

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Blida 1
Faculté de Technologie
Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Génie des Procédés des Matériaux

Intitulé du mémoire

**Etude expérimentale d'un lit du sable pour un dispositif de
stockage de chaleur avec combinaison des métaux ferreux**

Présentée par

BELLAHSENE Imane

MERZOUGUI Hanane

Encadré par

Dr. BENDJEBBAS Hichem

Dr. BOUMAD Souad

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Tout d'abord nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir accordé la connaissance, donné le courage, la patience et la santé pour réaliser notre projet de fin d'étude.

Nous adressons nos sincères remerciements à **Dr. ABBAS Mohamed** directeur de l'Unité de Développement des Équipements Solaires (UDES) de nous avoir accueilli au sein de son unité.

Nous tenons à exprimer notre plus profonde gratitude à notre promoteur **Dr. Hichem BENDJABESSE**, directeur de la Division Equipements à Énergies Renouvelables (EER) à l'UDES, pour avoir suivi de très près nos travaux, pour son aide, ses orientations pédagogiques dans l'élaboration de ce mémoire, et tous les conseils qu'il nous a prodigués durant toute la durée de ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre promotrice **Dr. BOUMAD Souad**, enseignante à l'université Blida 1, d'avoir accepté de co-diriger ce travail.

Nous tenons à remercier chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de lire et d'évaluer ce mémoire.

Que Madame **METIDJI Nadia** chercheuse au Centre de Développement des énergies renouvelables et chef des équipements et applications Héliothermiques (EAH) au de la Division Equipements à Energies Renouvelables (EER) à l'UDES accepte nos remerciements.

Sans oublier nos familles **BELLAHSENE** et **MERZOUGUI**.

Trouvant ici l'expression de notre profonde reconnaissance pour leur aide et conseils.

Il va sans dire que nous adressons un hommage tout particulier à l'ensemble des enseignants de l'université Blida 1 en particulier, à nos professeurs de Génie des Procédés pour les connaissances qu'ils nous ont transmises, pour leur écoute, leur disponibilité et l'encadrement dont ils nous ont fait bénéficier

Dédicaces

Je tiens à dédier cet humble travail à :

Ma tendre mère et mon très cher père : Nadia et Mustapha

Mes précieuses sœurs : Chaima et Anfel

Mon cher frère : Yasser

Mes oncles, mes tantes et mes cousines

Mon binôme : Hanane

Mes meilleurs amis : Riheb, Hanane, Aya, Sara, Lina, Hind, Amira, Khadidja

Tous mes amis du long parcours scolaire et universitaire

Toute ma famille et Merci à moi-même

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime

BELLAHSENE IMANE

Dédicace

Je dédie humblement ce travail à ceux qui furent ma lumière et ma force

Mes **chers parents**,

Mes piliers à chaque étape, la source de mon accomplissement aujourd'hui.

À ma chère maman, celle qui fut la voix de l'espoir dans mes jours difficiles,
Ma complice tout au long de mon parcours... Sans toi, ce succès n'aurait jamais été possible.
Puisse mon amour et ma gratitude t'atteindre à travers ces lignes.

À mon père bien-aimé,

Toi qui as veillé, sacrifié, et tout donné pour ma réussite et mon bonheur. Aucune parole ne
pourra jamais exprimer la fierté que j'ai d'être ta fille.

À mes frères et sœur : Yamina, Abdelkader et Mohamed,

Vous êtes la chaleur de mon cœur et mon refuge dans les moments les plus rudes.

Merci pour votre présence constante et votre soutien sincère.

À la famille de ma mère, Telmani, à mes tantes Kheïra et Noura, et à mes oncles Yacine et
Hichem, recevez mes plus sincères remerciements pour vos paroles réconfortantes et votre appui
tout au long de ce parcours.

À mon fiancé bien-aimé, Bilal,

Tu as été mon appui inébranlable, mon moteur et mon refuge dans les moments les plus
exigeants.

Ta patience, ton amour et ta confiance en moi ont été essentiels à cette réussite.

Ce diplôme t'est dédié... tout comme mon cœur et ma fierté.

Je n'oublie pas ma partenaire dans ce mémoire, qui fut plus qu'une collaboratrice, une sœur de
cœur.

Merci pour ton travail acharné, ta sincérité et ton soutien inestimable.

Sans toi, ce travail n'aurait pas vu le jour.

A mes amis : Rania, wissem, Maroua, aya, Sara et Lina, assia, omaima.

Et enfin...Je me remercie, pour l'effort que j'ai fourni, pour mon dévouement sincère,

Et pour ma persévérance jusqu'à l'accomplissement final

MERZOUGUI HANANE

SOMMAIRE

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Sommaire	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Introduction.....	4
I.1 Généralités sur le stockage thermique.....	4
I.1.1 Types du stockage thermique.....	5
I.1.2 Stockage thermique par chaleur latente	7
I.1.3 Stockage thermochimique.....	7
I.1.4 Stockage par sorption.....	7
I.2 Comparaison des différents types de stockage thermique	8
I.3 Critères de choix et de la conception d'un système de stockage	9
I.3.1 Critères économiques.....	9
I.3.2 Critères techniques.....	9
I.4 État de l'art du stockage thermique de chaleur sensible	9
I.5 Type des lits fix pour le stockage de l'énergie.....	13
I.6 Projets a échelle réel opérationnels de stockage thermique	16
I.7 Le sable comme matériau de stockage.....	17
I.7.1 Propriétés du sable	17
I.7.2 Avantages et inconvénients du sable	18
I.8 Performance des métaux ferreux (aluminium, (Fe)) et sel.....	18
I.9 Conclusion.....	19
Introduction.....	21
II. Procédés du stockage thermique par chaleur sensible	21
II.1.1 Le stockage liquide	22
II.1.2 Le stockage solide.....	23
II.2 Présentation de système	24

II.3	Transfer de chaleur dans le lit de sable	26
II.3.1	Transfer de chaleur par conduction.....	26
II.3.2	Transfer de chaleur par convection.....	26
II.3.3	Transfer de chaleur par contact.....	29
II.4	Mécanismes de transfert de chaleur dans un lit granulaire :	30
II.4.1	Modélisation du transfert thermique dans un milieu granulaire	31
II.5	Caractéristiques géométriques du dispositif de stockage.....	33
II.5.1	Définition des milieux poreux:	34
II.5.2	La porosité et indice de vide	35
II.5.3	Degré de saturation S_r	36
II.5.4	La perméabilité K :	37
II.5.5	L'indice sphéricité:	37
II.5.6	La tortuosité τ :	38
II.6	Les Caractéristiques thermo-physiques:.....	38
II.6.1	Viscosité effective:.....	38
II.6.2	Capacité calorifique équivalente CP_{eff} :	39
Introduction :	41
III.	Procédure expérimentale.....	41
III.1	Méthode expérimentale	41
III.1.1	Sélection et origine des matériaux	41
III.1.2	Caractérisation granulométrique.....	42
III.1.3	Chauffage des échantillons par four	43
III.1.4	Stockage au sein d'un boîtier isolé	44
III.1.5	Acquisition des données de température à l'aide d'un DATALOGGER :	45
III.1.6	Identification de la configuration la plus performante.....	46
III.1.7	Additifs thermo-conducteurs:	48
III.1.8	Analyse thermique post-mélange.....	51
III.2	Conception du dispositif:.....	51
IV.	Les Résultats et analyses :.....	55
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		64
Références bibliographiques		

LISTES DES FIGURES

Figure 1-1 Classification des différents types de stockage thermique.....	5
Figure 1-2 Différentes géométries d'ailettes pour améliorer le taux de transfert de chaleur dans un système de stockage thermique latent [36-40].....	15
Figure1-3 Le Miroir des Énergies (Brest).....	16
Figure 2-1 Classification des supports de stockage de chaleur sensible [50].....	22
Figure 2-2 : Volume nécessaire pour la même énergie stockée.....	23
Figure 2-3 Schéma de principe d'un lit emballé	24
Figure 2-4 : Échanges de chaleur dans un lit granulaire.....	30
Figure 2-5- Milieu consolidé [82].....	34
Figure 2-6- Milieu non consolidé [82].....	35
Figure 2-7- Arrangements réguliers des sphères de même diamètre [84].	35
Figure 2-8-Degré de saturation	36
Figure 3-1 photo du tamiseur.....	42
Figure 3-2 les quatre s échantillons retenus.....	43
Figure 3-3 photo de four	44
Figure 3-4 l'enceinte thermiquement isolée	44
Figure 3-5 photo du système « Benchlink Data Logger Pro ».....	45
Figure 3-6 photo de thermocouple type K	46
Figure 3-7 Des débris métalliques (fer, aluminium) et sel.....	48
Figure 3-8 Photos des échantillons du mélange.....	51
Figure 3-9 conception du dispositif	52
Figure 3-10 Conception 3D de dispositif.....	52
Figure 3-11 les différentes pièces du dispositif	53
Figure 4-1 graphe de l'analyse thermique de différents échantillons du sable.....	55
Figure 4-2 Graphe de l'analyse thermique de mélanges (sable +aluminium) avec différents quantités d'aluminium.	56
Figure 4-3 Graphe de l'analyse thermique de mélanges (sable +fer) avec différentes quantités de fer.	57
Figure 4-4 Graphe de l'analyse thermique de mélanges (sable +sel) avec différentes quantités de sel.	58
.....	59
Figure 4-5 L'analyse DRX des échantillons (fer, al, sable =0.125mm)	59

Figure 4-6 Comparaison entre les graphes de l'analyse thermique des mélanges du sable avec métaux ferreux et sel (m=48g) en fonction du temps.....	60
Figure 4-7 graphe d'évaluation de la température du (sable + fer) pendant une charge de 4h.....	61
Figure 4-8 graphe de variation de température du (sable +fer) pendant 2 h (en report).....	62
Figure 4-9 graphe de variation de température du (sable +fer) + température de l'eau froid (décharge)jusqu'à l'équilibre.	63

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1-1: Comparaison entre les différents types de stockage thermique 13.....	8
Tableau 1-2 : Propriétés des métaux ferreux et le sel	18
Tableau 2-1: Porosité de quelques matériaux poreux	36
Tableau 3-1 : propriétés du sable Quartz alpha	47
Tableau 3-2: propriétés de débris de fer	49
Tableau 3-3: propriétés de débris d'al	50

LISTES DES ABRÉVIATIONS

AL : Aluminium

BCC : cubique à corps centré

C_p : chaleur spécifique du fluide

$C_{p\text{ eff}}$: capacité calorifique équivalente

CCG : centrale à cycle combiné

CSP : centrale solaire concentration

CFC : cubique face centré

d : diamètre

DLR : deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

DRX : diffraction des rayons

ΔH : changement d'enthalpie

Fe : fer

HTF : Fluide Caloporteur

HTC : Coefficient de transfert de chaleur

k_v : coefficient de transfert de chaleur volumique

K : perméabilité

LHTES : Stockage thermique d'énergie par chaleur latente

L_e : longueur échantillon

L : longueur

NaCl : chlorure de sodium

U : l'efficacité

PSA : plateforme solaire d'Almeria

PSA : adsorption par pression alternée

PCM : matériaux à changement de phase

PCMs : matériaux à changement de phase

ρ : masse volumique

Ri : nombre de richardson

SCS : système de stockage thermique

SHS : stockage de chaleur sensible
TES : stockage thermique d'énergie
Sr : degré de saturation
T_s : température des grains
T_f : température du fluide
T_h : température enthalpique
 α : coefficient de discontinuité
 μ : vecteur de vitesse
 τ : temps
 λ : tenseurs de dispersion
 \mathcal{E} : porosité
 σ_C : la résistance à la compression uniaxial

الملخص

يُعد تخزين الحرارة الحساسة أقدم طريقة لتخزين الطاقة. يعتمد المبدأ على الحرارة المخزنة في مادة ما أثناء تغير درجة الحرارة، والتي يمكن استرجاعها لاحقًا. يُستخدم هذا النوع من التخزين في العديد من الأنظمة الشمسية الحرارية. تُعتبر بطارية الرمل أداة مبتكرة لتخزين الطاقة الحرارية، وتهدف إلى تخزين الحرارة الناتجة في وسط يتمتع بقدرة حرارية عالية لاستخدامها لاحقًا؛ وتوفير طاقة حرارية لشبكة تدفئة المباني أو لتزويد شبكة البخار الساخن والطاقة الحرارية لدورة الإنتاج الصناعي.

يهدف هذا المشروع إلى دراسة وتصميم وإنجاز واختبار سرير من الرمل ممزوج بمخلفات المواد الحديدية لتخزين الحرارة الحساسة.

النتائج

أظهرت التجارب أن إضافة مخلفات الحديد إلى الرمل تحسن من أداء التخزين الحراري، إذ سُجلت درجات حرارة أكثر استقرارًا واحتفاظًا أطول بالحرارة مقارنة بالرمل وحده. وُجد أن النسبة المثلى للمضافات الحديدية (مثل 48غ) تُوفر توازنًا جيدًا بين الامتصاص الحراري والتوصيل، مما يجعل هذا المزيج خيارًا مثاليًا لتطبيقات الكلمات المفتاحية تخزين، الطاقة الحرارية، الرمل، بقايا حديدية، بطارية

Abstract

Sensible heat storage is the oldest way of storing energy. The principle is based on heat stored in a material during a temperature variation, which can be later released. This type of storage is used in various solar thermal systems. The sand battery is an innovative thermal energy storage tool, aiming to store the produced heat in a medium with good thermal inertia for later use; and provide thermal energy for building heating networks or supplying hot water steam and heat networks for industrial production cycles.

This project aims to study, design, implement, and test a sand bed mixed with ferrous material waste for sensible heat storage.

Results

The experiments showed that adding iron residues to sand improves thermal storage performance. More stable temperatures and longer heat retention were recorded compared to sand alone. It was found that the optimal proportion of iron additives (such as 48g) provides a good balance between heat absorption and conductivity, making this mixture an ideal choice for thermal applications.

Keywords: storage, thermal energy, sand, ferrous residues, battery

Résumé

Le stockage par chaleur sensible est la façon la plus ancienne de stocker l'énergie. Le principe repose sur la chaleur emmagasinée par un matériau lors d'une variation de température et qui peut être restituée ultérieurement. Ce type de stockage est utilisé dans plusieurs systèmes solaires thermiques. La batterie à sable est un outil de stockage de l'énergie thermique innovant, dont les objectifs sont de pouvoir stocker la chaleur produite dans un support avec une bonne inertie thermique pour un usage ultérieur ; et disposer d'une énergie thermique pour le réseau de chauffage de bâtiments, ou pour alimenter le réseau de vapeur d'eau chaude et de chaleur pour le cycle de production industriel.

Le présent projet consiste à étudier, concevoir, réaliser et tester un lit de sable mélangé avec des déchets de matériaux ferreux pour le stockage de chaleur sensible.

Les résultats

Les expériences ont montré que l'ajout de résidus ferreux au sable améliore les performances du stockage thermique. Des températures plus stables et une rétention de chaleur plus longue ont été enregistrées par rapport au sable seul. Il a été constaté que la proportion optimale d'additifs ferreux (comme 48 g) offre un bon équilibre entre l'absorption thermique et la conductivité, ce qui fait de ce mélange un choix idéal pour les applications thermiques.

Mots-clés : stockage, énergie thermique, sable, résidus ferreux, batterie

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La consommation d'énergie primaire devrait augmenter de 48 % en 2040 en raison de l'épuisement des ressources fossiles et de l'impact environnemental négatif. Les sources d'énergie renouvelable comme le rayonnement solaire, les vagues océaniques, le vent et le biogaz jouent un rôle significatif dans le maintien de l'équilibre naturel et la satisfaction de la demande de la population [1]. Cependant, en raison des fluctuations climatiques, les méthodes de stockage d'énergie efficaces et durables deviennent de plus en plus importantes.

Le stockage d'énergie thermique (TES) est une technologie qui stocke l'énergie thermique en chauffant ou en refroidissant un milieu de stockage, permettant ainsi de l'utiliser ultérieurement pour des applications de chauffage et de refroidissement ainsi que pour la production d'énergie [2]. Les systèmes de stockage d'énergie thermique (TES) sont utilisés dans les bâtiments et les processus industriels, offrant des avantages tels qu'une efficacité accrue, une fiabilité améliorée, une réduction des coûts d'investissement et d'exploitation, et une diminution de la pollution environnementale. Les systèmes solaires thermiques deviennent de plus en plus importants pour le stockage de l'électricité en combinaison avec les centrales solaires thermodynamiques.

L'utilisation du stockage thermique, au départ, ne pouvait pas fournir un soutien efficace mais a aidé le système à se stabiliser thermiquement. Par conséquent, le stockage thermique a trouvé son utilité dans les systèmes thermiques assistés par solaire. Depuis lors, l'étude des technologies de stockage de l'énergie thermique ainsi que de l'utilité et des effets du stockage de chaleur sensible et latente dans de nombreuses applications se poursuit [3-7].

Ce travail est consacré à l'exploration d'un système de stockage thermique par chaleur sensibles, à travers l'étude des performances, pour un matériau solide (sable) et résistant avec mélanges des matériaux ferreux. Cette recherche vise à l'équilibre dynamique de ce type d'économie d'énergie thermique selon certaines conditions de fonctionnement. Nous nous concentrons également sur les facteurs souhaités, tels que la rentabilité des matériaux utilisés, le partage de la chaleur et les opérations de charge et de décharge.

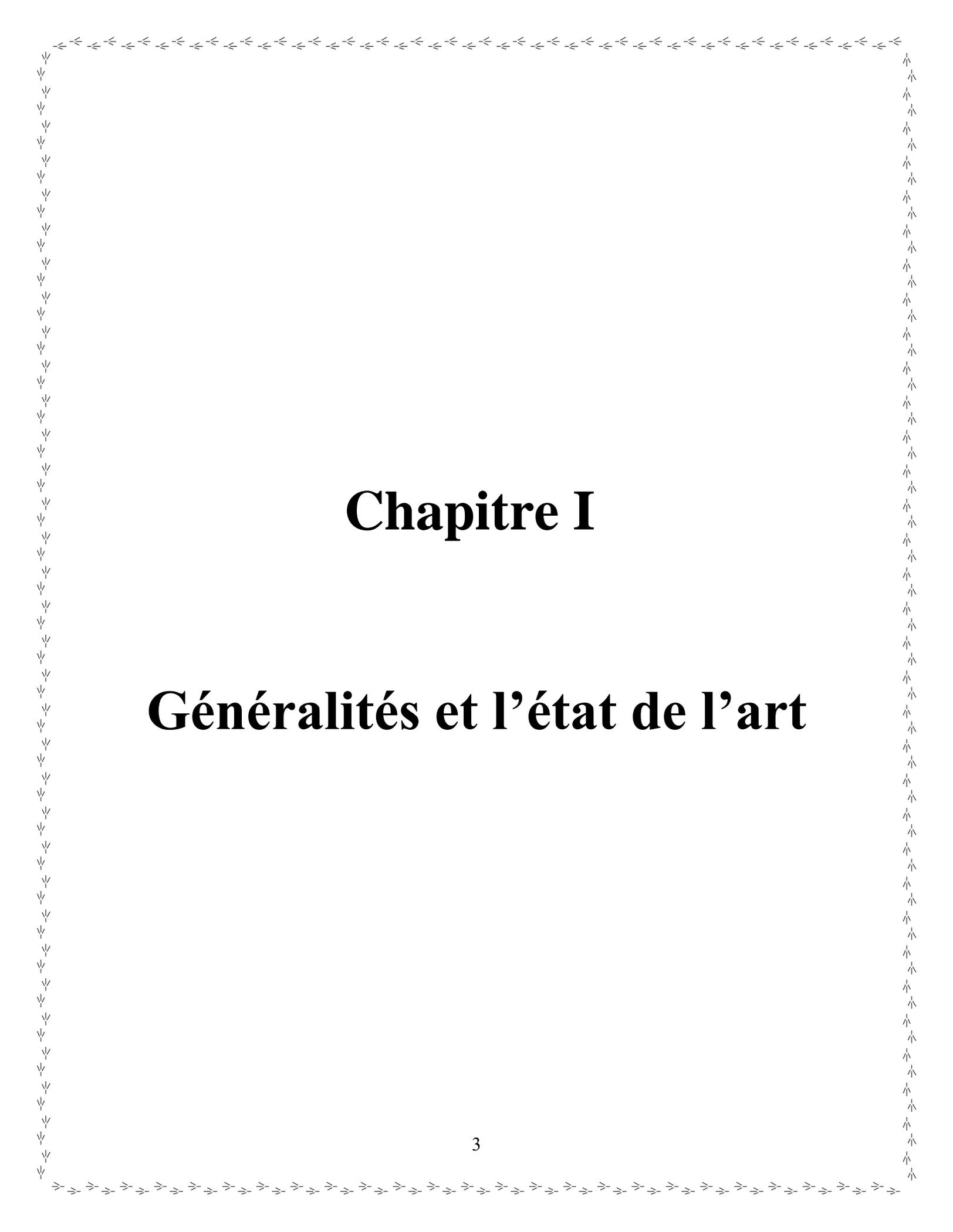
Ce mémoire se compose de quatre chapitres principaux :

-Premier chapitre : Introduction aux concepts généraux relatifs au stockage thermique raisonnable dans les registres de texte. Elle inclut également de nouveaux éléments tels que des consultations utilisées et un cas d'art commercial.

-Chapitre deux : Revue des principes de transport et d'édition, des équations de base, et des combinaisons pour le modèle d'image dans la médiation granulaire.

- Chapitre trois : Étude détaillée pour expliquer les applications avancées, les mesures de base et les tests de travail avec les caractéristiques des données.

-Chapitre quatre : Étude et discussion des résultats, avec un système séparé pour l'étude et une proposition de conférence indépendante sur l'indépendance indépendante.



Chapitre I

Généralités et l'état de l'art

CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉ ET ÉTAT DE L'ART

Introduction

Les fluctuations de l'énergie solaire nécessitent l'utilisation d'un stockage thermique pour maintenir une efficacité acceptable. Le développement de ce système est lié à la mise en œuvre de méthodes de stockage adaptées, suffisamment performantes, écologiquement et économiquement viables. Le choix du matériau de stockage est donc crucial en termes de performances et de coût. La technique de stockage la plus avancée est le stockage sensible de la chaleur. Utiliser des roches naturelles comme matériaux de stockage, qui sont peu coûteuses, facilement disponibles en grande quantité et ont un impact financier moindre. En conséquence, l'un des systèmes financiers qui semble le plus pertinent est un lit à cordes. Cependant, cette méthode présente certains inconvénients, tels que la fatigue mécanique pendant le cycle thermique [8].

I.1 Généralités sur le stockage thermique

Le terme "stockage thermique" (TES) fait référence au stockage temporaire d'énergie par chauffage ou refroidissement afin que l'énergie stockée puisse être utilisée ultérieurement pour produire de l'électricité, ce qui constitue une application de chauffage ou de refroidissement. Selon l'IRENA, le stockage thermique fournit la flexibilité nécessaire pour intégrer de grandes quantités d'énergie solaire et éolienne dans les nouveaux systèmes énergétiques. En fait, lorsque les sources d'énergie renouvelable sont combinées avec une offre fluctuante, le stockage d'énergie peut aider à fournir une énergie constante [9].

