



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des sciences et Technologie  
Département de Génie mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Energétique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :

**Oussama Rezgui & Mountassir Debbache**

Le : dimanche 26 juin 2022

Etude expérimentale des performances thermiques d'une installation de stockage de la chaleur  
par le sable

---

## Jury :

Dr.	Labeled Adnane	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	Moummi Abdelhafid	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Mahboub Chawki	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2021 - 2022

# ***Remerciement***

*Tout d'abord, nous remercions Dieu de nous avoir aidé, donné le savoir, la force et la patience pour réaliser ce travail.*

*Nous tenons à remercier aussi notre encadreur, Pr. Moummi Abdelhafid pour son aide, sa disponibilité et ses conseils pour réaliser ce modeste travail et sa patience avec nous.*

*Nous adressons également nos remerciements à nos collègues pour leurs aides durant la partie pratique, en particulier M Nadjmo rezgui et Djallel depuis le début de ce travail.*

*Nous remercions vivement les membres de jury d'avoir accepté pour juger ce modeste travail, leur présence est un grand honneur pour nous.*

*A toute personne ayant contribué, de près ou de loin à la réalisation de ce travail*

**Merci à tous**

Sommaire

**Remerciement..... 2**  
**Sommaire.....III**  
**List des figures ..... V**  
**List des tableaux..... VIII**  
**Nomenclature .....IX**  
**Introduction générale..... 2**

Chapitre I

**I.1. Introduction :..... 5**  
**I.2. Le stockage thermique : ..... 5**  
    **I.2.1. Types de stockage de chaleur :.....5**  
        **I.2.1.1. Stockage par chaleur sensible :.....5**  
        **I.2.1.2. Stockage par chaleur latente :.....7**  
        **I.2.1.3. Les matériaux à changement de phase:..... 8**  
        **I.2.1.4. Stockage thermochimique..... 10**  
            **I.2.1.4.1. Principe de fonctionnement:..... 10**  
**I.3. Comparaison entre les différentes techniques de stockage thermique:..... 12**  
**I.4. Quelques travaux des recherches réalisés sur le stockage par chaleur sensible : ..... 14**  
**I.5. Conclusion : ..... 18**

Chapitre II

**II.1. Introduction :..... 20**  
**II.2. Stockage liquide : ..... 20**  
**II.3. Stockage solide : ..... 21**  
**II.4. Le fluide caloporteur :..... 22**  
**II.5. Le milieu poreux (granulaire) :..... 23**  
**II.6. Procédés de stockage sensible solide:..... 24**  
    **II.6.1. Le Lit fixe entassé : ..... 24**  
    **II.6.2. Le Lit fluidisé : ..... 25**  
**II.7. Caractéristiques et propriétés d'un milieu poreux : ..... 26**  
    **II.7.1. Porosité : ..... 26**  
    **II.7.2. Volume Élémentaire Représentatif (VER) : ..... 26**  
    **II.7.3. La distribution de diamètres de grain: ..... 27**  
    **II.7.4. Fraction volumique : ..... 28**

II.8.	Paramètres thermiques: .....	28
II.8.1.	Capacité calorifique équivalente : .....	29
II.8.2.	Conductivité thermique équivalente : .....	29
II.9.	Performances thermiques : .....	30

## Chapitre III

III.1.	Introduction : .....	33
III.2.	Enceinte de stockage: .....	33
III.2.1.	Cuve de Stockage : .....	33
III.2.2.	Echangeur de chaleur : .....	34
III.2.3.	Isolation thermique : .....	35
III.2.4.	Matériau du stockage (le sable) : .....	36
III.3.	Principe de fonctionnement de l'installation : .....	39
III.4.	Instrumentations de mesure : .....	40
III.4.1.	Mesure du rayonnement solaire : .....	40
III.4.2.	Mesure du débit d'eau : .....	40
III.4.3.	Mesure des températures : .....	41
III.5.	Conclusion : .....	42

## Chapitre IV

IV.1.	Introduction: .....	44
IV.2.	Résultats et discussions : .....	44
IV.2.1.	Variation de la température : .....	44
IV.2.2.	Variation de l'efficacité: .....	47
IV.2.3.	Variation de la quantité de chaleur stockée : .....	49
IV.3.	Conclusion: .....	51
	<i>Conclusion générale</i> .....	52
	Bibliographies .....	54
	Résumé : .....	57

