pour estimer les variations thermiques avec une précision acceptable [6].

Tableau 1-1 : propriétés thermiques des principaux types de sol.

Lieu	Nature de sol	Diffusivité thermique (m^2/s)	Capacité calorifique ($\text{J.kg}/^{\circ}\text{C}$)	Conductivité thermique ($\text{W/m.}^{\circ}\text{C}$)	Densité (kg/m^3)
Ghardaïa [7]	Calcaire	$5.45 \cdot 10^{-7}$	1000	2.3	2740
Biskra [8]	Calcaire	$6.33 \cdot 10^{-7}$	1380	2.01	2300
Adrar [9]	Argile	$9.69 \cdot 10^{-7}$	880	/	1500
	Limon (argilo-sableux)	$6.22 \cdot 10^{-7}$	1340	/	1800
	Sable	$3.76 \cdot 10^{-7}$	1390	/	1780

Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires

1.3 Types d'échangeurs géothermiques :

Les systèmes de captation de l'énergie géothermique utilisent des échangeurs enterrés dans le sol, aussi appelés capteurs. Selon leurs dispositions, on distingue deux types : horizontaux, verticaux.

1.3.1 Échangeur géothermique horizontal :

Les échangeurs de chaleur horizontaux sont utilisés dans les systèmes géothermiques, bien qu'il n'existe actuellement aucun cadre réglementaire ni aucune norme harmonisée régissant leurs méthodes de conception et de mise en œuvre [10]. Leur utilisation repose essentiellement sur un ensemble de recommandations techniques et de directives pratiques disponibles dans ce domaine.



Figure 1-4 : échangeur horizontal [11].

1.3.2 Échangeur géothermique vertical :

Les échangeurs de chaleur verticaux sont installés dans des forages scellés de ciment de manière à assurer un transfert thermique efficace avec le sol. Ces forages peuvent atteindre des profondeurs de plusieurs centaines de mètres.

Un fluide caloporteur (eau mélangée à du glycol) circule en circuit fermé pour transférer la chaleur. Cette technologie nécessite une surface d'échange plus réduite que les échangeurs de chaleur horizontaux, ce qui la rend particulièrement adaptée aux espaces restreints.

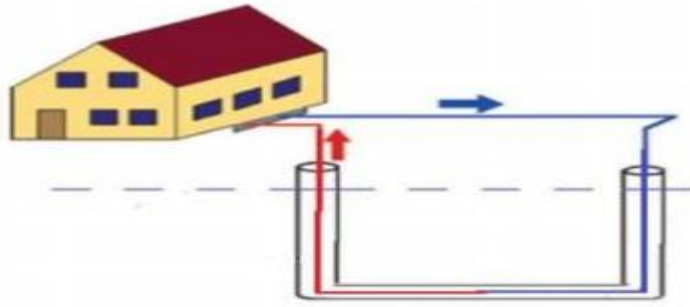


Figure 1-5 : Echangeur vertical [11].

1.4 Echangeur de chaleur air-sol (puits canadien) :

Un puits canadien est un dispositif constitué d'un ensemble de tubes (éventuellement un seul tube) enterrés horizontalement sous un bâtiment et intégrés au système de ventilation. L'air extérieur, soumis à de fortes variations de température selon les conditions atmosphériques. D'autre part, le sol à plusieurs mètres de profondeur, reste thermiquement stable du fait de son inertie. Les échangeurs air-sol exploitent cette inertie : ils amènent l'air extérieur en contact thermique avec le sol par l'intermédiaire de conduits enterrés, à proximité ou directement sous le bâtiment. Des ventilateurs aspirent l'air à travers ces conduits, puis le soufflent à l'intérieur [12].

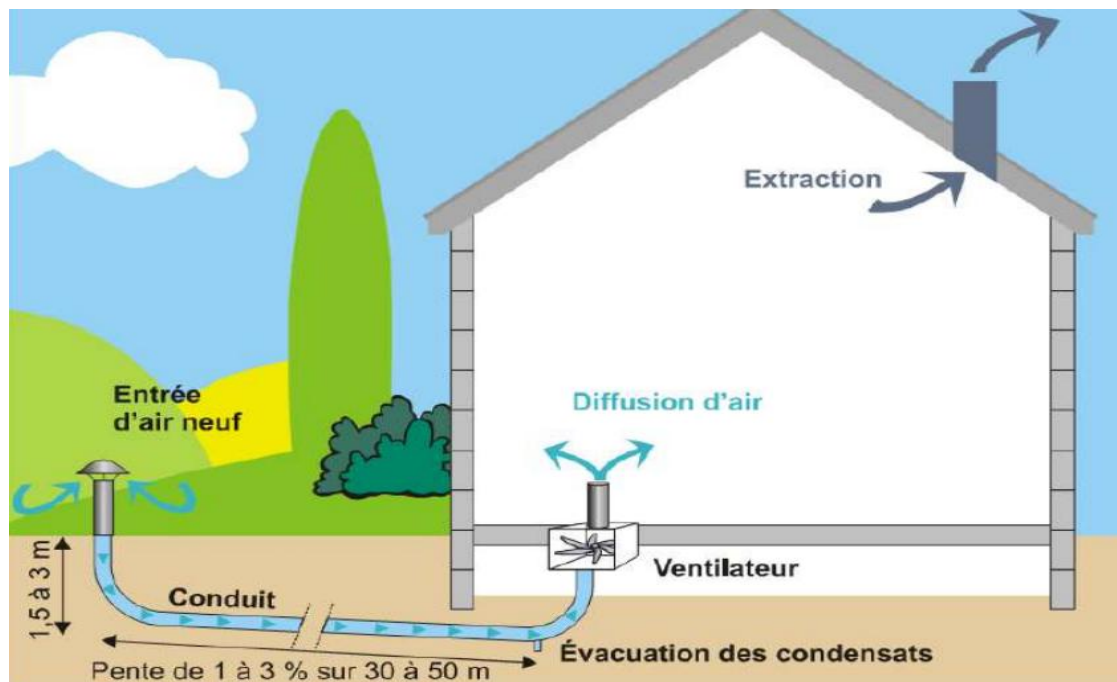


Figure 1-6 : Schéma simplifié du puits canadien [13].

Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires

1.4.1 Applications des échangeurs thermiques air-sol :

Grâce à la stabilité thermique du sous-sol, ce système permet de capter la chaleur libre pendant l'hiver et de diffuser une fraîcheur naturelle pendant l'été. Ses principales applications sont :

Architecture bioclimatique : C'est l'allié idéal des maisons passives. Il permet de ventiler avec de l'air déjà tempéré, ce qui soulage énormément le système de chauffage ou de clim.

Alternative à la climatisation : Dans les zones arides, il agit comme un climatiseur naturel performant sans consommer d'électricité massive.

Économies d'énergie : En stabilisant la température de l'air entrant, on réduit drastiquement les factures énergétiques tout au long de l'année.

Agriculture et élevage : Il aide à maintenir un climat doux et constant sous les serres ou dans les hangars d'élevage, favorisant ainsi une meilleure production.

Santé et confort intérieur : Le système permet de renouveler l'air en permanence sans subir de courants d'air glacés ou de bouffées de chaleur.

Aujourd'hui, ces technologies font l'objet de nombreuses recherches, notamment pour optimiser leur dimensionnement dans des contextes extrêmes comme le Sahara algérien, où le confort thermique durable est un enjeu vital.

1.4.2 Fonctionnement en hiver :

En hiver, à une profondeur de deux mètres, la température du sol est comprise entre 16 et 24 °C. Ainsi, de l'air extérieur frais est introduit dans le bâtiment à plus de 17 °C, ce qui permet des économies de chauffage dans toutes les régions.

Par ailleurs, ce système supprime la nécessité d'un dispositif anti-condensation, générant ainsi des économies supplémentaires lors de l'utilisation d'un échangeur thermique [14].

Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires

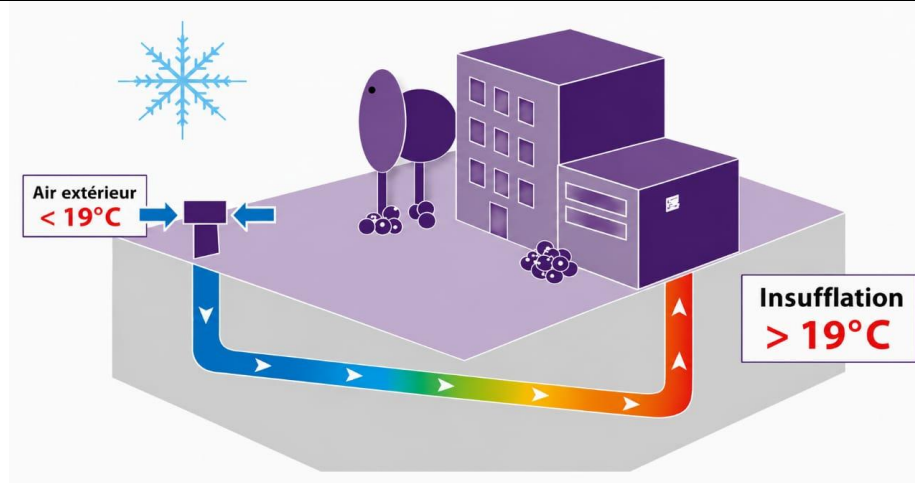


Figure 1-7 : Description d'un puits canadien en hiver [14].

1.4.3 Fonctionnement en été :

À une profondeur de deux mètres, la température du sol oscille entre 21 et 28 °C. Lorsque la température extérieure est supérieure à 30 °C, de l'air frais est introduit dans le bâtiment à une température inférieure à 30 °C, ce qui permet de refroidir l'air ambiant sans utiliser un système de climatisation conventionnel.

Les avantages obtenus garantissent des conditions de vies acceptables, une maison saine et agréable [13].

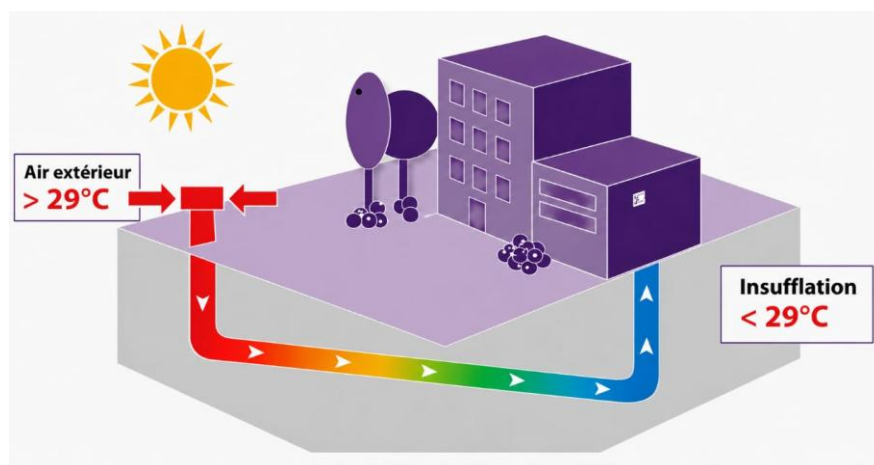


Figure 1-8 : Description d'un puits canadien en été [14].

Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires

1.5 Le gisement solaire : caractéristiques et potentiel énergétique :

L'énergie solaire est la plus dominante parmi les énergies renouvelables et constitue l'une des sources d'énergie les plus faciles à exploiter. Elle offre à l'utilisateur la possibilité de couvrir une partie de ses besoins énergétiques de manière directe et sans intermédiaires.

Le gisement solaire se caractérise principalement par la quantité et la qualité du rayonnement solaire disponible en un lieu donné. L'étude de ce potentiel nécessite une bonne connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant, ainsi que de sa trajectoire journalière et saisonnière. Les heures de lever et de coucher du soleil permettent d'évaluer des paramètres importants tels que la durée d'ensoleillement et l'irradiation solaire globale.

Les caractéristiques du gisement solaire reposent sur plusieurs grandeurs fondamentales, notamment :

- Les grandeurs astronomiques
- Les grandeurs géographiques
- Le rayonnement solaire hors atmosphère
- Les composantes du rayonnement solaire (direct, diffus et global)
- Les méthodes et appareils de mesure du rayonnement solaire

Par ailleurs, le potentiel énergétique du gisement solaire en Algérie est très important, ce qui justifie le développement de programmes nationaux visant à exploiter cette ressource abondante dans les domaines du photovoltaïque et du thermique solaire.

1.5.1 Le rayonnement solaire (direct, diffus et global) :

Le rayonnement solaire est défini comme un flux continu d'énergie électromagnétique émis par le Soleil dans toutes les directions de l'espace, sous forme de photons qui constituent les particules fondamentales de la lumière. Ces rayonnements se propagent à la vitesse de la lumière C , et mettent en moyenne environ 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre l'atmosphère terrestre (Bessemoulin et Oliviéri, 2000). La Terre reçoit, à la limite supérieure de son atmosphère, un flux de rayonnement estimé à environ $1\,367\text{ W/m}^2$, valeur connue sous le nom de constante solaire, qui est pratiquement indépendante de la situation géographique. Ce flux subit toutefois des variations dues à l'absorption d'une partie de celui-ci par les composants de l'atmosphère. La quantité de rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre dépend de l'angle d'incidence des rayons, la valeur maximale étant atteinte lorsque les rayons sont perpendiculaires à la surface de la Terre. Elle est également influencée par

Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires

l'épaisseur de la couche atmosphérique que traversent les rayons, qui est liée à la composition de l'atmosphère (telle que l'ozone, la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone), ainsi que par l'altitude au-dessus du niveau de la mer et la situation géographique [15].

Le rayonnement émis par le Soleil est une forme de rayonnement électromagnétique qui subit d'importantes modifications lors de son passage à travers l'atmosphère terrestre (figure 9). En raison de cet effet, la surface de la Terre ne reçoit que les composantes principales les plus actives du rayonnement total, à savoir le rayonnement direct et le rayonnement diffus [15].

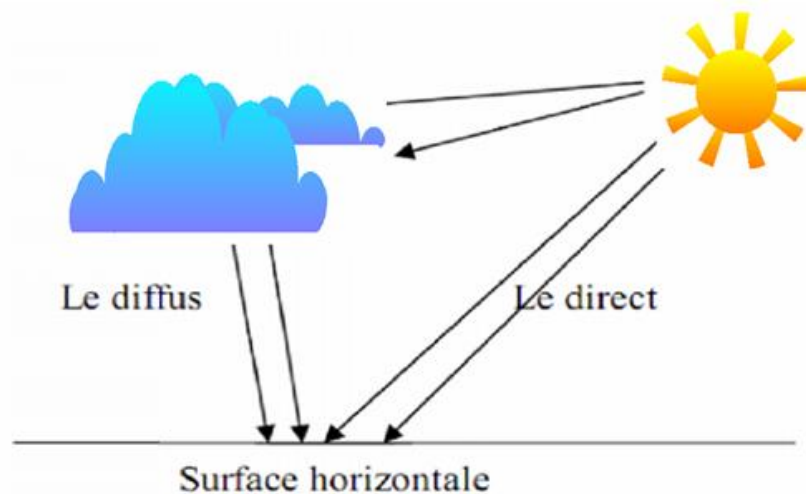


Figure 1-9 : Composantes solaires [15].