Le principal inconvénient des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, est qu'elle provient d'une source intermittente (généralement le soleil, qui est obscurci par les nuages) et peut ne pas toujours répondre aux besoins d'un point de vue spatial, temporel, de puissance ou de température. Par conséquent, la solution consiste à stocker la chaleur générée par l'énergie solaire pour répondre aux besoins énergétiques actuels et futurs, où qu'ils se manifestent. Après que les capteurs solaires (plans, paraboles, hyperboles et miroirs) ont réussi à capturer l'énergie thermique, celle-ci doit être efficacement stockée pour une utilisation ultérieure. C'est pourquoi le développement d'un système de stockage d'énergie efficace est crucial. L'efficacité des systèmes de stockage de chaleur est influencée par un certain nombre de variables. Lorsqu'on pense à un

Système de stockage, les choses les plus importantes à considérer sont les propriétés techniques du système et sa capacité à générer des revenus [10].

I.1.1 Types du stockage thermique

Le stockage thermique est basé sur un principe thermodynamique régissant le stockage par chaleur sensible, stockage par chaleur latente et stockage thermochimique, présente une vue d'ensemble de ces modes de stockage ainsi que des principaux matériaux de stockage utilisés [8,10,11].

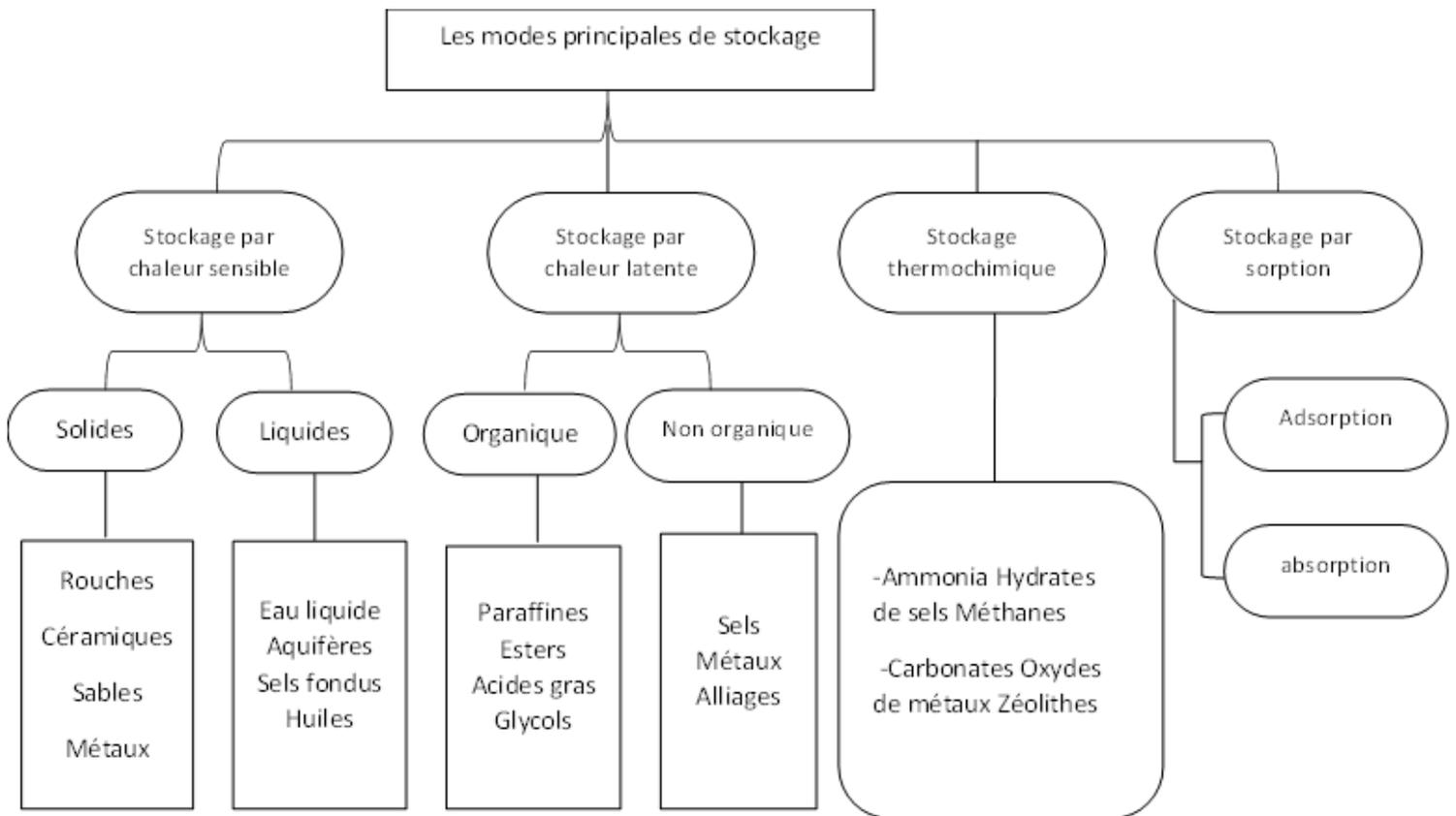


Figure 1-1 Classification des différents types de stockage thermique.

I.1.1.1 Stockage thermique par chaleur sensible (SCS)

Le stockage par chaleur sensible consiste à accumuler de l'énergie thermique en augmentant la température d'un matériau de stockage, proportionnellement à sa masse et à sa capacité calorifique. Utilisé dans le bâtiment (réservoirs d'eau chaude) et les applications à haute température (huiles thermiques, sels fondus), il est essentiel pour les centrales solaires thermiques. Il peut être de courte durée (chauffage sanitaire) ou saisonnier (chauffage des serres). Bien que son efficacité atteigne 50 à 98 % sa densité énergétique est inférieure aux autres technologies. Son principal inconvénient est la nécessité d'une isolation, mais il reste une solution simple et économique [10].

Dans le système (SCS), se trouve trois types de stockage [11] :

I.1.1.2 Stockage actif direct

Dans le cas du stockage direct, le fluide caloporteur sert à la fois de transporteur et de réservoir d'énergie, qu'il soit sous forme d'huile, d'eau ou d'huile produite synthétiquement. Ce type de stockage permet, entre autres, la production de vapeur d'eau à l'aide de l'énergie solaire. Il est fréquemment utilisé dans le secteur industriel pour maintenir un équilibre sain entre la production de vapeur et la demande.

I.1.1.3 Stockage actif indirect

L'énergie est d'abord absorbée par un fluide caloporteur, tel qu'un lubrifiant synthétique, avant d'être transférée via un échangeur de chaleur à un support de stockage, tel que des sels, dans cette approche. À l'heure actuelle, les seules solutions commercialement disponibles sont les systèmes de stockage de chaleur sensible qui sont principalement associés aux installations de concentration circulaire-parabolique et aux tours solaires. Cependant, l'un des plus grands problèmes de ce type de stockage est qu'il nécessite beaucoup de matériel, ce qui peut entraîner des coûts élevés à grande échelle.

I.1.1.4 Stockage passif

Le stockage thermique à l'aide d'un matériau solide, comme le béton, a été étudié en 2003 par la DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) à la plateforme solaire d'Almería (PSA). Cette recherche visait à mettre au point un matériau de stockage thermique efficace et peu onéreux, basé sur le principe du stockage par chaleur sensible.

Les matériaux utilisés sont conditionnés sous forme de lits granulaires ou de structures fixes, et l'échange de chaleur est assuré soit par un fluide caloporteur circulant à travers un échangeur thermique, soit en traversant directement le matériau poreux.

I.1.2 Stockage thermique par chaleur latente

Le stockage par chaleur latente repose sur l'énergie absorbée ou libérée lors du changement d'état d'un matériau. Pendant cette transition de phase, le matériau stocke ou restitue une quantité de chaleur correspondant à son enthalpie de changement d'état (ΔH), en fonction de la masse du matériau utilisé. Ce procédé permet d'accumuler et de restituer de la chaleur ou du froid de manière efficace, à une température stable proche de celle du matériau à changement de phase (PCM). Contrairement au stockage par chaleur sensible, cette méthode offre des densités énergétiques plus élevées et permet d'exploiter des variations de température et de flux thermiques très faibles [12].

I.1.3 Stockage thermochimique

Le stockage chimique de la chaleur ou stockage thermochimique, emmagasine l'énergie sous forme de liaisons chimiques lors de réactions réversibles, par exemple solide-gaz. Le stockage thermochimique s'effectue selon plusieurs voies possibles.

I.1.4 Stockage par sorption

La sorption comprend l'adsorption (en surface) et l'absorption (dans le volume) qui vont consommer de l'énergie. La transformation inverse, la désorption, résulte en la libération des molécules précédemment sorbes. Alors que la désorption est endothermique (stockage), la sorption est exothermique (déstockage).

I.2 Comparaison des différents types de stockage thermique

- Le stockage par chaleur sensible est le plus simple et économique mais présente une faible densité énergétique.
- Le stockage par chaleur latente est plus efficace grâce au changement de phase, permettant un stockage compact et à température stable.
- Le stockage thermochimique est le plus performant en termes de densité énergétique et de durée, mais il est aussi plus complexe et coûteux.

La différence entre les types de stockage thermiques est regroupé dans le 1 tableau suivant :

Tableau 1-1: Comparaison entre les différents types de stockage thermique [13]

		Stockage par chaleur sensible	Stockage par chaleur latente	Stockage thermochimique
Principe		Accumulation de chaleur en augmentant la température d'un matériau	Exploitation du changement d'un matériau pour stocker / restituer de l'énergie	Stockage de chaleur sous forme de liaisons chimiques lors de réactions réversibles
Densité d'énergie	Volumétrique	Faible~ 15-60kWh.m ⁻³	Moyenne ~ 50 -100 kWh.m ⁻³	Elevée ~ 100-500kWh.m ⁻³
	Massique	Faible ~ 0,02-0,03kWh.kg ⁻¹	Moyenne~ 0,05-0,1kWh.kg ⁻¹	Haute~ 0,5-1 kWh.kg ⁻¹
Température de stockage		Température de l'étape de Charge	Température de l'étape de Charge	Température de L'étape de charge ou ambiante
Durée de Stockage		Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes thermiques)	Théoriquement Illimitée
Transport de l'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance Théoriquement
Maturité		Echelle industrielle (20 MWe)	Echelle pilote (100 kWth)	Echelle laboratoire (1-5 kWth)
Technologie		Simple	Moyenne	Complexe

I.3 Critères de choix et de la conception d'un système de stockage

La conception d'un système de stockage repose sur de nombreux critères dont l'importance varie en fonction de la technologie employée et du mode de fonctionnement souhaité. Si la capacité thermique, c'est-à-dire la quantité d'énergie pouvant être stockée et restituée, constitue un élément central, d'autres aspects doivent également être pris en considération, qu'ils soient d'ordre économique ou technique [14].

I.3.1 Critères économiques

- Coût du matériau utilisé pour le stockage.
- Coût de l'échangeur thermique.
- Investissement nécessaire en fonction de l'encombrement du système de stockage.

I.3.2 Critères techniques

- Densité énergétique élevée (rapporté à la masse ou au volume).
- Bonne conductivité thermique.
- Efficacité des échanges de chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau de stockage.
- Stabilité mécanique et chimique du matériau utilisé.
- Compatibilité chimique entre le fluide caloporteur, l'échangeur thermique et le matériau de stockage.
- Capacité du matériau à assurer un grand nombre de cycles de charge et de décharge tout en restant performant.
- Faibles pertes thermiques.
- Maîtrise du contrôle et de la régulation du processus.

I.4 État de l'art du stockage thermique de chaleur sensible

Les performances d'un système de stockage thermique à lit fixe (TES) dépendent largement de ses caractéristiques thermiques, influencées par des paramètres tels que la sphéricité, la porosité et le diamètre des éléments de stockage.

Maithani et al, ont constaté qu'une augmentation de la fraction de vide entraîne une réduction de la stratification et une élévation de la température moyenne du lit. Ils ont conclu qu'une efficacité énergétique thermique optimale est atteinte lorsque la fraction de vide est minimale [15]. L'augmentation de la fraction de vide réduit la quantité de matériau de stockage dans le réservoir, ce qui diminue la capacité de stockage d'énergie et raccourcit le temps de charge [16].

Warkhade et al, ont réalisé des expériences pour analyser la distribution thermique d'un système de stockage en fonction de différentes formes géométriques (cubique, sphérique et cylindrique), en utilisant le béton comme matériau de stockage et l'air comme fluide caloporteur (HTF). Il a été observé qu'une augmentation de la fraction de vide entraîne une diminution de la stratification et une hausse de la température moyenne. Parmi les formes étudiées, le matériau de remplissage sphérique présente le temps de charge le plus court. Les résultats ont également révélé que la fraction de vide influence de manière significative le stockage d'énergie et la perte de charge dans le lit. Une augmentation de cette fraction réduit à la fois la capacité de stockage d'énergie et la perte de charge, et inversement [17].

Hoffmann et al, ont réalisé des études expérimentales et numériques sur un réservoir de stockage thermique à thermocline. Des roches de quartzite ont été employées comme matériau de stockage thermique avec une fraction de vide d'environ 0,4, tandis que l'huile de colza a été utilisée comme fluide caloporteur (HTF). Le système a été évalué sous différents débits massiques (0,01-0,05 kg/s) et avec deux tailles de particules distinctes. Les résultats ont révélé que les particules de petite taille offraient une meilleure efficacité de stockage, grâce à un transfert thermique optimisé entre le solide et le fluide. La géométrie G40, avec un débit massique de 0,3 kg/s, a permis d'atteindre une efficacité maximale de décharge de 75 %. Les résultats numériques ont montré une bonne corrélation avec les données expérimentales, bien qu'une légère limitation ait été relevée pour les débits massiques élevés dans le modèle numérique [18].

Bayón et Rojas ont étudié un modèle 1D-IP, appelé CIEMATIDISF, afin d'analyser les réservoirs de stockage à thermocline, en considérant soit un milieu de stockage liquide, soit une combinaison de milieux liquide et solide. Les performances du réservoir ont été évaluées en fonction de la vitesse, en se basant sur l'efficacité de décharge et l'épaisseur de la thermocline.

Les résultats ont montré qu'une augmentation de la vitesse (v) entraînait une diminution de l'épaisseur de la thermocline, tandis que l'efficacité du réservoir augmentait avec v , atteignant un maximum d'environ 87 % pour $v^2 \geq 2350$ [19].

Singh et al, ont réalisé des expériences pour évaluer les performances d'un système de stockage d'énergie solaire à lit de roches sous différentes conditions d'ensoleillement, tout en le modélisant théoriquement à l'aide de la méthode numérique d'approximation par différences finies. Les résultats expérimentaux ont montré une bonne concordance avec les valeurs prédites. L'efficacité de décharge du système à lit de roches s'est révélée supérieure à celle d'un système à lit fixe utilisant un matériau à changement de phase (PCM) comme la paraffine [20].

Cascetta et al, ont réalisé des expériences afin d'analyser les performances de transfert thermique d'un lit fixe composé de billes d'alumine d'un diamètre moyen de 8 mm. Un réservoir en acier au carbone a été utilisé pour accueillir ces billes, tandis que l'air servait de fluide caloporteur (HTF). La distribution de la température le long du réservoir de stockage a été examinée à la fois expérimentalement et numériquement à l'aide du modèle 2P-ID de Schumann. Les résultats numériques ont montré une bonne correspondance avec les données expérimentales lorsque les propriétés thermiques sont prises en compte comme étant dépendantes de la température. Les auteurs ont souligné que 40 % de la distance radiale est fortement impactée par la paroi du réservoir, indiquant ainsi que son influence durant le cycle de charge doit être prise en considération pour une évaluation précise du système [21].

Xu et al, ont mené une étude numérique sur les performances d'un système de stockage à thermocline à lit fixe, en examinant l'influence de la structure de la paroi, de la vitesse de l'air et des pertes thermiques. Les résultats ont révélé que la température d'entrée et la vitesse de l'air n'avaient qu'un impact négligeable sur le développement de la thermocline. Il a été observé qu'une augmentation de la hauteur du réservoir entraînait une diminution de la région de la thermocline et une amélioration de l'efficacité du système. Par ailleurs, une meilleure isolation permettrait de limiter efficacement les pertes de chaleur du système de stockage et de garantir une distribution plus homogène de la température du sel fondu dans la direction radiale [22].

Bruch et al, ont réalisé des essais pour évaluer les performances d'un système de stockage thermique à thermocline (TES). Ce système intégrait un mélange de roches et de sable de silice comme milieu de stockage, tandis que l'huile thermique était utilisée comme fluide caloporteur

(HTF). Afin d'étudier le comportement de la thermocline, plus de 250 thermocouples ont été installés dans le réservoir de stockage. Les résultats obtenus ont montré une bonne correspondance entre les données expérimentales et les simulations numériques, confirmant ainsi que le stockage à thermocline avec un milieu hybride constitue une solution efficace pour les centrales solaires à concentration (CSP) [23].

Becattini et al, ont analysé six types de roches pour leur capacité à stocker l'énergie thermique à haute température dans un système de stockage. Ces roches ont été soumises à des tests en laboratoire afin d'évaluer leurs propriétés thermiques et mécaniques, notamment la capacité calorifique, la porosité, le degré de fissuration et la fracturation. Les résultats ont révélé que les calcaires et les grès deviennent inadaptés à des températures dépassant 600 °C. En revanche, la serpentine, les roches magiques, les conglomérats riches en quartz et les roches felsiques se sont avérés adaptés au stockage de l'énergie à haute température [24].

Jemmal et al, ont analysé l'influence de la température sur les propriétés thermiques de deux matériaux de stockage distincts. Le système étudié intégrait des roches de silex et de quartz comme matériau de garnissage, avec de l'air utilisé comme fluide caloporteur (HTF). Les résultats ont révélé que la longévité des roches s'améliorait lorsque les températures de fonctionnement excédaient 250 °C [25].

Nsofor a mené une étude expérimentale et une modélisation d'un système de stockage thermique à lit fixe (TES). Des galets en oxyde de zirconium ont été utilisés comme matériau de stockage, avec des gaz de combustion comme fluide caloporteur durant la phase de stockage et de l'air ambiant lors de la décharge. Les résultats ont démontré que ces galets sont les plus adaptés au stockage de l'énergie à haute température, grâce à leur excellente stabilité thermodynamique, leur résistance à la corrosion et leur grande robustesse. De plus, il a été établi que le processus en contre-courant offre une récupération d'énergie plus efficace comparé à un écoulement parallèle dans le système de stockage [26].

Boonsu et al, ont réalisé des expériences pour évaluer les performances d'un prototype de système de stockage au cours des cycles de charge et de décharge. Le béton a été utilisé comme matériau de stockage et la vapeur comme fluide caloporteur (HTF). Les résultats ont révélé que l'augmentation des débits massiques améliore le coefficient global de transfert de chaleur (HTC)

et réduit le temps de charge. Il a également été observé que des débits plus élevés favorisent une meilleure efficacité énergétique [27].

Piyush et al, ont analysé l'influence des rainures intégrées dans un cylindre sur le transfert thermique et les caractéristiques de friction d'un système de stockage sensible à lit fixe. L'étude expérimentale a été menée sous diverses configurations et conditions de fonctionnement, notamment en faisant varier la fraction de vide, le rapport d'aspect du milieu de stockage et le nombre de Reynolds. Les performances du système ont été évaluées à travers le nombre de Nusselt et le facteur de friction. Les résultats ont révélé que le nombre de Nusselt augmente avec l'accroissement du nombre de Reynolds, tandis que le facteur de friction diminue avec une fraction de vide plus élevée. De plus, il a été constaté que l'augmentation du rapport d'aspect du milieu de stockage entraîne une hausse simultanée du nombre de Nusselt et du facteur de friction [28].

Vigneshwaran et al, ont réalisé des analyses numériques et expérimentales sur un système de stockage en acier moulé. Ce système est conçu selon une configuration à calandre et tubes, avec 19 pores facilitant le passage du fluide caloporteur (HTF). Les performances thermiques et le comportement du stockage ont été évalués en fonction de différentes températures d'entrée et débits massiques. Les résultats expérimentaux ont révélé que les taux de charge et de décharge augmentent avec des débits massiques plus élevés. Par ailleurs, une bonne concordance a été observée entre les résultats expérimentaux et les simulations numériques [29].

I.5 Type des lits fix pour le stockage de l'énergie

Comparées aux matériaux à changement de phase (PCMs) largement utilisés comme la paraffine, les acides gras présentent une conductivité thermique relativement faible, ce qui constitue un inconvénient majeur pour les systèmes de stockage thermique latent (LHTES). Cette faible conductivité thermique réduit l'échange de chaleur entre le fluide caloporteur (HTF) et le milieu de stockage. Pour améliorer le transfert thermique dans le système, il est nécessaire d'augmenter la conductivité du matériau de stockage ainsi que la surface d'échange thermique. Ainsi, des ailettes ont été utilisées pour accroître la surface de transfert thermique du système de stockage. De plus, l'ajout de divers additifs a permis d'améliorer la conductivité thermique des PCMs [30].

Miliozzi et al ont mené des expériences pour analyser le comportement thermique d'un système de stockage thermique latent. Leur étude s'est concentrée sur l'augmentation de la surface de contact entre l'enveloppe et le tube, ainsi que sur la variation de la conductivité du PCM [31].

Deux types de matériaux de stockage ont été utilisés : du sel fondu et du sel solaire, auxquels ont été ajoutées de petites quantités de nanoparticules de $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, avec de l'huile diathermique servant de fluide caloporteur. Les tests expérimentaux ont montré que la conductivité thermique du PCM et le taux de transfert de chaleur étaient améliorés grâce à l'augmentation de la surface d'échange et à l'ajout de nanoparticules.

Korti et Tlemsani ont mené des études expérimentales sur un système de stockage thermique latent utilisant différents types de PCMs et de l'eau comme fluide caloporteur. Les PCMs testés incluent de la paraffine raffinée, de la cire de bougie et de la paraffine semi-raffinée. Les résultats ont révélé que le débit du fluide caloporteur influence davantage la phase de charge que celle de décharge. Une augmentation de la température du fluide caloporteur permet de réduire le temps de charge, tandis que le temps de décharge s'allonge. En ajoutant de l'huile moteur au PCM, les performances du système se sont améliorées de 42,4 % pour la charge et 66 % pour la décharge [32].

Ma et al Ont étudié le comportement thermique d'un système de stockage avec et sans ailettes lors des phases de charge et de décharge. Des carbonates eutectiques ont été utilisés comme PCM pour stocker la chaleur, tandis que l'air servait de fluide caloporteur. L'ajout d'ailettes annulaires autour du tube a permis d'améliorer l'uniformité de la répartition thermique du PCM. Par conséquent, la puissance de charge et de décharge du système a augmenté, portant l'efficacité globale du stockage thermique de 34,4 % à 44,1 %. De plus, le temps de charge et de décharge a été réduit grâce à une augmentation du débit massique et de la température d'entrée du fluide en présence d'ailettes. Le tableau 10 présente un aperçu des différentes configurations de stockage, des types de fluides caloporteurs et des matériaux de stockage étudiés dans la littérature [33].