### List des figures

#### Chapitre I :

- Figure (I.1):** Classification d'un système de stockage thermique.
- Figure (I.2):** Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente (Solide/liquide).
- Figure (I.3):** Classification des MCP.
- Figure (I.4):** Organigramme de conception d'un ESECL
- Figure (I.5):** Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique.
- Figure (I.6) :** Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermochimique.
- Figure (I.7) :** Concept de processus stockage thermochimique  $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ .
- Figure (I.8) :** (a) Schéma de principe du système peu coûteux de stockage et de traitement des capteurs solaires au sol. (b) Croquis schématique de la coupe transversale de l'espace de récupération de chaleur ; qui peut être considéré comme réservoir dans lequel l'eau est remplie et se déplaçant vers la direction y.
- Figure. (I.9):** Photographie du sable utilisé comme milieu de stockage.
- Figure. (I.10) :** Configuration de l'échangeur de chaleur dans la cuve de stockage.
- Figure (I.11):** Échantillon de sable de rivière avant et après chauffage.
- Figure (I.12):** Dessin de l'échangeur de chaleur et la cuve avec logiciel de conception mécanique Solide Works
- Figure (I.13):** Distribution de la température en fonction du temps dans la cuve de sable pendant le chargement (Vue de côté)

#### Chapitre II :

- Figure (II.1):** Volume nécessaire pour la même énergie stockée.
- Figure (II.2):** Schéma simplifié d'un milieu granulaire.
- Figure (II.3)** Milieu granulaire réel (sable)
- Figure (II.4):** Schéma d'un système de stockage à lit entassé.
- Figure (II.5) :** Principe de fluidisation (a) lit fixe, (b) lit fluidisé.
- Figure (II.6) :** Schéma d'un système de stockage thermique à lit fluidisé.
- Figure (II.7):** Strates en série et en parallèle.

### Chapitre III

- Figure (III.1) :** Photo prise à l'intérieur du Hall Technique de l'Université de Biskra.
- Figure (III.2) :** Cuve de stockage en bois.
- Figure (III.3) :** Echangeur de chaleur tubulaire en forme de serpentin.
- Figure (III.4) :** Réalisation de l'échangeur serpentin.
- Figure (III.5) :** Isolation en double couche de Polystyrène et carton ondulée.
- Figure (III.6) :** Tamisage de sable de la région de Aîn Ben Naoui
- Figure (III.7) :** Étape de pose du sable et de l'échangeur de chaleur dans la cuve.
- Figure (III.8) :** Fermeture de la cuve de stockage et assemblage des éléments par une colle spéciale en silicone.
- Figure (III.9) :** Installation des captures de mesure de température a entrée et la sortie de l'enceinte de stockage.
- Figure (III.10) :** Raccordement de la cuve de stockage avec le capteur solaire plan à eau
- Figure (III.11) :** Système de remplissage du circuit.
- Figure (III.12) :** Pompe à eau de type Shimge home booster.
- Figure (III.13) :** Pyromètre portatif.
- Figure (III.14) :** Débit mètre à flotteur gradué de 0 à 160 l/h.
- Figure (III.15):** Thermomètres digital JDP-200avecécran afficheur.

### Chapitre VI

- Figure (IV.1) :** Variation de la température de l'eau entrante et sortante de la cuve et la température moyenne du sable pour un débit de 0,0278 Kg/s
- Figure (IV.2) :** Variation de la température de l'eau entrante et sortante de la cuve et la température moyenne du sable pour un débit de 0.0236 Kg/s.
- Figure (IV.3) :** Variation de la température de l'eau entrante et sortante de la cuve et la température moyenne du sable pour un débit de 0,0125kg/s.
- Figure (IV.4) :** Evolution de l'efficacité dans la cuve pour un débit d'eau égal à 0,0278 kg/s

- Figure (IV.5) :** Evolution de l'efficacité dans la cuve pour un débit d'eau égal à 0,0236 kg/s.
- Figure (IV.6):** Evolution de l'efficacité dans la cuve pour un débit d'eau égal à 0,0125kg/s.
- Figure (IV.7) :** Evolution de stockage de chaleur dans la cuve pour un débit d'eau égal à 0,0278 kg/s.
- Figure (IV.8) :** Evolution de stockage de chaleur dans la cuve pour un débit d'eau égal à 0,0236 kg/s.
- .Figure (IV.9) :** Evolution de stockage de chaleur dans la cuve pour un débit d'eau égal à 0,0125 kg/s.