1.5.1.1 Rayonnement solaire direct :

Le rayonnement solaire direct est défini comme le flux de rayonnement qui atteint la surface de la Terre directement depuis le Soleil, sous forme de rayons parallèles et d'intensité uniforme, et il est mesuré en W/m^2 . Ce rayonnement est constitué de photons qui n'ont subi aucune interaction avec les composants de l'atmosphère, conservant ainsi leur direction d'origine et l'énergie de chaque photon [15].

1.5.1.2 Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus résulte de l'interaction d'une partie des photons solaires avec l'atmosphère : certains sont absorbés, tandis que d'autres changent de direction sous l'effet de la diffusion. Ainsi, un faisceau parallèle se transforme en un réseau de rayons diffusés dans toutes les directions. L'intensité du rayonnement diffus provenant de toutes les directions l'un des éléments les plus difficiles à mesurer et à calculer [15].

1.5.1.3 Rayonnement global :

Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires

Le rayonnement total est défini comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. Ses données peuvent être classées en deux catégories principales :

- Rayonnement instantané : il représente la valeur du rayonnement à un moment précis de la journée.
- Rayonnement cumulé : il représente la somme du rayonnement total accumulé au cours de la journée [15].

1.5.2 Le Gisement solaire Algérien :

Le gisement solaire regroupe l'ensemble des données caractérisant les variations du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement optimal, parfaitement adapté aux besoins réels. Grâce à sa position géographique stratégique, l'Algérie dispose de l'un des potentiels solaires les plus élevés de la région Afrique du nord et Moyen-Orient (Figure (1-10)) [16].

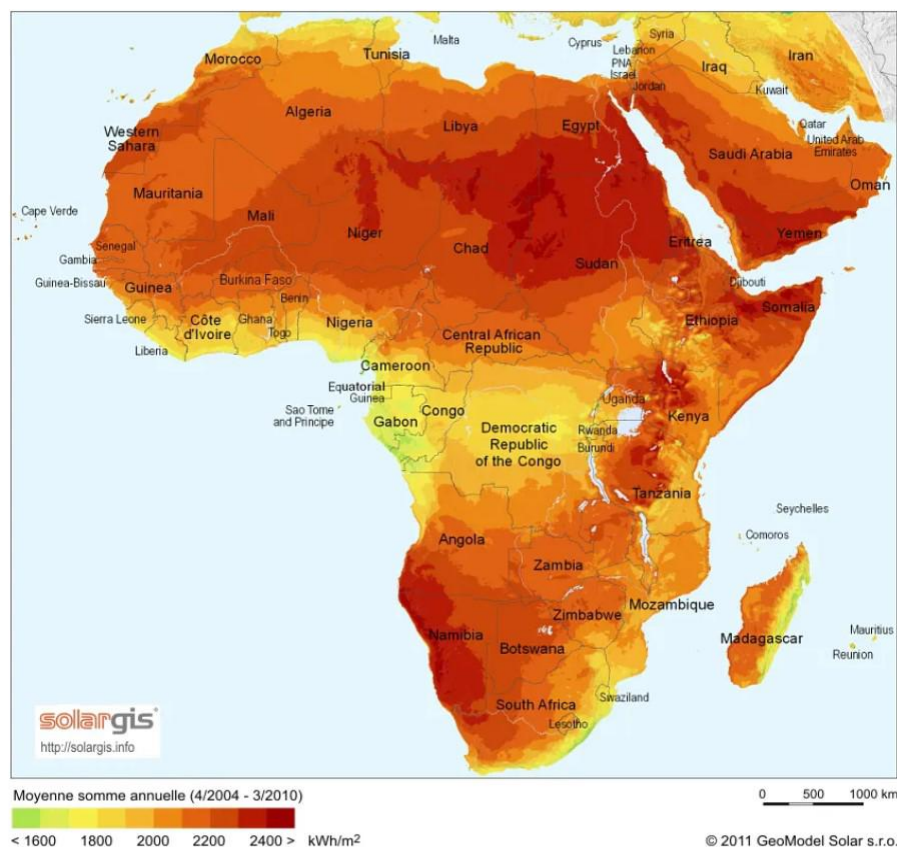
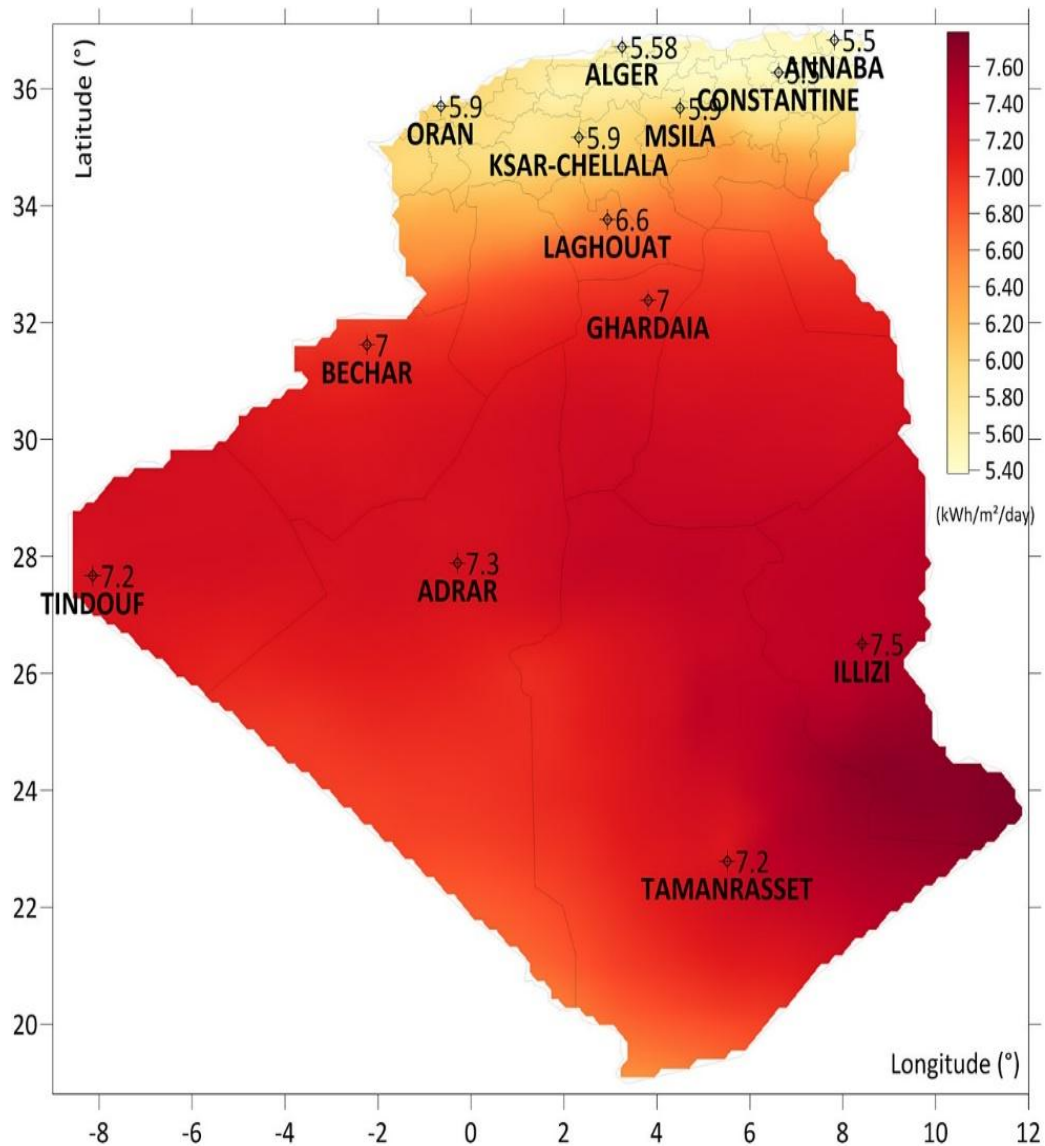


Figure 1-10 : Cartographie du potentiel solaire annuel pour les régions d'Afrique et du Moyen-Orient [16].

Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires

L'Algérie bénéficie d'un gisement solaire exceptionnel, figurant parmi les plus élevés au monde. Sur la quasi-totalité du pays, la durée d'insolation annuelle dépasse les 2 000 heures et atteint les 3900 heures dans les régions des Hauts Plateaux et Sahara. Sur une surface de 1 m², l'apport énergétique quotidien avoisine les 5,1 kWh (~1860 kWh par an et par m²) au Nord et 6,6 kWh (~2410 kWh par an et par m²) dans le grand Sud. Le potentiel solaire national est synthétisé dans la figure (1-11) [16].



Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Géothermiques et Solaires

Conclusion :

Ce chapitre de synthèse théorique a permis de mettre en évidence les principes fondamentaux régissant l'exploitation combinée des ressources solaires et géothermiques. L'analyse du sous-sol a révélé que, malgré un flux géothermique modeste à l'échelle mondiale, l'inertie thermique de la terre à faible profondeur constitue une source stable et inépuisable. La présentation des différentes configurations d'échangeurs, et plus particulièrement le puits canadien, a démontré l'intérêt de ces systèmes pour assurer un confort thermique passif, réduisant ainsi drastiquement les consommations énergétiques liées à la climatisation conventionnelle.

Dans le même temps, l'étude du champ solaire a confirmé que l'Algérie, de par sa position géographique, dispose d'un avantage majeur avec une irradiation annuelle supérieure à 2400 kWh/m² dans les zones sahariennes. Cette énergie, bien que fluctuante au cours de la journée, est idéalement complétée par la stabilité de l'énergie géothermique de surface.

En conclusion, le contrôle de paramètres tels que la diffusivité thermique du sol, l'angle d'incidence solaire et les mécanismes de transfert par convection et conduction constitue la base essentielle de toute approche d'optimisation énergétique.

Chapitre 2 Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

Introduction :

Ce chapitre vise à présenter le contexte climatique de la zone étudiée ainsi qu'une description détaillée du système hybride sol-atmosphère appliqué à l'unité de recherche appliquée sur les énergies renouvelables de Ghardaïa (URAER). Après avoir décrit la situation géographique et topographique du site, l'approche méthodologique adoptée est présentée, incluant les dispositifs de mesure, la chaîne d'acquisition des données, les outils de traitement et de visualisation. Une analyse des paramètres climatiques (température de l'air et du sol, rayonnement solaire global, vitesse du vent) est ensuite réalisée sur l'ensemble de l'année, afin de déterminer les conditions thermiques auxquelles le système est exposé. Enfin, la configuration expérimentale d'un échangeur de chaleur air-sol (EAHE) est décrite, à la fois en termes de composants physiques et d'options techniques visant à améliorer ses performances selon la saison.

2.1 Situation géographique de la région de Ghardaïa :

La wilaya de Ghardaïa est située au centre de la partie nord du Sahara algérien, à environ 600 kilomètres au sud d'Alger (figure 2-1). Son emplacement géographique détermine les régions administratives suivantes :

- au Nord par la wilayat de Laghouat
- au Nord Est par la wilaya de Djelfa
- à l'Est par la wilaya d'Ouargla
- au Sud par la wilayat d'El Meniaa
- à l'Ouest par la wilaya d'El-Bayadh

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

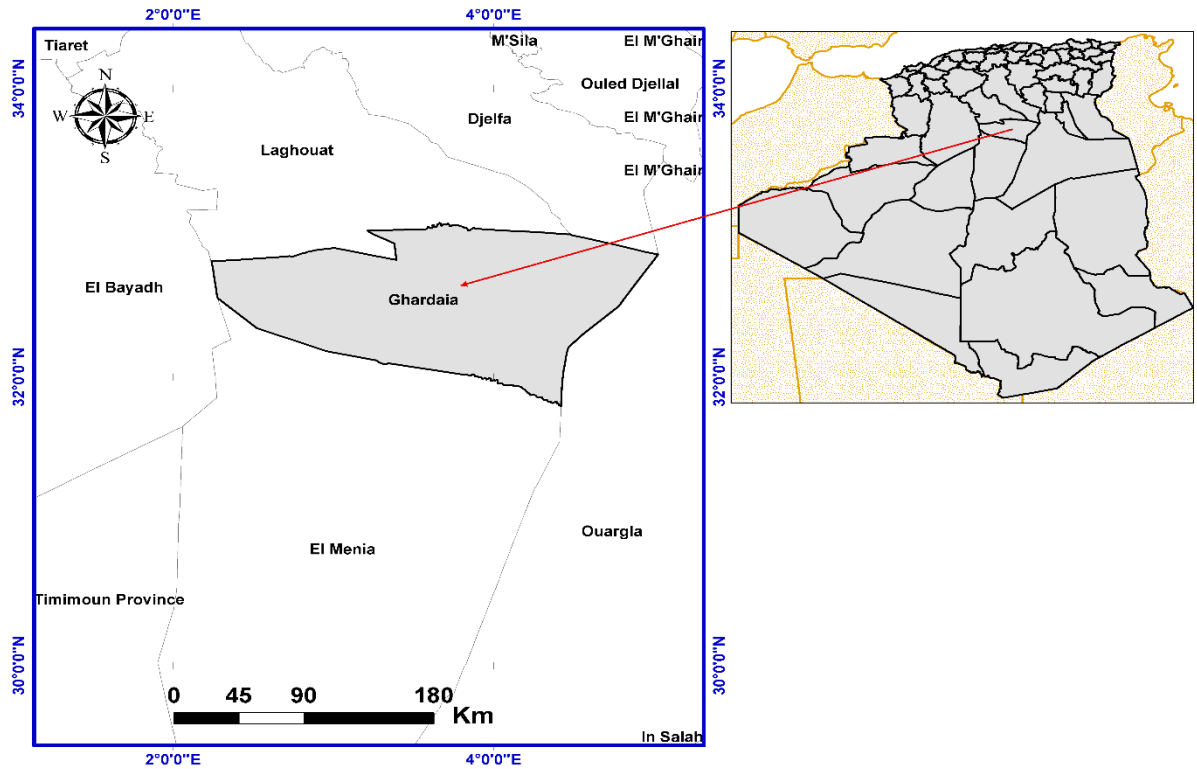


Figure 2-1: Localisation géographique de la wilaya de Ghardaïa.