Jasim et al ont réalisé une étude expérimentale sur trois systèmes de stockage thermique latent en intégrant des techniques d'amélioration du transfert de chaleur, notamment l'utilisation d'ailettes, de laine métallique disposée de manière aléatoire autour des tubes du fluide caloporteur, et de laine métallique compactée en forme d'ailettes. Les résultats ont montré que la laine métallique constitue une solution économique, permettant d'augmenter le taux de transfert

thermique de 14 % par rapport à un système sans amélioration. La disposition aléatoire de la laine métallique s'est révélée plus efficace que la disposition compacte [34].

Enfin, Xiaohu et al ont comparé les performances de deux systèmes de stockage thermique : l'un utilisant de la paraffine pure et l'autre une paraffine intégrant une mousse de cuivre [35].

Les performances des deux PCMs ont été évaluées sous différentes vitesses d'entrée du fluide caloporteur. L'intégration de la mousse métallique dans la paraffine a permis d'améliorer sa conductivité thermique.

On présent les différentes géométries d'ailettes pour améliorer le taux de transfert de chaleur dans un système de stockage thermique latent dans la figure 1-2 :

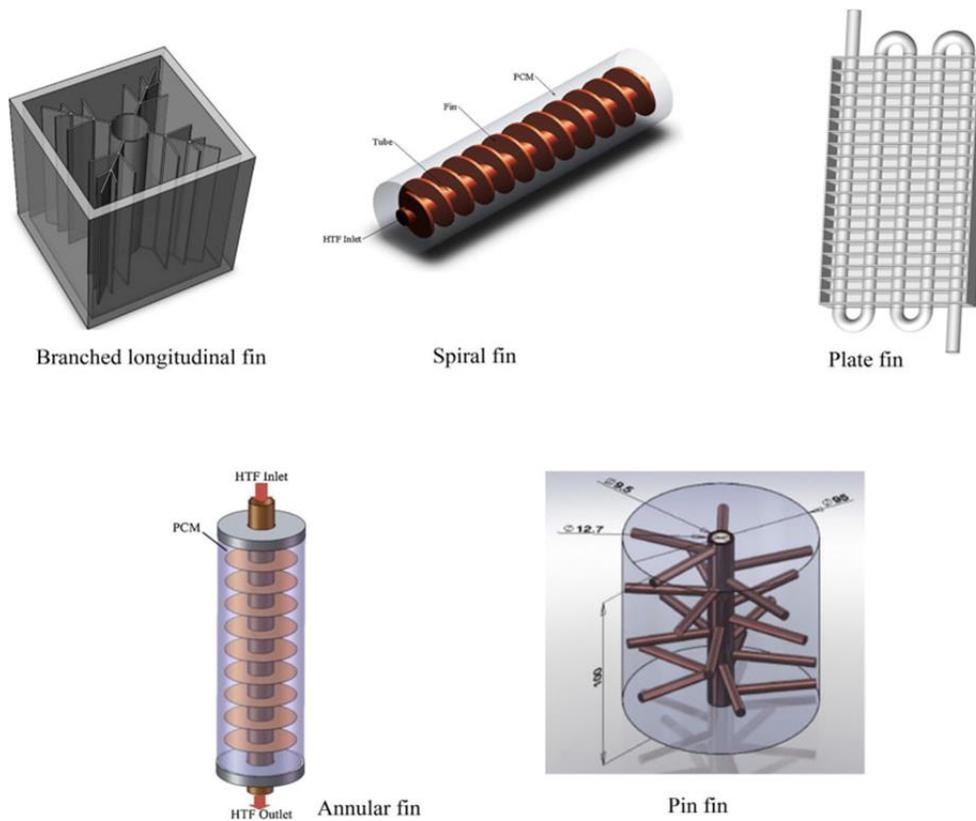


Figure 1-2 Différentes géométries d'ailettes pour améliorer le taux de transfert de chaleur dans un système de stockage thermique latent [36-40].

I.6 Projets a échelle réel opérationnels de stockage thermique

- Le Maroc possède le projet de la centrale pilote Ait-Baha, qui utilise la technologie des concentrateurs cylindro-paraboliques. La durée de stockage est de 5 heures, dans un milieu de stockage Roches, fluide de transfert de chaleur : Air sous une température de fonctionnement : 270-570°C, et une capacité de 3 MW [41].
- L'Allemagne possède le projet d'une centrale pilote a Julich avec la technologie de tour solaire d'une durée de stockage de 1.5 heure et un milieu de stockage : Céramique (Ceramic heat sink). Le fluide de transfert de chaleur est l'Air sous une température de fonctionnement de 680°C et une capacité de 1,5 MW [41].
- La cuve de stockage thermocline dans le projet « Le Miroir des Énergies » à Brest, en France, la technologie de stockage en cuve thermocline a été mise en œuvre de manière concrète, démontrant l'efficacité du stockage à grande échelle sur une base quotidienne et hebdomadaire [42].



Figure1-3 Le Miroir des Énergies (Brest)

- **Stockage Thermique en Sous-Station à La Villeneuve – CCG Grenoble**

Dans le quartier de La Villeneuve à Grenoble, en France, un système de stockage thermique par eau surchauffée a été instauré dans le but d'optimiser l'écart entre la production et la consommation de chaleur [42].

I.7 Le sable comme matériau de stockage

I.7.1 Propriétés du sable

Le sable est un matériau granulaire naturel résultant de la désagrégation et de l'érosion des roches sous l'effet des agents atmosphériques et hydrologiques. Sa composition est dominée par la silice (SiO_2), principalement sous forme de quartz, bien que d'autres minéraux comme les carbonates et le feldspath puissent être présents. Il constitue un élément fondamental des environnements désertiques, littoraux et fluviaux, jouant un rôle essentiel dans de nombreux processus géologiques et applications industrielles [43-44].

Il est un matériau aux multiples propriétés, dont la diversité influence largement ses usages dans divers domaines :

- Physiques : Le sable est un matériau granulaire dont la taille des particules varie entre 0,063 mm et 2 mm. Il se distingue par une densité comprise entre 1,5 et 1,8 g/cm^3 et une perméabilité élevée, ce qui lui confère une capacité d'infiltration et de drainage efficace. Ces caractéristiques le rendent essentiel dans divers domaines, notamment la construction, la filtration et la stabilisation des sols.
- Chimiques : Majoritairement composé de dioxyde de silicium (SiO_2) sous forme de quartz, le sable peut également contenir des minéraux secondaires tels que les carbonates, les oxydes de fer et le feldspath. Il présente une stabilité chimique en conditions normales mais peut réagir aux acides forts, ce qui influence son utilisation dans les processus industriels et les applications spécifiques en génie chimique.
- Mécaniques : Grâce à sa composition minérale, le sable possède une dureté modérée et une forte friction interne, garantissant une excellente stabilité structurelle. Ces propriétés en font un matériau de choix pour le génie civil, les fondations et les structures de soutènement, où il contribue à la résistance mécanique et à la durabilité des infrastructures.
- Thermiques : Doté d'une capacité thermique élevée et d'une excellente résistance aux températures extrêmes, le sable est un élément clé dans les industries du verre, de la métallurgie et des matériaux réfractaires. Sa faible conductivité thermique lui permet également d'être utilisé dans des applications d'isolation et de stockage de chaleur.
- Écologiques : Ressource naturelle omniprésente, le sable est indispensable aux écosystèmes côtiers, désertiques et fluviaux. Toutefois, son extraction intensive,

notamment pour l'industrie du bâtiment, peut provoquer des déséquilibres environnementaux majeurs, contribuant à l'érosion côtière, à la déstabilisation des cours d'eau et à la destruction d'habitats naturels essentiels.

I.7.2 Avantages et inconvénients du sable

Le sable présente quelques avantages tel que son faible coût, sa disponibilité, être non toxique et son utilisation directe sans prétraitement dans les récepteurs solaires. Cependant, il présente aussi quelques inconvénients à savoir sa faible densité et conductivité thermique.

I.8 Performance des métaux ferreux (aluminium, (Fe)) et sel

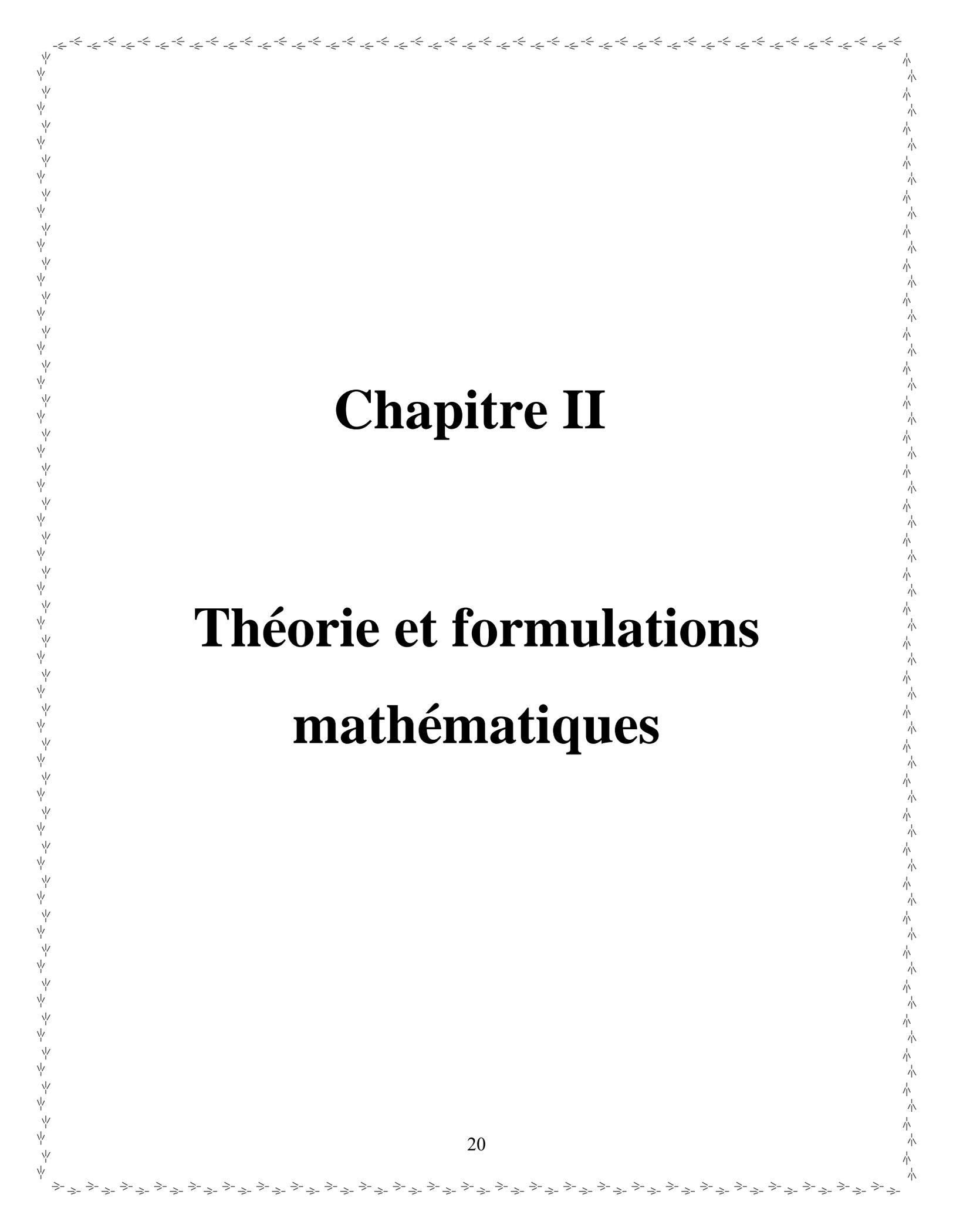
La conductivité thermique, la masse volumique, point de fusion, la capacité thermique spécifique, et mécanique sont reconsidéré comme performances des ferreux (Fonte (Fe) et aluminium,) et sel. Cependant, les performances (propriétés) importantes pour la présente étude sont illustrés dans le tableau 5 suivant :

Tableau 1-2 : Propriétés des métaux ferreux et le sel [45-46]

Métaux ferreux	Conductivité thermique (W/m.k)	Chaleur spécifique (J/kg.k)	Capacité thermique (kJ/m³. k)	Densité (g/cm³)
Aluminium	204 - 238	896 - 945	2419 - 2551	2.7
Sel	7	850	1.9	2.16
Fonte (Fe)	29.3 - 73	465 - 837	3348 - 6612	7.2 - 7.9
Acier	2.0 - 3.5	996	2968	3

I.9 Conclusion

En conclusion, le concept de stockage de la chaleur s'articule autour de trois mécanismes : la chaleur latente, la chaleur sensible et la réaction chimique. La sélection dépend des exigences économiques, et méthodes ainsi que la période de conservation souhaitée. L'analyse comparative des diverses formes et matériaux de stockage thermique a révélé les bénéfices de l'emploi du stockage sensible solide, en particulier sa technologie bien établie, sa simplicité et sa stabilité.



Chapitre II

Théorie et formulations mathématiques

CHAPITRE 2 : THÉORIE ET FORMULATIONS MATHÉMATIQUE

Introduction

Dans le cadre de notre étude sur le stockage de l'énergie thermique nous avons opté pour la méthode de stockage par chaleur sensible en raison de sa simplicité, de sa fiabilité ainsi que de son efficacité dans de nombreuses applications industrielles et énergétiques. Ce mode de stockage repose sur la capacité d'un matériau à emmagasiner ou restituer de la chaleur lors d'une variation de température, sans changement de phase.

Le transfert de chaleur peut se faire par conduction, convection et mixte. L'étude du transfert de chaleur dans des milieux poreux comme le sable ou les métaux est importante pour la géothermie, l'ingénierie des procédés et l'isolation thermique. Les propriétés thermo-physiques de ces milieux, comme la conductivité thermique, la capacité thermique et la diffusivité thermique, sont affectées par leur structure poreuse. Comprendre ces propriétés est crucial pour modéliser et prédire le transfert de chaleur dans ces systèmes, ce qui permet de concevoir des systèmes plus efficaces et durables.

II. Procédés du stockage thermique par chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible offre une plage de température étendue comparée aux autres types de stockage. Grâce à sa maturité, cette technique est bien établie dans l'industrie solaire thermique.

Les systèmes de stockage thermique sensible stockent l'énergie thermique en augmentant la température du matériau de stockage, sans qu'il y ait de changement de phase [47]. La quantité d'énergie emmagasinée dépend de la chaleur spécifique du matériau, de sa masse et de la différence de température. Ces systèmes sont peu coûteux et simples à mettre en œuvre, grâce à la bonne conductivité thermique, la non-toxicité, la densité élevée et la stabilité à long terme des matériaux utilisés. Ils représentent une alternative plus simple que les systèmes de stockage par changement de phase [48], donner par l'équation suivant [49] :

$$\partial Q_{T_f}^{T_i} = mC_p dT = mC_p \partial(T_f - T_i) \quad (\text{II.1})$$

Le stockage par chaleur sensible peut être classé en deux catégories selon le matériau de stockage : Le stockage par un liquide (eau, huile, sels fondus, etc.) et le stockage par un solide (pierre, sable, métaux, etc.). Chaque type de stockage possède ses propres caractéristiques et applications spécifiques [50].

La figure 2-1 présente les classifications des supports SHS.

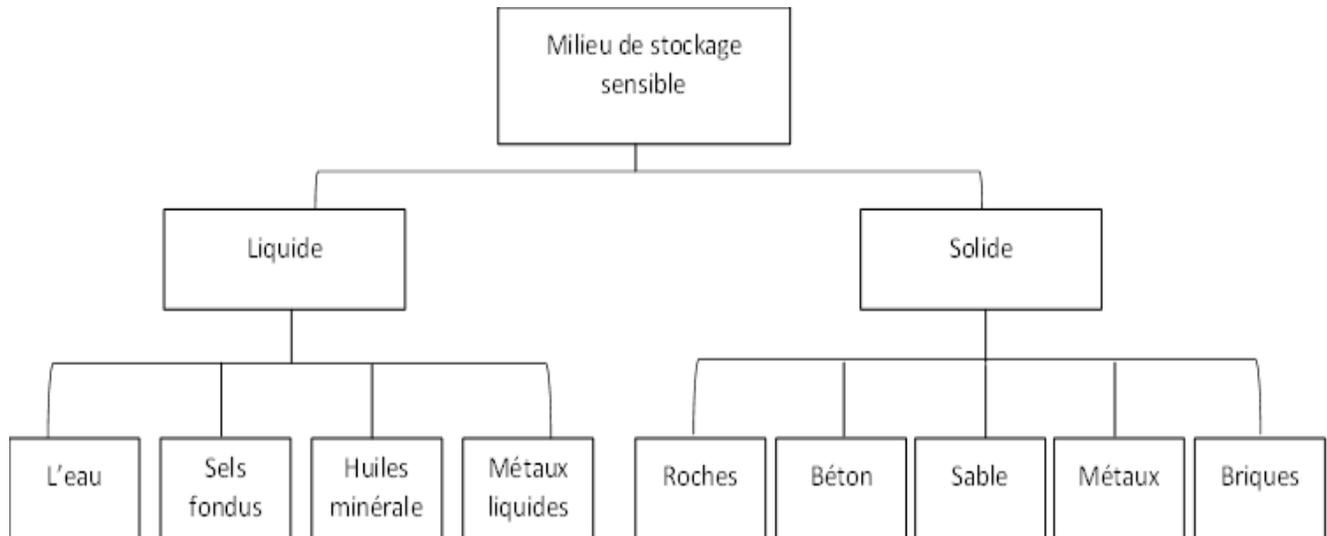


Figure 2-1 Classification des supports de stockage de chaleur sensible [50]

II.1.1 Le stockage liquide

Le stockage thermique liquide offre une solution pratique et économique. L'eau, largement utilisée pour des applications à basse température (25-90°C), stocke 250 kJ/kg pour une variation de température de 60°C, ce qui la rend idéale pour le chauffage des bâtiments et l'eau chaude sanitaire. Cependant, sa pression de vapeur élevée à haute température pose un problème majeur, nécessitant des réservoirs de stockage importants [51].

D'autres liquides, tels que les sels fondus et les huiles organiques, sont utilisés pour le stockage sensible. Bien que ces solutions offrent des avantages, elles nécessitent des installations sophistiquées pour assurer la sécurité et la stabilité, augmentant ainsi la complexité du contrôle [52, 53].

II.1.2 Le stockage solide

Le stockage thermique solide offre une alternative intéressante aux systèmes liquides, car il peut être utilisé à la fois à haute et à basse température, sans les inconvénients liés à la pression de vapeur, la corrosion, la stabilité et la sécurité.

De nombreux matériaux solides sont utilisés, la fonte étant particulièrement performante en termes de densité de stockage, dépassant même celle de l'eau. Cependant, son coût élevé et sa longue période de retour sur investissement limitent son utilisation [54].

Le béton et la pierre, des matériaux plus abordables, sont largement utilisés dans les applications solaires du bâtiment. Pour une variation de température de 50°C, ils stockent environ 36 kJ/kg. Bien que le stockage sensible solide nécessite un volume plus important que le stockage liquide, il offre une solution fiable et durable [55]. La figure 2-2- illustre la différence de volume nécessaire pour stocker la même quantité d'énergie (143,4.108J).

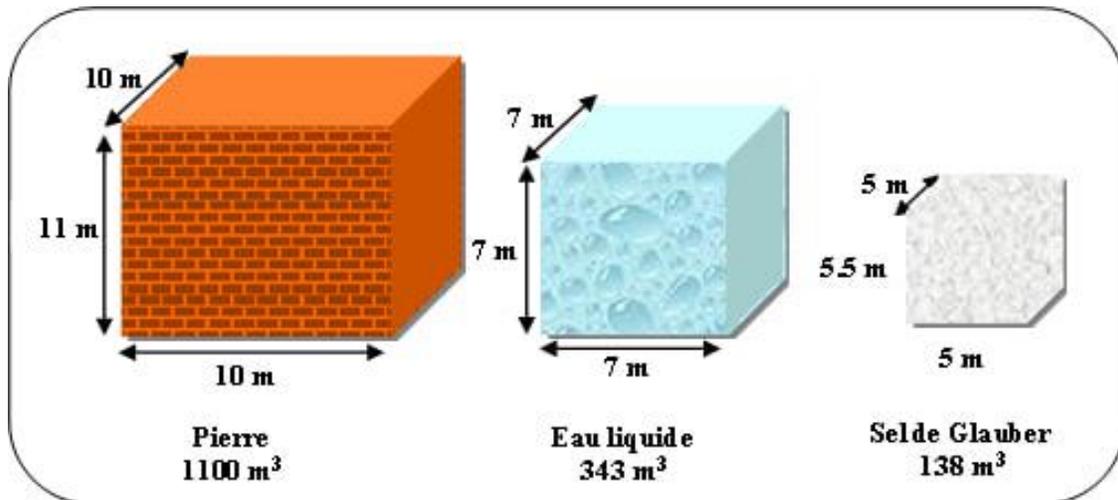


Figure 2-2 : Volume nécessaire pour la même énergie stockée.

II.2 Présentation de système

La méthode proposée utilise un réservoir de matériau solide destiné au stockage, dans lequel circule un fluide Caloporteur. Lors de la phase de charge, ce fluide transfère la chaleur au matériau en traversant le réservoir de haut en bas à l'aide d'un serpentin en cuivre. Lors de la phase de décharge, le fluide caloporteur se déplace en sens inverse avec une température basse. Cette méthode est généralement utilisée avec des capteurs solaires thermiques. Dans certaines configurations, le fluide caloporteur est transporté par des conduits. La figure 2-3 présente le schéma de stockage à lit emballé.

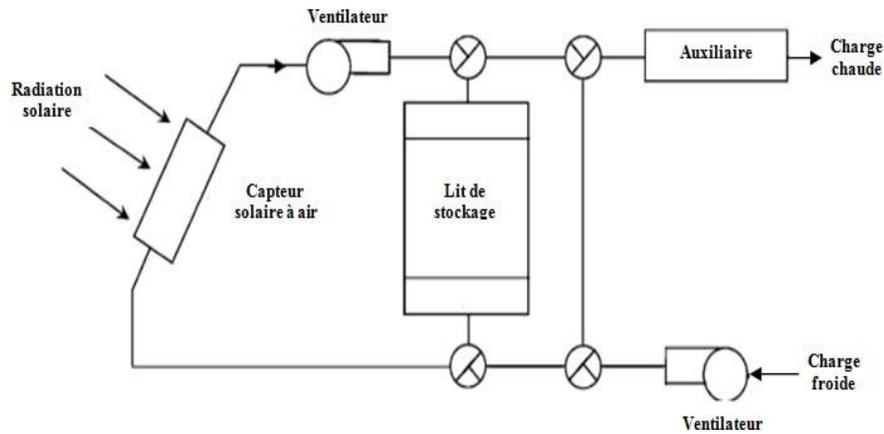


Figure 2-3 Schéma de principe d'un lit emballé

Grâce à leur capacité à stratifier la température, les systèmes du stockage à lit fixe sont efficaces car ils maintiennent la température initiale tout en chauffant les portes proches de l'entrée. Lorsque la température est uniforme, le lit fixe est complètement chargée. Les systèmes solaires, en revanche, ont une température de départ variable, ce qui complique la modélisation. Sur la base d'hypothèses telles que l'absence de conduction axiale, le transfert de masse et la perte de chaleur vers l'environnement, Schumann a proposé un modèle simplifié [52].

