

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
Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك
Département d'Automatique et Electromécanique

Mémoire de fin d'études, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Sciences et technologie

Filière : Énergie Renouvelable

Spécialité : Energie renouvelable en mécanique

Thème

Caractérisation avancée du sable désertique et évaluation de sa faisabilité comme matériau de stockage thermique

Présenté par :

AKIF Mohammed Oussama & HAMIDA Yacine

Soutenu publiquement en Juin 2026

**LAAMAYAD
TAHAR**

Maître de Conférences A Université de Ghardaïa Présidente

GAMA AMOR

**Directeur de Recherche UREAR / CDER -
Ghardaia Encadrant**

TAHTAH REDA

Maître de Conférences A Université de Ghardaïa Examineur

**BELAGHIT
ABDELHAKEM**

Maître de Conférences A Université de Ghardaïa Examineur

Devant le jury composé de :

Année universitaire 2025 / 2026

Remerciement

En préambule à ce mémoire nous remercions ALLAH, le tout puissant et miséricordieux qui nous aide et qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous adressons nos sincères remerciements et notre gratitude à tous ceux qui nous ont tendu une main secourable, de près ou de loin, pour mener à bien ce travail académique.

Nous tenons d'abord à remercier très chaleureusement Pr. GAMA Amor qui nous a permis de bénéficier de son encadrement. Les conseils qu'il nous a prodigué, la patience, la confiance qu'il nous a témoignés ont été déterminants dans la réalisation de notre travail de recherche.

Nous remercierons également le Directeur de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER, Ghardaïa), Dr DJAFER Djelloul ; qui nous a permis de réaliser ce travail au sein de l'URAER ainsi que pour son bon accueil.

Nous adressons également nos chaleureux remerciements à Melle Recioui Lobna, Dr. Essam Benabaha et M. Hamada Ahmed, pour leur accompagnement scientifique, leurs conseils avisés et leurs soutiens continus, car leur expérience exceptionnelle et leur vision profonde ont enrichi les horizons de notre réflexion et de notre esprit de recherches.

Nous adressons nos sincères remerciements et notre reconnaissance aux membres des jurys pour leur gentillesse à accepter l'évaluation de ce travail et pour leurs précieuses contributions, qui enrichiront sans aucun doute cette recherche.

Nous ne pouvons pas non plus manquer d'exprimer notre profonde gratitude à nos professeurs de la faculté des sciences et technologies de l'université de Ghardaïa, ainsi qu'aux responsables du master en énergies renouvelables, pour l'augmentation des connaissances et la formation scientifique qu'ils nous ont fournies tout au long de notre carrière académique.

À l'appui solide, à nos honorables familles et chers parents qui nous ont comblés de leurs prières, de leur amour et d'un soutien moral illimité, ainsi qu'à nos amis qui ont été les meilleurs compagnons sur le chemin de la connaissance ; à vous tous, nous dédions le fruit de cet effort, gage de loyauté et de reconnaissance.

RESUME

Cette étude porte sur la caractérisation expérimentale des propriétés thermo physiques de trois types de sable du désert prélevés dans les régions de Ghardaïa, Touggourt et El Oued, dans le but d'évaluer la possibilité de les utiliser comme matériaux pour stocker l'énergie thermique tangible. Une plateforme d'essais expérimentaux a été conçue et réalisée pour étudier le comportement thermique de différents échantillons. Le système se compose d'un réservoir cylindrique isolé thermiquement avec une résistance électrique située au centre du milieu de stockage. Les thermocouples de type K sont installés à 3 cm et 6 cm de la source de chaleur pour mesurer l'évolution de la température à l'aide d'une unité de mesure de données. Des expériences ont été menées pendant les phases de chauffage et de refroidissement afin d'analyser la réponse thermique des matériaux étudiés. Les résultats expérimentaux ont montré une convergence remarquable des performances thermiques et du comportement de transfert de chaleur entre les sables des régions de Ghardaïa et de Touggourt, avec une différence nette par rapport aux sables de la région du El Oued. Les échantillons de Ghardaïa ont montré et prédit un meilleur comportement thermique et une meilleure stabilité dans le stockage de chaleur, et la capacité thermique spécifique a été estimée sur la base des données expérimentales enregistrées. Ces résultats confirment le potentiel de l'utilisation du sable du désert comme matériau local facilement disponible et peu coûteux dans les applications de stockage d'énergie thermique au sein des systèmes d'énergie solaire

Mots-clés : stockage thermique, sable désertique, propriétés thermo-physiques, énergie solaire, capacité calorifique, banc expérimental.

ABSTRACT

This study deals with the experimental characterization of the thermophysical properties of three types of desert sand taken from the regions of Ghardaïa, Touggourt and El Oued, with the aim of evaluating the possibility of using them as materials for storing tangible thermal energy. An experimental test platform was designed and completed to study the thermal behavior of different samples. The system consists of a thermally insulated cylindrical tank with an electrical resistor located in the center of the storage medium. Type K thermocouples are installed 3 cm and 6 cm from the heat source to measure the temperature evolution using a data

measurement unit. Experiments were conducted during the heating and cooling phases to analyze the thermal response of the studied materials. The experimental results showed a remarkable convergence in thermal performance and heat transfer behavior between the sands of the Ghardaïa and Touggourt regions, with a clear difference compared to the sands of the El Oued region. Ghardaïa samples showed and predicted better thermal behavior and stability in heat storage, and the specific heat capacity was estimated based on the recorded experimental data. These results confirm the potential of using desert sand as a readily available and low-cost local material in thermal energy storage applications within solar energy systems

Keywords: thermal energy storage, desert sand, thermophysical properties, solar energy, specific heat capacity, experimental test bench.

ملخص

تتناول هذه الدراسة التوصيف التجريبي للخصائص الثرموفيزيائية لثلاثة أنواع من الرمال الصحراوية المأخوذة من مناطق غرداية وتوقرت والوادي بهدف تقييم إمكانية استخدامها كمادة لتخزين الطاقة الحرارية المحسوسة. تم تصميم وإنجاز منصة اختبار تجريبية لدراسة السلوك الحراري للعينات المختلفة. يتكون النظام من خزان أسطواني معزول حرارياً يحتوي على مقاومة كهربائية موضوعة في مركز الوسط التخزيني، كما تم تثبيت مزدوجي حرارة من نوع Type K على بعد 3 سم و 6 سم من مصدر الحرارة لقياس تطور درجة الحرارة باستخدام وحدة لقياس البيانات. أُجريت التجارب خلال مرحلتين التسخين والتبريد من أجل تحليل الاستجابة الحرارية للمواد المدروسة. أظهرت النتائج التجريبية تقارباً ملحوظاً في الأداء الحراري وسلوك انتقال الحرارة بين رمال منطقتي غرداية وتوقرت، مع وجود اختلاف واضح مقارنة برمال منطقة الوادي. وقد أظهرت عينات غرداية وتوقرت سلوكاً حرارياً وثباتاً أفضل في تخزين الحرارة، كما تم تقدير السعة الحرارية النوعية اعتماداً على البيانات التجريبية المسجلة. تؤكد هذه النتائج إمكانية استخدام الرمال الصحراوية كمادة محلية متوفرة ومنخفضة التكلفة في تطبيقات تخزين الطاقة الحرارية ضمن أنظمة الطاقة الشمسية

الكلمات المفتاحية: تخزين الطاقة الحرارية، الرمال الصحراوية، الخصائص الثرموفيزيائية،

الطاقة الشمسية، السعة الحرارية النوعية، منصة اختبار تجريبية.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vii
NOMENCLATURES	viii
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : État de l'Art sur le Stockage Thermique par Chaleur Sensible	3
I.1 Introduction	3
I.2 Les différents types de stockage :	3
I.2.1 Stockage par chaleur sensible :	4
I.2.2 Stockage par chaleur latente :	4
I.2.3 Stockage thermochimique :	6
I.2.4 Comparaison entre les différentes techniques de stockage thermique :	8
I.3 Le stockage sur lit de roche et sable :	8
I.3.1 Les Coûts :	9
I.3.2 L'abondance :	9
I.3.3 stabilité thermique :	9
I.4 Propriétés thermo physiques du sable :	9
I.4.1 Conductivité thermique :	9
I.4.2 Capacité calorifique :	10
I.4.3 Diffusivité thermique :	10
I.5. Travaux antérieurs :	10
I.5.1. Évolution du stockage par chaleur sensible :	10
I.5.2. Études sur les sables sahariens et le contexte algérien :	11
I.5.3.Synthèse et originalité de la thèse :	11
I.6 Conclusion	11
Chapitre II : Description du Dispositif Expérimental et Méthodologie	14
II.1 Introduction	14
II.2 Conception du banc d'essai :	14
II.2.1 Le récipient cylindrique :	14
II.2.2 L'isolation thermique :	15
II.3. Système de chauffage :	16
II.4 Instrumentation et mesures :	16
II.4.1 Positionnement des thermocouples :	16
II.4.2 Système d'acquisition de données :	17
II.5 Présentation des échantillons :	18

II.6 Conclusion :	20
Chapitre III : Résultats Expérimentaux et Discussion	21
III.1 Introduction	21
III.2. Propriétés thermo physiques du sable :	21
III.3. Tests de charge thermique :	23
III.3.1 Analyse de la phase de charge (Ghardaïa) :	24
III.3.2 Analyse de la phase de charge (Touggourt) :	26
<i>III.3.2.1 Propriétés thermo physiques du sable (Touggourt) :</i>	27
III.3.3 Analyse de la phase de charge (El Oued) :	27
<i>III.3.3.1 Propriétés thermo physiques du sable (el oued) :</i>	28
III.4. Tests de décharge (Refroidissement) :	29
III.5 Comparaison des performances :	31
III.5.1 Comparaison d'images des échantillons étudiés au microscope :	33
III.6 Conclusion	34
CONCLUSION GENERALE	36
BIBLIOGRAPHIE	37

LISTE DES FIGURES

Figure.1.1	Les différents types de stockage	04
Figure.1.2	Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente (solide/liquide)	05
Figure 1.3	Schéma de principe du stockage thermochimique	06
Figure 1.4	Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique	07
Figure 1.6	Schéma du système utilisé par les chercheurs chinois	11
Figure 2.1	réservoir cylindrique	15
Figure 2.2	Laine de verre	15
Figure 2.3	Laine de Roche	15
Figure 2.4	polyuréthane mousse	15
Figure 2.5	résistance à ailet	16
Figure 2.6	Positionnement des thermocouples	17
Figure 2.7	thermocouple type K	17
Figure 2.8	Agilant 34972A	17
Figure 2.9	Système d'acquisition de données	18
Figure 2.10	Échantillon de sable de Ghardaïa (6.9kg)	18
Figure 2.11	Échantillon de sable de Touggourt(6.4kg)	19
Figure 2.12	Échantillon de sable de El Oued(6.73kg)	19
Figure 3.1	phase de charge (Ghardaïa)	24
Figure 3.2	Température en fonction de logarithme du temps	26
Figure 3.3	phase de charge (Touggert)	26
Figure 3.4	Température en fonction de logarithme du temps (Touggert)	27
Figure 3.5	phase de charge (El Oued)	28
Figure 3.6	Température en fonction de logarithme du temps (el oued)	29
Figure 3.7	phase de décharge (Ghardaïa)	29
Figure 3.8	phase de décharge (Touggert)	31
Figure 3.9	phase de décharge (El oued)	32
Figure 3.10	Echantillons du sable de El Oued	34

Figure 3.11	Echantillons du sable de Touggert	34
Figure 3.12	Echantillons du sable de Ghardaïa	35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1.	Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur	8
Tableau II.1	Caractéristiques d'isolation.	16
Tableau II.2	la masse et la masse volumique de l'Échantillons.	19
Tableau III.1	Comparaison des propriétés du sable.	32

NOMENCLATURES

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
Q	Quantité de chaleur qui pénètre dans le matériau de stockage	<i>J</i>
Cp	Capacité calorifique spécifique	<i>J</i> <i>/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>

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le développement des sociétés modernes est étroitement lié à leur capacité de production, de conversion et de maîtrise de l'énergie. Dans ce contexte, les énergies renouvelables occupent aujourd'hui une place centrale en raison de leur durabilité, de leur faible impact environnemental et de leur rôle dans la transition énergétique mondiale. Parmi ces sources, l'énergie solaire constitue une ressource abondante, particulièrement dans les régions sahariennes telles que l'Algérie, où le potentiel d'irradiation solaire est parmi les plus élevés au monde.