2.2 Cadre de l'étude expérimentale :

Le site expérimental retenu est l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables (URAER) de Ghardaïa, en raison des conditions particulièrement favorables qu'elle offre pour la réalisation de cette étude. Cette infrastructure dispose notamment d'un prototype opérationnel d'échangeur de chaleur air-sol (EAHE), d'une station radiométrique pour la mesure du rayonnement solaire global, direct et diffus, ainsi que d'un ensemble complet d'équipements dédiés à l'acquisition et à l'enregistrement des données. Sur le plan géologique et topographique, le site est caractérisé par un sol rocheux nu, de nature calcaire, à surface plane et horizontale, bénéficiant d'une exposition solaire optimale tout au long de la journée. L'exploitation du potentiel géothermique de surface nécessite une analyse approfondie des variations de température du sol, basée sur la détermination rigoureuse des températures à différentes profondeurs et sur l'ensemble du cycle annuel. Dans cette perspective, la méthodologie adoptée s'appuie sur des données expérimentales collectées directement sur le terrain, afin de garantir la fiabilité et la représentativité des résultats obtenus pour ce contexte saharien spécifique. De plus, afin d'optimiser le fonctionnement du système selon la saison, une boîte en bois et en verre est proposée en hiver à l'entrée de l'échangeur EAHE, dans le but

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

de réchauffer la couche superficielle du sol jusqu'à une profondeur de 0,43 m et, par conséquent, chauffer le tube en contact avec ce milieu. En été, il est proposé d'isoler le tube vertical (au-dessus de surface sol) à l'aide de panneaux sandwich et de recouvrir la surface du sol avec des carreaux de plâtre, afin de limiter l'apport de chaleur externe et d'améliorer les performances globales de l'EAHE.

La localisation géographique exacte du site est définie par les coordonnées 32,387 ° Nord de latitude et 3,779 ° Est de longitude (Fig. 2-2). Situé à une altitude de 465 mètres au-dessus du niveau de la mer, ce site présente une caractéristique topographique essentielle pour l'interprétation des données climatique et géothermiques.



Figure 2-2: Localisation du site expérimental et emplacement de l'échangeur de chaleur air-sol (source : Google Earth).

2.3 Caractéristiques climatiques de la région d'étude :

Le climat de la wilaya de Ghardaïa est un climat désertique chaud, caractérisé par une sécheresse sévère et de fortes capacités thermiques, saisonnières et quotidiennes. Il se caractérise par de longs étés très chauds s'étendant de mai à septembre, en plus d'hivers relativement doux de décembre à mars, séparés par une période modérée. Les précipitations

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

sont faibles et irrégulières, principalement en automne et en hiver. En général, la chaleur, la sécheresse et les forts changements de température dominent ce climat tout au long de l'année et aujourd'hui.

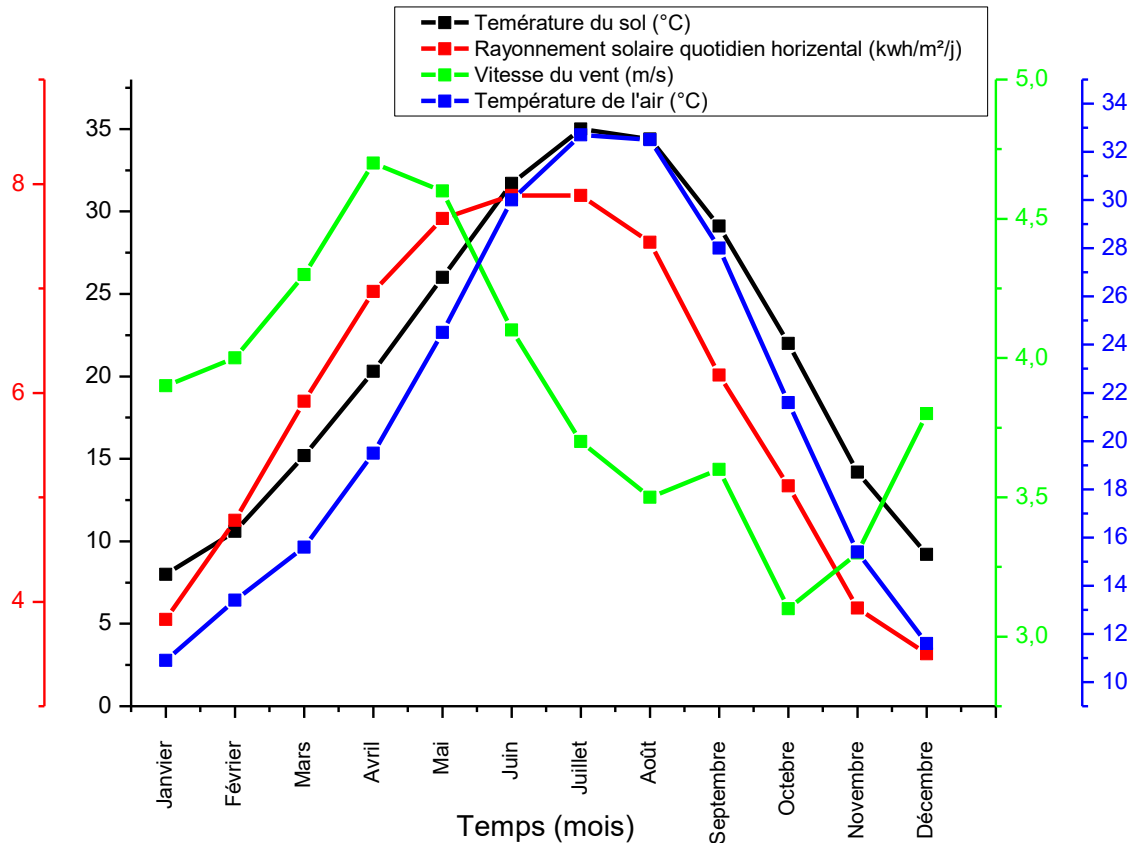


Figure 2-3 : Données climatique de la zone d'étude (à rectifié)

Le graphique présente l'évolution des variables climatiques fondamentales au cours des mois de l'année dans la wilaya de Ghardaïa, à savoir : la température du sol, la température de l'air, le rayonnement solaire horizontal quotidien et la vitesse du vent.

Températures de l'air et du sol : suivent un comportement saisonnier similaire, enregistrant leurs valeurs minimales pendant l'hiver (janvier-février), puis augmentent progressivement à partir du printemps pour atteindre leur pic pendant l'été, notamment en juillet et en août, avant de redescendre à l'arrivée de l'automne. Il apparaît également que la température du sol est très proche de celle de l'air, avec un léger décalage, ce qui reflète la capacité de stockage thermique du sol.

Rayonnement solaire : il augmente progressivement de l'hiver vers l'été, atteignant son maximum entre juin et juillet, puis commence à diminuer à l'automne. Ce comportement est lié

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

à l'angle d'incidence des rayons solaires et à la durée du jour, ce qui indique une forte disponibilité d'énergie solaire dans la région pendant la majeure partie de l'année.

Vitesse du vent : elle présente une variation relativement différente, enregistrant des valeurs relativement élevées au printemps (notamment en avril et mai), puis diminuant pendant l'été, pour remonter légèrement en fin d'année. Cela reflète les influences locales des systèmes météorologiques sahariens.

Le tableau 2-1 présente l'évolution des températures mensuelles moyennes de l'air à Ghardaïa au cours de l'année 2025, mettant en évidence une variation saisonnière marquée. Les valeurs de température minimale, maximale et moyenne fournissent une base pertinente pour l'analyse des conditions climatiques locales et leur influence sur les performances des systèmes thermiques étudiés.

Tableau 2-1: Les températures mensuelles moyennes à Ghardaïa (2025).

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
T° min	7.3	8.1	12.2	15.3	20.1	25.3	27,9	27.5	23.4	18.5	12.0	7.4
T° Max	18.0	19.1	24.2	28.4	32.5	38.3	41.3	40.1	35,5	29.7	22.5	16.7
T° moy	12.6	13.6	18.2	21.8	26.3	31.9	34.6	33.8	29.5	24.1	17.5	12,0

T° Min : La température mensuelle moyenne minimale.

T° Max : La température mensuelle moyenne maximale.

T° Moy : La température mensuelle moyenne.

La température moyenne annuelle est de 22,9°C, avec 34,6°C en juillet pour le mois le plus chaud et 12,6°C en janvier pour le mois le plus froid.

Les données climatiques montrent que le climat de la wilaya de Ghardaïa est soumis à un fort rayonnement, qui se traduit par une hausse simultanée des températures de l'air et du sol pendant l'été, contre une baisse en hiver, reflétant ainsi un comportement thermique saisonnier régulier. On observe également que le rayonnement solaire constitue le principal facteur déterminant de ces variations, tandis que la vitesse du vent reste un facteur secondaire dont l'influence est relativement limitée. Par conséquent, ces caractéristiques climatiques confirment l'adéquation de la région aux applications des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, avec la possibilité d'exploiter le sol comme réservoir thermique dans les systèmes géothermiques.

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

2.3.1 Variations mensuelles du rayonnement solaire à Adrar, Biskra et Ghardaïa :

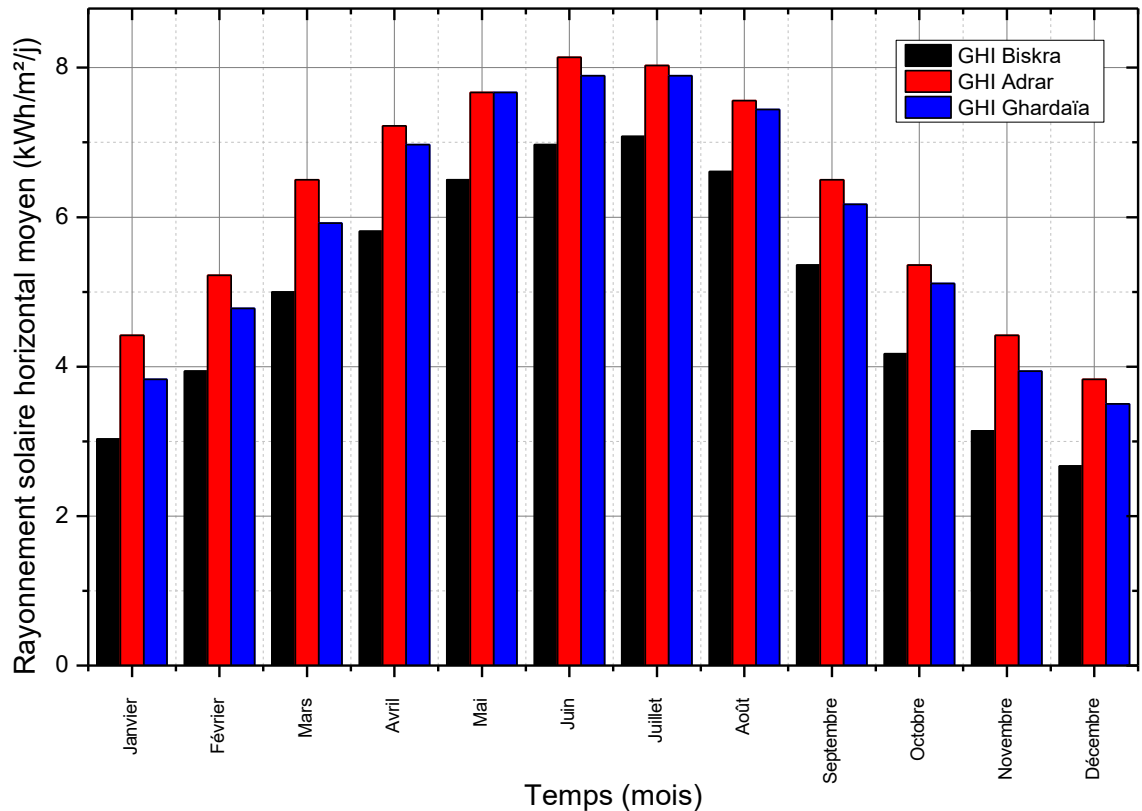


Figure 2-4 : Variations mensuelles du GHI.

Les variations du rayonnement solaire horizontal total (GHI) au cours des mois de l'année pour les villes de Biskra, Adrar et Ghardaïa, où l'on observe une fluctuation saisonnière marquée liée au changement des saisons et à l'angle d'incidence des rayons solaires.

Les valeurs du rayonnement solaire atteignent leur niveau le plus bas pendant l'hiver, en particulier en janvier et en décembre, en raison de la diminution de la durée d'ensoleillement et de l'augmentation de l'inclinaison des rayons solaires. Les valeurs commencent ensuite à augmenter progressivement à partir du printemps, pour atteindre leur pic pendant l'été, en particulier en juin et juillet, où elles dépassent environ 8 kWh/m²/j dans certaines régions. Elles diminuent ensuite progressivement à l'approche de l'automne, jusqu'à revenir aux valeurs minimales en hiver.

Comme le montrent les courbes, la ville d'Adrar enregistre les valeurs les plus élevées de rayonnement solaire pendant la plupart des mois de l'année, ce qui s'explique par sa situation désertique et le nombre élevé d'heures d'ensoleillement associé à une faible couverture nuageuse. Elle est suivie par la ville de Ghardaïa avec des valeurs proches, tandis que la ville de Biskra enregistre les valeurs les plus faibles par rapport aux deux autres villes.

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

2.3.2 Variations de la température du sol à différentes profondeurs à Adrar, Biskra et Ghardaïa :

L'analyse comparative des courbes mettent également en évidence les différences de caractéristiques thermiques entre les trois régions : Adrar enregistre les températures les plus élevées en raison de son caractère désertique et de l'intensité du rayonnement solaire. Les sites de Biskra et Ghardaïa affichent, quant à eux, des fluctuations thermiques significatives. Ces résultats valident le potentiel du sol en tant que réservoir thermique naturel, propice à une exploitation par géothermie de faible profondeur. La stabilité thermique observée confirme ainsi la viabilité de ces systèmes pour la régulation passive des bâtiments en zone saharienne.

La température pour chaque profondeur (z) et temps (t) est mesurée à l'aide de l'équation suivante [7] :

$$T(z, t) = T_{moy} + A * e^{\left(-\frac{z}{d}\right)} * \sin(\omega(t - t_0) - \frac{z}{d}) \quad (2-1)$$

T_{moy} : Température moyenne du sol ;

A : Amplitude de l'oscillation thermique à la surface ;

z : profondeur du sol (m) ;

d : Profondeur de pénétration thermique ;

ω : Fréquence angulaire d'une vague de chaleur ;

t_0 : Temps de référence pour atteindre la température moyenne.