Les équations différentielles pour les températures du fluide et du lit (t_f , t_b) sont les suivantes :

$$\bullet \quad (\rho c_p)_f \varepsilon = \frac{\partial t_f}{\partial \tau} = -\frac{m_f c_{p_f}}{A} \frac{\partial t_f}{\partial x} + k_v (t_b - t_f) \quad (\text{II.2})$$

$$\bullet \quad \rho_b c_{p,b} (1 - \varepsilon) \frac{\partial t_b}{\partial \tau} = k_v (t_f - t_b) \quad (\text{II.3})$$

Avec ρ_f est la densité du fluide ; $C_{p,f}$ est la chaleur spécifique du fluide ; ε est la fraction de vide du lit ; \dot{m}_f est le débit massique du fluide ; A est la surface de la section transversale du lit ; k_v est le coefficient de transfert de chaleur volumique (par unité de volume de lit) entre le lit et le fluide ; τ est le temps.

Pour un système à base d'air, le premier terme du côté gauche de l'équation (II.2) peut être négligé et les équations peuvent être écrites comme suit [56] :

$$\bullet \quad \frac{\partial t_f}{\partial(x/L)} = NTU(t_b - t_f) \quad (\text{II.4})$$

$$\bullet \quad \frac{\partial t_b}{\partial \Theta} = NTU(t_f - t_b) \quad (\text{II.5})$$

$$\bullet \quad NTU = \frac{k_v AL}{m_f c_{p,f}} \quad (\text{II.6})$$

Et le temps sans dimension est :

$$\bullet \quad \Theta = \frac{\tau m_f c_{p,f}}{\rho_b c_{p,b} (1 - \varepsilon) AL} \quad (\text{II.7})$$

Où A est la surface de la section transversale du lit ; L est la longueur du lit ; NTU est l'efficacité.

Des solutions analytiques à ces équations existent pour un changement brusque des conditions d'entrée et pour un fonctionnement cyclique. Cependant, pour l'étude à long terme des systèmes d'énergie solaire, ces solutions analytiques ne sont pas utiles, et des techniques numériques telles que la méthode des différences finies doit être utilisées. Les résultats d'une étude sur un lit garni rempli de briques en céramique sont présentés par Nems et al. [57].

L'installation de stockage prévue est destinée à être intégrée dans un système de chauffage dans une résidence unifamiliale et à terme inclure un capteur solaire concentré personnalisé.

Comme l'unité de stockage sera située à l'intérieur d'un bâtiment résidentiel, il est crucial qu'elle ne produise pas de gaz nocifs lorsqu'elle est chauffée à haute température. Lorsque la chaleur provient d'une source à intensité variable, comme un capteur solaire à air concentré, il devrait être

possible de réguler le débit d'air dans un système où la chaleur est stockée dans un matériau de stockage sensible, comme la brique céramique, afin d'optimiser l'efficacité du processus de stockage [57].

II.3 Transfer de chaleur dans le lit de sable

Le transfert thermique entre deux corps est l'échange d'énergie dû à une différence de température. Il se fait selon trois modes distincts : conduction, convection et rayonnement, chacun régi par des lois spécifiques.

II.3.1 Transfer de chaleur par conduction

Dans un milieu poreux avec un fluide immobile, la conductivité thermique effective dépend des propriétés des phases, de la porosité et de la structure du solide. Le transfert de chaleur par conduction suit la loi de Fourier [58] :

$$\varphi_{cond} = -\lambda_{eff} S \vec{\nabla}(T) \quad (II.8)$$

φ_{cond} (W) est disponible. La conductivité thermique effective ou équivalente λ_{eff} , qui est déterminée par les conductivités thermiques λ_s et λ_f des phases solides (indice s) et fluides (indice f) qui composent le milieu poreux, leurs fractions volumiques (porosité \mathcal{E}) et la structure de la matrice solide (continuité, état de surface, points de contact...).

Houpeurt et al. 1965. Ont révélé qu'en pratique, une recherche d'un équilibre thermique rapide s'établit selon la granulométrie : moins d'une minute pour 1 mm, jusqu'à deux heures pour 100 mm [59].

Boisdet et al., 1982, à l'aide d'un modèle mathématique unidimensionnel, ont étudié le comportement thermique d'un système de stockage et ont révélé les températures du solide et du fluide au cours des phases d'évolution dynamique [60].

II.3.2 Transfer de chaleur par convection

Dans un milieu poreux saturé en fluide, la convection thermique combine conduction et transport d'énergie par le fluide en mouvement. Elle peut être forcée, naturelle ou mixte. Son étude est complexe en raison de l'hétérogénéité du milieu et des interactions thermiques à l'échelle des pores. Le flux convectif de chaleur s'exprime par la loi Newton [61] suivant :

$$\varphi_{conv} = h(T_p - T_f) \quad (\text{II.9})$$

Tout comme dans les fluides monophasiques, la convection forcée dans les milieux poreux est provoquée par des forces externes, tandis que la convection libre ou naturelle est due à une variation de densité du fluide résultant d'un gradient de température dans le champ d'écoulement. Ces deux types de convection constituent les deux principales formes de transfert de chaleur par convection dans les milieux poreux. Entre ces deux cas extrêmes, on peut identifier un troisième type de convection : la convection mixte [62].

II.3.2.1 Transfert de chaleur par convection libre

La convection naturelle, qui est le mouvement d'un fluide résultant des différences de densité entre ses particules chaudes et froides, est influencée par la nature du fluide. Dans les milieux poreux, l'écoulement naturel du fluide interstitiel est principalement d'origine thermique, résultant de plusieurs forces, dont la gravité et les variations de masse volumique dues aux différences de température.

La modélisation mathématique de ces écoulements et du transfert de chaleur, où les fluctuations de volume de fluide sont représentées par une équation de la forme [63] :

$$\rho_f(T) = \rho_f(T_0)[1 - \beta(T - T_0)] \quad (\text{II.10})$$

Où β est le coefficient d'expansion thermique et $\rho_f(T_0)$ est la masse volumique à la température T_0 .

II.3.2.2 Transfert de chaleur par convection forcée :

La convection forcée est un type de transfert thermique qui utilise des forces externes (pompes, ventilateurs, etc.) pour déplacer le fluide et augmenter le transfert de chaleur par rapport à la convection naturelle. L'intensité du transfert thermique dépend du régime d'écoulement du fluide [64], qui est déterminé par le nombre de Reynolds [65].

Le nombre de Reynolds est un nombre adimensionnel qui compare les forces d'inertie (transport de la quantité de mouvement) aux forces visqueuses (diffusion de la quantité de mouvement) dans le fluide.

Il résume le rapport entre les termes de force d'inertie et celle des forces visqueuses de l'équation Navier-stokes :

$$\rho_f (\vec{V}_{fil} \nabla) \vec{V}_{fil} = -\vec{\nabla}_p + \mu_{eff} \nabla^2 \vec{V}_{fil} \quad (II.11)$$

$\rho_f (\vec{V}_{fil} \nabla) \vec{V}_{fil}$ est l'effets d'inertie : transport de la quantité de mouvement et $\mu_{eff} \nabla^2 \vec{V}_{fil}$ est l'effets visqueux de diffusion de la quantité de mouvement. [65]

$$Re = \frac{\text{Force d'inertie}}{\text{Force visqueuses}} = \frac{\rho_f \vec{V}_{fil}^2 / L}{\mu_f \vec{V}_{fil} / L^2} = \frac{\rho_f \vec{V}_{fil} L}{\mu_f} \quad (II.12)$$

II.3.2.3 Transfert de chaleur par convection mixte

La convection forcée et la convection naturelle sont deux mécanismes distincts de transfert de chaleur. La convection forcée ignore les effets de la gravité, tandis que la convection naturelle en tient compte. Cependant, il existe des situations où les deux mécanismes coexistent avec des forces comparables, ce qui est appelé la convection mixte.

On retrouve cette mixité dans des contextes variés, comme les systèmes de chauffage et de climatisation, les panaches de fumée, les écoulements atmosphériques et les courants marins.

La convection mixte peut être soit "assistée" soit "contrariée" selon l'interaction entre le mouvement forcé et le mouvement gravitationnel.

Si les deux mouvements sont dans le même sens, la convection est assistée, ce qui augmente le taux de transfert de chaleur. Par exemple, une plaque verticale chauffée dans un fluide ascendant voit son transfert de chaleur augmenter.

Si les deux mouvements sont en opposition, la convection est contrariée, ce qui freine l'écoulement et diminue le transfert de chaleur.

En conclusion, même lorsque le flux forcé est horizontal, c'est-à-dire perpendiculaire à la direction des forces gravitationnelles, on observe généralement une amélioration des échanges thermiques [63].

Le Nombre de *Richardson*, Ri est le rapport entre les forces d'*Archimède* $\rho_f g \beta (T_p - T_f)$ et les forces d'inertie $\frac{\rho_f V_{fil}^2}{L}$, est donné par :

$$\bullet \quad Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (II.13)$$

Le nombre de *Richardson*, Ri est le groupe adimensionnel qui détermine le type de convection est dominante pour un système en convection mixte.

- Si : $Ri \ll 1$ c'est la convection forcée qui domine ;
- Si : $Ri \gg 1$ c'est la convection naturelle qui domine ;
- Si : $Ri \approx 1$ c'est le domaine de la convection mixte.

II.3.3 Transfer de chaleur par contact

Dans le cas de surfaces chauffées en contact avec des particules solides mobiles, le transfert de chaleur se réalise essentiellement par contact. Des études sur ce thème ont montré que le transfert de chaleur par contact s'accroît avec la taille, le rayon et la vitesse des particules, tandis qu'il se réduit avec le coefficient de Young [66-68]. Pour établir les coefficients de transfert de chaleur entre (particules/surfaces) et (surfaces/particules), diverses corrélations ont été suggérées. Sun et Chen [68] ont suggéré une formule pour évaluer le coefficient d'échange particule/surface, en partant du principe que toutes les particules ont des caractéristiques identiques :

$$h = 0.41 C \dot{N} \rho_c A_c \sqrt{\lambda t_c} \quad (II.14)$$

Où Dans cette équation, C est un coefficient de correction exprimé en termes exponentiels selon un rapport spécifique, N désigne le flux de particules, c représente la capacité calorifique par unité de volume, A_c symbolise la surface de contact entre les particules ou entre une particule et une paroi, t indique la durée du contact et λ représente la conductivité thermique du matériau.

Pour des temps de contact courts et intermédiaires, Schlunder [67] a suggéré une formule pour déterminer le coefficient de transfert thermique en fonction des caractéristiques thermiques réelles du milieu à grain fin, pour des périodes de contact courtes et intermédiaires :

$$h = 2 \sqrt{\frac{(\rho c_p \lambda)_e}{\pi t_c}} \quad (II.15)$$

Même si le transfert de chaleur par contact est prépondérant dans les milieux granulaires denses à mouvement lent, on peut l'omettre dans les milieux dilués à circulation rapide ($t_c \rightarrow 0$).

II.4 Mécanismes de transfert de chaleur dans un lit granulaire :

Dans un lit granulaire statique (ou lit fixe), plusieurs mécanismes de transfert de chaleur peuvent intervenir, indépendamment de la présence d'un écoulement de fluide [69,70].

Ces mécanismes incluent :

- La conduction thermique à travers le fluide immobile emprisonné entre les particules ;
- La conduction à travers la phase solide (les grains eux-mêmes) ;
- La conduction au niveau des zones de contact entre particules ;
- Le transfert radiatif entre les surfaces des particules ;
- Le transfert radiatif entre les pores ou vides adjacents.

Lorsque le lit granulaire est soumis à un écoulement de fluide, d'autres mécanismes de transfert de chaleur viennent s'ajouter, notamment :

- La conduction thermique à travers le film fluide situé à proximité des zones de contact entre les particules (figure 2-4) ;
- Le transfert de chaleur par convection entre la phase solide et le fluide circulant, puis vers une autre phase solide (convection solide–fluide–solide).

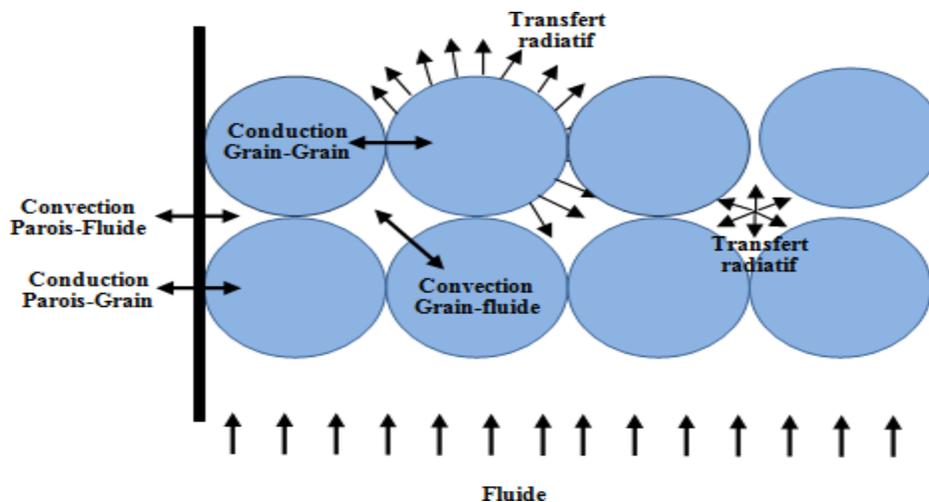


Figure 2-4 : Échanges de chaleur dans un lit granulaire

Le transfert de chaleur dans un lit granulaire en mouvement, tel qu'un lit fluidisé, repose sur les mêmes mécanismes que ceux observés dans un lit statique, notamment les contacts entre particules, les contacts particules-parois ainsi que le rayonnement thermique .Toutefois, le déplacement des particules au sein du lit introduit un terme advectif dans l'équation de transport d'énergie, qui, dans de nombreux cas, devient le mécanisme prédominant du transfert thermique dans ce type de milieu [71 ,72].

II.4.1 Modélisation du transfert thermique dans un milieu granulaire

La modélisation du transfert thermique dans un milieu granulaire repose sur différents modèles. Parmi les plus utilisés, on trouve le modèle à une température et le modèle à deux températures. Ces modèles, basés sur l'équation de la chaleur, prennent en compte les propriétés thermiques des deux phases (solide et fluide) et le transfert de chaleur par advection lié à l'écoulement du fluide. Des modèles spécifiques existent également pour décrire le transfert thermique près des parois, tels que les modèles standards et dispersifs [73,74] :

II.4.1.1 Le modèle à deux températures :

Le modèle à deux températures moyennes, largement utilisé dans la littérature, distingue la température des grains (T_s) de celle du fluide (T_f). Ce modèle repose sur la décomposition de chaque champ de température en une composante moyenne et une fluctuation spatiale.

$$T_f = \langle T_f \rangle^f + \tilde{T}_f \quad (\text{II.16})$$

$$T_s = \langle T_s \rangle^s + \tilde{T}_s \quad (\text{II.17})$$

Les fluctuations spatiales des températures peuvent être reliées aux températures moyennes comme suit :

- $\tilde{T}_f = f_f \cdot \nabla \langle T_f \rangle^f + g_f \cdot \nabla \langle T_f \rangle^f + h_f (\langle T_s \rangle^s - \langle T_f \rangle^f)$ (II.18)

- $\tilde{T}_s = f_s \cdot \nabla \langle T_s \rangle^s + g_s \cdot \nabla \langle T_s \rangle^s + h_s (\langle T_s \rangle^s - \langle T_f \rangle^f)$ (II.19)

Les fonctions de fermeture (f, g, h) qui dépendent de la géométrie du problème, de la position et du champ de vitesse local. En substituant les expressions de T_f et T_s dans les équations moyennes pour chaque phase, on obtient un système d'équations :

$$\bullet \quad \varepsilon(\rho C_p)_f \frac{\partial \langle T_f \rangle^f}{\partial t} = \nabla(\lambda_{ff} \nabla \langle T_f \rangle^f + \lambda_{fs} \langle T_s \rangle^s) - (\mu_{ff} \nabla \langle T_f \rangle^f + \mu_{fs} \nabla \langle T_s \rangle^s) + h a_v (\langle T_s \rangle^s - \langle T_f \rangle^f) \quad (\text{II.20})$$

$$\bullet \quad (1-\varepsilon)(\rho C_p)_s \frac{\partial \langle T_s \rangle^s}{\partial t} = \nabla(\lambda_{sf} \nabla \langle T_f \rangle^f + \lambda_{ss} \langle T_s \rangle^s) - (\mu_{sf} \nabla \langle T_f \rangle^f + \mu_{ss} \nabla \langle T_s \rangle^s) + h a_v (\langle T_s \rangle^s - \langle T_f \rangle^f) \quad (\text{II.21})$$

Ce modèle complexe implique quatre tenseurs de dispersion (λ), quatre vecteurs de vitesse (μ) et un coefficient h . Le paramètre a_v représente la surface de l'interface solide/fluide par unité de volume du milieu granulaire. Dans le cas d'un lit fixe composé de particules sphériques de diamètre d et de porosité ε , la surface caractéristique est déterminée par une relation spécifique :

$$\bullet \quad a_v = \frac{6(1-\varepsilon)}{d} \quad (\text{II.22})$$

La complexité du modèle, due au nombre important de paramètres, rend son utilisation pratique difficile. Des études antérieures ont démontré que dans le cas d'une géométrie monodimensionnelle et pour des temps longs, le modèle à deux températures peut être simplifié par des équations spécifiques [74,75] : λ_x

$$\bullet \quad \frac{\partial \langle T_\sigma \rangle^\sigma}{\partial t} + u \frac{\partial \langle T_\sigma \rangle^\sigma}{\partial x} = \frac{\lambda_x}{\langle \rho C_p \rangle_t} \frac{\partial^2 \langle T_\sigma \rangle^\sigma}{\partial x^2} \quad (\text{II.23})$$

Où $(\rho C_p)_t = \langle \rho C_p \rangle$ est la chaleur volumique du milieu granulaire

Ces équations considèrent une seule équation pour chaque phase ($\sigma = f, s$) avec une vitesse de Darcy commune et un coefficient de dispersion unique λ_x . Malgré cela, les zones thermiquement affectées dans chaque phase présentent un décalage spatial.

En pratique, pour des temps longs, ce décalage reste négligeable par rapport aux dimensions spatiales macroscopiques. Cette simplification du processus de dispersion thermique permet de généraliser le modèle en utilisant une seule température moyenne [75].

II.4.1.2 : Le modèle à une température

Ce modèle, basé sur les techniques d'homogénéisation et de prise de moyenne volumique, permet de formuler les équations de conservation de l'énergie des deux phases en utilisant une température unique. Il suppose l'équilibre thermique entre les phases solide et fluide [76] :

$$\bullet \quad \langle T \rangle = \langle T_f \rangle^f = \langle T_s \rangle^s \quad (\text{II.24})$$

Bien que des études [76] aient démontré que cette condition n'est pas nécessaire. Il est possible de définir une température enthalpique (T_h), qui représente la température moyenne des deux phases. Et cela comme suit :

$$\bullet \quad \langle T_h \rangle = \frac{1}{(\rho C_p)_t V} \int_V \rho C_p(r) T dv \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$$\bullet \quad (\rho C_p)_t = \varepsilon (\rho C_p)_f + (1 - \varepsilon) (\rho C_p)_s \quad (\text{II.26})$$

Cette température est calculée comme une moyenne volumique de l'enthalpie H du système dans un volume élémentaire V :

$$\bullet \quad (\rho C_p)_t T_H = \langle H \rangle \quad (\text{II.27})$$

La température moyenne enthalpique est donnée par une équation spécifique :

$$\bullet \quad (\rho C_p)_t \frac{\partial [T]}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla \langle T \rangle) - \varepsilon (\rho C_p)_f \langle u_f \rangle^f \cdot \nabla \langle T \rangle \quad (\text{II.28})$$

Avec $\langle u_f \rangle^f$ est la vitesse moyenne intrinsèque de la phase fluide, $u_D = \langle u_f \rangle^f$ est la vitesse de Darcy,

Le tenseur de dispersion thermique prend en compte plusieurs composantes [77], notamment une contribution purement conductive, une contribution due à la dispersion massique et un terme de tortuosité dépendant de la vitesse moyenne et de la géométrie du milieu.

Dans la littérature, ce modèle est souvent utilisé avec des approximations concernant le tenseur de dispersion thermique. Il est généralement considéré comme un simple tenseur de conductivité effective, calculé en considérant une conduction parallèle fluide/solide au sein du milieu granuleux [78].

II.5 Caractéristiques géométriques du dispositif de stockage

L'amélioration de l'échange thermique est souvent possible grâce à l'utilisation de milieux poreux, caractérisés par leur structure solide complexe et leurs cavités inter-connectées accessibles aux fluides. Ces milieux sont le siège d'une multitude de phénomènes physiques, chimiques et de

transport. Bien que souvent considérés comme homogènes et isotropes, ils présentent en réalité une anisotropie dans leurs propriétés mécaniques et thermiques, un aspect crucial dans de nombreuses applications pratiques [79].

II.5.1 Définition des milieux poreux:

Un milieu poreux est un matériau constitué d'une structure solide renfermant des cavités internes, appelées pores. Ces pores, de formes et de dimensions variées, peuvent être plus ou moins connectés entre eux, influençant ainsi les propriétés du milieu, notamment en termes de perméabilité et de rétention des fluides [80-81].

Les milieux poreux se classent en deux catégories en fonction de la nature de leur matrice (voir figures 2-5 et 2-6) :

- a) **Milieu consolidé** : Il s'agit d'un matériau poreux ou alvéolaire dont la matrice est compacte et cohérente. Les particules solides y sont fortement liées, rendant le matériau difficile à fragmenter. Les pores se présentent généralement sous forme de fissures. Parmi les exemples de milieux consolidés, on trouve les roches, le calcaire, le grès, les céramiques et les tissus biologiques [82].

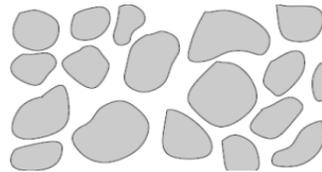


Figure 2-5- Milieu consolidé [82].

- b) **Milieu non consolidé** : Contrairement au milieu consolidé, ce type de matériau est constitué d'une matrice granulaire ou pulvérulente, où les particules solides ne sont pas soudées entre elles. Il s'apparente à un espace vide rempli de grains ou de particules en suspension. Les exemples incluent le gravier, le sable et les billes [82].