L'énergie solaire peut être exploitée selon deux principales filières : le photovoltaïque et le solaire thermique. Le photovoltaïque, largement utilisé pour les applications de petite et moyenne puissance, présente cependant un rendement relativement limité. À l'inverse, le solaire thermique, notamment le solaire thermodynamique, permet d'atteindre des rendements plus élevés en convertissant le rayonnement solaire en énergie thermique, puis en énergie utile. Dans ce cadre, le stockage de l'énergie thermique constitue un enjeu majeur afin d'assurer une continuité d'exploitation et d'améliorer l'efficacité globale des systèmes solaires.

Le stockage thermique par chaleur sensible, basé sur l'élévation de température de matériaux solides, liquides ou granulaires, représente une solution simple, économique et adaptée aux conditions désertiques. Les matériaux granulaires tels que les sables désertiques constituent des candidats prometteurs grâce à leur disponibilité locale, leur faible coût et leur stabilité thermique. Toutefois, leurs performances thermo-physiques varient selon leur composition, leur granulométrie et leur origine géographique.

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude expérimentale et comparative de trois types de sable désertique issus des régions de Ghardaïa, Touggourt et El Oued, dans le but d'évaluer leurs propriétés thermo-physiques et leur aptitude au stockage thermique. Pour cela, un banc d'essai expérimental a été conçu et réalisé. Il est constitué d'un réservoir cylindrique thermiquement isolé contenant une résistance électrique de 750 W placée au centre, simulant une source de chaleur. Deux thermocouples de type K, positionnés à différentes distances de la source, permettent de suivre l'évolution temporelle des températures au sein du matériau.

L'analyse des résultats expérimentaux permet de comparer le comportement thermique des différents sables et d'évaluer leur capacité de stockage de chaleur, ainsi que leur réponse thermique dynamique.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux:

- Chapitre I : État de l’art sur le stockage thermique par chaleur sensible, présentant les principes fondamentaux, les matériaux de stockage et les applications dans les systèmes énergétiques.
- Chapitre II : Description du dispositif expérimental et méthodologie, détaillant le banc d’essai, les matériaux utilisés, les instruments de mesure et le protocole expérimental adopté.
- Chapitre III : Résultats expérimentaux et discussion, consacré à l’analyse des données, la comparaison des performances thermiques des différents sables et l’interprétation des résultats obtenus.

Enfin, une conclusion générale synthétise les principaux résultats de l’étude et propose des perspectives pour des travaux futurs dans le domaine du stockage thermique à base de matériaux locaux.

Chapitre I : État de l'Art sur le Stockage Thermique par Chaleur Sensible

Chapitre I : État de l'Art sur le Stockage Thermique par Chaleur Sensible

I.1 Introduction

Le stockage d'énergie thermique s'est imposé comme l'un des piliers fondamentaux de la transition énergétique, notamment pour compenser l'intermittence des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire. Parmi les différentes technologies disponibles, le stockage par chaleur sensible demeure la solution la plus mature et économiquement viable pour les applications à haute température.

L'objectif de ce chapitre est d'établir un état de l'art complet des connaissances actuelles relatives au stockage thermique. Nous commencerons par comparer les différents modes de stockage (sensible, latent et thermochimique) afin de positionner notre étude dans le paysage technologique actuel.

Une attention particulière sera portée au stockage thermique utilisant les roches et le sable, une solution qui suscite un intérêt croissant en raison de son faible coût, de son abondance naturelle et de sa grande stabilité thermique. Nous détaillerons ensuite les propriétés thermophysiques fondamentales (conductivité thermique, capacité calorifique et diffusivité thermique) qui régissent le comportement du sable en tant que matériau de stockage.

Enfin, ce chapitre présente une synthèse des travaux antérieurs réalisés par la communauté scientifique sur l'utilisation du sable du désert. Cette revue de littérature permettra de mettre en évidence les performances déjà observées et de justifier l'intérêt de caractériser des échantillons spécifiquement prélevés dans les régions d'El Oued, Touggourt et Ghardaïa.

I.2 Les différents types de stockage :

L'énergie thermique peut être conservée suivant trois types : soit en faisant varier la température d'un matériau (chaleur sensible), soit en utilisant l'énergie de sa transition de phase (chaleur latente), soit enfin par le biais de processus thermochimiques. [1]

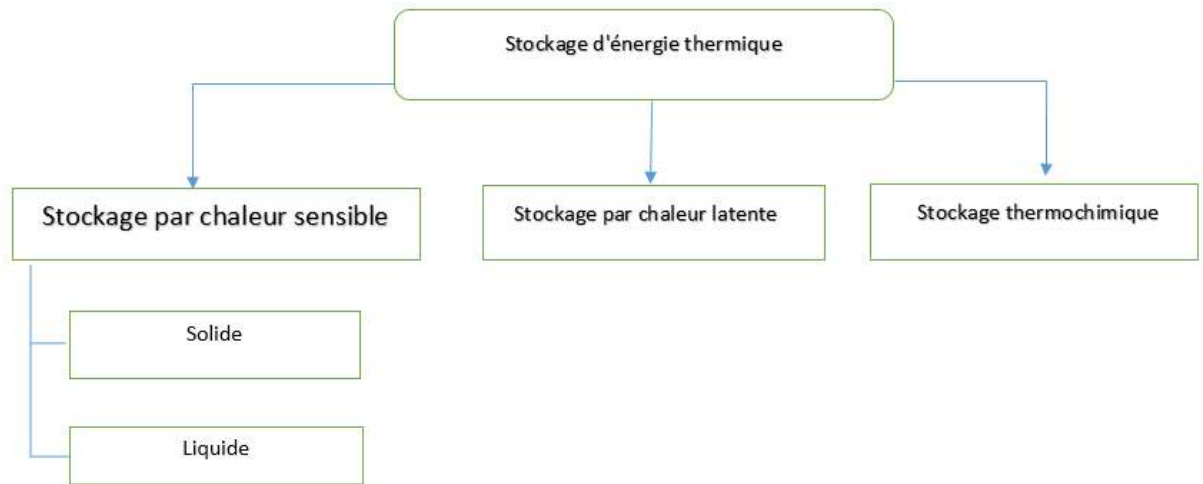


Figure I.1: Les différents types de stockage.

I.2.1 Stockage par chaleur sensible :

Le stockage de chaleur s'effectue en élevant la température d'un solide ou d'un liquide (comme l'eau, la roche ou le pétrole). C'est la méthode la plus simple et la plus avancée techniquement. Le stockage s'effectue selon la relation suivante :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot Cp \cdot dT = m \cdot Cp \cdot (T_f - T_i) \quad (I.1)$$

Avec :

- Q : Quantité de chaleur qui pénètre dans le matériau de stockage (Joules).
- m : Masse de matériau de stockage (kg).
- Cp : Capacité thermique spécifique du matériau (J/Kg. K).
- T_f : Température finale (°K).
- T_i : Température initiale (°K). [2]

I.2.2 Stockage par chaleur latente :

Pendant que les matériaux changent de phase, que ce soit du solide au liquide ou du liquide à la vapeur, il est possible de stocker l'énergie thermique de manière isotherme. Cela dépend de la chaleur latente, qui est une propriété du matériau lui-même, et de la quantité de matériau utilisée. Ce type de stockage peut être très efficace même pour des différences de température très faibles. Les matériaux utilisés pour cela sont appelés Matériaux à Changement de Phase, ou MCP pour les anglophones, qui signifie Change Phase Matérielle.

De nombreuses substances ont été étudiées pour leur potentiel en tant que matériaux à changement de phase, mais seuls quelques-uns sont commercialisés à cette fin.

Chapitre I : État de l'Art sur le Stockage Thermique par Chaleur

Lors de l'étape de charge, on fournit de l'énergie thermique au matériau, ce qui le fait chauffer, changer de phase et parfois même surchauffer. Cette énergie reste stockée à la température de charge. Lorsque l'on veut restituer l'énergie stockée, le matériau change à nouveau de phase et revient à son état initial. La Figure (1.2) illustre les différentes étapes d'un tel système de stockage.

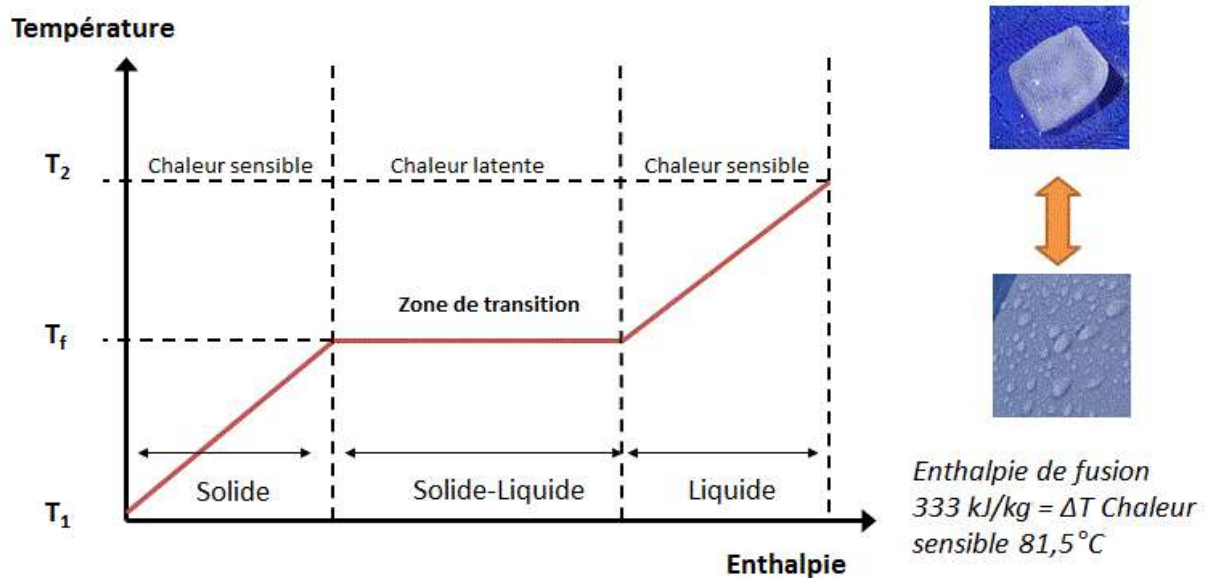


Figure I.2 : Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente (solide/liquide). [3]

La quantité d'énergie stockée dans le matériau à changement de phase est la somme de l'énergie sensible et de l'énergie latente suivant la relation (1.2). La majeure partie de l'énergie stockée est comprise dans l'enthalpie de changement de phase du matériau.

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot C_{p_s} \cdot dT + m \cdot \Delta L + \int_{T_i}^{T_f} m \cdot C_{p_l} \cdot dT \quad (I.2)$$

Avec :

- Q : est la quantité d'énergie stockée (J).
- m : est la masse du matériau de stockage (kg).
- C_{p_s} et C_{p_l} : sont respectivement les chaleurs spécifiques des matériaux solide et liquide (J/kg .K).
- ΔL : est l'enthalpie infinitésimale de changement de phase (J /kg).
- dT : est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K).

L'utilisation du stockage par chaleur latente présente plusieurs avantages. Elle permet de réduire les volumes de stockage nécessaires, contrairement au stockage par chaleur sensible.

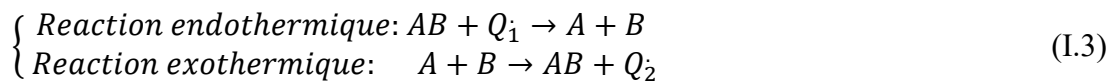
Chapitre I : État de l'Art sur le Stockage Thermique par Chaleur

De plus, elle offre des températures de travail isothermes, que ce soit lors de la charge ou de la décharge.