### List des tableaux

#### Chapitre I :

- Tableau (I.1) :** Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.
- Tableau (I.2) :** Paramètres thermo physiques du sable.
- Tableau (I.3) :** Paramètres thermo-physiques du sable.

#### Chapitre VI :

- Tableaux(IV.1) :** Relevées expérimentaux et calcul des performances thermiques de la cuve de stockage pour un débit égale à 0.0278 kg/s.



## Nomenclature

Symboles	Définition	Unités
$C$	Compacité.	[J/Kg. K]
$Cp$	Capacité calorifique.	[J/Kg. K]
$d$	Diamètre équivalent.	[m]
$dT$	La variation infinitésimale de la température durant l'étape de chargement.	[K]
$g$	Accélération de la pesanteur	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Profondeur.	[m]
$m$	La masse.	[kg]
$T1$	Température de fluide caloporteur (Eau).	[K]
$T2$	Température de matériau de stockage (sable).	[K]
$T_{inlet}$	Température d'entrée du fluide caloporteur.	[K]
$T_{ini}$	Température initiale du système	[K]
$t$	Temps	[s]
$V_{solid}$	volume de la phase solide du milieu poreux.	[m <sup>3</sup> ]
$V_{tot}$	Volume total du milieu.	[m <sup>3</sup> ]
$\mathcal{V}$	Vitesse de sédimentation.	[m/s]
<b>Symboles grecs :</b>		
$\alpha$	La diffusivité thermique	[m <sup>2</sup> /s]
$\varepsilon$	La porosité.	–
$k_{solide}$	Conductivités thermiques du solide.	[W/m. K]
$k_{fluide}$	Conductivités thermiques du fluide.	[W/m. K]
$\eta$	L'efficacité énergétique.	–
$\mu$	Viscosité dynamique du liquide	[pas]
$\rho$	Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_g$	Masse volumique des grains.	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{eau}$	Masse volumique de l'eau.	[kg/m <sup>3</sup> ]

### Indice :

<i>eq</i>	Équivalent.
<i>f</i>	Fluide.
<i>g</i>	Grains
<i>ini</i>	Initial.
<i>s</i>	Solide
<i>tot</i>	Total

# Introduction générale

## Introduction générale

Au cours de ces dernières décennies, la demande de l'énergie sous ses différentes formes n'a cessé d'augmenter, vue le développement et la croissance de l'activité industrielle et la demande du confort dans la vie quotidienne comme dans le transport, le chauffage et la climatisation. Les énergies fossiles dont le pétrole, le charbon et le gaz naturel fournissent actuellement la majeure partie des besoins énergétique.

En raison des considérations économiques et environnementales, l'énergie géothermique et L'énergie solaire se présentent de plus en plus comme des alternatives renouvelables face aux autres formes d'énergies utilisées pour le chauffage et la climatisation dans l'environnement intérieur et extérieur.

Le stockage saisonnier de la chaleur offre la possibilité de bénéficier de l'énergie solaire pendant la période de l'année. A Biskra en particulier, les besoins pour le chauffage sont les plus élevés durant la période hivernale, il serait raisonnable de collecter l'énergie solaire en été grâce aux panneaux solaires, de la stocker dans le sol par exemple et de la récupérer en hiver afin d'assurer le chauffage des locaux.

Le stockage saisonnier peut être réalisé pour une maison individuelle, cependant il devient compétitif économiquement à l'échelle d'une communauté. Des projets à grande échelle ont déjà vu le jour, principalement en Europe mais aussi en Afrique.