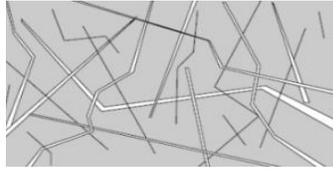


Figure 2-6- Milieu non consolidé [82].

II.5.2 La porosité et indice de vide

-Le volume total (V_t), d'un matériau poreux est constitué de la somme du volume du solide (V_s) et du volume des pores (ou vides) (V_v) présents dans le matériau :

$$V_t = V_s + V_v. \quad (\text{II.29})$$

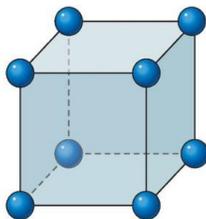
-La porosité est un paramètre clé des milieux poreux, définie comme le rapport entre le volume des pores et le volume total du matériau.

-La porosité est une grandeur variant de 0 (solide dense) à 1 (milieu totalement vide) et s'exprime généralement en pourcentage [83].

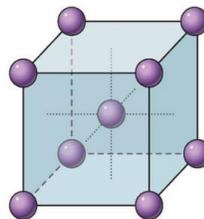
$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_T} \quad (\text{II.30})$$

Dans les milieux naturels, la porosité ne dépasse généralement pas 0,6 et dépend de l'agencement et de la taille des grains. Pour un empilement régulier de sphères identiques, elle varie de 0,476 en arrangement cubique, à 0,32 en cubique centré, et 0,26 en cubique à faces centrées [84]. La figure

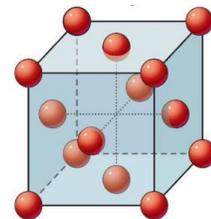
2-7- Arrangements réguliers des sphères de même diamètre représentés



a) Arrangement cubique



b) Arrangement cubique centré



c) Arrangement cubique a face centré

Figure 2-7- Arrangements réguliers des sphères de même diamètre [84].

Voici le tableau organisé avec les matériaux et leurs porosités correspondantes (Bejan & Lage, 1991) [85] :

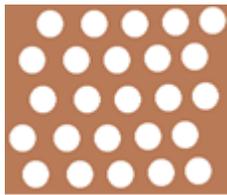
Tableau 2-1 Porosité de quelques matériaux poreux [85]

Matériaux	Porosité
Brick / Brique	0.12 - 0.34
Cuir / Leather	0.56 – 0.59
Sable/ Sand	0.37 – 0.50
Poudre de cuire/ Copper powder	0.09- 0.34

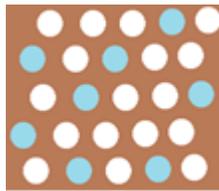
II.5.3 Degré de saturation S_r

Le degré de saturation S_r (%) représente le rapport entre le volume d'eau V_w (m^3) et le volume des vides V_v (m^3) dans un milieu poreux. Un sol saturé sous la nappe phréatique a, tandis qu'un sol au-dessus présente un degré de saturation variable, toujours inférieur à 100 %. Un sol totalement sec a théoriquement de 0% [86].

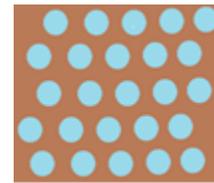
$$S_r \% = \frac{V_w}{V_v} . 100 \tag{II.31}$$



a) Sol sec



b) Sol humide



c) Sol saturé

Figure 2-8-Degré de saturation

II.5.4 La perméabilité K :

La perméabilité désigne la capacité d'un matériau poreux à permettre le passage d'un fluide (qu'il soit liquide ou gazeux) sous l'influence d'un gradient de pression. La perméabilité, représentée par $\kappa(m^2)$, est déterminée uniquement par la porosité (II-8) et la configuration de la matrice solide [87].

Une perméabilité haute est synonyme d'une porosité importante, toutefois, l'inverse n'est pas vrai. Une forte perméabilité dépend de la dimension des grains et des espaces vides, elle exige donc que les pores soient intensément reliés entre eux.

$$\kappa = \frac{-\mu_f \cdot u_D}{dp/dx} \quad (\text{II.32})$$

Notée $\kappa(m^2)$ c'est la perméabilité et $\mu_f (kg/ms)$ La viscosité dynamique du fluide à la perte de charge par unité de longueur $dp/dx (Pa/m)$ et la section de passage, $u_d (m/s)$ La vitesse Darcienne, (Darcy) désigne la capacité d'un milieu poreux à laisser passer un fluide sous l'effet d'un gradient de pression. Elle dépend de la porosité et de la structure de la matrice solide. Une perméabilité élevée implique des pores bien interconnectés, mais une forte porosité ne garantit pas toujours une grande perméabilité [88].

II.5.5 L'indice sphéricité:

L'indice de sphéricité, défini comme le rapport entre la surface d'une sphère de même volume que le grain et la surface effective du grain, est donné par la formule :(II.11.) [89]

$$\bullet \quad \psi = \frac{\pi^{1/3} (6 v_g)^{2/3}}{A_g} \quad (\text{II.33})$$

Où V_g représente le volume du grain. Un indice de sphéricité élevé, proche de 1, correspond à une forme sphérique (comme des billes ou des pommes), tandis qu'un indice proche de 0 indique une faible sphéricité, caractéristique des bâtonnets ou des lamelles (voir figure 2-9)

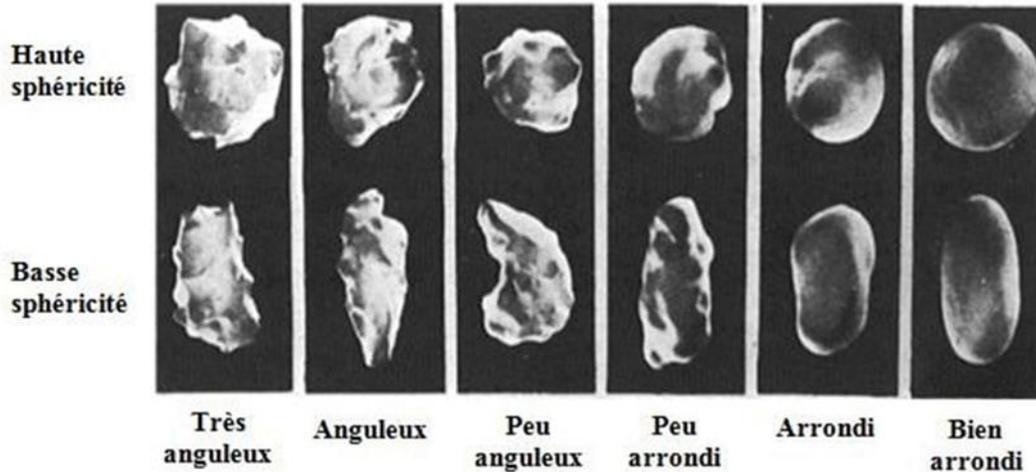


Figure 2-9 Évaluation de la sphéricité de grains par la simplification de Powers.

II.5.6 La tortuosité τ :

Le passage dans un matériau poreux est le résultat d'une interaction entre la connectivité des pores et la tortuosité [90]. On fait appel au concept de tortuosité pour décrire la structure des milieux poreux en ce qui concerne la conductivité hydraulique et la dispersion, sa dépendance varie en fonction du type d'écoulement ou de processus de transport examiné [91,92]. Les milieux poreux, en particulier les milieux naturels tels que les roches et les sols, sont des systèmes désordonnés qui présentent une variété de tailles de pores et de formes de grains. Le trajet de l'écoulement dans ces environnements n'est pas linéaire et une particule parcourt toujours une distance qui dépasse la longueur de l'échantillon.

Elle se définit par le rapport entre la longueur réelle des lignes de courant du fluide traversant un échantillon $L_e(m)$ sur la longueur d'un milieu poreux $L(m)$ [93].

$$\tau = \frac{L_e}{L} \quad (II.34)$$

II.6 Les Caractéristiques thermo-physiques:

II.6.1 Viscosité effective:

Le concept de viscosité effective a été introduit pour la première fois pour décrire la condition de continuité entre la zone non poreuse et la zone poreuse. C'est le cas d'un tube partiellement rempli d'un milieu poreux. Brinkman, en 1947 [94], a supposé que la viscosité effective est égale à la

viscosité du fluide considéré. Cependant, Lundgren, en 1972 [95], a montré que la viscosité effective est une fonction de la viscosité du fluide et de la perméabilité du milieu poreux. Malgré cela, l'hypothèse de Brinkman a été validée par certains chercheurs, dont Lundgren, pour une faible concentration de particules. De plus, Nader, en 1974 [96], a utilisé l'extension de Brinkman de la loi de Darcy dans le milieu poreux ont trouvé que :

$$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_f} = \alpha^2 \quad (\text{II.35})$$

α Représente le coefficient de discontinuité entre la région poreuse et la région sans matière poreuse.

II.6.2 Capacité calorifique équivalente CP_{eff} :

L'enthalpie étant une grandeur extensive, la capacité calorifique volumique C_{peff} (J/molK) peut être déterminée en appliquant la loi des mélanges [79] :

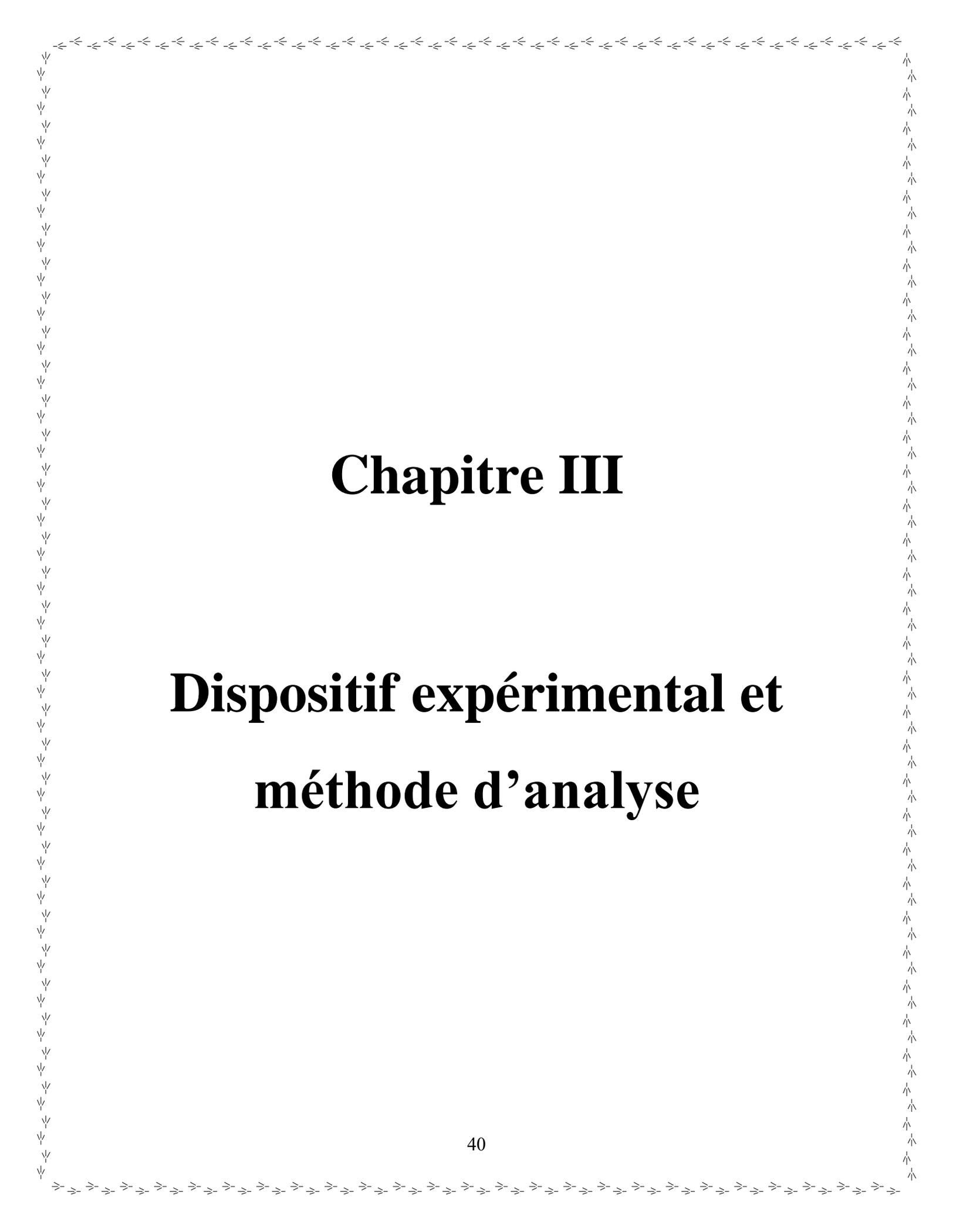
$$(\rho C_p)_{\text{eff}} = \varepsilon(\rho C_p)_f + (1 - \varepsilon)(\rho C_p)_s \quad (\text{II.36})$$

II.7 Conclusion:

En conclusion de ce chapitre ont précisé l'étude sur le stockage par chaleur sensible qui bassé sur l'augmentation de la température de matériaux (solide ou liquide) sans changement de l'état et leur procédé.

Après, on a donné les méthodes et mécanismes de transfert de chaleur (conduction-convection-mix) dans le matériau, en tenant compte de la porosité et perméabilité, degré de saturation

Ainsi que les caractéristiques thermo-physiques qui améliorer la performance et la durabilité ce matériau.



Chapitre III

Dispositif expérimental et méthode d'analyse

CHAPITRE III

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET MÉTHODE D'ANALYSE

Introduction :

Dans le cadre de notre travail sur le stockage thermique, nous avons sélectionné du sable de deux sources différentes (sable du désert/sable de mer) dans le cadre d'une étude expérimentale visant à déterminer l'efficacité de ce matériau naturel dans le stockage de l'énergie thermique.

En plus de l'intégration de certains matériaux améliorés tels que : les métaux (acier, fer, al) et les sels (sel de serouti) afin d'améliorer les performances thermiques du sable et d'élargir ses domaines d'utilisation en tant que milieu efficace pour le stockage thermique, un protocole expérimental a été suivi.

III. Procédure expérimentale

- 1) Collecte du sable
- 2) Collecte des débris de métal
- 3) Préparations des échantillons
- 4) Mesure de température a échelle réduit.
- 5) Choix de la meilleure configuration
- 6) Conception du dispositif
- 7) Chauffage du matériau
- 8) Mesure charge
- 9) Mesure au repos
- 10) Mesure décharge

III.1 Méthode expérimentale

III.1.1 Sélection et origine des matériaux

Dans le cadre de cette étude expérimentale axée sur le stockage thermique à base de matériaux granulaires, trois types de matières premières ont été rigoureusement sélectionnées en fonction de leur origine géologique et de leur granulométrie :

- **Sable saharien** : issu de dépôts éoliens, caractérisé par une texture fine et homogène.
- **Sable marin** : prélevé sur les côtes de Bou Ismaïl, présentant une composition siliceuse influencée par l'environnement marin.
- **Gravier siliceux** : matériau grossier, destiné à évaluer l'effet de la taille des particules sur les performances thermiques.

III.1.2 Caractérisation granulométrique

Une analyse granulométrique par tamisage séquentiel a été réalisée selon les normes AFNOR pour obtenir des fractions bien définies. Le processus consiste à séparer mécaniquement les particules à l'aide d'une série de tamis de mailles calibrées.

La méthode de tamisage :

Le tamisage décrit l'opération consistant à passer à travers des tamis pour séparer les particules en différentes dimensions [97]. La figure 3-1 présente la photo de tamisage :



Figure 3-1 photo du tamiseur.

-À l'issue de cette opération, les échantillons suivants ont été retenus :

Échantillon 01 : sable marin [1 mm - 0,5 mm]

Échantillon 02 : sable marin [0.5 mm- 0,25 mm]

Échantillon 03 : sable saharien [0.25 mm - 0,125 mm]

Échantillon 04 : gravier [5.6 mm - 1 mm]

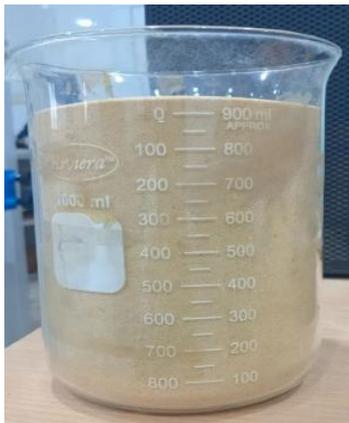
Les quatre échantillons sont présents dans la figure 3-2 :



Echantillon 1 : sable ($d= 0.5\text{mm}$)



Echantillon 2 : sable ($d= 0.25\text{mm}$)



Echantillon 3 : sable ($d= 0.125\text{mm}$)



Echantillon 4 : gravier ($d=1\text{mm}$)

Figure 3-2 les quatre s échantillons retenus

III.1.3 Chauffage des échantillons par four

Chaque échantillon, d'un volume fixe de 900 ml, a été soumis à un chauffage contrôlé à 200°C dans un four à convection naturelle. Cette température a été choisie pour simuler un cycle thermique pertinent pour les applications de stockage de chaleur. La figure 3-3 présent le four :



Figure 3-3 photo de four

III.1.4 Stockage au sein d'un boîtier isolé

Les échantillons chauffés ont été transférés rapidement dans des enceintes thermiquement isolées à l'aide de polyuréthane expansé de 4 cm d'épaisseur. Ce polymère [98], connu pour sa faible conductivité thermique, permet de limiter les pertes de chaleur par conduction et convection.

La figure suivant 3-4 présente la photo de l'enceinte thermiquement isolée



Figure 3-4 l'enceinte thermiquement isolée

III.1.5 Acquisition des données de température à l'aide d'un DATALOGGER :

L'évolution de la température interne de chaque échantillon a été enregistrée sur une période de 2 heures, à l'aide du système « Benchlink Data Logger Pro » couplé à une sonde thermocouple de type K.

La figure suivante 3-5 présente la photo du système « Benchlink Data Logger Pro »



Figure 3-5 photo du système « Benchlink Data Logger Pro »

C'est un enregistreur de données est un petit appareil électronique relativement peu coûteux qui surveille et enregistre au fil du temps (telles que la tension, la température et le courant) via un capteur interne ou externe. Cet appareil est généralement basé sur un processeur numérique.

Il est choisi plutôt qu'un système de collecte de données lorsque l'application ne nécessite pas d'enregistrement à grande vitesse, mais nécessite des temps d'enregistrement plus longs. C'est moins coûteux que les systèmes de collecte de données numériques.

Ils sont l'épine dorsale des équipements d'enregistrement. Ils sont capables d'enregistrer des données pendant des jours, des semaines, voire des années. Ce processus est communément appelé enregistrement de données.

Cette méthode permet une acquisition temporelle précise, adaptée aux études de dissipation thermique à faible gradient [99].

La figure suivante de photo de thermocouple type K :



Figure 3-6 photo de thermocouple type K

Le thermocouple de type K est reconnu pour sa polyvalence. Il offre une large plage de mesure de température, un coût réduit, et bien que sa précision soit légèrement inférieure à celle du type T, ce modèle de classe 1 garantit une exactitude de $\pm 1,5$ °C dans l'intervalle allant de -40 à $+1000$ °C.

Le nouvel isolant en fibre de verre haute température permet un fonctionnement continu jusqu'à $+750$ °C, tandis que le conducteur de 0,8 mm de diamètre est conçu pour résister à des températures allant jusqu'à $+1000$ °C. Ces caractéristiques confèrent à la sonde à jonction exposée une robustesse et une rentabilité remarquables, en faisant un choix idéal pour la mesure de températures dans les fours. Lorsqu'elle est fixée en position de manière à ce que l'isolant ne soit pas soumis à des flexions, la sonde peut supporter des températures encore plus élevées. C'est pourquoi la température maximale admissible du conducteur est fixée à $+1000$ °C, tout en respectant les tolérances de la classe 1[100].

III.1.6 Identification de la configuration la plus performante

L'exploitation des courbes thermiques obtenues a révélé que l'échantillon 03 (sable fin, $d = 0,125$ mm) présente la meilleure capacité de rétention thermique, probablement en raison de sa faible porosité et de sa forte compacité, limitant les transferts thermiques.

III.1.6.1 Propriétés du sable utilisé:

D'abord on a fait un analyse DRX et on a trouvé le type de sable

A. Type du sable :

Le sable qui on a travail avec est de type :Quartz alpha (α - quartz) [101] :

- Formule chimique : SiO_2
- Structure cristalline : Tétraèdres SiO_4 reliés par leurs sommets en une hélice tridimensionnelle
- Système cristallin : Rhomboédrique ou hexagonal
- Stabilité structurale : Forme la plus stable de la silice à température ambiante
- Transition vers le quartz β : à 573 °C

On a résumé les propriétés dans un tableau suivant :

Tableau 3-1 propriétés du sable Quartz alpha [101]

Propriétés	Détails
Propriétés thermiques	-Température de fusion: $\approx 1650 \text{ °C} \pm 75 \text{ °C}$
	-Température d'ébullition: $\approx 2230 \text{ °C}$
	-Comportement à haute température : Ne font pas facilement, mais crépite sous l'effet de la chaleur
	-Stabilité thermique : Très stable ; à pression ou température élevée, peut se transformer en d'autres phases (ex. : rutilé)
Propriétés physiques	-Densité: $2,65 \text{ g/cm}^3$ (constante)
	-Dureté : Élevée (environ 7 sur l'échelle de Mohs – donnée à préciser)

III.1.7 Additifs thermo-conducteurs:

Afin d'améliorer la conductivité thermique du matériau, une étude comparative a été entreprise en intégrant des débris métalliques (fer, aluminium) ainsi que du sel (98% de NaCl) comme agent ionique.

Ces débris, après tamisage à $d = 0,25$ mm, la figure suivant 3-7 présente des débris métalliques (fer, aluminium) et sel (98% de NaCl) :

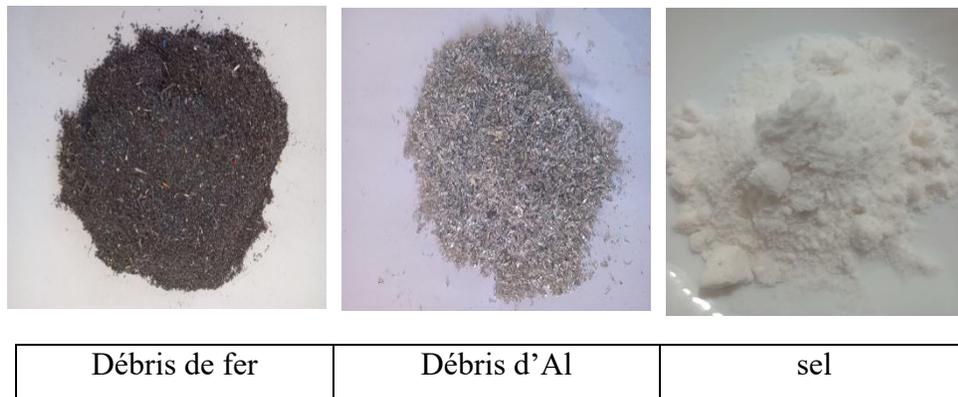


Figure 3-7 Des débris métalliques (fer, aluminium) et sel

III.1.7.1 Propriétés des débris métalliques :

Selon l'analyse DRX des débris métalliques (fer et Al) on découvre les types de ces échantillons.