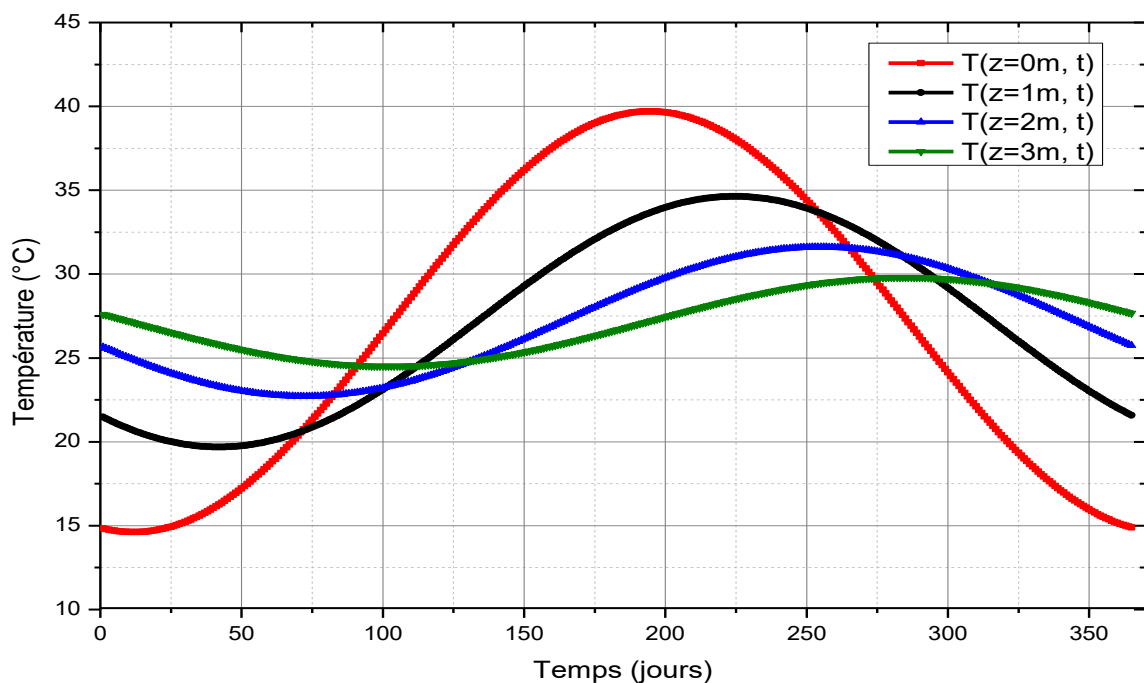


Figure 2-5 : Fluctuation des températures du sol à Adrar.

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

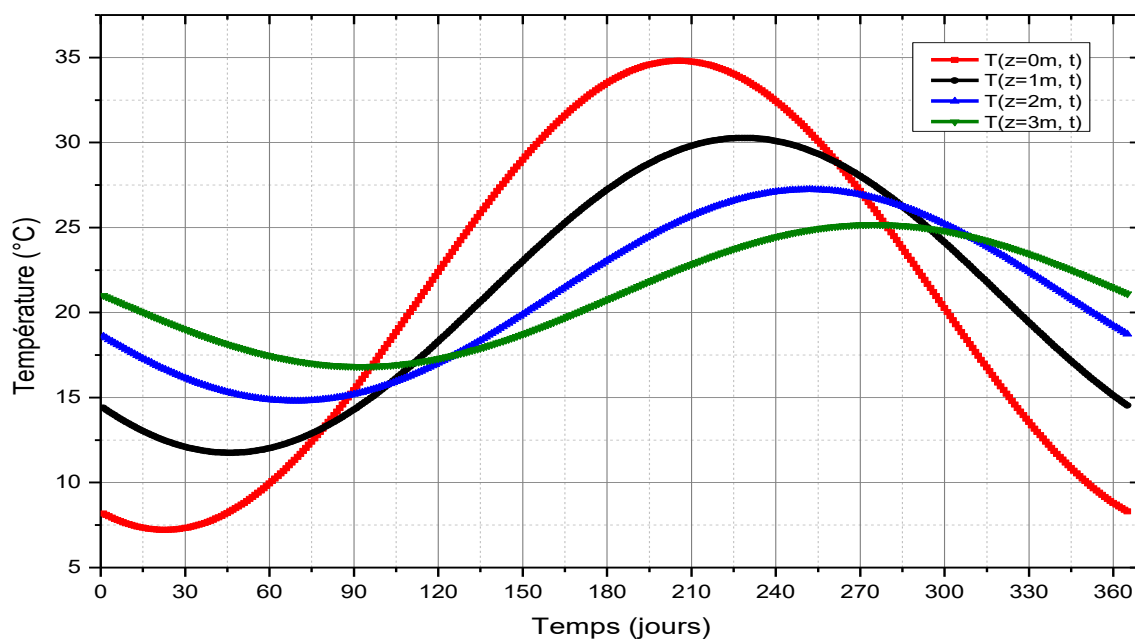


Figure 2-6 : Fluctuation des températures du sol à Biskra.

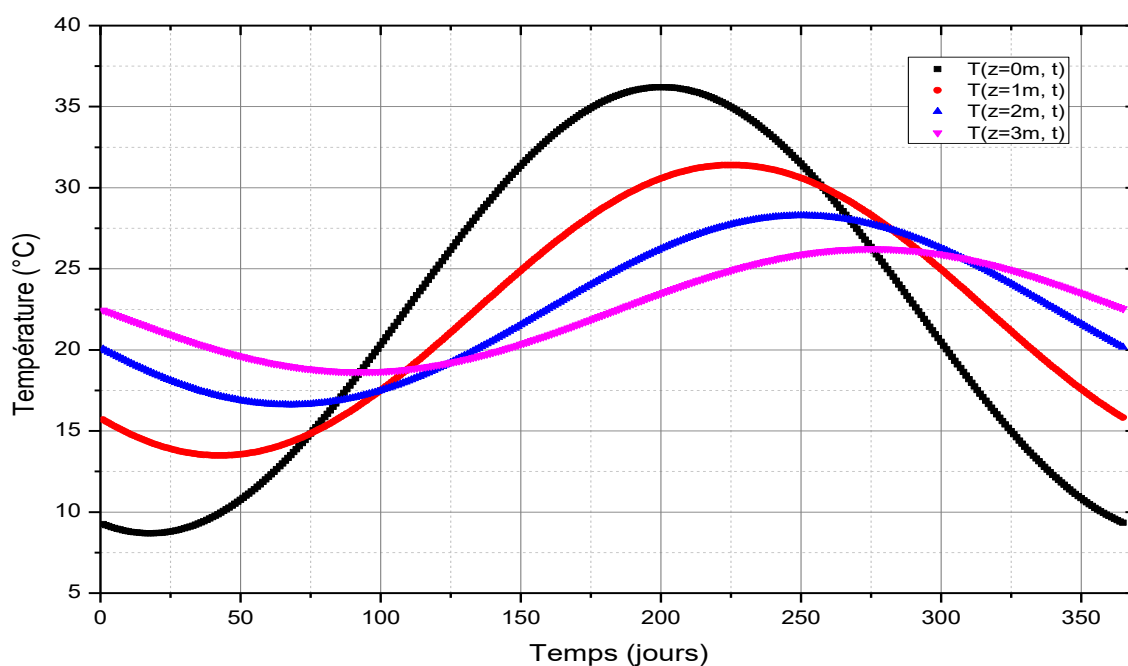


Figure 2-7 : Fluctuation des températures du sol à Ghardaïa.

Ces courbes illustrent l'évolution de la température du sol au cours de l'année à différentes profondeurs (1 m, 2 m, 3 m et à la surface de sol) pour Adrar, Biskra et Ghardaïa. On observe que la température de surface ($z = 0m$) connaît les plus fortes variations thermiques, avec une nette augmentation en été et une baisse en hiver, sous l'effet direct du rayonnement solaire et des conditions climatiques extérieures.

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

Avec l'augmentation de la profondeur, l'amplitude des variations thermiques diminue progressivement, les variations de température devenant plus stables et régulières. On observe également un décalage temporel dans l'atteinte du pic thermique aux plus grandes profondeurs, ce qui reflète le phénomène de transfert de chaleur au sein du sol par diffusion thermique. À une profondeur plus de 3 m, les températures deviennent quasi stables par rapport à la surface, ce qui témoigne de la capacité du sol à stocker l'énergie thermique et à atténuer les fluctuations climatiques saisonnières.

$$A(z) = A * e^{\left(\frac{-z}{d}\right)} \quad (2-2)$$

L'évolution temporelle des températures enregistrées dans les villes d'Adrar, Ghardaïa et Biskra sur une période de plus de 23 ans. Cette représentation met en évidence les variations saisonnières ainsi que les différences thermiques entre les trois sites.

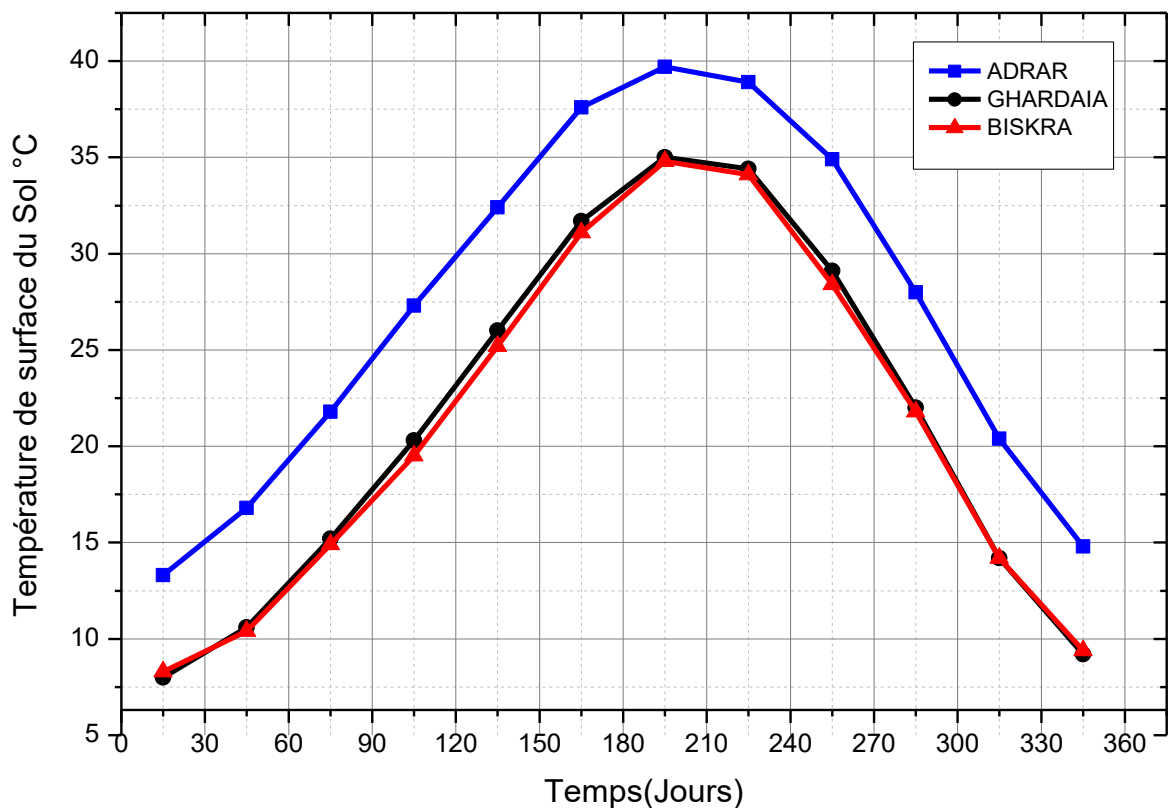


Figure 2-8 : variation des températures en fonction du temps dans trois localités : Adrar, Ghardaïa et Biskra.

L'analyse de l'évolution annuelle des températures de surface des sols dans les villes d'Adrar, Ghardaïa et Biskra révèle une variation saisonnière marquée, attribuée à la succession

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

des saisons et aux fluctuations climatiques locales. Les températures, qui sont plus basses en hiver (surtout au début et à la fin de l'année), montent progressivement au printemps pour atteindre leurs valeurs maximales en été, entre juin et août, avant de décliner en automne. Cette dynamique reflète l'influence dominante du rayonnement solaire et de la hausse des températures atmosphériques pendant les périodes chaudes. Adrar bénéficie systématiquement des températures de surface les plus élevées pendant la majeure partie de l'année, avec des valeurs estivales autour de 40 °C, en raison de son environnement désertique, d'un fort ensoleillement et d'une faible humidité. D'autre part, les villes de Ghardaïa et Biskra présentent des profils thermiques relativement similaires, avec de légères différences entre elles.

2.4 Équipements de mesure :

La station comprend un ensemble de capteurs météorologiques destinés à mesurer plusieurs paramètres climatiques fondamentaux, notamment la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, la pression atmosphérique, ainsi que la précipitation.

Ces capteurs sont reliés à un système d'acquisition et de traitement de données de type Campbell Scientific (interface RS232), qui sert à enregistrer et à stocker les données, en particulier les mesures radiométriques (Fig. 2-9). Le processus de mesure a été réglé selon des intervalles réguliers, les données étant enregistrées toutes les minutes et toutes les dix minutes.

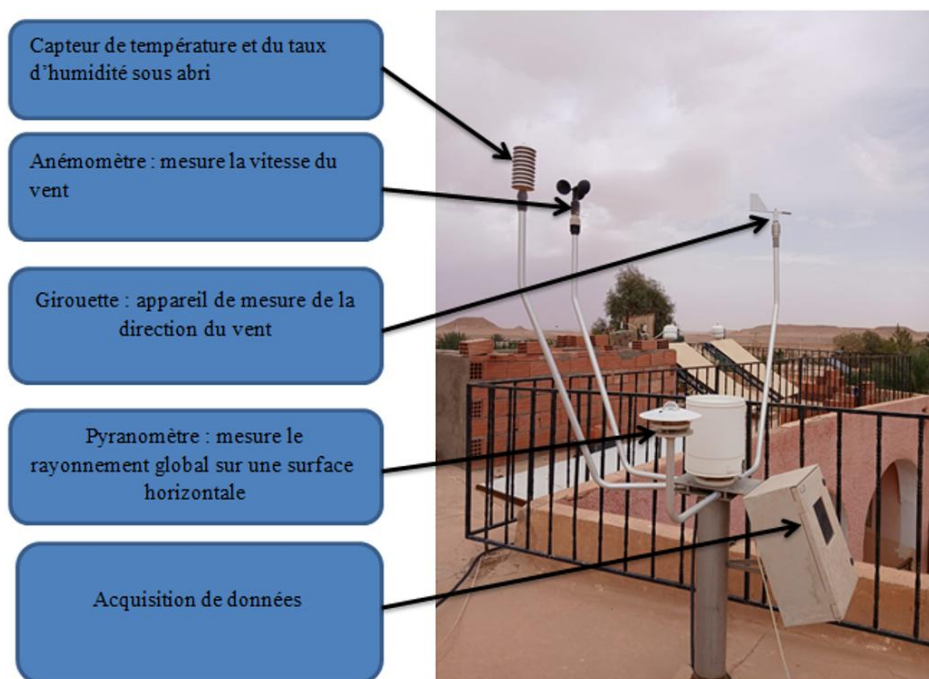


Figure 2-9 : station radiométrique installé à UARER (Ghardaïa).