Cependant, cette approche présente également des défis. Les technologies utilisées pour le transfert de chaleur et la sélection des matériaux appropriés sont plus complexes. Des problèmes persistent, notamment la durée de vie limitée des produits qui se dégradent après plusieurs cycles de fusion et solidification. De plus, l'optimisation des transferts thermiques s'avère difficile. [4]

I.2.3 Stockage thermochimique :

Certaines réactions chimiques peuvent être inversées et cela peut être utile pour stocker de l'énergie sous forme thermique. Ce type de stockage est appelé stockage thermochimique. Le principe de base du stockage thermochimique est décrit par les équations. (I.3). [5]



Pour ce type de stockage, la réaction mise en jeu doit être totalement réversible afin que le procédé ne perde pas sa capacité de stockage au cours des cycles. Le schéma de principe du stockage de chaleur par voie thermochimique est présenté sur la figure 1.3.

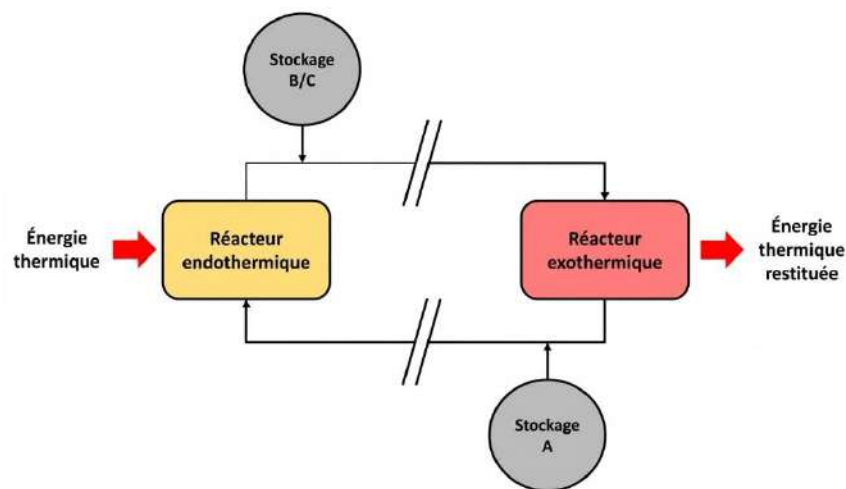


Figure 1.3. Schéma de principe du stockage thermochimique. [6]

Lors de l'étape de charge, la chaleur provenant d'une source, comme les rayons du soleil, permet de déclencher une réaction qui nécessite de l'énergie. Les résultats de cette réaction, notés A et B, sont ensuite séparés et conservés.

Chapitre I : État de l'Art sur le Stockage Thermique par Chaleur

Lorsque l'énergie thermique doit être restituée, les produits conservés, A et B, sont mélangés pour enclencher une réaction qui libère de la chaleur. Cette réaction est réversible, ce qui signifie qu'elle peut se répéter, et elle permet de récupérer la chaleur stockée tout en reformant le produit initial, noté AB.

La quantité d'énergie pouvant être stockée dans une réaction chimique dépend de deux facteurs principaux : l'énergie sensible des matériaux utilisés et la chaleur dégagée ou absorbée pendant la réaction.

La relation pour calculer la quantité d'énergie stockée est la suivante :

$$Q = \sum_{i=1}^N m_i \cdot C_{p_i} \cdot dT + n_A \Delta H_r \quad (I.4)$$

- E : est la quantité d'énergie stockée (J).
- n_A : est le nombre de moles du produit A (mol).
- ΔH_r : est l'enthalpie de la réaction (J/mol. A).
- Et la réaction chimique.

La sorption est bien adaptée pour stocker de la chaleur à basse température, environ 80°C. Le stockage thermochimique désigne deux phénomènes : la sorption

En revanche, pour des applications à haute température comme le solaire concentré, où les températures peuvent aller de 200 à 2000°C, les réactions chimiques de synthèse sont plus appropriées. [7]

La Figure I.4 montre comment les systèmes de stockage thermochimique peuvent être classés en fonction de ces deux phénomènes : la sorption et les réactions chimiques.

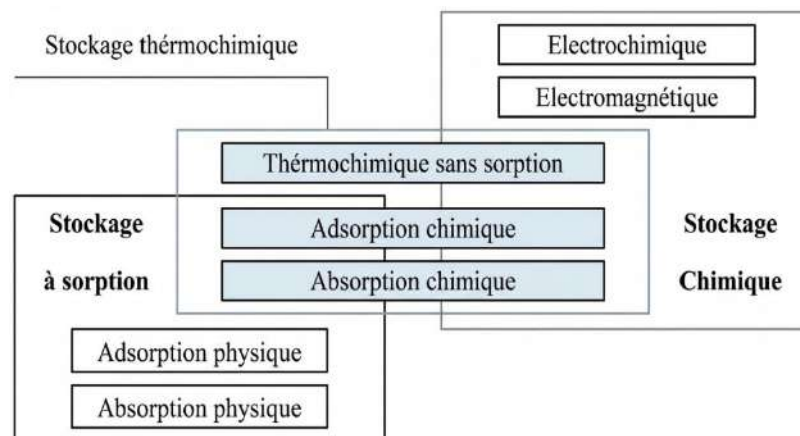


Figure 1.4. Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique. [8]

Chapitre I : État de l'Art sur le Stockage Thermique par Chaleur

I.2.4 Comparaison entre les différentes techniques de stockage thermique :

Le Tableau I.1 répertorie les caractéristiques des trois systèmes de stockage d'énergie Thermique présentée.

Tableau I.1. Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur. [9]

	Stockage par chaleur sensible	Stockage par chaleur latente	Stockage par voie thermochimique
Densité Volumétrique	Faible $\sim 15 - 60 \text{ kWh/m}^3$	Moyenne $\sim 50 - 100 \text{ kWh/m}^3$	Elevée $\sim 100 - 500 \text{ kWh/m}^3$
Énergétique Massique	Faible $\sim 0,02 - 0,03 \text{ kWh/kg}$	Moyenne $\sim 0,05 - 0,1 \text{ kWh/kg}$	Haute $\sim 0,5 - 1 \text{ kWh/kg}$
Température de stockage	Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge ou température ambiante
Durée de stockage	Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes thermiques)	Théoriquement illimitée
Transport de l'énergie	Faible distance	Faible distance	Distance théoriquement illimitée
Maturité	Echelle industrielle (20 MW)	Echelle pilote (100 kWh)	Echelle laboratoire (1-5 kWh)
Technologie	Simple	Moyenne	Complexe

1.3 Le stockage sur lit de roche et sable :

Le stockage d'énergie thermique dans des lits de sable ou de roches est une solution prometteuse pour valoriser les énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire thermique. Ce type de stockage repose sur la chaleur sensible accumulée dans des matériaux solides inertes, simples d'accès et peu coûteux.

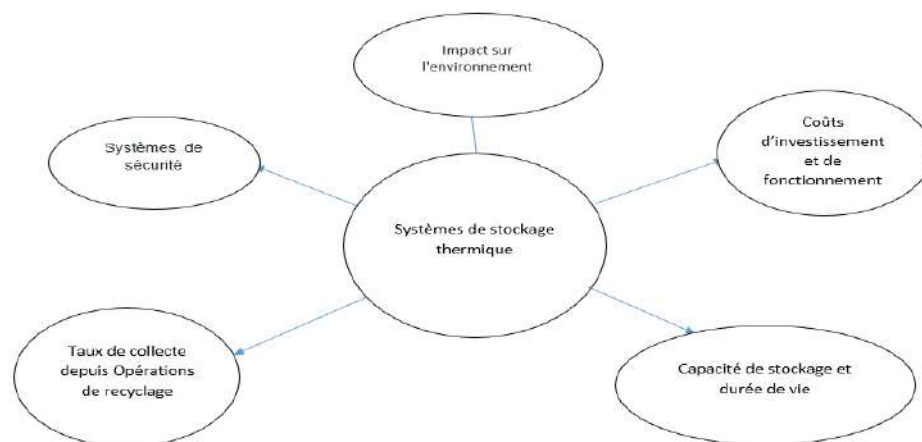


Figure I.5 : Critères de sélection d'un système de stockage thermique. [10]

I.3.1 Les Coûts :

- Le sable et les roches sont des matériaux bon marché et largement disponibles localement, ce qui réduit considérablement l'investissement initial du système de stockage.
- La simplicité de la conception (réservoirs ou cuves en béton ou acier) limite également les coûts de fabrication et de maintenance par rapport aux systèmes à base de fluides complexes ou de batteries électrochimiques. [11]

I.3.2 L'abondance :

Le sable ainsi que les roches naturelles se trouvent en grande quantité dans les zones désertiques et semi-arides, ce qui facilite leur utilisation dans les projets de stockage thermique sans nécessiter d'importations coûteuses. Cette disponibilité renforce la durabilité du système et diminue la dépendance aux matériaux industriels sophistiqués souvent importés. [12]

I.3.3 stabilité thermique :

Les lits de sable ou de roches présentent une bonne inertie thermique et supportent de nombreux cycles de chauffage et de refroidissement, avec une dégradation minimale des propriétés thermique contrairement aux fluides thermiques, ces matériaux solides ne présentent pas de risques de fuite, de corrosion importante ou de dégradation chimique, ce qui améliore la fiabilité et la durée de vie du système. [13]

I.4 Propriétés thermo physiques du sable :

Les coefficients thermiques que nous prenons en compte dans ce cas incluent la capacité thermique, la conductivité thermique et la diffusivité thermique. L'importance des différentes propriétés du type de fluide est considérée : dans un fluide granulaire, qui est un fluide complexe et multiphasique, on utilise un fluide différent de celui utilisé dans un fluide homogène. C'est pourquoi nous introduisons la notion de coefficients thermiques équivalents. Il s'agit de grandeurs globales affiliées à un groupe de travail homogène, représentant un fluide granulaire réel, et est considéré comme faisant partie de tous ses constituants dans les principes de la structure de l'organisation. [14]

I.4.1 Conductivité thermique :

L'évaluation de la conductivité thermique équivalente d'un milieu granulaire est bien plus complexe. Elle dépend non seulement des propriétés physiques et des proportions des composants du milieu, mais aussi de sa géométrie d'empilement, décrite par de nombreux paramètres souvent difficiles à mesurer ou à contrôler. Plusieurs modèles ont été proposés pour

Chapitre I : État de l'Art sur le Stockage Thermique par Chaleur

déterminer cette conductivité thermique équivalente. Ces modèles considèrent généralement le milieu comme un ensemble homogène de phases solides. Tous ces modèles reposent sur l'idée que la conductivité thermique équivalente d'un milieu hétérogène se situe entre la valeur calculée pour un milieu à couches parallèles et la valeur simulée pour un milieu à couches séquentielles.