A. Types de fer :

Le fer qui on a travail avec est de type : fer α [102].

Nature chimique :

- Solution solide de carbone dans le fer α .
- Très faible teneur en carbone (inférieure à 0,02 %).
- Peut contenir des inclusions d'autres éléments en traces.

Structure cristalline :

- Réseau cubique centré (BCC : cubique à corps centré).

Les propriétés de débris fer résumé dans le tableau suivant :

Tableau 3-2 propriétés de débris de fer.

Propriétés	Débris de fer
Propriétés mécaniques	-Dureté faible : $HV \approx 90$
	-Résistance à la traction : $R_m \approx 300 \text{ N/mm}^2$.
	-Résilience (ténacité) : $K \approx 300 \text{ J/cm}^2$.
	-Très ductile (bonne déformation plastique).
Propriétés magnétiques	-Ferromagnétique à température ambiante.
	-Perd son magnétisme à environ $760 \text{ }^\circ\text{C}$ (point de Curie).
Apparence microscopique	-Aspect de grains homogènes polyédriques (structure granulaire régulière).

B. Types d'aluminium

L'aluminium utilisé est pur. Les propriétés de débris (Al) résumé dans le tableau 3-3 suivant :

Tableau 3-3 propriétés de débris d'al. [103].

Propriétés	Débris d'Al
Propriétés thermiques et électriques	-Bonne conductivité électrique : environ 61 % de celle du cuivre lorsque la section et la longueur sont identiques.
	-À masse égale et avec une section différente, la conductivité électrique de l'aluminium peut atteindre 200 % de celle du cuivre.
	-Conductivité thermique élevée, ce qui le rend adapté aux applications thermiques.
Propriétés physiques et cristallographiques	-Structure cristalline cubique à faces centrées (CFC – face-centered cubic).
	-Non magnétique.
	-Ne produit pas d'étincelles.
	-Excellentes propriétés réfléchissantes : réfléchit la lumière visible et les rayons ultraviolets.
Propriétés mécaniques	-Faible résistance mécanique : la limite de rupture de l'aluminium pur industriel est d'environ 69 MPa.
	-Peut être renforcé par écrouissage ou par l'ajout d'éléments d'alliage pour améliorer sa résistance avant son utilisation comme matériau structurel.

Ces débris ont été mélangés avec le sable saharien selon les proportions suivantes :

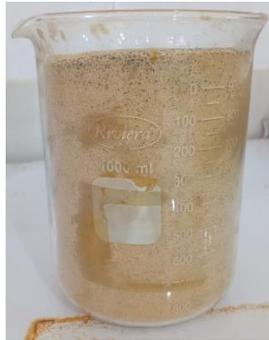
- **(Métal/Sable) :** 12 g, 24 g, 36 g, 48 g pour le fer et l'aluminium (des débris)
- **(Sel/Sable) :** 12 g, 24 g, 36 g, 48 g

Les quantités ont été pesées avec une balance analytique de précision.

La figure 3-8 présente les photos des échantillons du mélange :



Echantillon 1 :
Mélange du sable + aluminium



Echantillon 2 :
Mélange du sable + fer



Echantillon 3 :
Mélange du sable + sel

Figure 3-8 Photos des échantillons du mélange

III.1.8 Analyse thermique post-mélange

Les mélanges obtenus ont subi le même cycle thermique (chauffage à 200°C et suivi sur 2 h). Les courbes résultantes ont permis d'évaluer l'impact de chaque additif sur la cinétique de perte thermique.

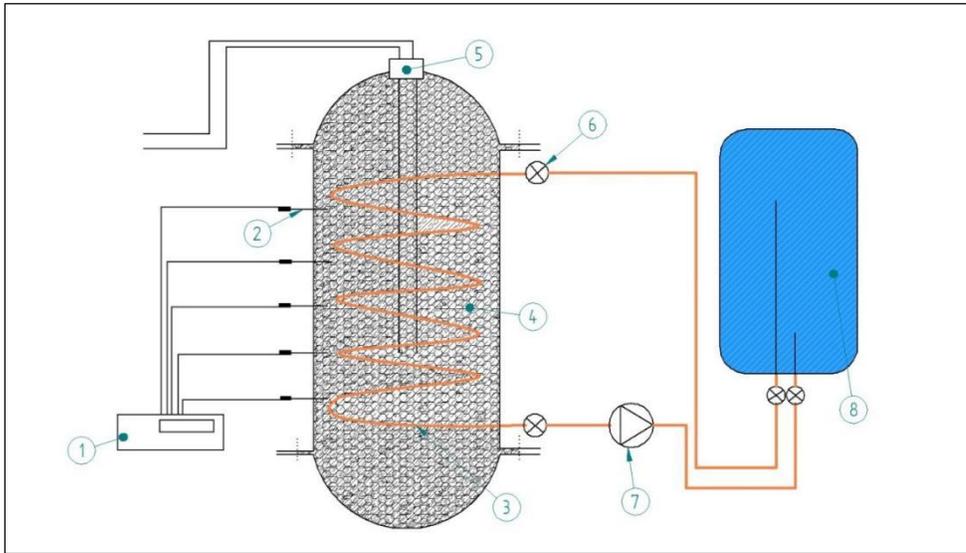
III.2 Conception du dispositif:

Dans ce système, le réservoir est rempli de sable et débris de fer dont le diamètre des grains est $d = [0,25 \text{ mm} - 0,125 \text{ mm}]$ (pour le sable). La résistance électrique est activée pour chauffer le matériau de stockage (le sable + fer) jusqu'à atteindre une température voulu (phase de charge 4h).

Enregistrée par le système d'acquisition des données. Une fois la température souhaitée atteinte, la résistance électrique est éteinte (phase de repot).

Par la suite, on ouvre la vanne pour permettre de retituer le matériau de stockage (phase de décharge).

La figure ci-dessous présente la conception du dispositif :



- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| 1. Acquisition des données | 5. Résistance électrique |
| 2. Thermocouple | 6. Vanne |
| 3. Serpentin | 7. Pompe |
| 4. Matériau de stockage | 8. Eau. |

Figure 3-9 conception du dispositif

Ce figure 3-10 présente la photo de dispositif en 3D :

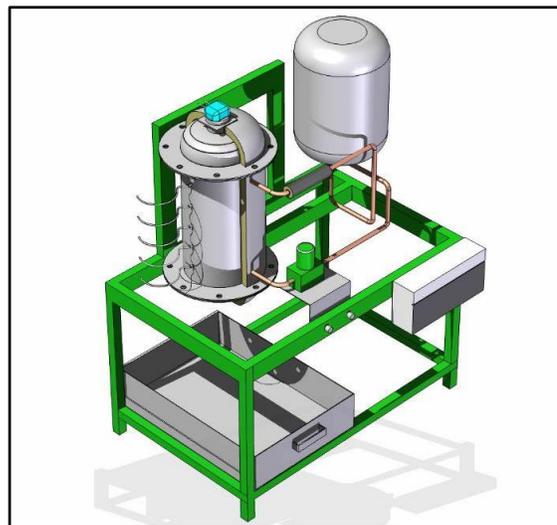
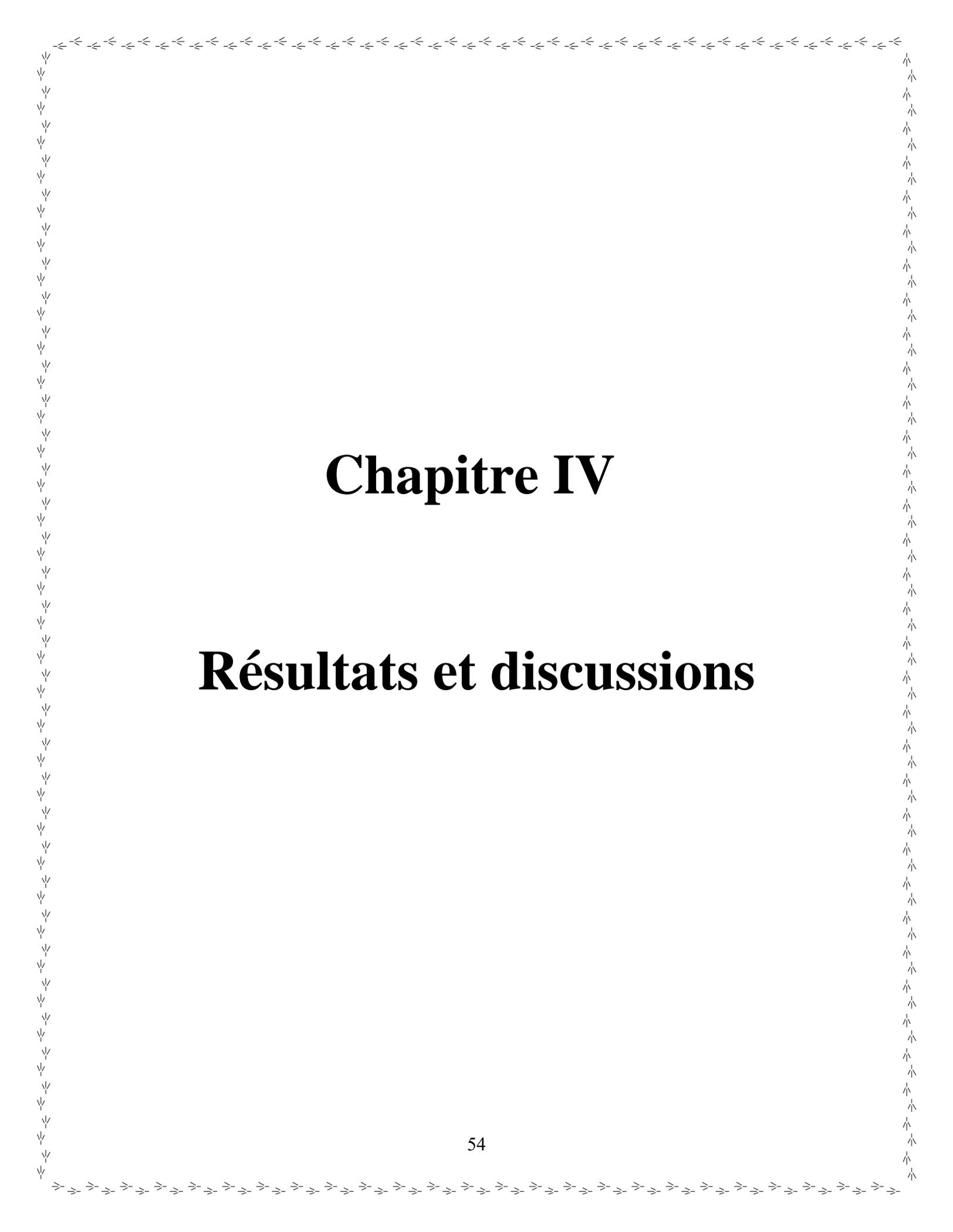


Figure 3-10 Conception 3D de dispositif

La figure 3-11 suivante représente les différentes pièces de dispositif en réel. Des photos de l'extérieur et l'intérieur, dispositif avant et après l'isolation, la résistance électrique et serpentins :



Figure 3-11 les différentes pièces du dispositif



Chapitre IV

Résultats et discussions

IV. Les Résultats et analyses :

La figure 4-1 suivante représente l'analyse thermique de différents échantillons du sable en fonction du temps.

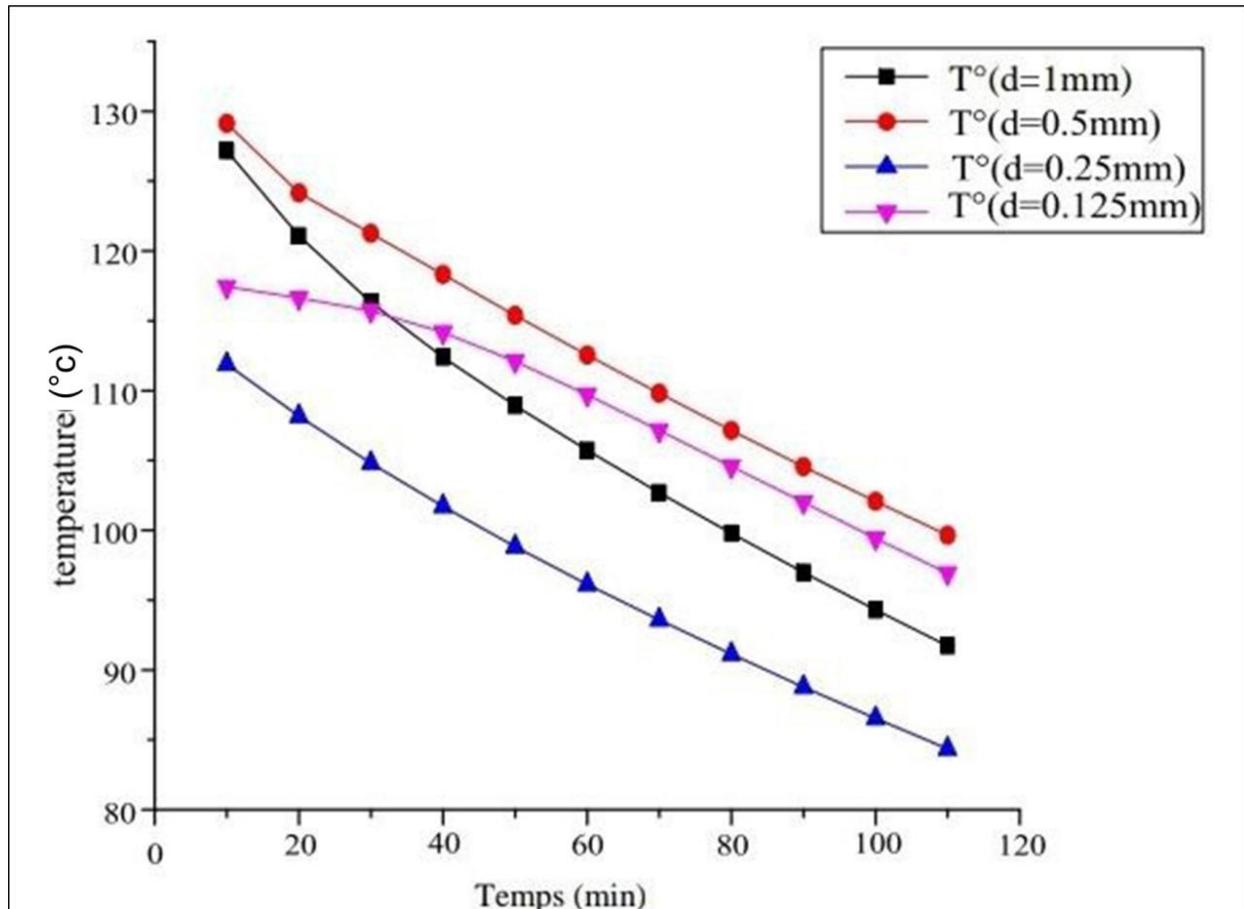


Figure 4-1 graphe de l'analyse thermique de différents échantillons du sable

La recherche a montré que la performance de stockage thermique est grandement affectée par les dimensions des particules du sable. Les échantillons de granulométrie fine, notamment 0,125 mm, ont démontré une meilleure conservation de la chaleur grâce à leur densité accrue et leurs petites porosités, minimisant ainsi les déperditions thermiques. Cette performance est due à une plus grande surface spécifique et un nombre supérieur de particules, ce qui favorise un bon transfert thermique. Ces conclusions concordent avec les informations provenant de la littérature, même si l'étude actuelle s'appuie sur l'évolution directe de la température comme indice de performance,

contrairement à d'autres recherches qui se fondent sur des calculs d'énergie emmagasinée. De plus, le choix des matériaux, notamment ceux qui présentent une faible porosité et une bonne conductivité

La figure 4-2 suivante représente l'analyse thermique de mélanges (sable +aluminium) avec différents quantités d'aluminium en fonction du temps

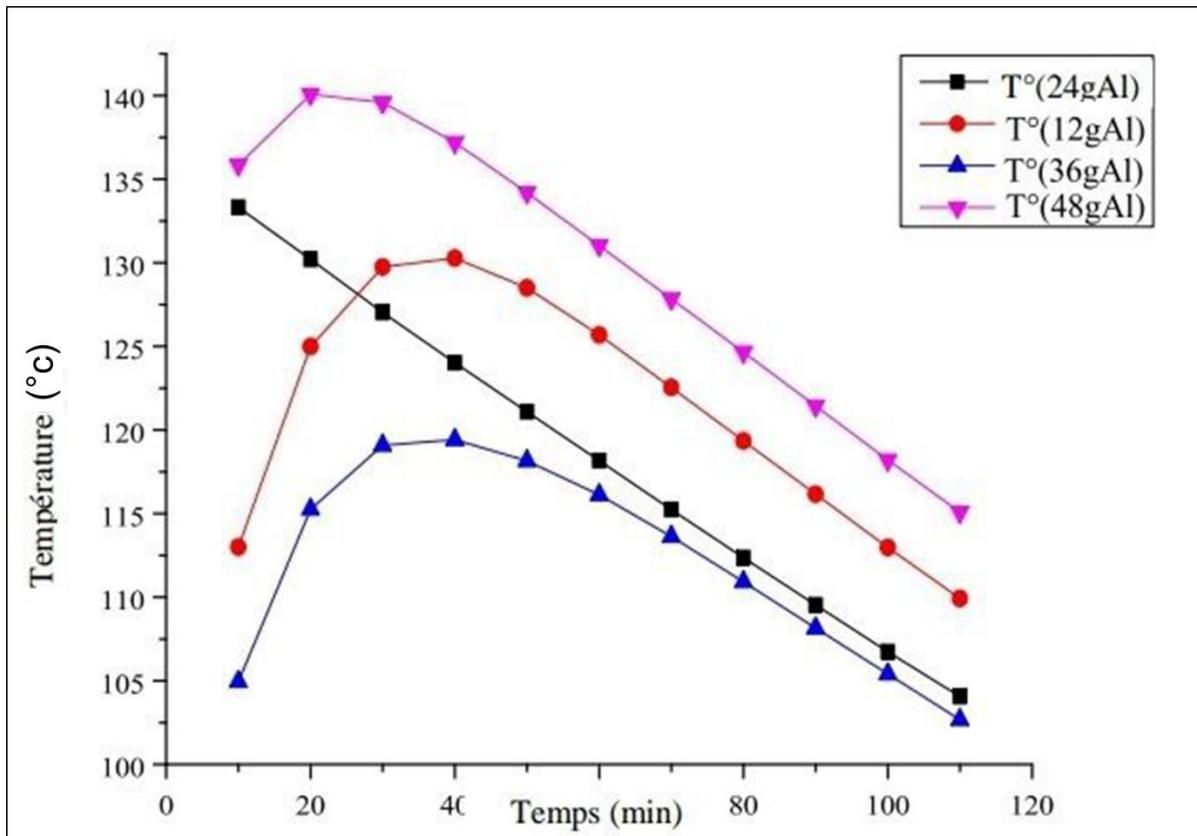


Figure 4-2 Graphe de l'analyse thermique de mélanges (sable +aluminium) avec différentes quantités d'aluminium.

Il est remarqué que sur les graphes de (sable + 48 g d'Al) est le plus milieu que les autres et plus stable. Ce qui indique que la quantité ajouter joue un rôle important comme un paramètre qui influence l'augmentation de la température.

Ce mélange est choisi pour améliorer la capacité de stockage de chaleur sensible. L'aluminium pur se distingue par une conductivité thermique très élevée (environ 237 W/m·K) et une faible

capacité thermique spécifique (environ $0,90 \text{ J/g}\cdot\text{K}$), ce qui favorise un réchauffement rapide ainsi qu'un refroidissement rapide, assurant un transfert thermique efficace.

L'analyse thermique de mélanges (sable +fer) avec différentes quantités de fer en fonction du temps est illustré dans la figure 4-3 ci-dessous :

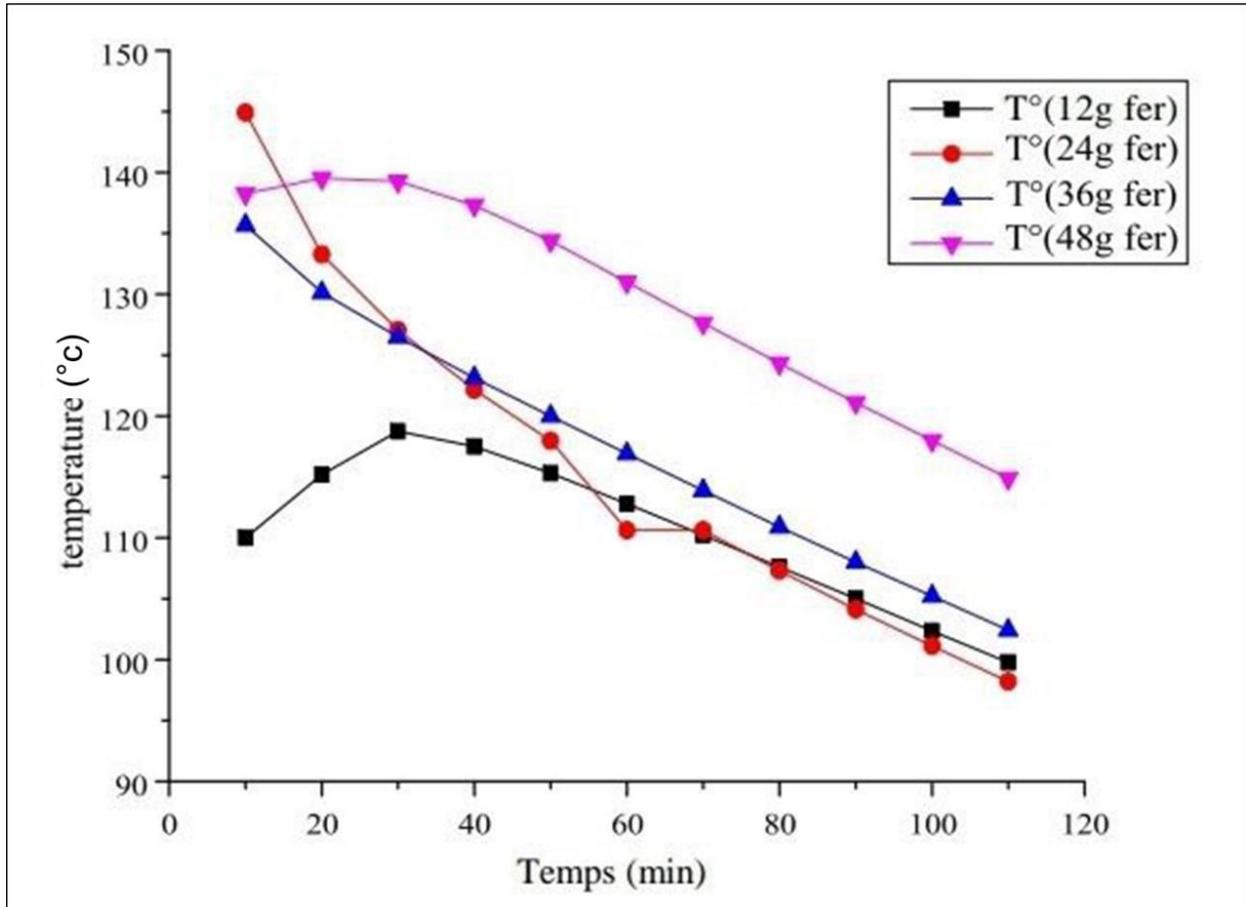


Figure 4-3 Graphe de l'analyse thermique de mélanges (sable +fer) avec différentes quantités de fer.