L'objectif de ce projet est d'utiliser l'énergie solaire à conversion thermique pour les besoins énergétiques humains, facilement et sans dépenses importantes. Cette énergie thermique d'origine solaire est stockée dans un matériaux solide granulaire par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur dans une enceinte parfaitement isolée par rapport à son environnement extérieur. Le milieu de stockage utilisé étant le sable de la région de Biskra, ou la faisabilité du système peut être démontrée par l'efficacité et la quantité de chaleur emmagasinée durant une journée en fonction des conditions climatiques de la région de Biskra.

Le présent travail comporte quatre chapitres et une annexe :

- **Le premier chapitre** : des généralités et synthèse bibliographique sur le stockage de la chaleur en générale.
- **Le deuxième chapitre** : une étude théorique sur les procédés de stockage sensible par le sable en particulier, ou on essaiera de mettre en évidence les équations caractéristiques du stockage de la chaleur permettant de calculer l'efficacité et la quantité de chaleur

emmagasinée dans l'enceinte de stockage.

- **Le troisième chapitre** : une étude expérimentale avec description du banc d'essai constitué d'un capteur solaire à eau et une enceinte de stockage de la chaleur par le sable, ensuite, une série de relevées expérimentales des températures d'entrée, de sortie, de l'enceinte de stockage et du rayonnement solaire incident en fonction du temps.
- **Le dernier chapitre** : calcul des paramètres des performances thermiques, avec interprétations et discussion des résultats obtenus.
- Enfin, nous terminons ce travail avec une conclusion générale.

# Chapitre I

## I.1. Introduction :

Le stockage d'énergie thermique est le concept de stockage d'énergie thermique. Il joue un rôle clé dans l'utilisation efficace de la chaleur résiduelle industrielle et les énergies renouvelables ressource, et permis de réduire le coût de l'énergie solaire.

Les exigences techniques pour le système stockage d'énergie thermique comprennent :

Densité d'énergie élevée, transfert de chaleur suffisant entre le fluide et milieu de stockage, stabilité mécanique et chimique, perte de chaleur minimisée, réversibilité complète de nombreux cycles de charge/décharge, compatibilité chimique avec le fluide caloporteur et le transport de chaleur par échangeurs.

Il existe différentes méthodes de stockage thermique, sous forme de stockage thermique sensible et les catégories de stockage de chaleur latente. [1]

Dans ce chapitre on essayera de montrer les différents modes de stockages d'énergie en se basant sur le stockage thermique sensible, qui nous intéresse dans cette étude.

## I.2. Le stockage thermique :

Le stockage de l'énergie thermique concerne principalement la chaleur provenant du soleil, comme il concerne également la chaleur produite par certaines industries (industrie métallurgique, centrale à gaz, centrale d'incinération...).

Les technologies de stockage de l'énergie thermique peuvent être classifiées dans diverses catégories selon différents critères tel que montrée par la Figure (I.1).

### I.2.1. Types de stockage de chaleur :

Le stockage de la chaleur peut se faire selon trois types : par chaleur sensible, par chaleur latente, ou par voie thermochimique [2].

#### I.2.1.1. Stockage par chaleur sensible :

Le principe de stockage de chaleur par chaleur sensible utilise la capacité thermique d'un matériau, c'est-à-dire sa chaleur spécifique, afin d'emmagasiner de l'énergie. L'énergie thermique est stockée par l'augmentation de la température du matériau suivant la relation.

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

# Chapitre I : Généralités et étude bibliographique

Avec :