La conductivité thermique du sable sec est relativement faible (environ 0,2 à 2 $W/m \cdot K$), ce qui limite les pertes thermiques. [15]

$$\frac{1}{\frac{\varepsilon}{\lambda_f} + \frac{1-\varepsilon}{\lambda_s}} < \lambda_{eq} < \varepsilon\lambda_f + (1-\varepsilon)\lambda_s \quad (I.5)$$

I.4.2 Capacité calorifique :

C'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un objet d'un degré Celsius (ou un Kelvin). Il exprime la mesure dans laquelle une substance résiste à un changement de sa température lorsque l'énergie est gagnée ou perdue.

$$(\rho C_p)_{eq} = \varepsilon(\rho C_p)_f + (1-\varepsilon)(\rho C_p)_s \quad (I.6)$$

I.4.3 Diffusivité thermique :

La conductivité thermique du sable est une propriété fondamentale qui mesure la vitesse de diffusion de la chaleur dans ce matériau granulaire. Elle est calculée à l'aide de l'équation

$$\alpha = \lambda / (\rho \times C_p) \quad (I.7)$$

Avec :

- λ est La conductivité thermique ($W/m \cdot K$)
- ρ est la masse volumique (kg/m^3)
- C_p est la chaleur spécifique ($J/kg \cdot K$) [16]

I.5. Travaux antérieurs :

I.5.1. Évolution du stockage par chaleur sensible :

Historiquement, le stockage thermique par chaleur sensible a fait l'objet de nombreuses recherches visant à utiliser des matériaux solides économiques tels que les roches, les céramiques et le béton. Les travaux pionniers ont démontré que bien que ces matériaux offrent

Chapitre I : État de l'Art sur le Stockage Thermique par Chaleur

une excellente stabilité à haute température, ils souffrent souvent de problèmes de fissuration sous l'effet des cycles thermiques répétés, ou de coûts de mise en œuvre élevés. C'est ainsi que l'intérêt scientifique s'est progressivement orienté vers l'utilisation du sable naturel comme milieu de stockage granulaire, particulièrement adapté aux technologies solaires à concentration (CSP) et aux systèmes à lits fixes ou fluidisés. [17] [18]

I.5.2. Études sur les sables sahariens et le contexte algérien :

Récemment, la valorisation des ressources locales du Sahara algérien a suscité un intérêt croissant à l'échelle internationale et nationale. L'étude menée par Benrokia, Asnour et Zeghib (2021) a analysé spécifiquement la pertinence du sable saharien comme matériau de stockage thermique pour les centrales solaires, confirmant ses excellentes propriétés thermo-physiques et sa stabilité face aux cycles thermiques. De même, les travaux de Skhiri ont exploré la caractérisation expérimentale de sables du désert pour des applications à haute température, validant l'aptitude de ces matériaux à stabiliser la restitution d'énergie. Cependant, la majorité de ces travaux antérieurs se sont limités soit à des caractérisations physico-chimiques isolées en laboratoire, soit à des modélisations numériques, sans confrontation expérimentale simultanée de plusieurs variétés locales (comme celles d'El Oued ou de Touggourt) sur un même banc d'essai standardisé. [19] [20]

I.5.3. Synthèse et originalité de la thèse :

Bien que le potentiel du sable du désert soit scientifiquement reconnu, la littérature actuelle présente un manque de données comparatives directes et purement expérimentales entre les sables de différentes régions d'un même écosystème saharien soumis aux mêmes contraintes opérationnelles.

L'originalité de ce travail : Contrairement aux approches théoriques ou limitées à une seule région dans la littérature, cette thèse propose une démarche comparative concrète en concevant une plateforme expérimentale dédiée. Ce banc d'essai permettra de tester simultanément, sous un protocole standardisé, trois sables spécifiques (El Oued, Touggourt et Ghardaïa). L'objectif est de mesurer précisément leur cinétique de chauffe, leur uniformité thermique spatiale et leur taux de rétention d'énergie, comblant ainsi un vide scientifique crucial pour le déploiement à grande échelle du stockage solaire thermique en Algérie

I.6 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, il apparaît clairement que le stockage d'énergie thermique au moyen de chaleur sensible représente une solution stratégique prometteuse pour relever les

Chapitre I : État de l'Art sur le Stockage Thermique par Chaleur

défis de la fluctuation de l'énergie solaire, en raison de sa simplicité technique et de sa grande faisabilité économique. Grâce à notre examen des différentes méthodes de stockage, le sable est devenu un support de stockage idéal, non seulement pour la disponibilité abondante de sa matière première dans les zones désertiques, mais aussi pour sa stabilité thermique à haute température et son faible coût par rapport à d'autres matériaux. L'analyse des propriétés thermophysiques (telles que la convection et la diffusion thermique) nous a permis de comprendre les mécanismes complexes qui contrôlent le transfert de chaleur dans les milieux poreux, une étape essentielle pour estimer l'efficacité de tout futur système de stockage. L'examen scientifique des études précédentes a également montré que l'utilisation du sable du désert algérien reste un terrain fertile pour la recherche, car les propriétés thermiques varient en fonction de la situation géographique et de la composition granulaire. Sur la base de ces données théoriques, il est urgent de passer du côté descriptif au côté appliqué. C'est ce sur quoi nous nous concentrerons dans le deuxième chapitre, où nous passerons à la description de l'aspect expérimental et de la méthodologie de travail suivie pour mesurer avec précision ces propriétés d'échantillons sélectionnés de Sables (El Oued, Touggourt, Ghardaïa) afin de vérifier leur adéquation en tant que supports de stockage efficaces dans les systèmes énergétiques.

Chapitre II : Description du Dispositif Expérimental et Méthodologie

Chapitre II : Description du Dispositif Expérimental et Méthodologie

II.1 Introduction

Ce chapitre présente en détail la préparation expérimentale de cette étude ainsi que la méthodologie employée pour caractériser les propriétés thermiques du sable. Il décrit la conception du banc d'essai, en précisant la géométrie du récipient cylindrique et les dispositifs d'étanchéité mis en place, ainsi que les matériaux isolants utilisés pour limiter les pertes de chaleur vers l'environnement. Ensuite, il détaille le système de chauffage, basé sur une résistance électrique centrale, en évoquant sa capacité, sa configuration et la méthode de contrôle appliquée. Le chapitre expose également les instruments utilisés, notamment les emplacements des thermocouples pour établir une cartographie précise des températures dans la couche de sable, ainsi que le système de collecte des données. Enfin, il présente les échantillons de sable (El Oued, Touggourt, Ghardaïa) en précisant leur origine géographique, les méthodes d'échantillonnage et les préparations réalisées avant les essais. Cette description garantit la clarté des conditions expérimentales et la fiabilité des résultats obtenus.

II.2 Conception du banc d'essai :

II.2.1 Le récipient cylindrique :

Un réservoir cylindrique a été sélectionné pour abriter les échantillons de sable, garantissant une distribution uniforme de la chaleur et réduisant les pertes thermiques. Ce dispositif possède les dimensions suivantes :

- Hauteur (H) : 24 cm
- Diamètre (D) : 15,5 cm

Pour assurer la sécurité du processus expérimental et prévenir toute fuite de sable ou perte de masse durant la dilatation thermique, le réservoir a été renforcé par une ceinture d'étanchéité spécialement conçu pour garantir une fermeture hermétique et un maintien solide, assurant ainsi la stabilité du dispositif pendant les phases de chauffage et de refroidissement.



Figure II.1: Conception mécanique du Réservoir cylindrique.

II.2.2 L'isolation thermique :

Pour assurer que l'expérience soit la plus proche possible des conditions adiabatiques c'est-à-dire pour réduire au minimum les échanges thermiques avec l'environnement extérieur, un système d'isolation composite de haute performance a été instauré. Ce système se compose de trois couches principales (Couche de mousse, Laine de roche et laine de verre).

Les matériaux employés pour l'isolation se caractérisent par leur faible conductivité thermique et leur stabilité face à la chaleur. La laine de roche peut résister à des températures allant de 600 à 700°C, la laine de verre entre 250 à 400°C, tandis que la mousse isolante a une résistance plus limitée, se situant approximativement entre 100 à 140°C. Ces caractéristiques contribuent à réduire efficacement les pertes thermiques et à optimiser le confinement de la chaleur dans le réservoir expérimental. [21]



Figure II.2 : Laine de verre.



Figure II.3 : Laine de Roche.



Figure II.4: polyuréthane mousse.

Tableau II.1 : Caractéristiques du matériau d'isolation

	Conductivité thermique [W/(m.k)]	Masse volumique (kg/m^3)	Température maximale (°c)
La mousse	0,025 - 0,035	30 – 45	100 et 140
Laine de roche	0,035 - 0,045	70 - 140	600 à 700
Laine de verre	0,032 - 0,040	15 – 25	250 et 400

II.3. Système de chauffage :

Dans notre expérience de chauffage des échantillons de sable, nous avons utilisé une résistance électrique centrale. La résistance électrique est placée au centre géométrique du cylindre pour assurer la propagation radiale de la chaleur du centre vers les côtés.

Caractéristiques de la résistance électrique centrale :

- Longueur (L) = 22cm.
- Résistance (R) = 66.9 Ω .
- Courant (I) = 3.66A.
- Tension (U) = 225V.
- Puissance (P) = 750W.



Figure II.5 : Résistance à ailette.

II.4 Instrumentation et mesures :

II.4.1 Positionnement des thermocouples :

Le thermocouple de type K est le plus répandu aujourd'hui. Ces thermocouples sont principalement conçus pour mesurer les températures générales dans la plupart des environnements courants. Leur température de fonctionnement continue maximale est d'environ 1100°C, mais au-delà de 800°C, l'oxydation provoque une déviation du capteur, qui

dépasse progressivement sa plage de température de fonctionnement. Ils peuvent toutefois être utilisés pendant de courtes périodes jusqu'à 1200°C.

Les capteurs thermiques sont positionnés à intervalles de 3 cm et 6 cm du centre, ce qui garantit un placement précis à l'intérieur du boîtier isolé. [22]

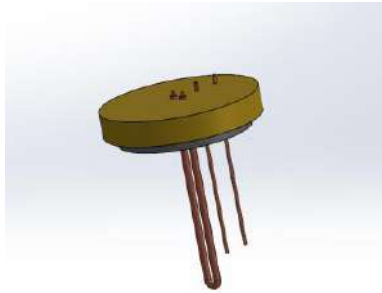


Figure II.6 : Positionnement des thermocouples.



Figure II.7 : Thermocouple type K.

II.4.2 Système d'acquisition de données :

Après avoir placé les deux thermocouples aux emplacements mentionnés, ils sont connectés à une unité d'acquisition de donnée d'enregistrement de données (Agilent 34972A) connecté à un ordinateur pour surveiller les changements de température en temps réel.



Figure II.8: Unité d'acquisition de donnée de type Agilent 34972A.



Figure II.9: La chaîne d'acquisition de donnée.

II.5 Présentation des échantillons :

Les échantillons de sable utilisés dans cette étude proviennent de trois régions désertiques distinctes, ce qui permet de comparer les propriétés thermiques de sables issus d'environnements géologiques légèrement différents, tout en préservant leurs caractéristiques au sein d'un environnement granulaire naturel Voir les Figures ci-dessous.



Figure II.10: Échantillon de sable de Ghardaïa (6.6kg).



Figure II.11: Échantillon de sable de Touggourt (6.4kg).



Figure II.12: Échantillon de sable de El Oued (6.73kg)

Tableau II.2 : la masse et la masse volumique de l'Échantillons.

	m(kg)	$\rho((\text{kg}/\text{m}^3)$
Ghardaïa	6.61	1523.4
Touggourt	6.4	1509.79
El Oued	6.73	1587.63

Chaque expérience a été réalisée pratiquement selon les étapes séquentielles suivantes :

Étape 1 (remplissage et préparation) : le récipient est rempli de sable en utilisant un processus de remplissage contrôlé (compression) pour atteindre une densité sèche spécifique, qui assure une porosité constante (n) de tous les échantillons.

Étape 2 (stabilisation initiale) : l'échantillon est laissé suffisamment longtemps pour que sa température se stabilise et uniformément répartie dans tout le récipient (équilibre thermique).

Étape 3 (chauffage et mesure) : l'appareil de mesure de la résistance électrique est allumé avec une tension constante.

Le récepteur commence à enregistrer l'élévation de température en deux points (r_1 , r_2) en fonction du temps ($T = f(t)$).

Étape 4. Traitement des données : à partir des résultats obtenus (courbes thermiques), la solution analytique de l'équation thermique en coordonnées cylindriques est appliquée pour déduire ce qui suit : Conductivité thermique (λ): en analysant la pente de la courbe d'élévation de température avec le logarithme du temps. Diffusivité thermique (α): en étudiant la différence de temps d'arrivée de la vague de chaleur entre le premier et le deuxième capteur. Capacité calorifique (C_p).

II.6 Conclusion :

Ce deuxième chapitre a permis de révéler avec précision l'environnement expérimental conçu pour cette étude. La rigueur introduite dans la conception du banc d'essai, notamment par le choix des matériaux isolants et l'amélioration de l'étanchéité du récipient cylindrique, constitue la base de la fiabilité de nos futures mesures. L'intégration d'un système de chauffage contrôlé, couplé à une cartographie thermique précise par thermocouples, assure une surveillance précise des processus de transfert de chaleur dans les milieux granulaires. Enfin, la sélection et la préparation minutieuses des échantillons de sable des zones de Wadi et Touggourt et Ghardaïa permettent de consolider ce travail en une réalité géographique et physique concrète. La portée de ce dispositif et la méthodologie spécifiée nous permettent désormais d'aborder la phase expérimentale en toute confiance. Par conséquent, le prochain chapitre sera consacré à la présentation, à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus pour chacun des types de sable étudié.