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

2.4.1 Acquisition Agilent 34972A :

Le système Agilent 34972A a été utilisé pour mesurer et enregistrer les températures durant les expériences. Cet appareil est un système d'acquisition de données de haute précision permettant la connexion de plusieurs capteurs thermocouples et la surveillance en temps réel des variations de température, avec la possibilité de stocker et de transférer les données vers un ordinateur pour analyse.



Figure 2-10 : Acquisition Agilent 34972A

2.4.2 Testo 176 T4 :

Le Testo 176 T4 est un enregistreur de données numérique conçu pour mesurer et enregistrer la température avec une grande précision sur plusieurs canaux de mesure simultanément. Cet appareil utilise des sondes thermiques de type thermocouple, qui convertit les variations de température en signaux électriques pouvant être enregistrés et traités ultérieurement.

Il se distingue également par une grande capacité de stockage et la possibilité de programmer les intervalles de mesure, ce qui le rend adapté à diverses applications environnementales, notamment pour la surveillance de la température du sol et de l'air.

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié



Figure 2-11 : Testo 176T4.

2.4.3 Anémomètre :

Anémomètre Pro'sKit MT-4615 est un anémomètre numérique utilisé pour mesurer avec précision la vitesse de l'air dans diverses conditions environnementales. Il fonctionne à l'aide d'une turbine qui convertit le mouvement de l'air en un signal électrique, lequel est traité et affiché sur un écran numérique.

Cet appareil se caractérise par sa facilité d'utilisation et sa portabilité, ce qui le rend adapté aux études climatiques et aux mesures de ventilation.



Figure 2-12 : Anémomètre de type Pro'sKit MT-4615.

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

2.4.5 Thermocouple type k :

Le thermocouple de type K est un capteur de température composé de deux fils en chromel et en alumel, reliés au point de mesure afin de générer une différence de potentiel électrique proportionnelle à la température, conformément à l'effet thermoélectrique.



Figure 2-14 : Thermocouple type k.

2.5 Description du dispositif expérimental et de la chaîne d'acquisition :

Le suivi expérimental des performances thermiques de l'installation repose sur une chaîne d'acquisition automatique de données, conçue pour assurer une mesure précise et continue des températures de l'air et de sol. Le schéma synoptique, illustré à la (Fig 2-15) , repose sur des thermomètres de type K stratégiquement placés aux points dans l'échangeur de chaleur. Ces capteurs sont connectés à un émetteur multicanal 20 canaux, qui collecte les signaux analogiques avant de les envoyer à l'unité d'acquisition 34972A d'Agilent Technologies. Cette unité assure la conversion du signal et le traitement métrologique avec une grande précision. Enfin, les données sont transférées en temps réel vers un ordinateur équipé d'un logiciel de supervision, permettant le stockage des séries temporelles et la visualisation de l'évolution thermique du système.

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

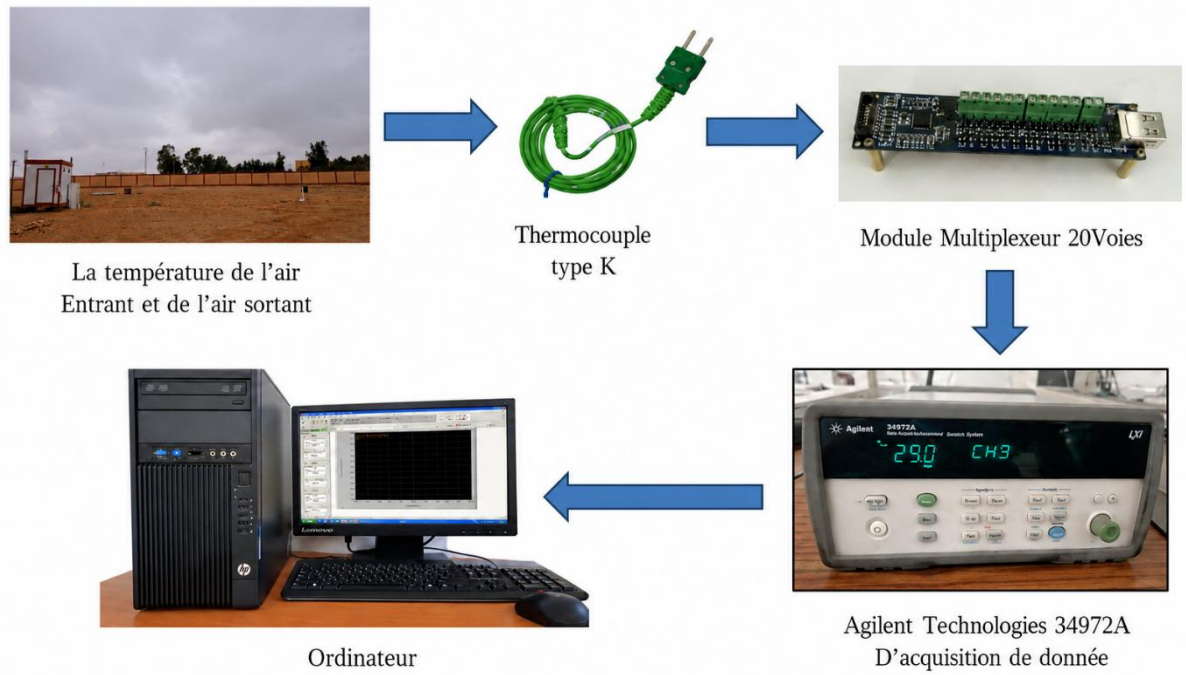


Figure 2-15 : Schéma synoptique du dispositif expérimental d'acquisition thermique.

2.6 Traitement et organisation des données :

Les données brutes issues de la campagne expérimentale sont consolidées puis organisées selon un ordre chronologique. Cette étape de prétraitement s'appuie sur des tableurs (comme Microsoft Excel) ou d'environnements spécialisés en analyse statistique, garantissant une structuration rigoureuse des séries temporelles avant toute exploitation numérique.

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

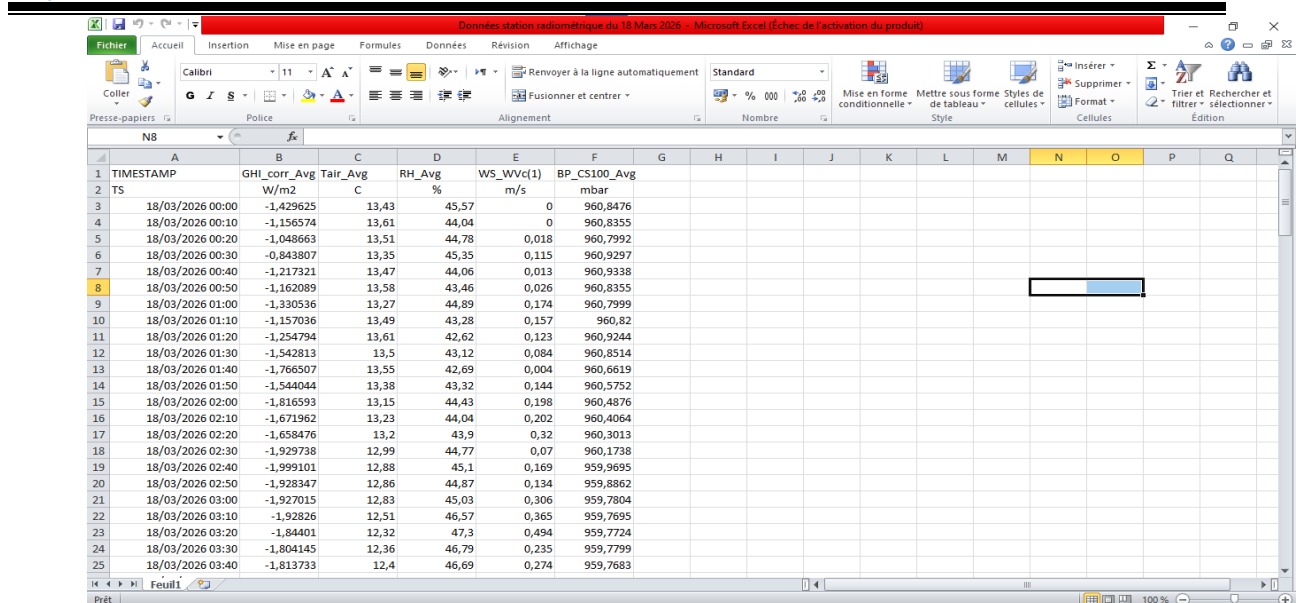


Figure 2-16 : structuration et organisation, à l'aide d'un tableur (Microsoft Excel), des données enregistrées.

2.7 Visualisation et analyse graphique des séries de mesures :

La phase de suivi et de visualisation des données a été réalisée à l'aide du logiciel OriginPro. Cet outil vous permet de générer des graphiques scientifiques de haute qualité, d'explorer les relations entre les variables et d'identifier visuellement les anomalies ou tendances potentielles. Les séries temporelles, ainsi que les grandeurs physiques mesurées, ont été représentées sous forme de courbes, de diagrammes de dispersion ou d'histogrammes, facilitant ainsi l'interprétation des résultats et la validation des hypothèses initiales. L'utilisation d'OriginPro a également offert une grande flexibilité dans la définition des axes, légendes et échelles, assurant une présentation claire et standardisée des données pour l'ensemble de l'étude.

Chapitre 2 : Contexte Climatique et Description du Système Hybride Étudié

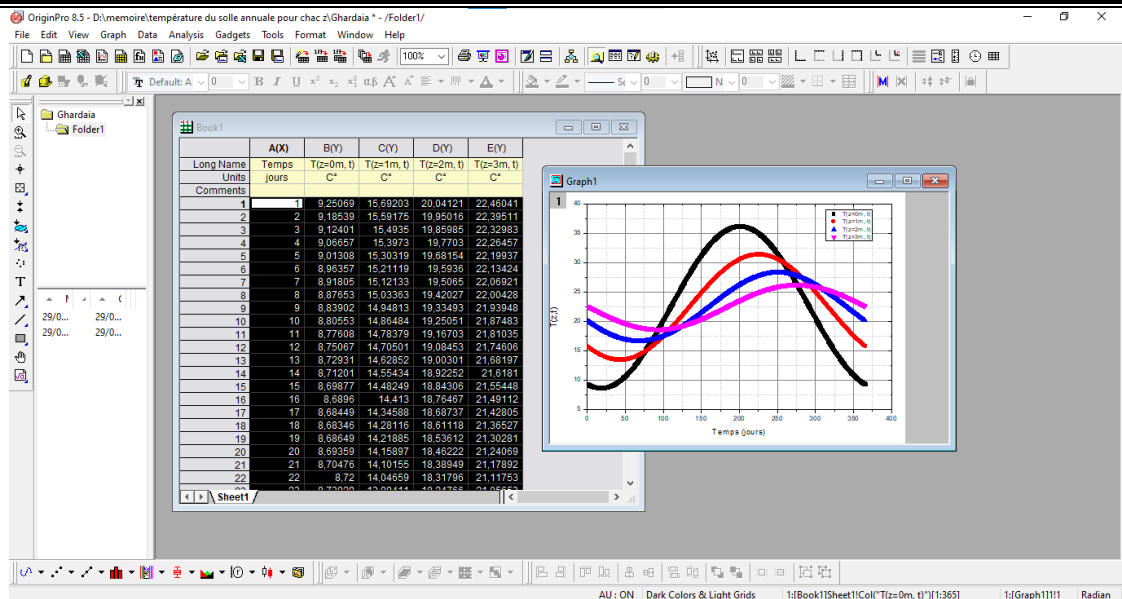


Figure 2-17 : aperçu de l'OriginPro.

Conclusion :

Les résultats confirment que les régions désertiques algériennes se caractérisent par une élévation considérable des températures de surface du sol pendant la majeure partie de l'année, ce qui a un impact direct sur la performance thermique des bâtiments et des systèmes énergétiques, et souligne l'importance d'adopter des techniques de refroidissement et d'isolation thermique pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire la consommation d'énergie.

CHAPITRE 3 : ANALYSE ET DUSCUSION

Introduction :

L'analyse et la discussion de la performance de l'échangeur air-sol (EAHE) appliqué à l'URAER à Ghardaïa constitue l'objectif principal de ce chapitre. Grâce aux paramètres d'ingénierie et de thermophysique du système, une description détaillée du dispositif expérimental a été formulée, suivie d'une approche mathématique pour modéliser le transfert de chaleur entre l'air circulant dans le tube et le sol environnant. La formule est basée sur l'utilisation de quantités sans dimension (Reynolds, Brandtel et Nusselt) pour caractériser le système d'écoulement et l'intensité des échanges convectifs, avec une référence particulière à la corrélation de Dittus-Bolter pour estimer le coefficient de convection interne et la résistance thermique totale. Deux stratégies d'optimisation sont ensuite examinées : d'une part, un dispositif à effet de serre situé à l'entrée de l'échangeur en hiver, destiné à préchauffer l'air ambiant, et d'autre part, une isolation passive du tube vertical et de la surface du sol en été, dans le but de réduire l'apport de chaleur supplémentaires.

3.1 Paramètres géométriques et thermophysiques :

Les principaux paramètres physiques et géométriques du système sont rassemblés dans le tableau suivant. Nous trouvons les caractéristiques dimensionnelles du tube, diamètre D , longueur L et section S , ainsi que les propriétés thermophysiques de l'air : densité ρ , capacité thermique C_p , conductivité thermique λ , viscosité dynamique μ et viscosité cinématique ν . Ces grandeurs constituent les données d'entrée nécessaires à l'analyse des transferts de chaleur et des flux au sein du système.

Tableau 3-1 : récapitulatif des paramètres du système.

Designation	Valeur	Unité
Diamètre de tube (D)	0,141	m
Longueur de tube (L)	28	m
Masse volumique de l'air (ρ)	1,23	kg/m ³
Capacité thermique de l'air (C_p)	1006	J/kg*K
Conductivité thermique de l'air (λ)	0,0262	W/m*K
Viscosité dynamique de l'air (μ)	0,0000185	kg/m*s
Viscosité cinématique de l'air (ν)	0,0000157	m ² /s
Surface de section de tube (S)	0,01495	m ²

3.2 Présentation du dispositif EAHE mis en œuvre :

Le dispositif expérimental de type échangeur air-sol (EAHE) a été dimensionné et instrumenté dans le cadre de cette étude afin d'évaluer ses performances thermiques en conditions réelles. L'implantation du système est illustrée dans la figure suivante.



Figure 3-1 : Vue ensemble du système EAHE.

L'installation expérimentale de l'EAHE à l'UARER (Ghardaïa) est basée sur un tube de 28 mètres de long, enterré à 2,3 mètres de profondeur, équipé d'un anémomètre, de la sonde TESTO 176 T4 et du système d'acquisition Agilent 34972A.

La figure suivante montre plus en détail les dispositifs destinés à surveiller les températures et les flux d'air, ce qui est nécessaire pour analyser le comportement thermique de l'échangeur de chaleur.