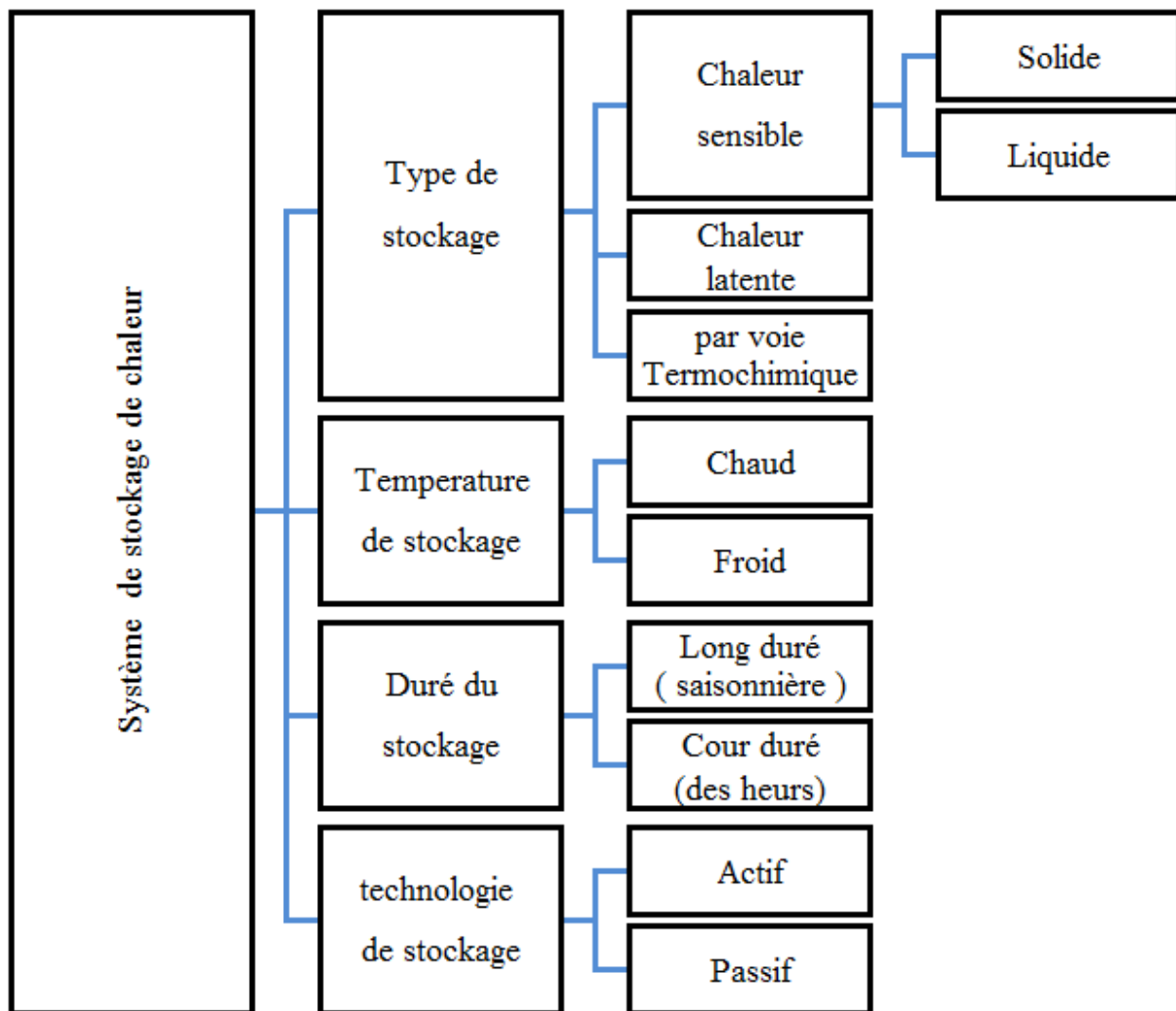
$Q$  : Quantité de chaleur qui pénètre dans le matériau de stockage (Joules).

$m$  : Masse de matériau de stockage (kg).

$C_p$  : Capacité thermique spécifique du matériau (J/Kg. K).

$T_f$  : Température finale (°K).

$T_i$  : Température initiale (°K). [3]



**Figure 1.1** : Classification d'un système de stockage thermique.



De plus, aucun changement de phase n'apparaît en cours de fonctionnement. Afin qu'un matériau soit reconnu comme potentiel utilisable comme médium de stockage de chaleur sous forme sensible, il doit répondre aux critères suivants [4] :

Chaleur spécifique élevée ;

- Stabilité à long terme avec cycles thermiques ;
- Compatibilité avec son contenant ;
- Faible coût ;
- Les principaux matériaux utilisés se retrouvent sous forme liquide ou solide.