Chapitre III : Résultats Expérimentaux et Discussion

Chapitre III : Résultats Expérimentaux et Discussion

III.1 Introduction

Cette partie présente et analyse les résultats obtenus lors des essais expérimentaux de charge et décharge thermiques réalisés sur différents échantillons de sable prélevés dans les régions d'El Oued, Touggourt et Ghardaïa. L'objectif principal est d'évaluer leur comportement thermique afin de déterminer leur aptitude au stockage de chaleur, en fonction de l'évolution de la température dans le temps. L'analyse est organisée en trois parties. Tout d'abord, les tests de convection permettent d'étudier la température élevée du sable et de comparer sa capacité à absorber l'énergie thermique. Ensuite, les tests de décharge mettent en évidence son inertie thermique et sa capacité à restituer progressivement la chaleur accumulée. Enfin, une comparaison scientifique des performances entre les trois Sables permet de déterminer l'échantillon le plus performant pour une application potentielle en stockage thermique. Cette discussion vise à relier les observations expérimentales aux propriétés thermo physiques des matériaux, en particulier la conductivité, la diffusivité et la capacité calorifique, afin de mieux comprendre l'influence de l'origine géographique du sable sur son comportement de stockage d'énergie.

III.2. Propriétés thermo physiques du sable :

L'identification des caractéristiques thermiques des matériaux, en particulier le coefficient de conductivité thermique (λ), est crucial dans le domaine de l'ingénierie géotechnique et pour les applications de l'énergie géothermique. Mesurer ces propriétés dans des environnements naturels comme le sol, en conditions stables (état stationnaire), est difficile. C'est pourquoi le test de réponse thermique (TRT) s'appuie sur le modèle de source linéaire infinie. Ce modèle repose mathématiquement sur la résolution transitoire de l'équation de Fourier pour la conductivité thermique, utilisant la fonction d'intégration exponentielle (Ei) formulée par Euler, qui exprime une série infinie reliant les variations de température au temps. Ce modèle se distingue par sa capacité à transformer un comportement thermique complexe et initialement non linéaire en une relation linéaire simple dans le domaine logarithmique du temps. Cette transformation est à la fois une simplification mathématique et une méthode technique permettant d'isoler les propriétés intrinsèques du matériau des perturbations

Chapitre III : Résultats Expérimentaux et Discussion

mineures, facilitant ainsi la détermination précise du coefficient de conductivité thermique en calculant la pente de la droite obtenue.

À partir de la loi de Fourier et de l'équation de la conductivité thermique en coordonnées cylindriques :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} r \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III.1})$$

En se basant sur l'approche mathématique développée par le chercheur, l'équation différentielle (III.1) a été transformée en une formule intégrale, que nous résumons dans l'équation (III.2) . [23]

$$T = \frac{q'}{4\pi\lambda} \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (\text{III.2})$$

La méthode est basée sur la résolution de l'équation de conduction thermique transitoire en coordonnées cylindriques d'une source de chaleur longitudinale infinie. Elle est exprimée comme un changement dans la température (T) à une distance radiale (r) et le Temps (t) à l'aide de la fonction d'intégration exponentielle $Ei(u)$ qui est délogé par séquentielle Euler infini :

$$Ei(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx = -\gamma - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \dots \quad (\text{III.3})$$

Où est-ce :

$\gamma = 0.5772$: Est la constante d'Euler-Mascheroni.

$u = \frac{r^2}{4.\alpha.t}$: Une variable qui relie la Distance (r) et le temps (t).

Quand il n'y a plus de temps (t), devient la valeur de (u) est très faible, ce qui permet à la négligence de la limite supérieure en séquentiel d'Euler ($u . u^2 . u^3 \dots$).

$$Ei\left(u \Rightarrow \frac{1}{u}\right) \approx \ln\left(\frac{1}{u}\right) - 0.5772 \quad (\text{III.4})$$

Au début du chauffage, la courbe de chaleur dans le temps (T vs t) apparaît courbe (Non linéaire), où les changements thermiques sont rapides et instables (Phase transitoire).

Cette simplification transforme la fonction de sa forme exponentielle complexe en une forme logarithmique linéaire. En traçant T versus $\ln(t)$, on passe de l'étude d'une courbe de

Chapitre III : Résultats Expérimentaux et Discussion

croissance à l'étude d'une ligne droite, puisque cette ligne représente l'étape de stabilité thermique quasi-stable.

$$T(t) - T_i = \frac{q'}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} \right) - 0.5772 \right] \quad (\text{III.5})$$

$$\Delta T = \frac{q'}{4\pi\lambda} \cdot \ln(t) + \frac{q'}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha}{r^2} \right) - 0.5772 \right] \quad (\text{III.6})$$

Calcul de la pente d'une droite (S) : Deux points ($\ln t_1, T_1$) et ($\ln t_2, T_2$) sont choisis sur la partie droite de la courbe, et la pente est calculée à l'aide de la formule :

La Pente :

$$S = \frac{T_2 - T_1}{\ln(t_2) - \ln(t_1)} \quad (\text{III.7})$$

Conductivité thermique :

$$\lambda = \frac{q'}{4\pi S} \quad (\text{III.8})$$

Diffusivité thermique :

$$\alpha = \frac{r_2^2 - r_1^2}{4 \cdot \Delta t \cdot \ln(t_2/t_1)} \quad (\text{III.9})$$

La masse volumique :

$$\rho = \frac{m}{r^2 \cdot \pi \cdot L} \quad (\text{III.10})$$

Capacité calorifique :

$$Cp = \frac{\lambda}{\alpha \cdot \rho} \quad (\text{III.11})$$

III.3. Tests de charge thermique :

La méthodologie expérimentale de ce travail était basée sur une norme unifiée pour ajuster le processus de chauffage, où un plafond thermique a été fixé à 300°C pour le premier capteur en tant que signal pour déconnecter la source de chaleur et démarrer la phase de surveillance de la réponse transitoire.

Cependant, en raison des caractéristiques du sable de la région de Ghardaïa, ce plafond a été exceptionnellement relevé à 384°C pour garantir que le stade de stabilité thermique suffisant pour l'analyse a été atteint.

Malgré cette variabilité des conditions de fonctionnement, le modèle de source linéaire reste applicable dans les deux cas, car la preuve de la séquence logarithmique dépend essentiellement de la pente de la courbe en phase de linéaire, et non de la valeur absolue de la

température maximale. Ainsi, la différence de température de coupe n'affecte pas la précision de la dérivation du coefficient de conductivité thermique (λ), mais nous donne plutôt une vision plus large du comportement du matériau sous des contraintes thermiques variables.

III.3.1 Analyse de la phase de charge (Ghardaïa) :

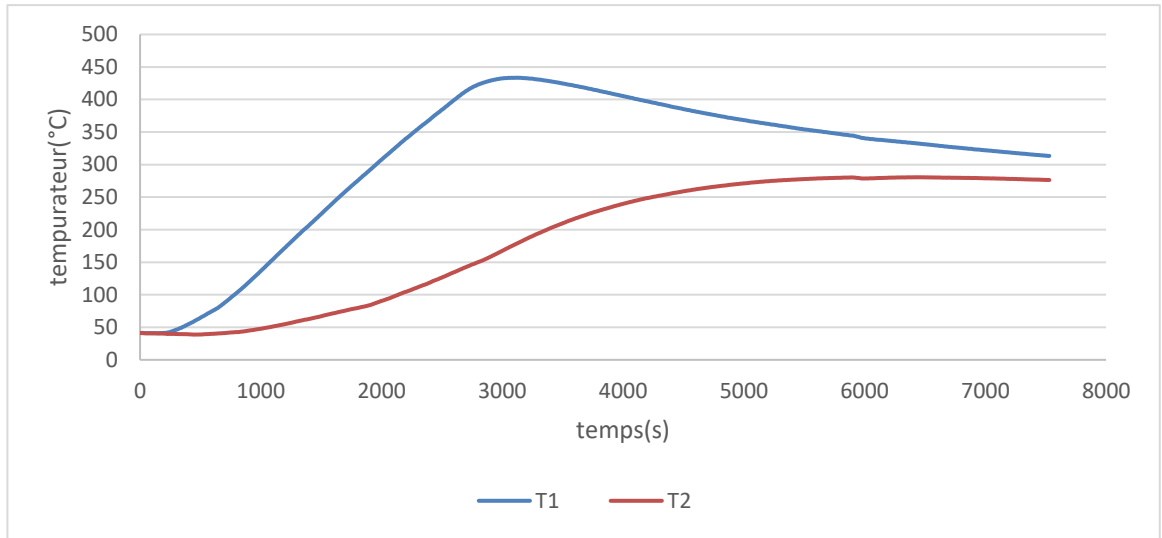


Figure III.1: Phase de charge (Ghardaïa).

Commentaire général et discussion :

La courbe illustre l'évolution de la température au fil du temps à deux points distincts de l'échantillon de sable de Ghardaïa (T_1 à 3 cm et T_2 à 6 cm de la source de chaleur). Son comportement se divise en deux phases principales, Première phase : Phase de chauffage actif (0 à 41 minutes). Point sensible T_1 (proche) : On constate une réponse très rapide et une forte élévation de la température, passant de 41°C à 384°C au moment de la déconnexion de la source. Cette augmentation notable témoigne d'une forte absorption d'énergie thermique par les couches adjacentes.

- Point sensible T_2 (éloigné) : La réponse est plus lente et la pente de la courbe est moins abrupte, la température n'atteignant que 126°C à la minute 41.
- La différence significative entre T_1 et T_2 (environ 258°C) lors de l'arrêt du chauffage suggère que le sable agit initialement comme un isolant thermique relatif, la chaleur nécessitant un certain temps pour se diffuser à travers les interstices entre les grains.
- Pic de température et phase d'inertie (après 41 minutes). Cette section constitue l'élément le plus crucial de l'analyse, car on constate une augmentation continue de la température malgré l'interruption de la source : le phénomène d'inertie thermique.

Chapitre III : Résultats Expérimentaux et Discussion

- Concernant le capteur T_1 : la température a continué de croître pendant 11 minutes supplémentaires après l'arrêt de l'appareil, atteignant un maximum de 433°C aux 52 minutes.
- Pour le capteur T_2 : l'augmentation s'est prolongée sur une période très étendue (56 minutes supplémentaires après l'arrêt de l'appareil), atteignant un maximum de 280°C aux 97 minutes.
- L'augmentation persistante de la température après l'interruption de la source démontre que le sable agit comme un excellent « réservoir » ; la chaleur captée par les couches superficielles a continué à se diffuser en profondeur par conduction.
- Propagation de l'onde thermique : L'intervalle temporel entre le pic T_1 (minute 52) et le pic T_2 (minute 97), évalué à 45 minutes pour une distance de seulement 3cm, illustre la faible conductivité thermique du sable, une caractéristique bénéfique pour le stockage de chaleur à long terme (accumulation thermique).
- Gradient thermique : La courbe montre un gradient thermique prononcé, ce qui est habituel pour les milieux granulaires. La porosité entre les grains de sable ralentit le processus de charge, tout en augmentant la capacité de rétention de chaleur.