Il est remarqué que les graphes de (sable + 48 g de fer α) est le plus milieu que les autres et plus stable. Ce qui indique que la quantité ajoutée joue un rôle important dans le processus d'augmentation de la température.

Ce mélange est choisi pour améliorer la capacité de stockage de chaleur sensible. Le fer α se distingue par une conductivité thermique élevée ($80 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) et une faible capacité thermique spécifique ($0,45 \text{ J/g}\cdot\text{K}$), favorisant un réchauffement rapide et un transfert thermique efficace.

L'analyse thermique de mélanges (sable +sel) avec différentes quantités de sel est illustré dans la figure 4-4 suivante :

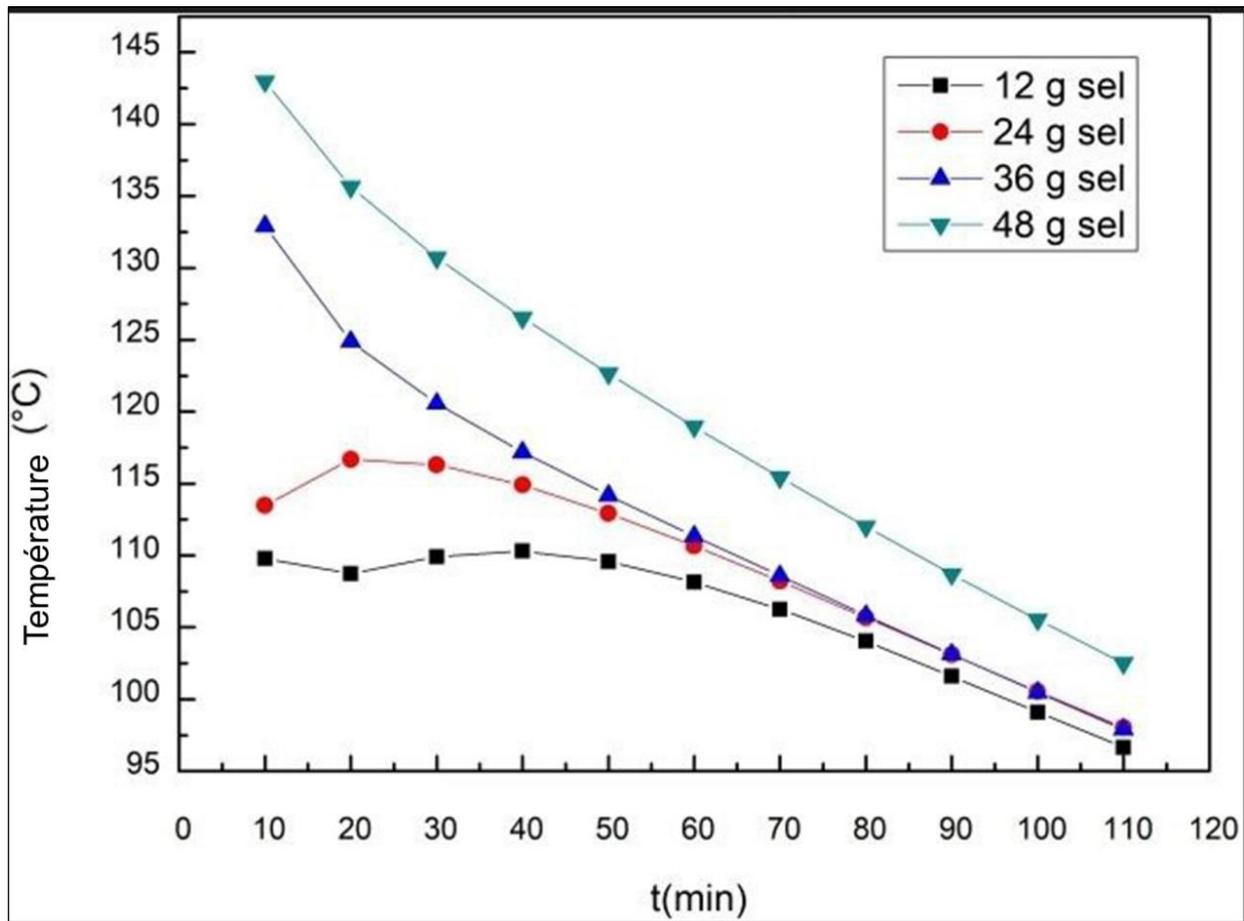


Figure 4-4 Graphe de l'analyse thermique de mélanges (sable +sel) avec différentes quantités de sel.

Le sel de table (NaCl) se caractérise par une très haute capacité thermique ($\sim 0,86 \text{ J / g} \cdot \text{K}$) et une grande quantité de chaleur massique. Bien que la conductivité thermique ne soit pas élevée ($\sim 6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), cette récolte contribue à la rétention de la chaleur et réduit rapidement son efficacité. Lors de l'analyse des courbes de chaleur en fonction du temps, on constate que les échantillons de plus grande masse (36 g, 48 g) continuent d'augmenter de manière plus prononcée en température, restent lents et montrent qu'ils ont une bonne capacité à conserver la chaleur. Par conséquent, elles sont particulièrement utiles dans les applications nécessitant une utilisation prolongée de l'énergie thermique.

Les diffractogrammes des rayons X obtenus sont représentés dans la figure 4-5 ci-après :

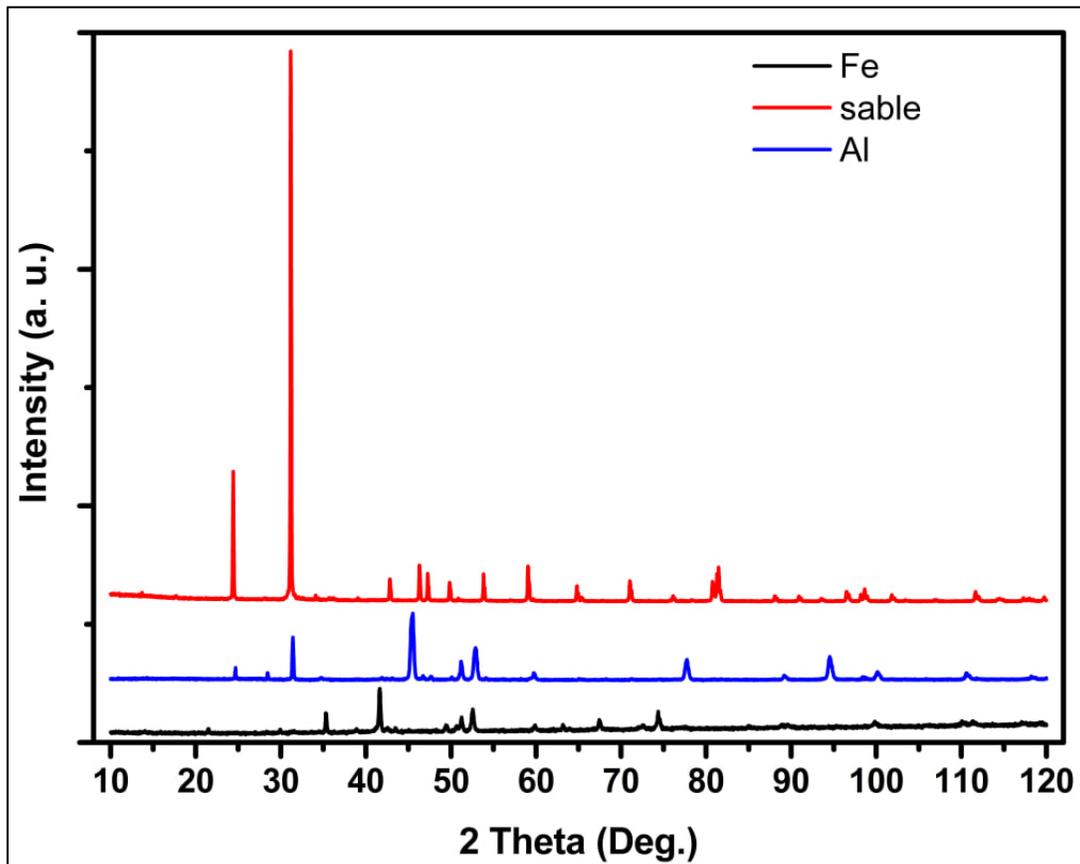


Figure 4-5 L'analyse DRX des échantillons (fer, al, sable =0.125mm)

Le fer : Le graphique montre un pic clair indiquant la présence d'une structure régulière. À partir de cette position, nous expliquons le type de fer utilisé, représenté par le fer alpha BCC.

Le sable : Dans le graphique, une pointe très nette apparaît à 26 degrés, ce qui nous indique une haute cristallinité, suggérant la présence de quartz alpha.

L'aluminium : il existe des pics fins et correspondants qui montrent la présence d'aluminium pur avec une structure cristalline cubique centrée.

Comparaison entre les graphes de l'analyse thermique des mélanges du sable avec métaux ferreux et sel (m=48g) en fonction du temps, la figure 4-6 ci-dessous :

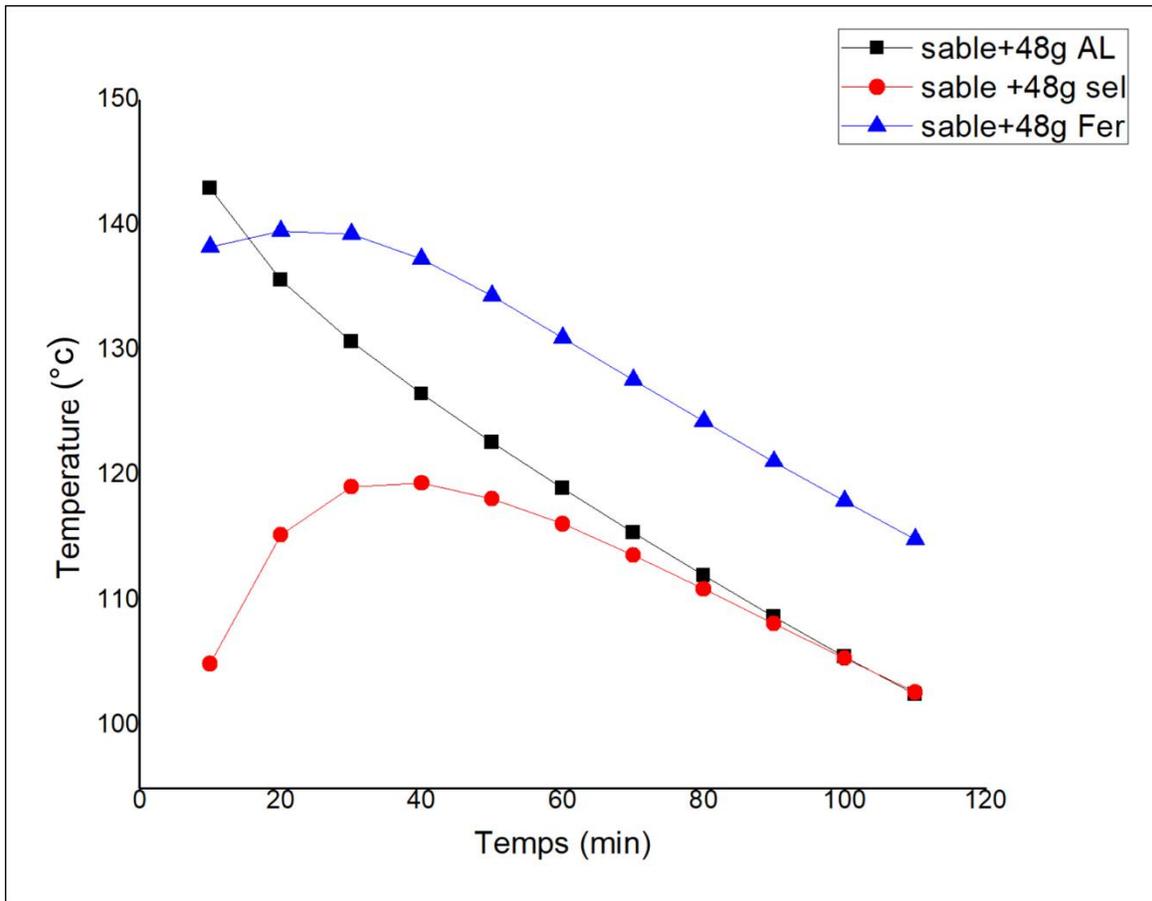


Figure 4-6 Comparaison entre les graphes de l'analyse thermique des mélanges du sable avec métaux ferreux et sel (m=48g) en fonction du temps

Après les analyses précédentes, le meilleur mélange choisi est le sable + 48g de fer. Pour cela une quantité de 48kg de sable +2 kg de déchets de fer ont été tamisés pour remplir le dispositif, tous en mesurant la de température pendant la charge, en report, et en décharge.

La figure 4-7 représente l'évaluation de la température du (sable + fer) pendant une charge de 4h

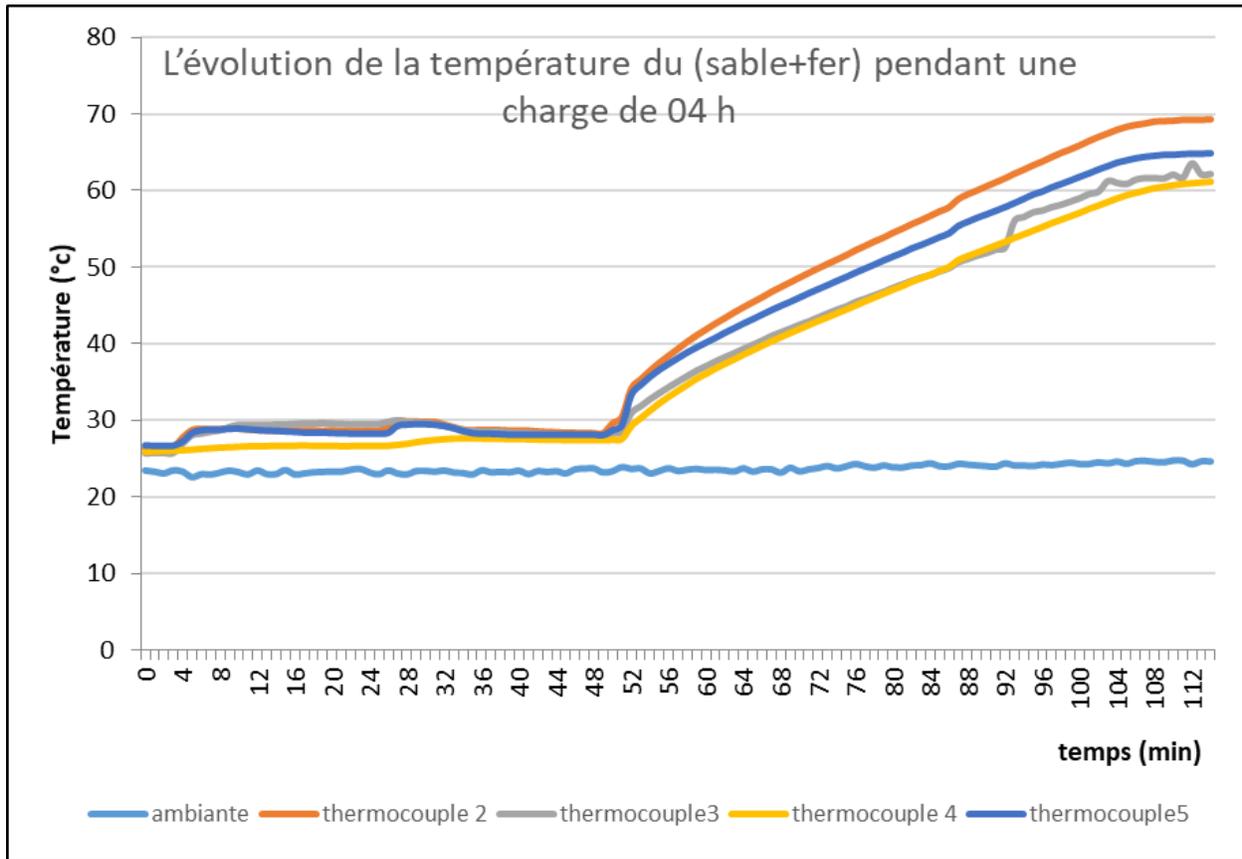


Figure 4-7 graphe d'évaluation de la température du (sable + fer) pendant une charge de 4h.

Dans ce graphique, nous remarquons une augmentation progressive de la température à partir du moment de la mise en marche, ce qui est dû au chauffage continu (du sable + fer). Le thermocouple 1 a enregistré une montée rapide, car la chaleur ne s'était pas encore diffusée, ce qui indique une distribution lente de la chaleur.

La variation de température du (sable +fer) pendant 2 h (en report) est illustré dans la figure 4-8 ci-dessous :

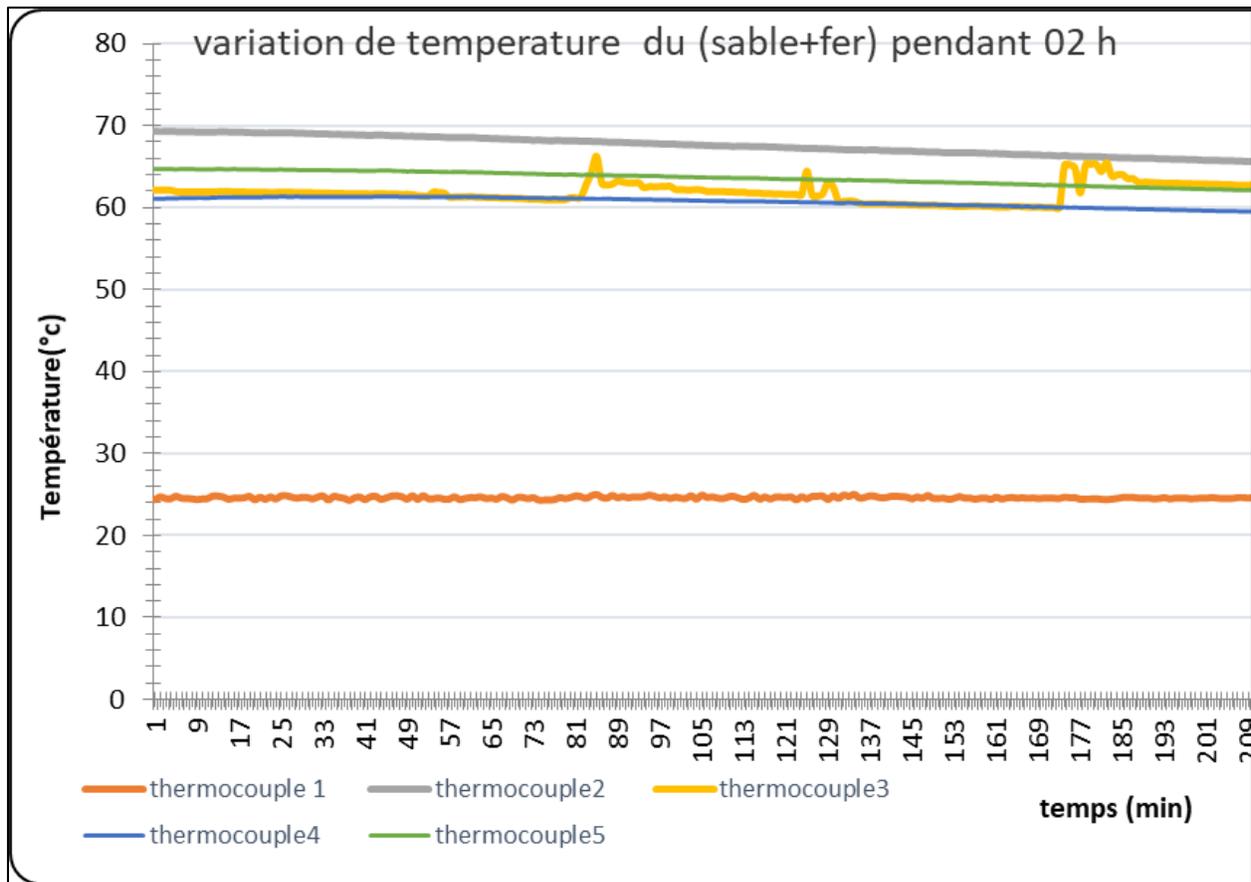


Figure 4-8 graphe de variation de température du (sable +fer) pendant 2 h (en report).

Nous remarquons à travers ce graphique une baisse lente des températures avec une certaine stabilité pour certaines d'entre elles.

Après l'arrêt du chauffage, le (sable + fer) commence à perdre une partie de sa chaleur vers le milieu extérieur. Cela est dû à la capacité du (sable + fer) à retenir la chaleur pendant longtemps grâce à leur grande capacité thermique et à leur faible conductivité thermique.

Par exemple, au niveau du thermocouple 3, le refroidissement est plus lent car il est plus isolé.

La variation de température du (sable +fer) + température de l'eau froid (décharge) jusqu'à l'équilibre est représenté dans la figure 4-9 suivante :

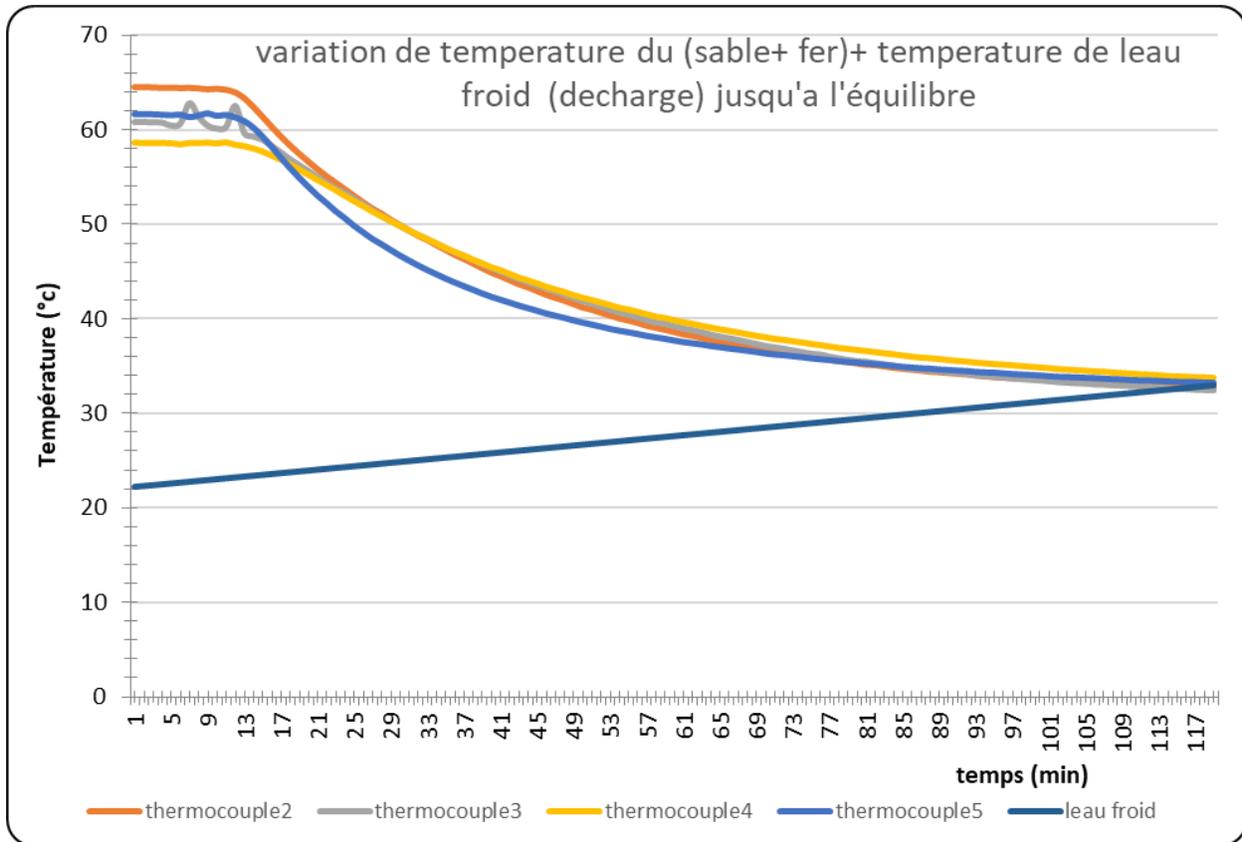


Figure 4-9 graphe de variation de température du (sable +fer) + température de l'eau froid (décharge) jusqu'à l'équilibre.