## I.2.1.2. Stockage par chaleur latente :

L'énergie thermique peut être stockée de façon isotherme grâce à un changement de phase des matériaux, solide/liquide ou liquide/vapeur. Durant l'étape de charge, l'énergie thermique fournie au média permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. Celui-ci est ensuite stocké à la température de charge. Lors de la restitution de l'énergie celle-ci change de nouveau de phase pour restituer l'énergie stockée et reprend son état initial. La Figure (1.2) représente les différentes étapes d'un tel système de stockage.

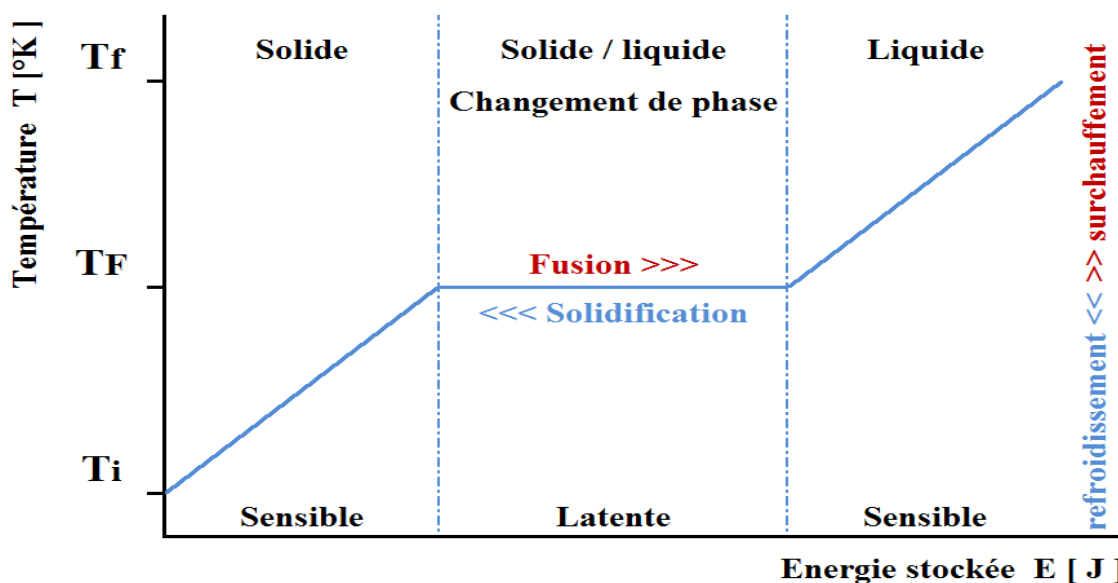


Figure 1.2 : Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente

(Solide/liquide). [5]

## Chapitre I : Généralités et étude bibliographique

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

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot C_{p,S} \cdot dT + m \cdot \Delta L + \int_{T_i}^{T_f} m \cdot C_{p,L} \cdot dT \quad (1.2)$$

Où, Q est la quantité d'énergie stockée (J), m est la masse du matériau de stockage (kg),  $C_{p,s}$  et  $C_{p,i}$  sont respectivement les chaleurs spécifiques des matériaux solide et liquide ( $J.kg^{-1} .K^{-1}$ ),  $\Delta L$  est l'enthalpie de changement de phase ( $J.kg^{-1}$ ) et dT est la variation de la température durant l'étape de charge (K).

### I.2.1.3. Les matériaux à changement de phase:

On nomme matériau à changement de Phase - ou MCP - tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Cette plage est grossièrement localisée entre 10 et 80 degrés. Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omniprésentes dans notre vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire...) [6].

Les matériaux à changement de phase ont pour particularité de pouvoir stocker l'énergie sous forme de chaleur latente ; la chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide et vice versa. Ainsi l'énergie stockée dépend de la chaleur latente et de la quantité du matériau de stockage. Le diagramme ci-dessous présente la classification des matériaux à changement de phase :

L'implantation d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente (ESECL).se fait en trois principales étapes [7] :

- choix du MCP;
- choix du réservoir de stockage ;
- choix de l'échangeur de chaleur.

Les MCP peuvent être regroupés en trois principales catégories :

- les matériaux ayant un changement de phase solide-solide.
- les matériaux ayant un changement de phase solide-liquide.
- les matériaux ayant un changement de phase liquide-gazeux.