III.3.1.1 Propriétés thermo-physiques du sable (Ghardaïa):

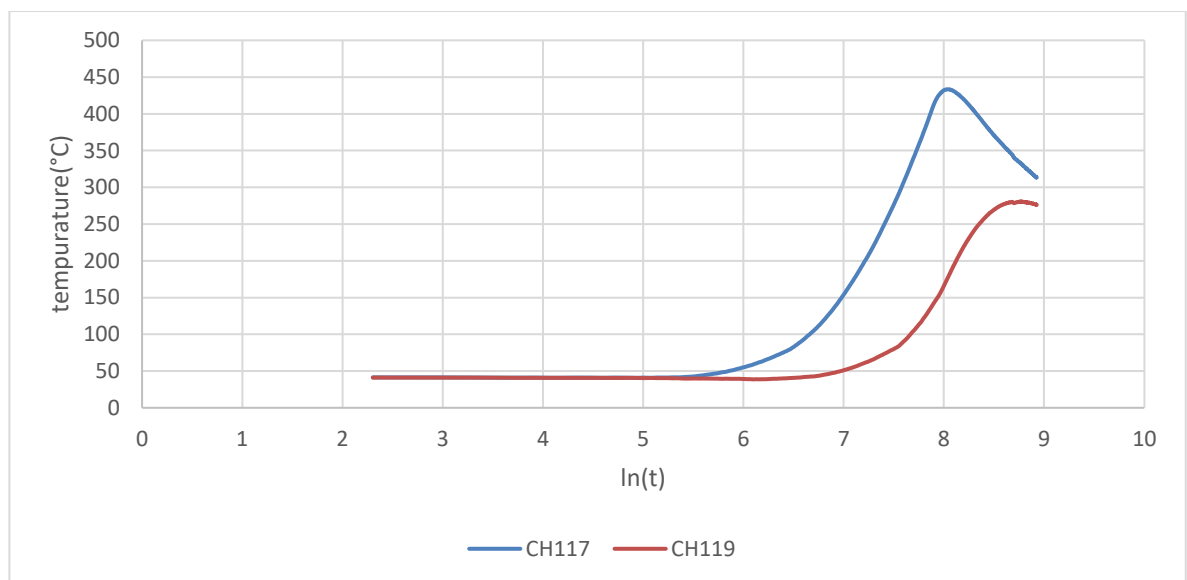


Figure III.2 : Température en fonction de logarithme du temps (Ghardaïa).

- | | |
|----------------------------|--|
| – La pente : | $S = 301.84$ |
| – Conductivité thermique : | $\lambda = 0.82 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ |
| – Diffusivité thermique : | $\alpha = 4,89845 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| – La masse volumique : | $\rho = 1523.4 \text{ kg/m}^3$ |
| – Capacité calorifique : | $Cp = 1051.287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ |

III.3.2 Analyse de la phase de charge (Touggourt) :

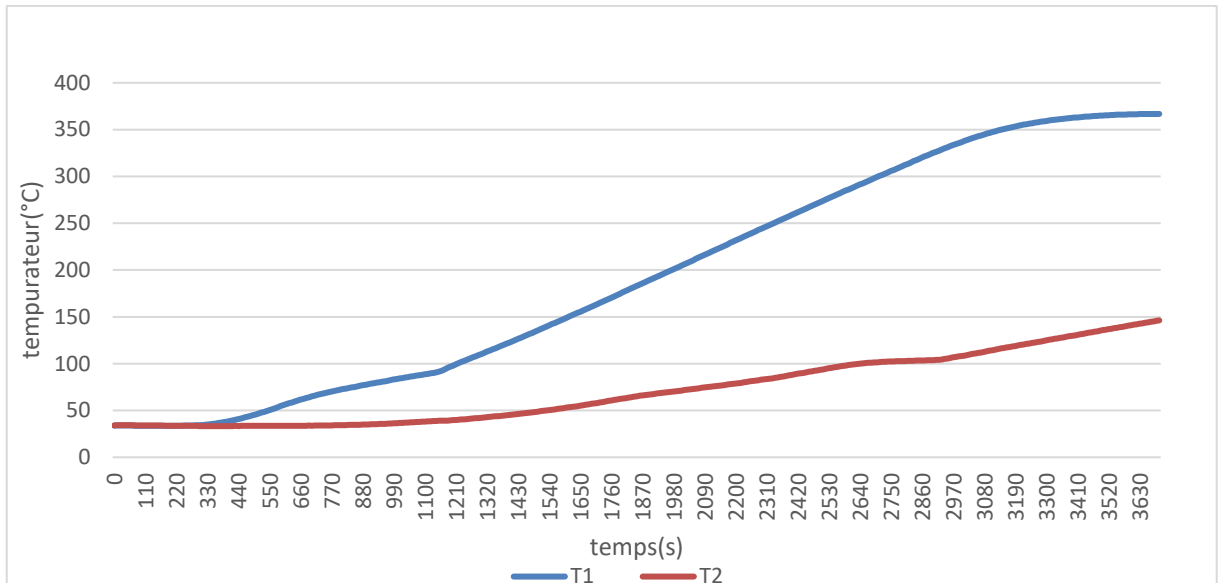


Figure III.3: Phase de charge (Touggourt).

Commentaire général et discussion :

Le processus de chauffage dans cet échantillon a duré plus longtemps (62 minutes), ce qui nous a permis d'observer l'interaction du sable avec l'énergie pendant une longue période.

- On remarque que la courbe T_2 (point éloigné) a considérablement augmenté, atteignant 101°C le temps de coupure du chauffage, contre seulement 50°C dans l'échantillon précédent. Cela indique que le sable de Touggourt a une perméabilité thermique élevée, ce qui permet de transférer la chaleur plus rapidement du centre vers la périphérie.
- Bien que la différence entre T_1 et T_2 soit toujours présente, leur convergence en fin de phase de charge reflète une meilleure homogénéité thermique au sein de cet échantillon.
- Le phénomène de la "vague de chaleur" et le pic maximum après l'interruption de la source aux 45 minutes : la température dans les deux courbes a continué d'augmenter, atteignant un pic très élevé de près de 250°C Celsius en T_2 et 366°C en T_1 .
- Une augmentation aussi significative après coupure de la source (inertie thermique) confirme que le sable de Touggourt agissait comme un excellent réservoir thermique ; il absorbait une énorme quantité d'énergie en son centre puis la redistribuait efficacement vers l'extérieur, élevant la chaleur de toute la masse à des niveaux très élevés.

III.3.2.1 Propriétés thermo physiques du sable (Touggourt) :

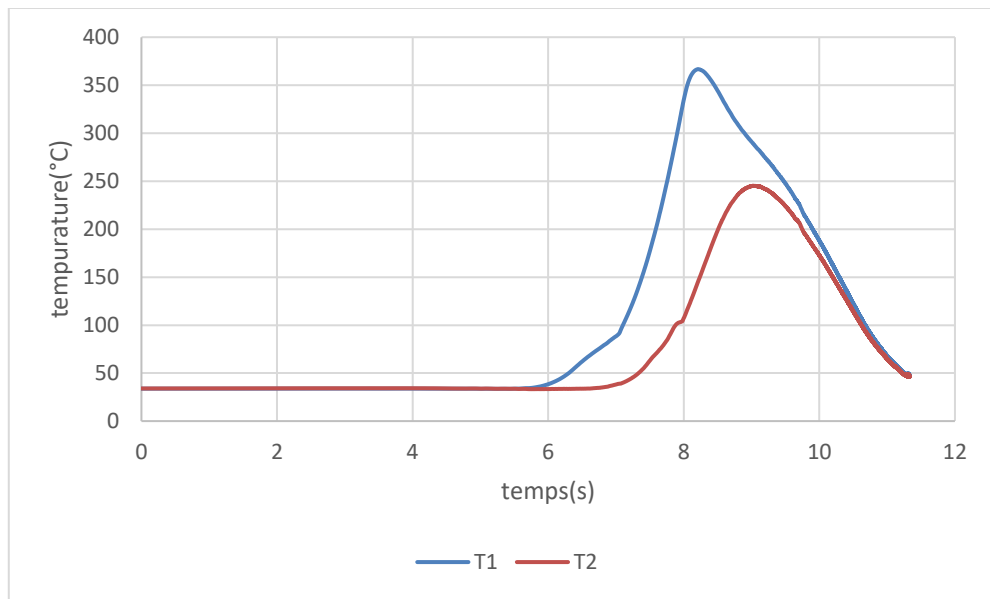


Figure III.4 : Température en fonction de logarithme du temps (Touggourt).

- La pente : $S = 296$
- Conductivité thermique : $\lambda = 0.83 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
- Diffusivité thermique : $\alpha = 4,97294 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
- La masse volumique : $\rho = 1523.4 \text{ kg/m}^3$
- Capacité calorifique : $C_p = 1054 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

III.3.3 Analyse de la phase de charge (El Oued) :

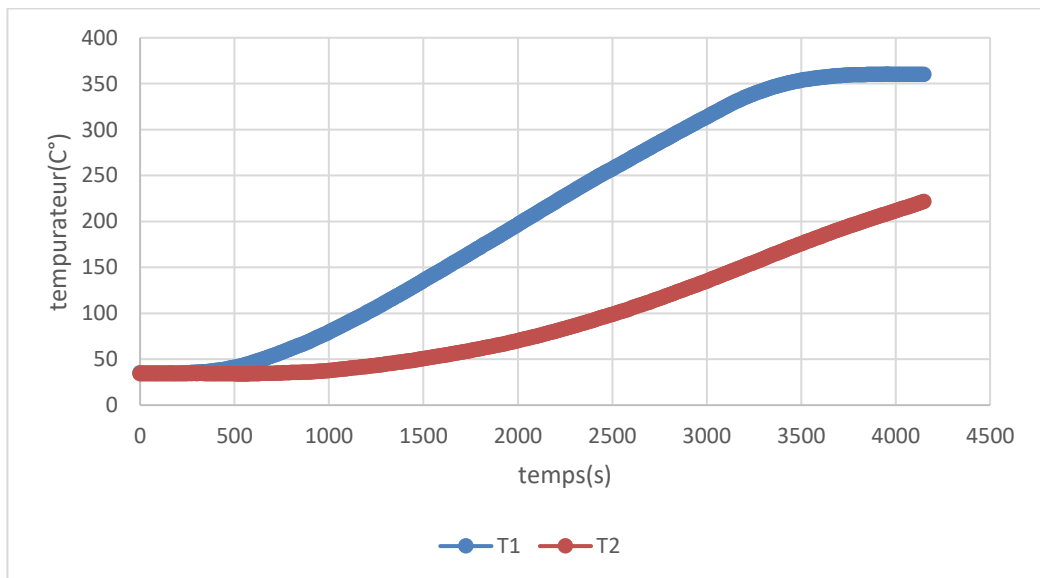


Figure III.5: Phase de charge (El Oued).

Commentaire général et discussion :

L'échantillon de sable de El Oued a été soumis à un chauffage pendant 64 minutes, la plus longue durée entre les trois expériences.

- La courbe montre une pente très raide au début, ce qui signifie que le sable absorbe immédiatement l'énergie sans résistance thermique significative.

Le phénomène d'absorption maximale (analyse des pics) pic élevé : après la coupure du chauffage, la chaleur a continué à monter pour dépasser dans le premier capteur (T_1) la barrière de près de 360°C avant de commencer à reculer.

- Dans la courbe du sable de El Oued, on remarque que l'écart entre T_1 et T_2 se rétrécit plus rapidement que dans le sable de Ghardaïa, ce qui indique que l'échantillon de El Oued atteint l'état d'homogénéité thermique en moins de temps.