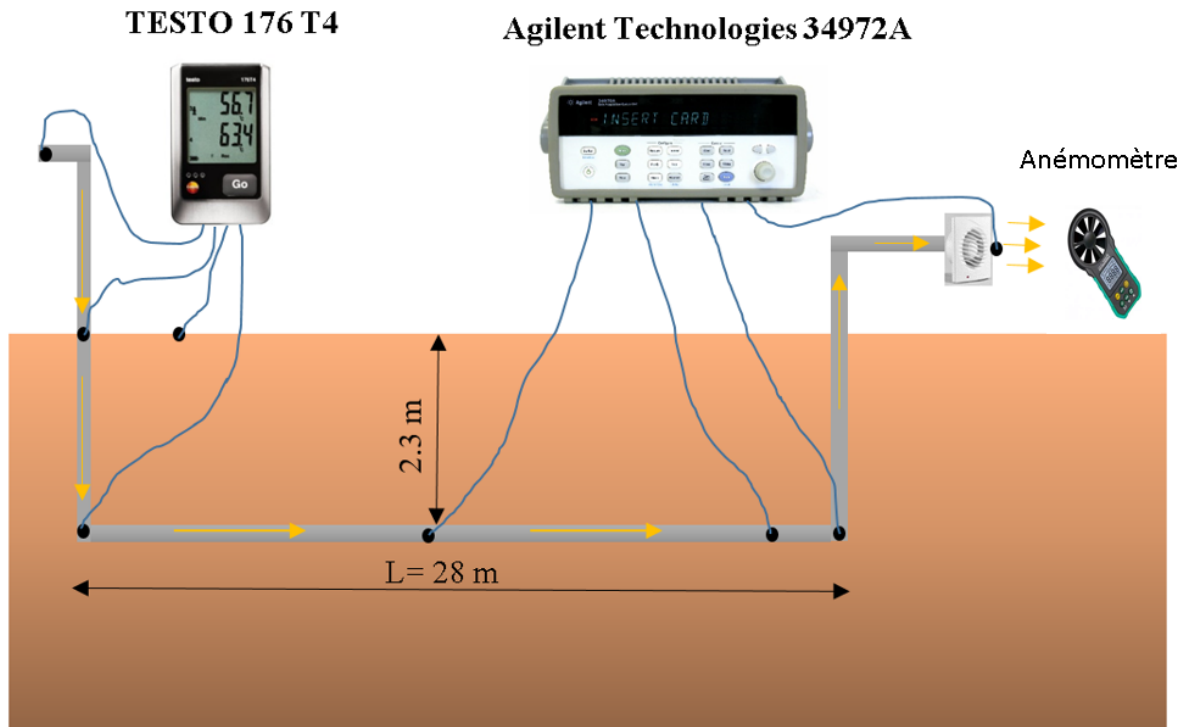


Figure 3-2 : Vue du système d'échangeur air-sol (EAHE), en référence aux principaux instruments de mesure (anémomètre, sonde TESTO 176 T4, système d'acquisition Agilent 34972A) et aux dimensions caractéristiques.

3.3 Analyse mathématique de l'échangeur de chaleur air-sol :

La formulation mathématique de l'échangeur air-sol (EAHE) consiste, d'abord, à déterminer la distribution de la température du sol, puis celle de l'air circulant dans le conduit horizontal. Le rendement thermique du système est également évalué, ainsi que les équations caractéristiques régissant le comportement thermique de l'EAHE, qui sont essentielles pour la validation expérimentale du modèle. L'ensemble des équations régissant le système est basé sur plusieurs hypothèses simplificatrices : on suppose que le sol est homogène, avec des propriétés thermiques constantes ; le transfert de chaleur dans le sol est considéré comme unidimensionnel ; enfin, le tube est assimilé à un milieu homogène aux caractéristiques géométriques et thermiques invariantes.

Dans le cadre de l'étude thermique de l'échangeur air-sol, l'analyse est basée sur plusieurs grandeurs adimensionnelles qui permettent de caractériser le régime d'écoulement ainsi que l'intensité des transferts thermiques.

3.3.1 Nombre de Reynolds :

Le nombre de Reynolds est défini par [17] :

$$Re = \frac{\rho * V * D_{int}}{\mu} \quad (3-1)$$

Où :

ρ : Masse volumique du fluide (kg/m^3) ;

V : vitesse du fluide moyenne (m/s) ;

D_{int} : diamètre (m) dans un tube (diamètre intérieur) ;

μ : viscosité dynamique (pa.s).

Ce numéro «Re» identifie le type d'écoulement dans le tuyau et joue un rôle essentiel dans l'évaluation du comportement thermique du système.

3.3.2 Nombre de Prandtl :

Le nombre de Prandtl (Pr) est un paramètre adimensionnel reliant les propriétés de transport du fluide, à savoir la diffusion de la quantité de mouvement (viscosité cinématique) et la diffusion thermique. Il exprime ainsi le rapport entre l'épaisseur de la couche limite hydrodynamique et celle de la couche limite thermique à l'intérieur du tube. Pour l'air circulant dans l'installation, ce nombre est déterminé par la relation suivante [17] :

$$Pr = \frac{\mu * Cp}{\lambda} \quad (3-2)$$

Dans les conditions expérimentales de l'étude, la valeur du nombre de Prandtl adopté est $Pr = 0,708$.

3.3.3 Nombre de Nusselt :

Le nombre de Nusselt (Nu) caractérise le rapport entre les transferts thermiques par convection et par conduction au sein d'un fluide. Dans la présente étude, ce paramètre est déterminé à l'aide de la corrélation de Dittus-Boelter, classiquement employée pour les écoulements turbulents dans des tubes lisses. Ce modèle, fondé respectivement sur les nombres de Reynolds (Re) et de Prandtl (Pr), a été systématiquement confronté aux mesures expérimentales acquises sur l'installation longue de 28 mètres. La formule de Dittus-Boelter s'écrit [18] :

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^n \quad (3-3)$$

$$Nu = \frac{h * D_{int}}{\lambda} \quad (3-4)$$

n est un exposant dépendant de la condition de chauffage ou de refroidissement :

n = 0,4 pour le chauffage ($T_{\text{paroi}} > T_{\text{fluid}}$).

n = 0,3 pour le refroidissement ($T_{\text{paroi}} < T_{\text{fluid}}$).

Tableau 3-2 : Corrélations du nombre de Nusselt issues de la littérature pour les écoulements laminaires et turbulents en convection forcée.

Auteur(s)	Corrélation Empirique
Baehr and Stephan [19]	$Nu = \frac{\frac{3.66}{\tanh(2.264Gz_D^{-2/3} + 1.7Gz_D^{-2/3})} + 0.0499Gz_D \tanh(Gz_D^{-1})}{\tanh(2.432Pr^{1/6}Gz_D^{-1/6})}$
Taler [20]	$Nu = Nu_{\text{laminaire}}(Re = 2300) + \frac{(\frac{f}{8})(Re - 2300)Pr^{1.008}}{1.08 + 12.39\sqrt{\frac{f}{8}(Pr^{2/3} - 1)}} * [1 + (\frac{D}{L})^{2/3}]$
Dittus and Boelter [21]	$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^n (n = 0.3 \text{ pour chauffage } n = 0.3 \text{ pour refroidissement})$
Pethukov and Kirillov [22]	$Nu = \frac{(\frac{f}{8})RePr}{1.07 + \frac{900}{Re} - \frac{0.36}{1 + 10Pr} + 12.7\sqrt{\frac{f}{8}(Pr^{2/3} - 1)}}$
Gnielinski [23]	$Nu = \frac{(\frac{f}{8})(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\sqrt{\frac{f}{8}(Pr^{2/3} - 1)}}$
Chilton and Colburn [24]	$Nu = 0.125 f Re Pr^{1/3}$

3.3.4 Détermination de h :

Le coefficient de convection interne h est déterminé à partir du nombre de Nusselt, et est évalué selon la corrélation de Dittus-Bolter dans un système turbulent. Ces méthodes permettent de mesurer l'efficacité des échanges thermiques entre le flux d'air et la paroi interne d'un tuyau de 28 mètres de long. La comparaison de ce modèle théorique avec les données expérimentales collectées permet de vérifier l'exactitude de la caractérisation du transport de charge au sein de l'installation.

$$h = \frac{Nu * \lambda}{D_{\text{int}}} \quad (3-5)$$

Afin d'évaluer l'influence de la dynamique des fluides sur les performances de l'échangeur air-sol, une analyse paramétrique a été réalisée en faisant varier la vitesse du flux d'air. Le tableau ci-dessous résume les valeurs calculées du nombre de Reynolds (Re), du nombre de Nusselt (Nu) et du coefficient de transfert convectif (h). Ces résultats nous

permettent de comprendre l'évolution du régime d'écoulement et de quantifier l'amélioration des transferts thermiques dans le tube de 141 mm de diamètre. Il faut souligner que, pour toutes les vitesses étudiées, le nombre de Reynolds reste supérieur à 4000, ce qui confirme l'établissement d'un régime turbulent, favorable aux échanges convectifs.

Tableau 3-3 : calcul des paramètres de transfert convectif (Re, Nu, h)

v(m/s)	Re	Dittus-Boelter			
		Nu		h (W/m²*K)	
		chauffage	refroidissement	chauffage	refroidissement
1,00	8 970,65	29,1	30,13	5,53	5,72
2,00	17 941,30	50,68	52,46	9,62	9,96
2,50	22 426,62	60,58	62,71	11,50	11,91
3,00	26 911,95	70,10	72,56	13,31	13,78

3.3.5 Résistance thermique totale :

S'exprime en termes de résistances thermiques comme :

$$R_{tot} = R_{air} + R_{tube} + R_{sol} \quad (3-6)$$

R_{air} , R_{tube} et R_{sol} sont les résistances thermiques de l'air, du tube et du sol respectivement [13].

$$R_{air} = \frac{1}{2\pi r_i h_a L} \quad (3-7)$$

$$R_{tube} = \frac{\ln(D_{ext}/D_{int})}{2\pi\lambda_p L} \quad (3-8)$$

$$R_{sol} = \frac{\ln(R_{influence}/R_{ext})}{2\pi\lambda_s L} \quad (3-9)$$

3.3.6 Température de l'air en sortie de l'EAHE :

La température de l'air à la sortie EAHE est déterminée par l'évolution thermique le long de l'échangeur. Elle suit la distribution exponentielle :

$$T_{air}(x) = T_{sol} + (T_{entrée} - T_{sol}) * \exp\left(-\frac{x}{\dot{m} * C_p * R_{tot}}\right) \quad (3-10)$$

Cette expression reflète l'approche progressive de l'air vers la température du sol au fur et à mesure qu'il avance dans le tube. La vitesse de cet échange dépend du débit massique $\dot{m}$, de la capacité thermique C_p et de la résistance thermique totale R_{tot} . Ainsi, plus la longueur x est grande, plus la température de sortie se stabilise près de T_{sol} .

3.4 Optimisation hivernale d'EAHE par l'effet de serre localisé :

3.4.1 Problématique des performances hivernales à Ghardaïa :

Dans le contexte saharien de Ghardaïa, les températures hivernales nocturnes peuvent chuter brutalement, bien que l'ensoleillement diurne reste intense. Lors de notre stage pratique à l'URAER, l'exploitation de l'inertie thermique du sol à moins de 3 mètres de profondeur s'avère incomplète en hiver. Par conséquent, la température de l'air échantillonné n'assure pas un préchauffage suffisant, ce qui souligne la nécessité d'un enfouissement plus profond pour optimiser les performances du système.

Face à cette observation, nous avons cherché à augmenter la performance de l'échangeur en hiver en agissant non pas sur le tube enfoui lui-même, mais sur la zone d'entrée d'air.

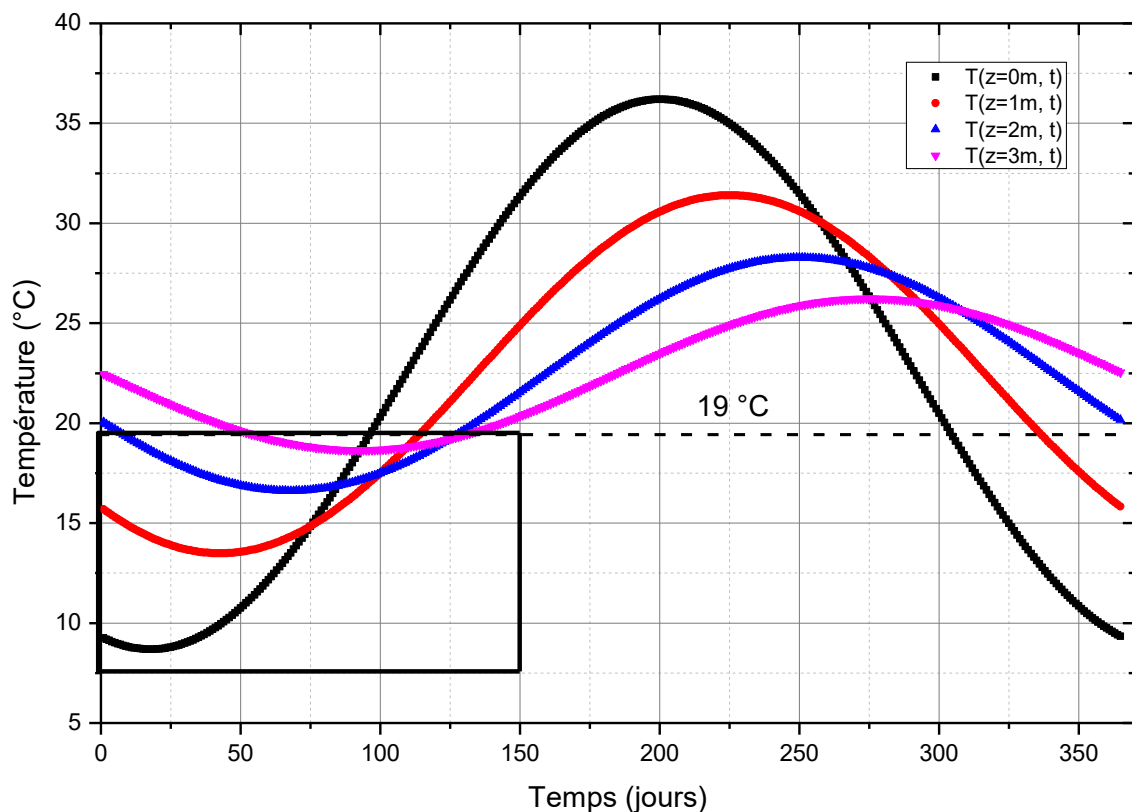


Figure 3-3 : Evolution de température de sous-sol à Ghardaïa.

3.4.2 Principe de l'amélioration proposée : table en bois-verre :

Afin de maximiser le gain thermique solaire, un prototype de captation passive a été conçu et installé à l'entrée de l'échangeur (section descendante), le dispositif combine un cadre en bois isolant et une couverture en verre (5 mm), créant un effet de serre miniature qui piège le

rayonnement incident pour chauffer une couche superficielle du sol. La conception en bois réduit les fuites de chaleur conductrice vers l'extérieur.