D'après le graphique, une baisse rapide de la température du (sable + fer) est remarqué, suivie d'une diminution progressive jusqu'à atteindre l'équilibre. Cette baisse est due à la différence de température entre le (sable + fer) et l'eau froide, ce qui a conduit à un transfert rapide de chaleur.

L'échantillon situé au niveau du thermocouple 5 a connu une baisse plus rapide car il est plus proche de la surface de contact avec l'eau.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail a été axé sur l'étude des performances thermiques d'un matériau pour le stockage thermique sensible en réalisant un dispositif complet réservé aux tests de laboratoires et destiné à simuler une source de chaleur renouvelable.

Le matériau utilisé est le sable qui est connu par ses capacités calorifiques élevées ainsi que sa disponibilité et sa durabilité. Ce matériau aussi offre l'interchangeabilité pour voir l'effet granulométrique sur le stockage de l'énergie thermique.

On a procédé à la collecte différents types de sable qui existe dans le pays (Sable marin, sable du Sahara, sable des oueds,). Ensuite on a procédé à l'opération de tamisage afin d'avoir des échantillons de différentes granulométries. Par la suite on fait chauffé des volumes de 900cl³ de chaque échantillon de sable jusqu'à 200°C en l'isolant parfaitement pour voir l'évolution et la stabilité de température pour chaque configuration afin de déterminer la taille granulaire optimale. Après cette opération on a essayé de voir l'effet de mitiger une petite quantité fine de débris de différents métaux sur le stockage de température dans le sable (fer, Aluminium et sel).

Sur la base de ces études préliminaires on a pu concevoir et réalisé un système de stockage de chaleur avec une cuve de 70L et un chauffage électrique intégré.

Les résultats obtenus démontrent clairement l'efficacité du sable dans le stockage de chaleur surtout avec l'ajout de débris de fer.

Ce travail expérimental nous a permis de nous approcher de manière pratique de l'idée de stockage de l'énergie thermique en utilisant des matériaux simples et disponibles localement. Nous avons traversé plusieurs étapes, de la collecte des matériaux et de la préparation des échantillons, à la mesure des performances dans différentes conditions. Il est vrai que certaines étapes ont demandé du temps et des efforts, mais l'expérience a été riche en observations et en leçons. La combinaison du sable et des minéraux a montré des résultats encourageants et a ouvert de nouvelles questions que nous pourrions explorer à des étapes ultérieures. Nous espérons que ce début sera une étape vers le développement de solutions énergétiques alternatives, d'une manière qui allie simplicité et efficacité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Twidell, J.; Weir, T. Renewable Energy Resources; Routledge: London, UK, 2015.
- [2] Sarbu, I.; Sebarchievici, C. Solar Heating and Cooling: Fundamentals, Experiments and Applications; Elsevier:Oxford, UK, 2016.
- [3] Sharma, A.; Tyagi, V.V.; Chen, C.R.; Buddhi, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2009, 13, 318–345
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- [4] Zhou, D.; Zhao, C.Y.; Tian, Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Appl. Energy* 2012, 92, 593–605.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>
- [5] Moreno, P.; Solé, C.; Castell, A.; Cabeza, L.F. The use of phase change materials in domestic heat pump and air-conditioning systems for short term storage: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 39, 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.062>
- [6] Liu, M.; Saman, W.; Bruno, F. Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012, 16, 2118–2132.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.020>
- [7] Zhai, X.Q.; Wang, X.L.; Wang, T.; Wang, R.Z. A review on phase change cold storage in air-conditioning system: Materials and applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 22, 108–120.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.013>
- [8] B. Rahmouna, Étude numérique d'un stockage thermique par chaleur sensible dans les galets Par, n.d.
- [9] F. Boshell, Innovation Outlook: Thermal energy storage Energy Community Workshop on

- the energy storage technologies, (2023).
- [10] M. Coeytaux, Le Stockage Thermique De L'Energie., RFM, Rev. Fr. Mec. (1978) 17–19.
- [11] M. Académique, Etude de stockage de l'énergie thermique par sorption liquide-gaz application aux bâtiments à basse consommation, (2019).
- [12] Pincemin, S., « Elaboration et caractérisations de matériaux composites à haut performances énergétiques pour l'intégration d'un stockage thermique dans les centrales électro-solaires », Thèse de Doctorat de l'Université de Perpignan, (2007).
- [13] Boutaoui Meriem, Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique, Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara Boumerdes, année 2016, pp95.
- [14] P. Pardo, thermique haute température par voie thermo-chimique To cite this version : DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE Délivré par :, (2023).
- [15] Maithani R, Patil AK, Saini JS. Investigation of effect of stratification on the thermal performance of packed bed solar air heater. International Journal of Energy Science. 2013;3(4):267- 275. www.ijesci.org.
- [16] Raghav G, Nagpal M. Performance investigation and optimization of low temperature. Sensible Heat Solar Energy Storage System. International Journal of Renewable Energy Research, 2015;5(3):903-909.
- [17] Warkhade GS, Babu AV, Mane S, Ganesh Babu K. Experimental investigation of sensible thermal energy storage in small sized, different shaped concrete material packed bed. World Journal of Engineering. 2016;13(5):386-393. <https://doi.org/10.1108/WJE-08-2016-0048>.
- [18] Hoffmann J-F, Fasquelle T, Goetz V, Py X. Experimental and numerical investigation of a thermocline thermal energy storage tank. Appl Therm Eng. 2017;114:896-904. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.053>.
- [19] Bayón R, Rojas E. Simulation of thermocline storage for solar thermal power plants: from dimensionless results to prototypes and real-size tanks. International Journal of Heat and

- Mass Transfer. 2013;60(1):713-721. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.047>.
- [20] Singh PL, Deshpandey SD, Jena PC. Thermal performance of packed bed heat storage system for solar air heaters. *Energy Sustain Dev.* 2015;29:112-117. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.10.010>.
- [21] Cascetta M, Cau G, Puddu P, Serra F. A study of a packed-bed thermal energy storage device: test rig, experimental and numerical results. *Energy Procedia.* 2015;81:987-994. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.157>.
- [22] Xu C, Wang Z, He Y, Li X, Bai F. Parametric study and standby behavior of a packed-bed molten salt thermocline thermal storage system. *Renew Energy.* 2012;48:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.017>.
- [23] Bruch A, Fourmigué JF, Couturier R. Experimental and numerical investigation of a pilot-scale thermal oil packed bed thermal storage system for CSP power plant. *Solar Energy.* 2014;105:116-125. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.03.019>.
- [24] Becattini V, Motmans T, Zappone A, Madonna C, Haselbacher A, Steinfeld A. Experimental investigation of the thermal and mechanical stability of rocks for high- temperature thermal-energy storage. *Appl Energy.* 2017;203: 373-389. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.025>.
- [25] Jemmal Y, Zari N, Maaroufi M. Experimental characterization of siliceous rocks to be used as filler materials for air-rock packed beds thermal energy storage systems in concentrated solar power plants. *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 2017;171(February):33-42. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.06.026>.
- [26] Nsofor EC. Investigations on the packed bed for high- temperature thermal energy storage. *International Journal of Green Energy.* 2005;2(4):337-351. <https://doi.org/10.1080/01971520500287925>.
- [27] Boonsu R, Sukchai S, Hemavibool S, Somkun S. Performance analysis of thermal energy storage prototype in Thailand. *Journal of Clean Energy Technologies.* 2015;4(2):101-106. <https://doi.org/10.7763/JOCET.2016.V4.261>.

- [28] Agrawal P, Gautam A, Kunwar A, Kumar M, Chamoli S. Performance assessment of heat transfer and friction characteristics of a packed bed heat storage system embedded with internal grooved cylinders. *Solar Energy*. 2018;161(December 2016):148-158. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.044>. <https://doi.org/10.1016/j.solener>
- [29] Vigneshwaran K, Sodhi GS, Muthukumar P, Guha A, Senthilmurugan S. Experimental and numerical investigations on high temperature cast steel based sensible heat storage system. *Appl Energy*. 2019;251(May):113322. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113322>
- [30] C. Suresh, R.P. Saini, Review on solar thermal energy storage technologies and their geometrical configurations, *Int. J. Energy Res.* 44 (2020) 4163–4195. <https://doi.org/10.1002/er.5143>.
- [31] Miliozzi A, Liberatore R, Crescenzi T, Veca E. Experimental analysis of heat transfer in passive latent heat thermal energy storage systems for CSP plants. *Energy Procedia*. 2015;82:730- 736. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.799>.
- [32] Korti AIN, Tlemsani FZ. Experimental investigation of latent heat storage in a coil in PCM storage unit. *Journal of Energy Storage*. 2016;5:177-186. <https://doi.org/10.1016/j.est.2015.12.010>.
- [33] Ma Z, Yang WW, Yuan F, Jin B, He YL. Investigation on the thermal performance of a high-temperature latent heat storage system. *Appl Therm Eng*. 2017; 122:579-592. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.085>.
- [34] Gasia J, Miguel J, Galati F, Simone M De, Cabeza LF. Experimental evaluation of the use of fins and metal wool as heat transfer enhancement techniques in a latent heat thermal energy storage system. *Energy Convers Manage* 2019;184 (February):530–538. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.085>
- [35] Yang X, Wei P, Cui X, Jin L, He Y. Thermal response of annuli filled with metal foam for thermal energy storage: an experimental study. *Appl Energy*. 2019;250(May):1457-1467.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.096>.

[36] Sheikholeslami M, Lohrasbi S, Ganji DD. Numerical analysis of discharging process acceleration in LHTESS by immersing innovative fin configuration using finite element method. *Appl Therm Eng.* 2016; 107:154-166. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.158>.

[37] Borhani SM, Hosseini MJ, Ranjbar AA, Bahrampoury R. Investigation of phase change in a spiral-fin heat exchanger. *App Math Model.* 2019; 67:297-314. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.10.029>.

[38] Yang X, Wei P, Cui X, Jin L, He Y. Thermal response of annuli filled with metal foam for thermal energy storage: an experimental study. *Appl Energy.* 2019;250(May):1457-1467. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.007>.

[39] Tay NHS, Bruno F, Belusko M. Comparison of pinned and finned tubes in a phase change thermal energy storage system using CFD. *Appl Energy.* 2013; 104:79-86. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.040.remaque> .

[40] Li D, Yang C, Yang H. Experimental and numerical study of a tube-fin cool storage heat exchanger. *Appl Therm Eng.* 2019;149 (July 2018):712-722.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng>.

[41] NREL, Solar Thermal Energy Storage Projects. [https:// solarpaces.nrel.gov/by-status/operational](https://solarpaces.nrel.gov/by-status/operational). U.S. Department of Energy: The National Renewable Energy Laboratory U.S.A., Published 2019.

[42] Compagnie de Chauffage de Grenoble, Stockage thermique et réseaux de chaleur, Cerema, sept. 2021. Disponible: https://reseaux-chaleur.cerema.fr/sites/reseaux-chaleur-v2/files/fichiers/2022/01/Stockage_thermique.pdf

[43] A. Guidoum and W. Farhet, Influence de la nature du sable sur les propriétés physico-mécaniques d'un béton ordinaire, Master's thesis, Dept. Génie Civil, Univ. Badji Mokhtar - Annaba, Annaba, Algeria, 2019

<https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/09/GUIDOUM-Abderrahmen.pdf>

- [44] M. E. Tucker, *Sedimentary rocks in the field*, 3e éd., p. 32. Chichester, Royaume-Uni : John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- <https://zarmesh.com/wp-content/uploads/2018/08/Sedimentary-Rocks-in-the-Field.pdf>
- [45] Tiskatine R, Oaddi R, Ait El Cadi R, et al. Suitability and characteristics of rocks for sensible heat storage in CSP plants. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017;169(October 2016): 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.05.033>
- [46] A.M. Rabi', J. Radulovic, J.M. Buick, Packed Bed Thermal Energy Storage System: Parametric Study, *Thermo* 4 (2024) 295–314. <https://doi.org/10.3390/thermo4030016>.
- [47] Singh H, Saini RP, Saini JS. A review on packed bed solar energy storage systems. *Renew Sustain Energy Rev*. 2010;14(3): 1059-1069. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.022>.
- [48] Cárdenas B, León N. High temperature latent heat thermal energy storage: phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renew Sustain Energy Rev*. 2013; 27:724-737. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.028>.
- [49] Ahmed SF, Khalid M, Rashmi W, Chan A, Shahbaz K. Recent progress in solar thermal energy storage using nanomaterials. *Renew Sustain Energy Rev*. 2017; 67:450-460. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.034>.
- [50] Hasnain SM. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conver Manage*. 1998;39(11):1127-1138.
- [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00025-9).
- [51] K. Hollands and M. Lightstone, "A review of low-flow, stratified-tank solar water heating systems," *Solar energy*, vol. 43, pp. 97-105, 1989.
- [52] S. Kalaiselvam and R. Parameshwaran, "Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability: Systems Design, Assessment and Applications," Elsevier, 2014.
- [53] E. G. Kovach, "Thermal Energy Storage: The Report of a NATO Science Committee Conference Held at Turnberry, Scotland, 1st-5th March, 1976," Pergamon Press, 2013.

- [54] N. Siegel, M. Gross, C. Ho, T. Phan, and J. Yuan, "Physical Properties of Solid Particle Thermal Energy Storage Media for Concentrating Solar Power Applications," *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 1015-1023, 2014.
- [55] M. Hadjieva, R. Stoykov, and T. Filipova, "Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage," *Renewable Energy*, vol. 19, pp. 111-115, 2000.
- [56] Duffie, J.A.; Beckman, W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*; Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2013.
- [57] Nems, M.; Nems, A.; Kasperski, J.; Pomorski, M. Thermo-hydraulic analysis of heat storage filled with the ceramic bricks dedicated to the solar air heating system. *Materials* **2017**, 10, 940.
- [58] J. B. J. Fourier, "Sur la propagation de la chaleur," Unpubl. Manusc., 1807.
- [59] A. Houpeurt, J. Delouvrier, and R. Iffly, "Fonctionnement d'un doublet hydraulique de refroidissement," *La Houille Blanche*, no. 3, pp. 239–246, 1965.
- [60] A. Boisdet, J. L. Peube, and D. Blay, "Stockage thermique en milieu poreux granulaire," *Rev. Phys. Appliquée*, vol. 17, no. 9, pp. 591–594, 1982.
- [61] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007
- <https://hyominsite.files.wordpress.com/2015/03/fundamentals-of-heat-and-mass-transfer-6th-edition.pdf>
- [62] J. Huetz and J.-P. Petit, "Notions de transfert thermique par convection," *Tech. l'ingénieur A-1541*, 1990.
- [63] Y. A.Çengel et A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*, 5e édition. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [64] D. Menacer, "Étude numérique de la convection mixte dans des cavités phénomène de bifurcation."
- [65] O. Cadot, O. Cadot, and E. École, "Introduction à la turbulence, cours de l'ENSTA-ParisTech 2A To cite This version : HAL Id : cel-01228137 Polycopié de Cours," 2015.

- [66] O. Molerus, "Heat transfer in moving beds with a stagnant interstitial gas," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 40, pp. 4151-4159, 1997.
- [67] E. Schlünder, "Heat transfer to moving spherical packings at short contact times," *International Chemical Engineering*, vol. 20, pp. 550-554, 1980.
- [68] J. Sun and M. Chen, "A theoretical analysis of heat transfer due to particle impact," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 31, pp. 969-975, 1988.
- [69] J. Borkink and K. Westerterp, "Influence of tube and particle diameter on heat transport in packed beds," *AIChE journal*, vol. 38, pp. 703-715, 1992.
- [70] G. F. Froment, K. B. Bischoff, and J. De Wilde, *Chemical reactor analysis and design* vol. 2, Wiley, New York, 1990.
- [71] A. Boateng and P. Barr, "A thermal model for the rotary kiln including heat transfer within the bed," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 39, pp. 2131- 2147, 1996.
- [72] Y. Ding, R. Forster, J. Seville, and D. Parker, "Scaling relationships for rotating drums," *Chemical Engineering Science*, vol. 56, pp. 3737-3750, 2001.
- [73] R. G. Carbonell and S. Whitaker, "Heat and mass transfer in porous media," in *Fundamentals of transport phenomena in porous media*, ed: Springer, 1984, pp. 121- 198.
- [74] J. Levec and R. Carbonell, "Longitudinal and lateral thermal dispersion in packed beds. Part I: Theory," *AIChE journal*, vol. 31, pp. 581-590, 1985.
- [75] F. Zanotti and R. Carbonell, "Development of transport equations for multiphase systems— III: Application to heat transfer in packed beds," *Chemical Engineering Science*, vol. 39, pp. 299-311, 1984.
- [76] P. Cheng and D. Vortmeyer, "Transverse thermal dispersion and wall channelling in a packed bed with forced convective flow," *Chemical Engineering Science*, vol. 43, pp. 2523-2532, 1988.
- [77] C. Moyne, S. Didierjean, H. A. Souto, and O. Da Silveira, "Thermal dispersion in porous media: one-equation model," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 43, pp. 3853-3867, 2000

- [78] J. S. Hong, M. C. Kim, D.-Y. Yoon, B.-J. Chung, and S. Kim, "Linear stability analysis of a fluid-saturated porous layer subjected to time-dependent heating," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 51, pp. 3044-3051, 2008.
- [79] S. Bories, A. Mojtabi, M. Prat, and M. Quintard, "Transferts de chaleur dans les milieux poreux Changement de phase," *Tech. L'ingénieur*, vol. BE 8251, pp. 1–14, 2008.
- [80] M. Kaviany, *Principles of heat transfer in porous media*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [81] O. Coussy, *Mécanique des milieux poreux*. Editions Technip, 1991
- [82] F. Lominé, "Ecoulements de particules dans un milieu poreux." 2007.
- [83] R. Younsi, "Simulation numérique du transfert de chaleur et de masse en milieux fluides et poreux." 2002.
- [84] S. Bories, A. Mojtabi, M. Prat, and M. Quintard, "Transferts de chaleur dans les milieux poreux Changement de phase," *Tech. L'ingénieur*, vol. BE 8251, pp. 1–14, 2008.
- [85] A. Bejan and J. L. Lage, "Heat transfer from a surface covered with hair," in *Convective heat and mass transfer in porous media*, Springer, 1991, pp. 823–845.
- [86] A. Merea, *Premier cours national post-graduate sur l'irrigation, le drainage et la gestion des ressources hydriques*. IICA Biblioteca Venezuela.
- [87] D. A. Nield and A. Bejan, *Convection in porous media*, vol. 3. Springer, 2006.
- [88] H. Darcy, *Les fontaines publiques de la ville de Dijon : exposition et application...* Victor Dalmont, 1856.
- [89] M. C. Powers, "A new roundness scale for sedimentary particles," *Journal of Sedimentary Research*, vol. 23, 1953.
- [90] U. Gisi, R. Schenker, R. Schulin, F. X. Stadelmann, and H. Sticher, "Soil ecology," 1997.
- [91] P. Moldrup, T. Olesen, T. Komatsu, P. Schjønning, and D. E. Rolston, "Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 65, no. 3, pp. 613–623, 2001.

- [92] R. W. Vervoort and S. R. Cattle, "Linking hydraulic conductivity and tortuosity parameters to pore space geometry and pore-size distribution," *J. Hydrol.*, vol. 272, no. 1–4, pp. 36–49, 2003.
- [93] G. E. Archie, "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics," *Trans. AIME*, vol. 146, no. 01, pp. 54–62, 1942.
- [94] H. C. Brinkman, "A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles, *Appl Sci.*" Res, 1947.
- [95] T. S. Lundgren, "Slow flow through stationary random beds and suspensions of spheres," *J. Fluid Mech.*, vol. 51, no. 2, pp. 273–299, 1972.
- [96] G. H. N. W. K. Nader, "Practical significance of Brinkman extension of Darcy's law coupled parallel flows within a channel and a bounding porous medium," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 52, p. 475, 1974.
- [97] AquaPortail, "Tamisage : définition et explications". Disponible : <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/5869/tamisage>
- [98] G. M. Smith, "What Is a Data Logger (Datalogger) - The Ultimate Guide," Dewesoft, 14 mai 2024. Disponible : <https://dewesoft.com/blog/what-is-data-logger>.
- [99] V-Sure, "Polyuréthane". Disponible : <https://www.v-sure.eu/fr/produits/polyurethane/>.
- [100] Pico Technology, "Thermocouple haute température de type K, pointe exposée, isolé en fibre de verre, 3 m". Disponible : <https://www.picotech.com/accessories/type-k-thermocouple/thermocouple-hi-temp-type-k-fg-3-m>.
- [101] D. Clavier, Croissance hydrothermale de monocristaux isotopes du quartz- α , étude des propriétés physiques et recherche de nouvelles solutions solides avec des oxydes du bloc p (Ge, Sn) et du bloc d (Mn, V, Ti), Thèse de doctorat, Université de Montpellier, France, 2015. Disponible : <https://theses.hal.science/tel-01258003/file/These%20VF-1.pdf>
- [102] S. Bensaada, "Diagramme fer-carbone," Université de Biskra, 2016. <https://www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/4%20Diagramme%20fer%20carbone%2036%20pages.pdf>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[103] ZYA Aluminum Sheet, "2022" ما هي خصائص الألمنيوم النقي وسبائك الألومنيوم. [Online]. Available: <https://www.zyaluminumsheet.com/info/what-are-the-characteristics-of-pure-aluminum-70324408.html>