III.3.3.1 Propriétés thermo physiques du sable (el oued) :

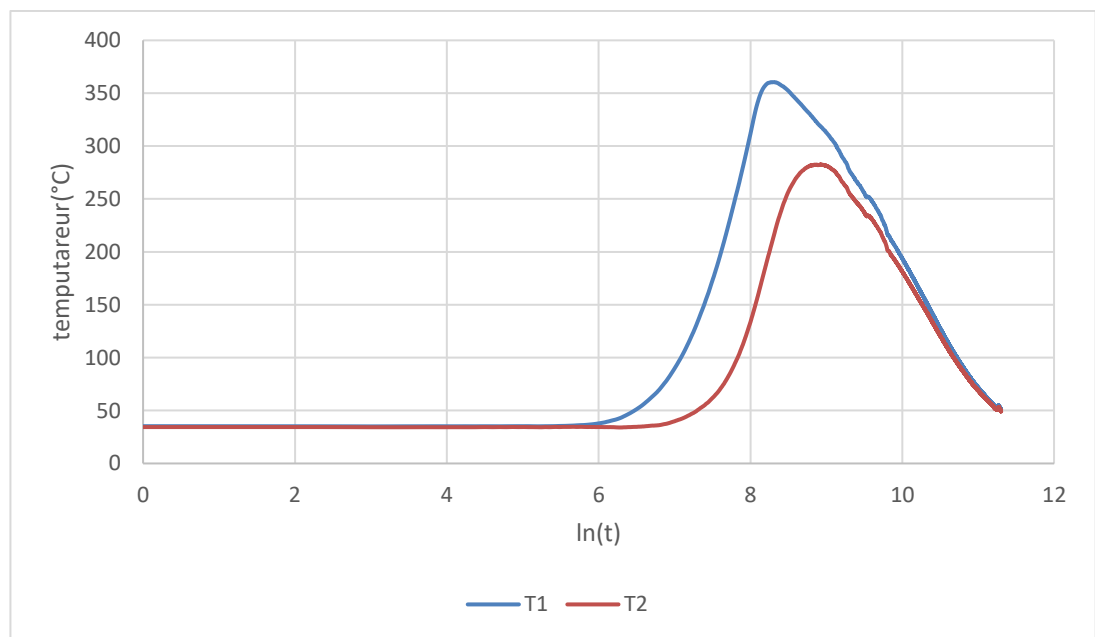


Figure III.6 : Température en fonction de logarithme du temps (El Oued).

- | | |
|----------------------------|--|
| – La pente : | $S = 271$ |
| – Conductivité thermique : | $\lambda = 0.91 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ |
| – Diffusivité thermique : | $\alpha = 6,84408 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| – La masse volumique : | $\rho = 1587.63 \text{ kg/m}^3$ |
| – Capacité calorifique : | $Cp = 863 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ |

III.4. Tests de décharge (Refroidissement) :

Ghardaïa :

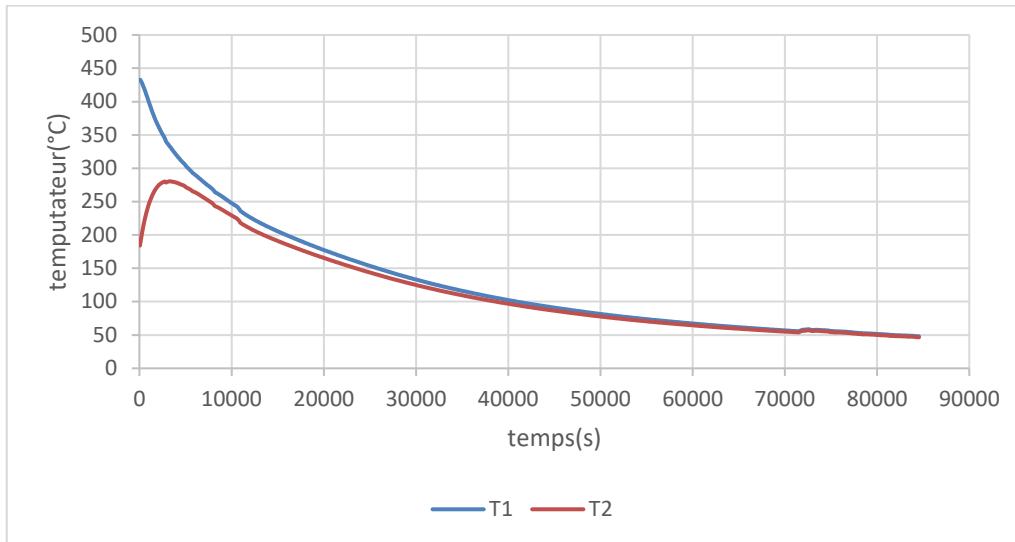


Figure III.7 : Phase de décharge (Ghardaïa).

Commentaire général et discussion :

L'image représente la courbe de refroidissement naturel du sable de Ghardaïa suite à l'interruption de la source de chaleur. On peut observer les comportements suivants :

- Propagation continue de l'onde thermique (pic tardif). Point critique T₁ : La température commence à descendre immédiatement après avoir atteint son maximum (433°C). La chute initiale est rapide en raison de l'écart important entre la température du sable et celle de l'environnement (loi de Newton).
- Un phénomène physique notable se produit ; malgré l'arrêt du chauffage, la température en T₂ a continué à augmenter, passant d'environ 126°C (au moment de l'arrêt) à un maximum de 280°C avant de commencer à diminuer.
- Cela démontre que la chaleur « emmagasinée » au centre du sable a continué à se propager vers les couches superficielles même après la disparition de la source, un phénomène désigné sous le terme de diffusion thermique différée.
- Inertie thermique et vitesse de refroidissement. Il est constaté que les deux courbes se rejoignent au fil du temps.

Chapitre III : Résultats Expérimentaux et Discussion

- Le sable a nécessité un temps considérable pour se dissiper. Sur l'axe des abscisses, il est observable que même après plus de 1300 secondes, la température du sable est demeurée au-dessus de 50°C. Cette décroissance lente témoigne d'une forte inertie thermique, une caractéristique fondamentale des sables désertiques pour leur emploi en tant que réservoirs d'énergie.
- L'analyse de la capacité de récupération de chaleur du sable de Ghardaïa met en évidence les points suivants :
 - ✓ Le sable ne perd pas sa chaleur brutalement, mais la restitue progressivement. Ainsi, dans des applications concrètes (comme le chauffage de l'eau la nuit à l'aide de sable chauffé pendant la journée), le sable assure un flux de chaleur continu pendant de longues périodes.
 - ✓ La convergence des courbes T_1 et T_2 en fin de refroidissement indique que l'échantillon est devenu thermiquement homogène, garantissant ainsi une récupération d'énergie optimale.

Tougourt :

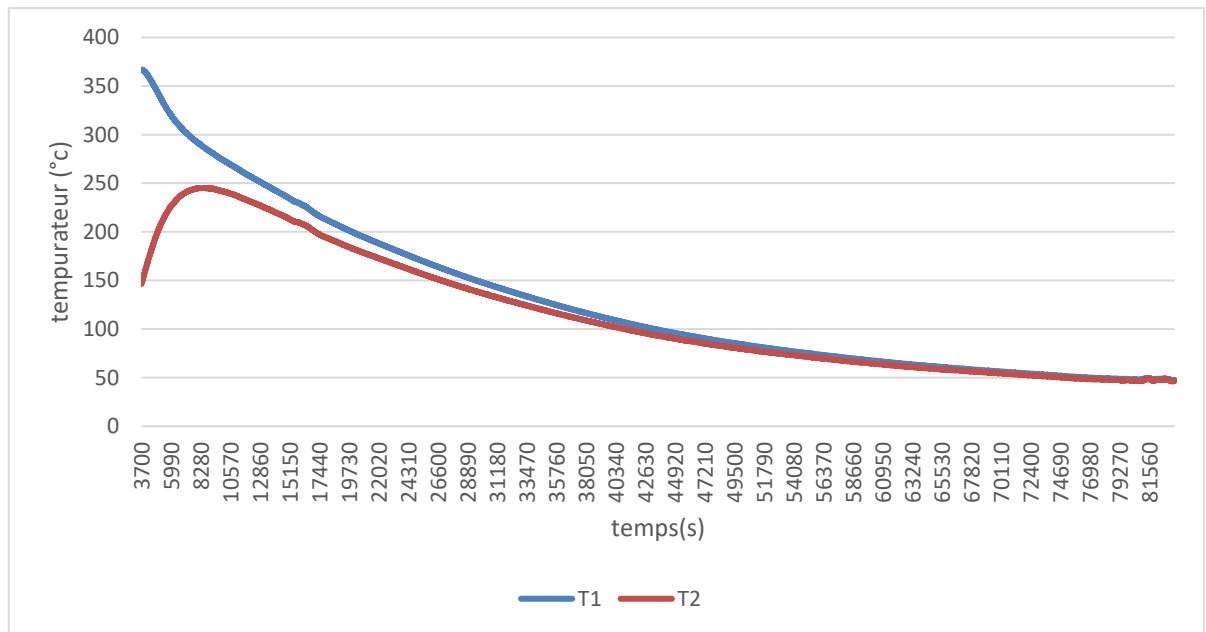


Figure III.8 : Phase de décharge (Tougourt).

Commentaire général et discussion :

- On remarque une caractéristique unique dans le sable prédit, à savoir que les courbes T_1 et T_2 sont descendues en parallèle et presque à l'identique après une courte période de décharge. Cela montre que l'échantillon refroidit (refroidissement uniforme), ce qui est une

Chapitre III : Résultats Expérimentaux et Discussion

caractéristique technique très importante dans les systèmes de récupération d'énergie thermique.

- Le sable a mis plus de 80 000 secondes (plus de 22 heures) pour revenir à basse température, prouvant l'efficacité de ce sable dans les applications de stockage à long terme.

El oued :

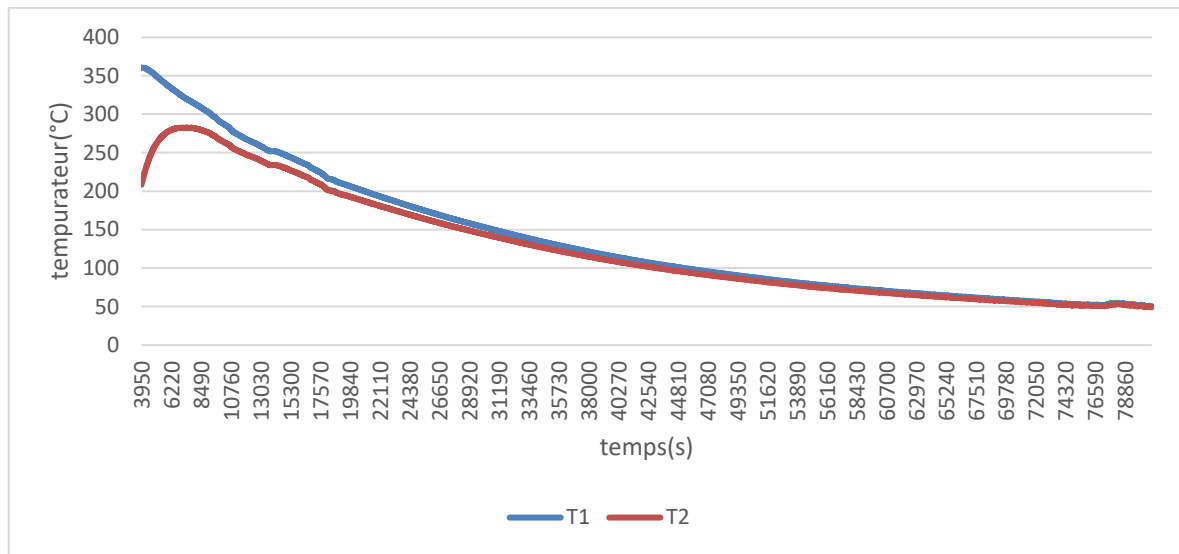


Figure III.9 : Phase de décharge (El oued).

Commentaire général et discussion :

- La courbe de sable de El Oued est caractérisée par la présence de très légères "oscillations" dans la phase de refroidissement, mais elle maintient une courbe descendante uniforme.
- L'échantillon a continué à retenir la chaleur au-dessus de 50°C pendant très longtemps (dépassé 80 000 secondes), ce qui en fait un "magasin dynamique" par excellence ; il se charge rapidement et se vide régulièrement.

III.5 Comparaison des performances :

Tableau III.1 : Comparaison des propriétés du sable.

	Conductivité thermique $\lambda : \frac{W}{m.K}$	Diffusivité thermique $\alpha : (m^2/s)$	Capacité calorifique $Cp : (J/kg)$
El oued	0.91	$6,84408 \times 10^{-7}$	836
Touggourt	0.83	$4,97294 \times 10^{-7}$	1054
Ghardaïa	0.82	$4,89845 \times 10^{-7}$	1051.287

Chapitre III : Résultats Expérimentaux et Discussion

Nous avons réalisé une étude comparative des trois échantillons (sable de Ghardaïa, sable de Touggourt et sable d'El Oued) en nous basant sur les résultats expérimentaux et les propriétés thermo physiques mesurées, dans le but d'évaluer l'efficacité de chaque type pour le stockage et la récupération d'énergie thermique.