En outre, la zone enterrée adjacente a été isolée jusqu'à une profondeur de 0,5 m à l'aide de carreaux de plâtre. Cette configuration permet de rompre les ponts thermiques avec le sol adjacent et de concentrer l'énergie thermique accumulée en ligne avec le tube vertical de l'échangeur.

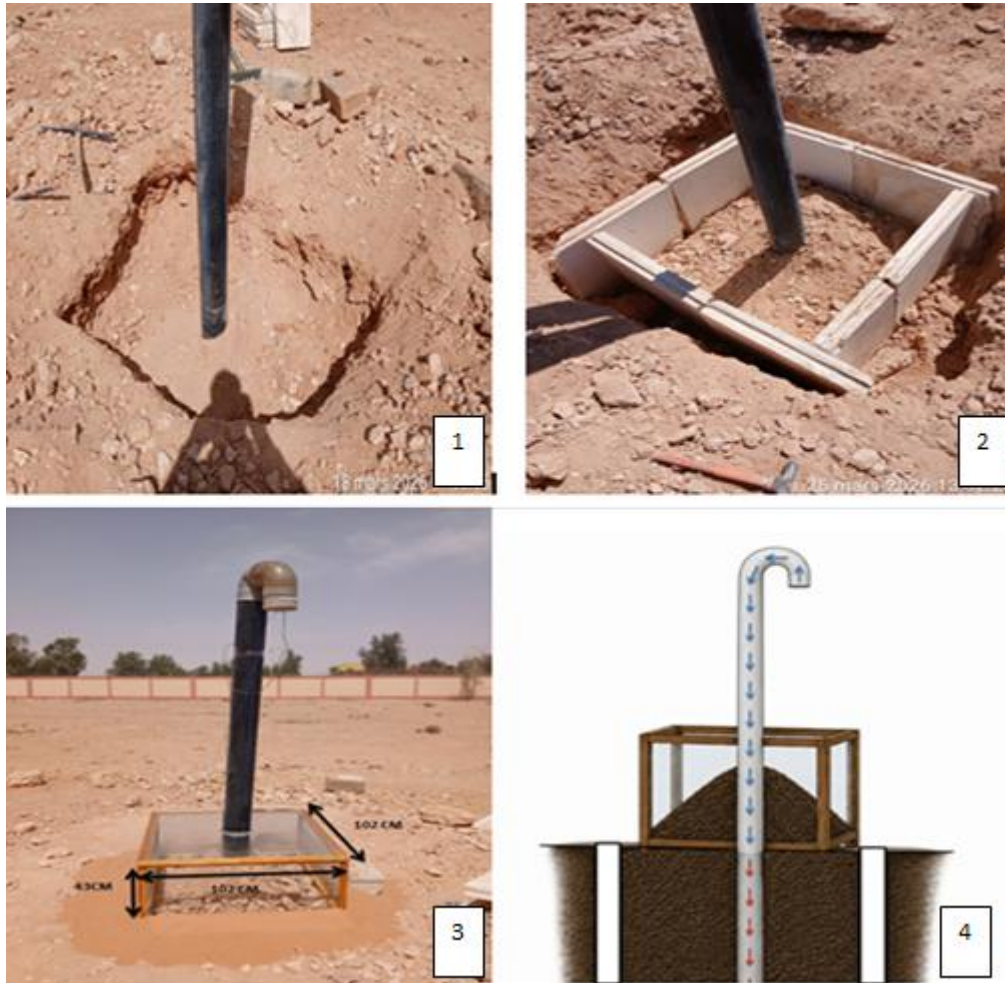


Figure 3-4 : Étapes pour créer une zone de capture solaire et un système d'isolation périmétrique.

3.4.3 Mécanisme de transfert thermique vers le tube vertical :

Le rôle de cette table chauffante est d'interfacer l'air ambiant et le tube vertical d'entrée de l'échangeur. Le tube vertical (section descendante) est partiellement intégré sous cette table. Le principe est le suivant:

- **Le sol sous la table** s'échauffe par effet de serre durant la journée (température pouvant atteindre 72 °C en hiver).
- **Ce sol chaud** transmet sa chaleur par conduction à la paroi extérieure du tube vertical qui le traverse.
- **La paroi du tube** s'échauffe à son tour, puis chauffe l'air qui circule à l'intérieur du tube par convection forcée atteindre 46 °C.

Ainsi, même si l'air extérieur est froid (10 à 20°C), il se réchauffe dès son passage dans le premier tronçon vertical grâce à cette source chaude locale.

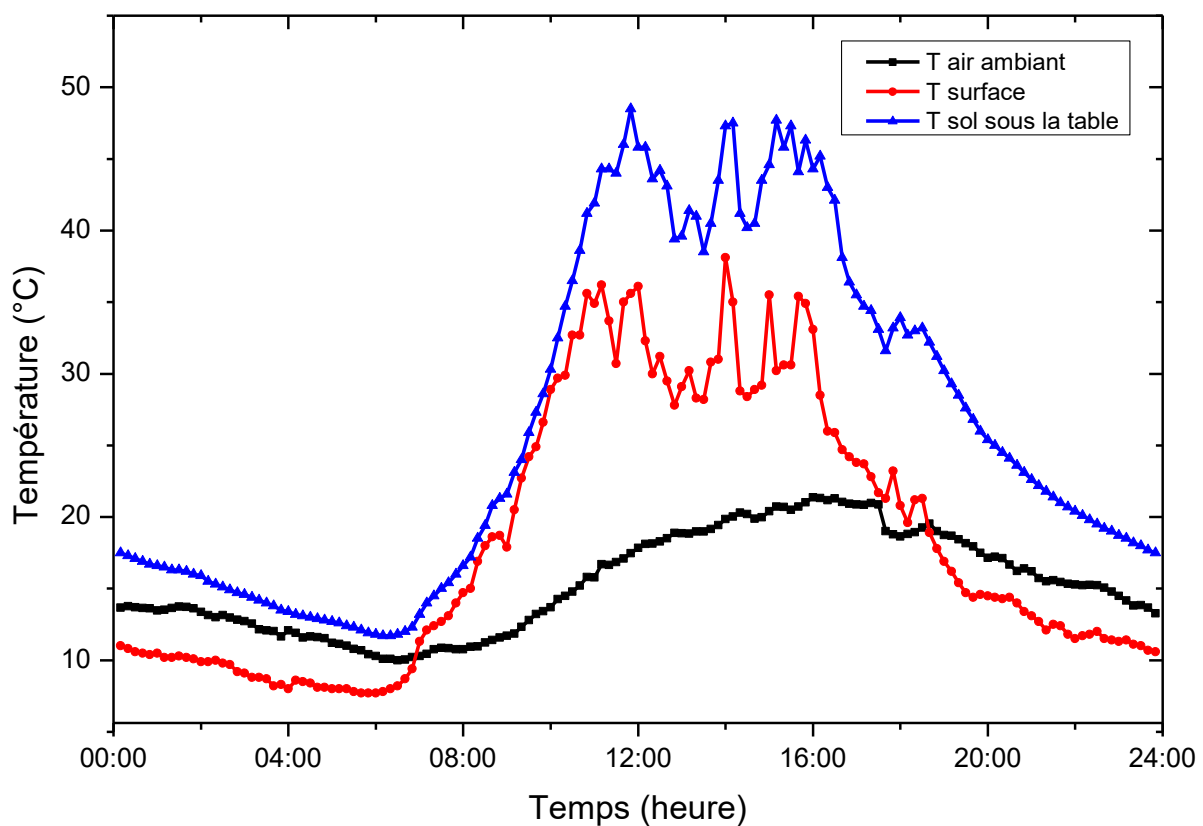


Figure 3-5 : Évolution des températures de l'air ambiant, de la surface du sol et du sol sous table du 11/03/2026, ciel nuageux.

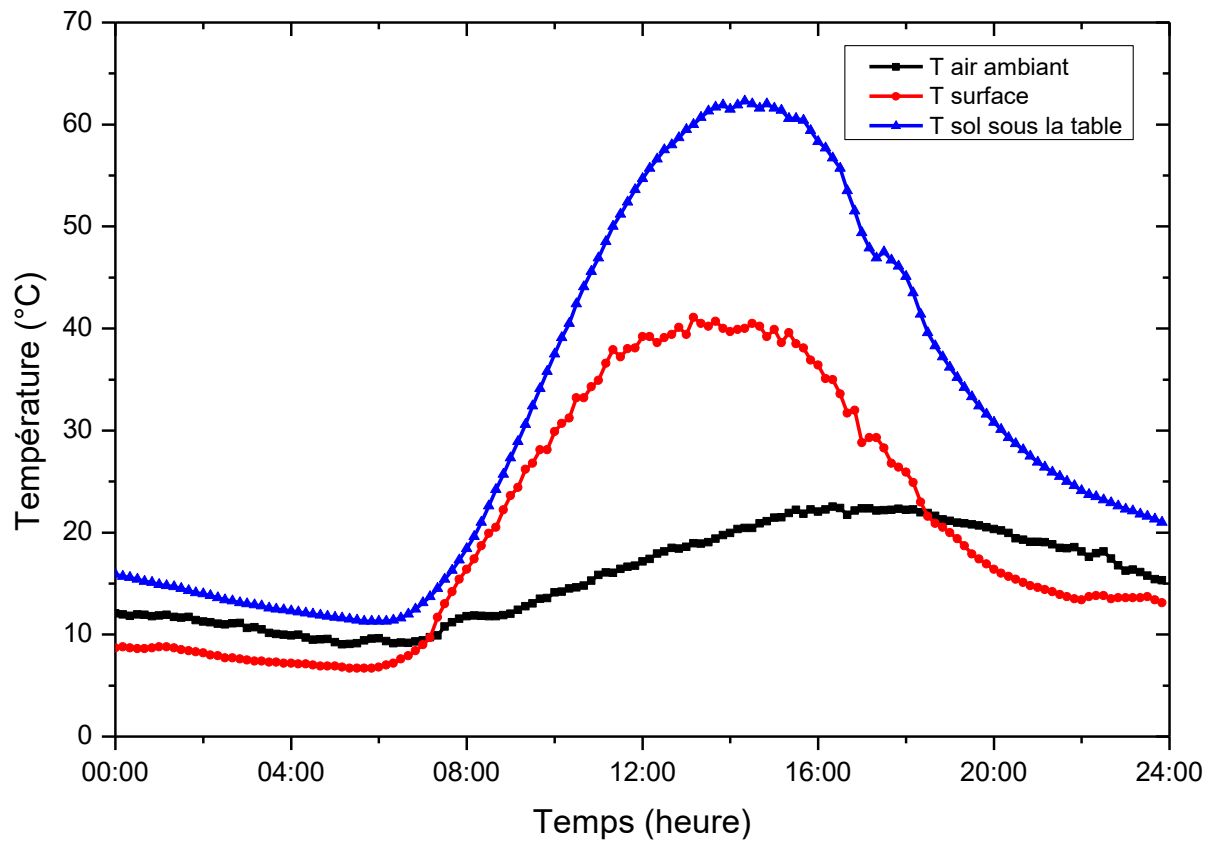


Figure 3-6 : Évolution des températures de l’air ambiant, de la surface du sol et du sol sous table du 15/03/2026, sous un ciel de nuages légers.

L’analyse des courbes de température pour le 15/03/2026 sous un ciel de nuages légers met en évidence un potentiel thermique diurne significatif. En effet, la différence entre la température de l’air ambiant et celle du sol sous la table, ainsi que l’inertie thermique du sol, permettent de chauffer l’air entrant dans l’échangeur d’air au sol (EAHE) pendant la journée. Il serait donc judicieux d’exploiter ce gradient de température en faisant circuler l’air dans le EAHE en phase diurne, afin d’accumuler la chaleur dans la masse du sol. Cette énergie thermique stockée peut être libérée après le coucher du soleil, ce qui permet de maintenir l’approvisionnement en chaleur du bâtiment le soir et pendant la nuit, lorsque les besoins en chauffage deviennent plus importants.

L’énergie thermique stockée peut être libérée après le coucher du soleil, ce qui permet de maintenir l’approvisionnement en chaleur du bâtiment le soir et pendant la nuit, lorsque la demande énergétique atteint son maximum.

3.5 Réduction des apports thermiques estivaux sur l'EAHE par barrières passives :

En été, à Ghardaïa, le défi est renversé, le sol en surface est très chaud (souvent au-dessus de 70°C) [7], ce qui peut dégrader les performances de l'échangeur air-sol (EAHE) en chauffant l'air avant même son entrée dans la partie enterrée. Pour résoudre ce problème pendant notre stage à l'URAER, nous avons mis en œuvre deux améliorations négatives. Autour de l'entrée de l'échangeur, nous avons recouvert le sol d'environ un mètre carré avec des carreaux de plâtre posés à plat reliés autour du tuyau vertical (section descendante). Le plâtre, un matériau isolant, réfléchit une partie du rayonnement solaire et réduit la conductivité thermique entre l'air surchauffé et la couche superficielle du sol pendant la journée.

D'autre part, nous avons isolé thermiquement le tube vertical (la partie hors sol) en utilisant des panneaux isolants sandwich de 4 cm d'épaisseur. Ces panneaux, constitués d'un noyau en mousse de polyuréthane pris en sandwich entre deux interfaces rigides, ont été coupés, enroulés autour du tube, puis fixés avec des vis. Cette isolation joue un rôle essentiel, elle empêche la paroi verticale du tuyau d'absorber la chaleur de l'air très chaud (généralement 40 à 45°C dans l'après-midi) et de transférer une partie de celle-ci à l'air, qui descend vers la fraîcheur du sol profond.

Grâce à cette double protection, carreaux de plâtre en surface pour isoler le sol et panneaux sandwich de 4 cm autour du tuyau vertical, la température de l'air à l'entrée de la partie enterrée de l'échangeur de chaleur a été réduite d'environ 12 °C en moyenne par rapport à la configuration non isolée. L'air arrive ainsi plus frais dans le tube horizontal enterré, ce qui améliore considérablement l'efficacité du refroidissement en été. Ce dispositif simple, peu coûteux et adapté au contexte aride de Ghardaïa, montre qu'une isolation ciblée des zones critiques (surface du sol et tube vertical) peut améliorer les performances EAHE en été.

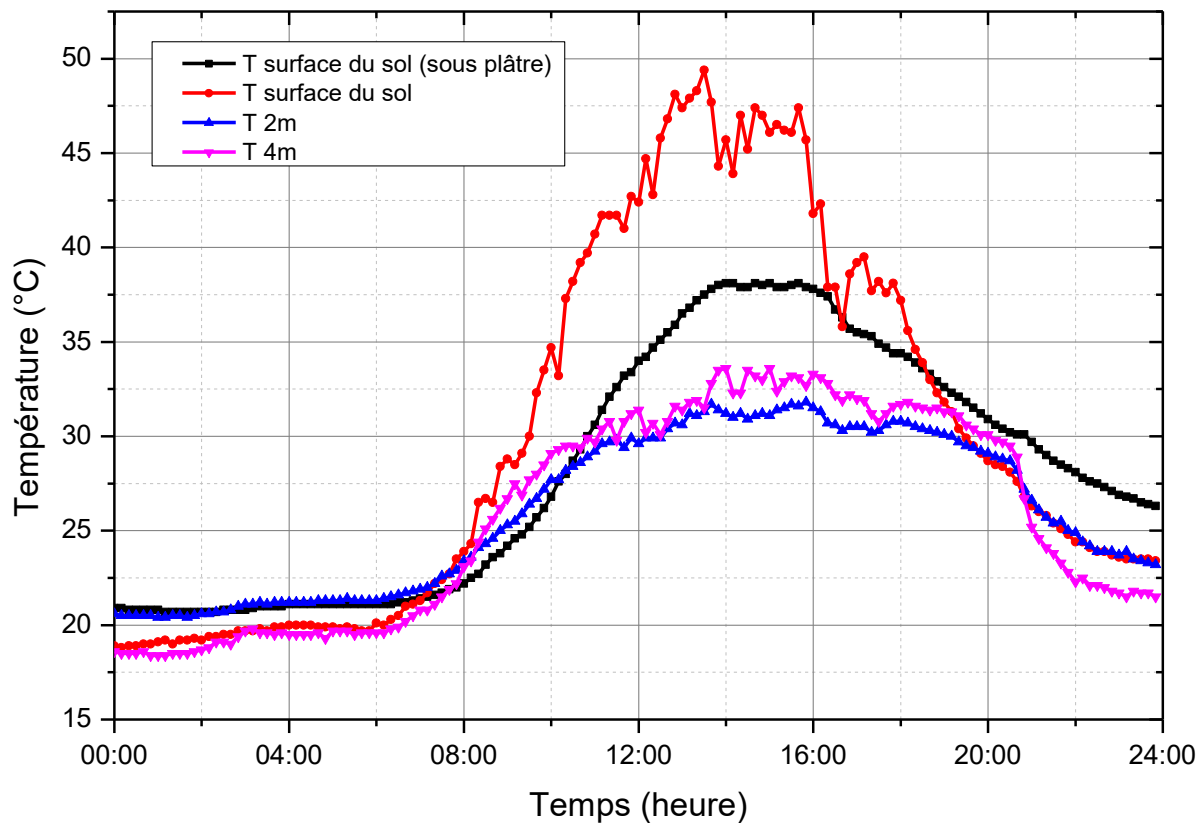


Figure 3-7 : Évolution horaire des températures du 15 Mai 2026.

La figure montre l'évolution des températures du sol au cours du 15 mai 2026 à la surface, sous le plâtre et à des profondeurs de 2 m et 4 m dans le tube (section descendant). Nous notons que la température de surface du sol a connu le plus grand changement thermique, atteignant une valeur maximale d'environ 49 °C pendant l'après-midi en raison de l'exposition directe au rayonnement solaire. La température sous le plâtre était plus basse et plus stable, ce qui indique le rôle isolant de plâtre pour atténuer l'effet thermique. Les courbes montrent également que les températures à des profondeurs de 2 m et 4 m changent lentement et avec une capacité thermique moindre, ce qui reflète la capacité du sol à stocker la chaleur et à réduire les fluctuations thermiques à mesure que la profondeur augmente.

Les campagnes de mesures réalisées pendant la période de formation à l'URAER, du Mars à Avril 2026, ont permis de collecter les données thermiques contenues dans le tableau suivant. Cette synthèse met en évidence l'effet des développements de surface sur la préclimatisation avant son introduction dans l'échangeur, pour deux saisons contrastées.

Tableau 3-4 : Résumé des plages de température mesurées à différents points du système pendant l'été et l'hiver.

Point de mesure	Température moyenne estival (°C)	Température moyenne hivernal (°C)
Air extérieur	25 – 32	10 - 15
Surface du sol	16 - 49	8 - 16
Surface du sol sous table	-	19 - 72
Surface du sol sous plâtre	17 - 42	-
Air à 2m (entrée tube vertical)	17 - 34	15 - 46
Air à la sortie de l'échangeur (14 m)	23 - 27	22 -26
Air à la sortie de l'échangeur (28 m)	22 - 24	22 - 25

Les résultats mettent en évidence l'efficacité étonnante de la captation passif, avec des températures sous la table bois-verre atteignant 72°C en hiver, contre seulement 16°C pour un sol nu. Cette accumulation de chaleur sur la surface, combinée à l'isolation des carreaux de plâtre, améliore le préchauffage de l'air une fois à l'intérieur du système. À la sortie de l'échangeur, la remarquable stabilité thermique (entre 22°C et 27°C) confirme la capacité de l'intérieur Ghardaïa à réguler durablement le confort thermique interne, quelles que soient les fluctuations saisonnières extrêmes.

3.6 Analyse des performances thermiques hivernales :

L'intégration du dispositif de captation passive (table bois-verre) à l'entrée de l'échangeur a permis d'optimiser les performances hivernales du système selon trois axes majeurs :

Préchauffage immédiat de l'air entrant : Grâce à l'effet de serre généré, la température au niveau de la surface du sol sous la table atteint des valeurs comprises entre 19°C et 72°C, alors que la température de l'air extérieur oscille entre 10°C et 15°C. Ce gain thermique initial permet à l'air de s'introduire dans le tube vertical à une température déjà pré-conditionnée (entre 15°C et 46°C), réduisant ainsi la sollicitation directe du sol profond.

Optimisation du gradient thermique et sécurité du système : En élevant la température d'entrée, le dispositif réduit l'écart thermique brutal entre l'air et les parois du tube. Cette

régulation améliore les conditions de fonctionnement de l'échangeur tout en limitant les risques de condensation ou de givrage, assurant ainsi une stabilité de sortie entre 22°C et 26°C.

Valorisation passive de l'ensoleillement : Le système exploite efficacement le fort rayonnement solaire local pour chauffer le substrat superficiel. Cette énergie gratuite vient compenser les pertes thermiques du sol en hiver, agissant comme un appoint énergétique passif qui soutient l'inertie du sous-sol et garantit un confort thermique constant dans les locaux.

Conclusion :

Les résultats de cette analyse indiquent que le comportement thermique de l'échangeur d'air au sol (EAHE) dépend étroitement de l'interaction entre les paramètres techniques du tube, les propriétés de l'air et les conditions climatiques locales à Ghardaïa. Avec des nombres de Reynolds supérieurs à 4000, l'écoulement est en régime turbulent, ce qui favorise le transfert de chaleur par convection. Les stratégies d'amélioration proposées sont particulièrement efficaces. En hiver, l'effet de serre local à l'entrée de l'échangeur de chaleur améliore considérablement le préchauffage de l'air. En été, l'isolation du tube vertical et de la surface du sol réduit la température moyenne de l'air à l'entrée de la section enfouie d'environ 12°C, augmentant ainsi la capacité de refroidissement du système. Tous ces résultats soulignent l'importance d'une approche analytique et expérimentale combinée pour améliorer les performances de l'EAHE en milieu désertique, ouvrant la voie à une gestion saisonnière plus fine du système, qui fera l'objet d'un développement ultérieur.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les résultats obtenus dans ce mémoire mettent en évidence le fort potentiel d'un échangeur air-sol (EAHE) opérant dans un climat désertique, dans le contexte de Ghardaïa. Les caractéristiques climatiques de la région, fort rayonnement solaire, températures estivales élevées et hivers relativement doux, sont particulièrement favorables à l'exploitation de l'inertie thermique du sol comme réservoir de chaleur ou de fraîcheur naturelle. La configuration expérimentale mise en œuvre à l'URAER, qui repose sur un prototype EAHE, une station de mesure radiométrique et une microchaîne pour la collecte des données, permet une analyse précise du transfert de chaleur air-sol et de la réponse saisonnière du système.

Les modèles analytiques, basés sur les nombres de Reynolds, Brandtl et Nusselt et sur la formule de résistance thermique totale, permettent de reproduire l'évolution des températures de l'air de manière cohérente et de relier les changements de vitesse de l'air aux améliorations des transferts par convection. Les stratégies d'optimisation proposées sont particulièrement efficaces : l'effet de serre localisé à l'entrée du système améliore significativement le préchauffage de l'air en hiver, tandis que l'isolation du tube vertical et de la surface du sol réduit la température de l'air à l'entrée enterrée d'environ 12°C en moyenne pendant l'été, ce qui améliore considérablement les capacités de refroidissement.

Ces résultats démontrent qu'une approche combinée, associant modèle analytique simplifié avec des optimisations passives ciblées, peut améliorer significativement la performance énergétique d'un EAHE en milieu saharien, sans nécessiter d'investissements matériels importants. Ils ouvrent la voie à des études complémentaires, en particulier à des simulations numériques plus détaillées, à l'extension du système pour inclure des configurations multitubes et à la mise en œuvre d'une gestion automatisée des flux d'air afin de maximiser l'utilisation de l'inertie géothermique tout au long de l'année.

Références bibliographiques

- [1] Lemale, J. (2012). La Géothermie (2^e édition). DUNOD. ISBN 978-2-10-057238-0.
- [2] Zeitoun, W. (2024). [Etude des facteurs d'impact sur le fonctionnement et le rendement à long terme des systèmes géothermiques] [Thèse de doctorat, Université de Strasbourg]. Ecole Doctorale Mathématiques, Sciences de l'informatique et de l'ingénieur (ED269), Laboratoire ICube, Département Mécanique.
- [3] Oladunjoye, M. A., Sanuade, O. A., & Akinluyi, F. O. (2018). *Data on the thermal properties of soil and its moisture content*. Data in Brief, 17, 900–906. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.02.018>
- [4] Ouali, S., Khellaf, A., & Baddari, K. (2006). Étude des ressources géothermiques du Sud de l'Algérie. *Revue des Energies Renouvelables*, 9(4), 297–306
- [5] Takherist, D., & Hamdi, L. (1990). Thermal anomaly at In Salah: Possible consequences for petroleum potential. SONATRACH, Division Exploration.
- [6] <http://archi.climatic.free.fr/calculs/calculs.html>
- [7] Chenini, N., Nezli, I. E., Kaddour, A., Larguech, S., Kifouche, A., Avenyévh, D. M. S., & Menni, Y. (2026). Experimental analysis of soil thermal diffusivity for optimizing surface geothermal energy systems in arid environments. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 21(1), ctg046. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctg046>
- [8] Benhamza, M. E., Brima, A., Houda, S., & Serrir, L. (2014). Étude expérimentale et numérique d'un échangeur de chaleur air/sol horizontal. In *Proceedings of the 3rd International Seminar on New and Renewable Energies (SIENR 2014)*, Ghardaïa, Algeria.
- [9] Benhammou, M., & Draoui, B. (2011). Modélisation de la température en profondeur du sol pour la région d'Adrar : Effet de la nature du sol. *Revue des Energies Renouvelables*, 14(2), 219–228.
- [10] Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G. D., & Mathur, J. (2010). *Performance analysis of earth–air heat exchanger systems*. Elsevier *Energy and Buildings*, 42(5), 645–648. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.11.001>
- [11] Rouag, A., Benchabane, A., Labed, A., Belhadj, K., and Boultif, N. (2016). Applicability of a solar adsorption cooling machine in semiarid regions: proposal of supplementary cooler using earth-water heat exchanger, *International Journal of Heat and Technology*, 34(2), 281–286.
- [12] THIERS, S. & Bruno, P. (2007). Modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiments Journée thématique SFT-IBPSA Froid solaire et confort d'été 25 avril 2007. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Références bibliographiques

- [13] Belloufi, Y. (2012). Modélisation d'un échangeur air/sol dont le but de rafraîchissement des locaux," mémoire de master, Université Mohamed Khider, Biskra.
- [14] Xpair. (2016, 23 février). Le puits canadien : solution environnementale. Conseils Xpair.
https://conseils.xpair.com/consulter_parole_expert/puits_canadien_solution_environnementale.htm
- [15] Ferkous, K. (2021). Characterization and evaluation of solar radiation for the Ghardaïa site. Thèse de doctorat en automatisation appliquée et diagnostic industriel. Université Ziane Achour de Djelfa, Algérie.
- [16] Abdeladim, K., Razagui, A., Semaoui, S., Hadj Arab, A. (2020). Updating Algerian solar atlas using MEERA-2 data source. *Energy Reports*, 6 (Supplement 1), 281-287.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.08.057>
- [17] Sefrou, A., & Bettioui, M. (2023). Simulation Numérique de la Ventilation d'un Local, Université Aboubakr Belkaïd (Tlemcen), Mémoire de MASTER en Structures: Efficacité Energétique dans les Bâtiments de Construction. p74.
- [18] Alsayah, A. M., Alshukri, M. J., Ali, S., Faraj, J., & Khaled, M. (2025). Prediction of overall heat transfer coefficient in concentric tube heat exchangers using artificial neural networks: A comparative study with empirical correlations. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 163, 108723.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108723>
- [19] Baehr, H.D., & Stephan, K. (2006). *Heat Transfer*, second ed., Springer, Berlin.
- [20] Taler, D. (2016). A new heat transfer correlation for transition and turbulent fluid flow in tubes, *Int. J. Therm. Sci.* 108–122.
- [21] Dittus, F.W. (1930). Heat transfer in automobile radiators of the tubular type, *Univ. Calif. Pub., Eng.* 2 (13) 443–461.
- [22] Pethukov, B., Kirillov, V. (1958). The problem of heat exchange in the turbulent flow of liquids in tubes, *Teploenerg.* (4) 63–68.
- [23] Gnielinski, V. (1976). New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow, *Int. Chem. Eng.* 16 (2) 359–368.
- [24] Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (6th ed.). McGraw-Hill Education.



شعبة : هندسة ميكانيكية

تخصص : طاقات متجددة في الميكانيك

غرداية في : 2026/06/14

شهادة ترخيص بالتصحيح والاياداع:

انا الاستاذ(ة) : تهناه رضا

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ليسانس/ماستر/دكتورا) المعنونة بـ:

Étude expérimentale d'un système géothermique-solaire à faible profondeur pour le chauffage passif et le refroidissement en climat semi-aride.

من انجاز الطالب (الطالبة):

Sendjal Fouzi Ayoub

Sayah Ben Aissa Aïmen Abd Samad

التي نوقشت بتاريخ : 2026/06/14

اشهد ان الطالب/الطالبة قد قام /قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من

ذلك من طرفنا

وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

امضاء المسؤول عن التصحيح

TAHATAH Reda

4/11/2026

مصادقة رئيس القسم

رئيس قسم الآلية والكهروميكانيك

عزوي محمد