Analyse de la phase de charge (absorption thermique) :

Taux de diffusion : Le sable d'El Oued a montré des performances remarquables en matière de transfert de chaleur, affichant la diffusivité thermique la plus élevée ($\alpha = 6,84408 \times 10^{-7}$) ce qui a permis à la chaleur d'atteindre le capteur éloigné T_2 et d'enregistrer une température de 126 °c en un temps record par rapport aux autres échantillons.

Uniformité thermique : Le sable de Touggourt a montré des courbes convergentes à la fin de la phase de charge, ce qui indique une distribution thermique plus homogène au sein de la masse de sable.

Analyse de la phase de décharge (inertie et récupération de chaleur) :

Stabilité et équilibre : Le sable de Touggourt a révélé une caractéristique technique distinctive les courbes de refroidissement (T_1) et (T_2) ont diminué de manière presque identique. Ce refroidissement uniforme favorise un processus de récupération d'énergie régulier et stable.

Capacité de rétention de chaleur : Les trois échantillons ont réussi à maintenir des températures supérieures à 50°C pendant une période exceptionnellement prolongée, dépassant 80 000 secondes (plus de 22 heures).

Décharge uniforme : Le sable de El Oued a montré une décharge uniforme malgré quelques légères fluctuations, ce qui en fait un milieu de stockage dynamique capable de se charger et de se décharger rapidement et efficacement.

Explication scientifique fondée sur les propriétés thermiques : L'efficacité du sable de Touggourt en tant que réservoir thermique est due à sa capacité thermique élevée ($C_p = 1054 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$), lui permettant d'accumuler d'importantes quantités d'énergie. La conductivité thermique élevée du sable de El Oued ($0,82 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) justifie sa réponse rapide aux stimuli thermiques par rapport aux autres échantillons. En conclusion, selon l'analyse comparative, l'utilisation optimale de chaque variété de sable peut être établie comme suit :

Sable de Ghardaïa : Parfait pour les applications nécessitant des températures extrêmes et une grande capacité d'absorption.

Sable de Touggourt : Parfait pour les systèmes de stockage à long terme qui requièrent une distribution de chaleur stable et homogène.

Sable d'El Oued : Parfait pour les systèmes qui exigent une réponse rapide et une charge thermique rapide.

III.5.1 Comparaison d'images des échantillons étudiés au microscope :

L'examen microscopique des échantillons révèle un gradient de couleur reflétant la composition minérale de chaque région. Alors que les sables de la région d'El Oued se distinguent par leur couleur blanc clair et leurs grains fins et sphériques, caractéristiques du quartz pur, les échantillons de sable de Touggourt et de Ghardaïa présentent des propriétés optiques similaires. Les sables des deux régions se caractérisent par une saturation de couleur moyenne à intense, avec des tons brun-rougeâtre (brique). Cette similarité est due à la formation d'une couche d'oxydes de fer entourant les grains (qui forme un film continu et est plus foncée dans les sables de Ghardaïa). Cette similarité géologique confère aux sables de Touggourt et de Ghardaïa un avantage commun en termes de capacité de rétention de chaleur par rapport aux sables de la région d'El Oued.



Figure III.10 : Echantillons du sable de El Oued.



Figure III.11 : Echantillons du sable de Touggourt.



Figure III.12 Echantillons du sable de Ghardaïa.

III.6 Conclusion

Les résultats expérimentaux présentés dans ce chapitre représentent la base essentielle pour l'évaluation de la faisabilité technique de l'utilisation des sables du Sahara algérien en tant que moyen de stockage de l'énergie thermique. À travers une analyse détaillée des phases de chargement et de déchargement des trois échantillons (Ghardaïa, Touggourt et El Oued), nous pouvons en déduire les conclusions suivantes : efficacité thermique différenciée : l'étude a démontré que le choix optimal du sable dépend directement de la nature du système requis. Alors que le sable de Ghardaïa s'est distingué par sa tolérance et sa concentration en hautes énergies, atteignant 433°C , le sable d'El Oued a révélé une réponse dynamique rapide grâce à sa conductivité thermique élevée ($0,91 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), le rendant le plus adapté aux systèmes à cycles thermiques rapides.

Stabilité énergétique : le sable Touggourt a montré une supériorité en termes de durabilité thermique et d'homogénéité, sa capacité calorifique élevée ($1054 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$) ayant joué un rôle crucial pour garantir une évacuation de chaleur stable et régulière, ce qui est une exigence fondamentale dans les applications de chauffage et de récupération de chaleur sur de longues périodes.

Inertie thermique : les trois échantillons ont convenu de leur capacité supérieure à retenir la chaleur pendant plus de 22 heures, confirmant que le sable local constitue une alternative économique, durable et performante aux matériaux de stockage traditionnels. Enfin, cette variation des propriétés thermo physiques des échantillons étudiés ouvre de vastes perspectives pour la conception de systèmes de stockage d'énergie sur mesure, équilibrant vitesse d'absorption (sable de El Oued), résistance au stockage (sable granulaire) et stabilité à la récupération (sable kératinisé). Ces résultats de laboratoire confirment non seulement l'efficacité du sable en tant que réservoir thermique.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a porté sur l'étude expérimentale des propriétés thermo-physiques de trois types de sable désertique issus des régions de Ghardaïa, Touggourt et El Oued, en vue de leur utilisation potentielle comme matériaux de stockage thermique sensible. L'objectif principal était d'évaluer et de comparer le comportement thermique de ces matériaux locaux afin d'identifier leur aptitude à être intégrés dans des systèmes de stockage d'énergie thermique, notamment dans les applications solaires.

Pour atteindre cet objectif, un banc d'essai expérimental a été conçu et réalisé. Celui-ci repose sur un réservoir cylindrique thermiquement isolé, équipé d'une source de chaleur électrique de 750 W placée en son centre. Deux thermocouples de type K ont été utilisés pour suivre l'évolution de la température à différentes distances de la source, permettant ainsi d'analyser la dynamique de transfert de chaleur au sein des différents échantillons de sable.

Les résultats expérimentaux obtenus ont mis en évidence des différences significatives dans le comportement thermique des trois sables étudiés. Ces différences sont liées à leurs propriétés thermo-physiques intrinsèques, telles que la capacité calorifique, la conductivité thermique et la structure granulaire. Le sable de Ghardaïa et Touggourt a présenté une réponse thermique plus stable et une meilleure homogénéité de diffusion de la chaleur, ce qui le rend plus favorable pour les applications de stockage thermique dans les conditions expérimentales considérées.

Cette étude confirme l'intérêt des matériaux granulaires naturels, et en particulier des sables désertiques, comme solution locale, économique et durable pour le stockage de l'énergie thermique. Elle met également en évidence l'importance de la caractérisation expérimentale pour la sélection optimale des matériaux de stockage adaptés aux systèmes énergétiques solaires.

En perspective, il serait intéressant d'approfondir cette étude en intégrant d'autres paramètres influents tels que l'humidité, la granulométrie détaillée, ainsi que l'analyse de la conductivité thermique et de la diffusivité. De plus, une modélisation numérique du comportement thermique pourrait compléter les résultats expérimentaux afin d'optimiser la conception des systèmes de stockage à grande échelle.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] I. Dinçer, M. Rosen, Thermal energy storage: Systems and Applications, Wiley edition, England, 2002.
- [2] A. Moummi, Cours échangeurs de chaleur, Master II, option énergétique, Université de Biskra, 2020.
- [3] Projets, A. N. R. Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés.
- [4] Cabeza, L. F. (2021). Advances in thermal energy storage systems: Methods and applications. In *Advances in thermal energy storage systems* (pp. 37-54). Woodhead publishing.
- [5] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- [6] Senoussaoui, N.-L. (2025). *Approche couplant analyse pincement, analyse exergétique avancée et optimisation pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés industriels : apport des systèmes experts* [Thèse de doctorat, Université de Toulouse]. HAL Thèses.theses.hal+1
- [7] Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Cabeza, L. F. (2010) State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. Renewable and sustainable energy reviews, 14,(1) 31-55.
- [8] Edem N' Tsoukpoe, K., Liu, H., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2009). A review on long-term sorption solar energy storage. Renewable & sustainable energy review, 13(9), 2385-2396.
- [9] Pardo, P. (2013). 'Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique' (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT).
- [10] Nadjiba, M. (2016). *Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide* (Doctoral dissertation).

BIBLIOGRAPHIE

- [11] : Zahir. H. (2024, 14 janvier). Énergies renouvelables : Les batteries de roches thermiques, une révolution dans le stockage de l'énergie. JSM Center pour la Recherche et les Études. Consulté le 22 avril 2026.
- [12] Melhem. M. (2023, 25 Janvier). Chauffage des bâtiments à l'énergie solaire stockée dans le sable / Batteries à sable. JSM Center pour la Recherche et les Études.
- [13] Youcef, M. B., Abdelhak, M. A. H., & Omar, M. D. Étude et simulation d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'un séparateur électrostatique.
- [14] Akrouche, A. (2011). Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase.
- [15] Engineering Toolbox. (2025). Conductivité thermique des matériaux courants - solides, liquides et gaz. Récupéré le 19 mai 2026, de https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html
- [16] INP Toulouse. (2012, 29 octobre). Mesure des propriétés thermiques d'un sable [Sujet de TP]. https://pedagogtech.inp-toulouse.fr/200630/res/2Hy_Conductivite_sujetTp.pdf
- [17] Kuravi, S., Trahan, J., Goswami, D. Y., Rahman, M. M., & Stefanakos, E. K. (2013). Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. *Progress in energy and combustion science*, 39(4), 285-319.
- [18] Behar, O., Khellaf, A., & Mohammedi, K. (2013). A review of studies on central receiver solar thermal power plants. *Renewable and sustainable energy reviews*, 23, 12-39.
- [19] Benrokia, S., Asnour, K., & Zeghib, I. (2021). Thermal characterization and suitability of Saharan sand as a sensible heat storage material for solar thermal power plants. *Journal of Energy Storage*, 40, 102719.
- [20] Skhiri, N., Knies, A., Ben Slama, R., & Emery, C. (2020). Experimental characterization of desert sand for high-temperature thermal energy storage applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 215, 110657.
- [21] Sammourah, P. (n.d.). Thermal insulation [PDF file]. Philadelphia University. Retrieved May 19, 2026, from <https://www.philadelphia.edu.jo/academics/sammourah/uploads/thermal%20insulation.pdf>
- [22] TC S.A.S. (n.d.). Thermocouple type K—information technique. <https://www.tcsa.fr/thermocouples/type-k-thermocouple.html>
- [23] Banks, D. (2015). Horatio Scott Carslaw and the origins of the well function and line source heat function. *Scottish Journal of Geology*, 51(1), 100-104.



شعبة: ميكانيك..... طاقوينة

غرداية في 28/07/2026

تخصص: طاقات متجددة في ميكانيك

شهادة ترخيص بالتصحيح والايذاع:

انا الاستاذ(ة): الحميد الطاهر

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

Caractérisation avancée du sable désertique et évaluation de sa faisabilité comme matériau de stockage thermique

من أنجاز الطالب (الطالبة):

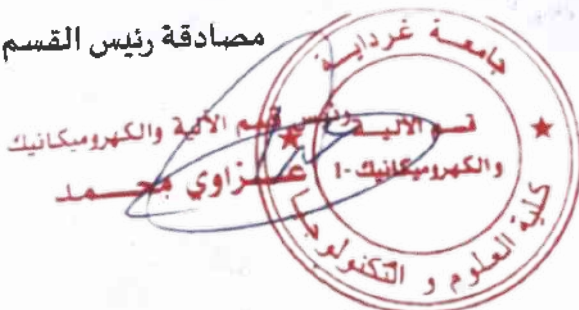
حميدة ياسين

عكيف محمد أسامة

التي نوقشت بتاريخ: 2026/06/13

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.

مصادقة رئيس القسم



مضاء المسؤول عن التصحيح