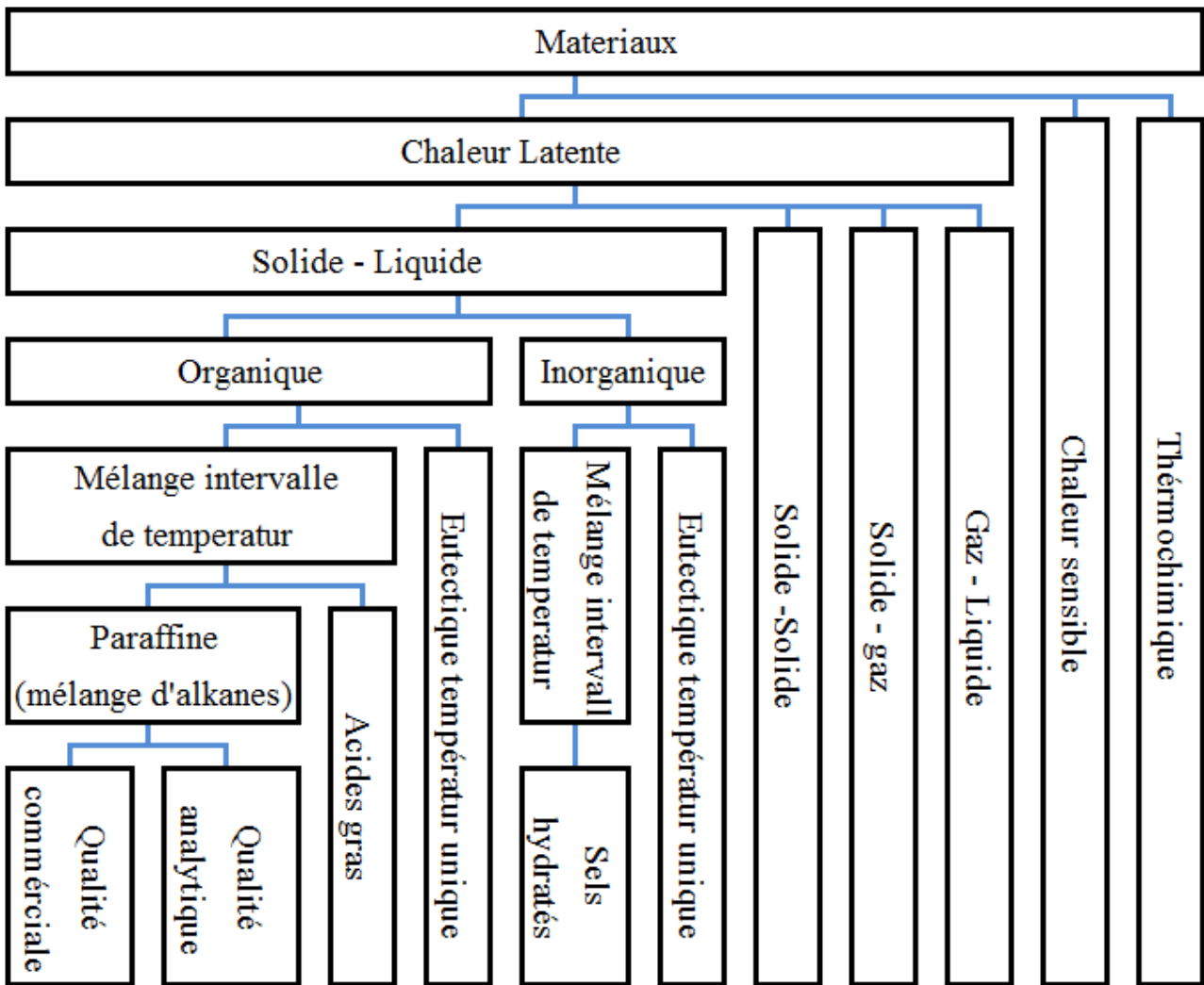


Figure 1.3 : Classification des MCP [8].

La figure 1.4 montre la méthodologie de conception qui devrait être utilisée pour un (ESECL).

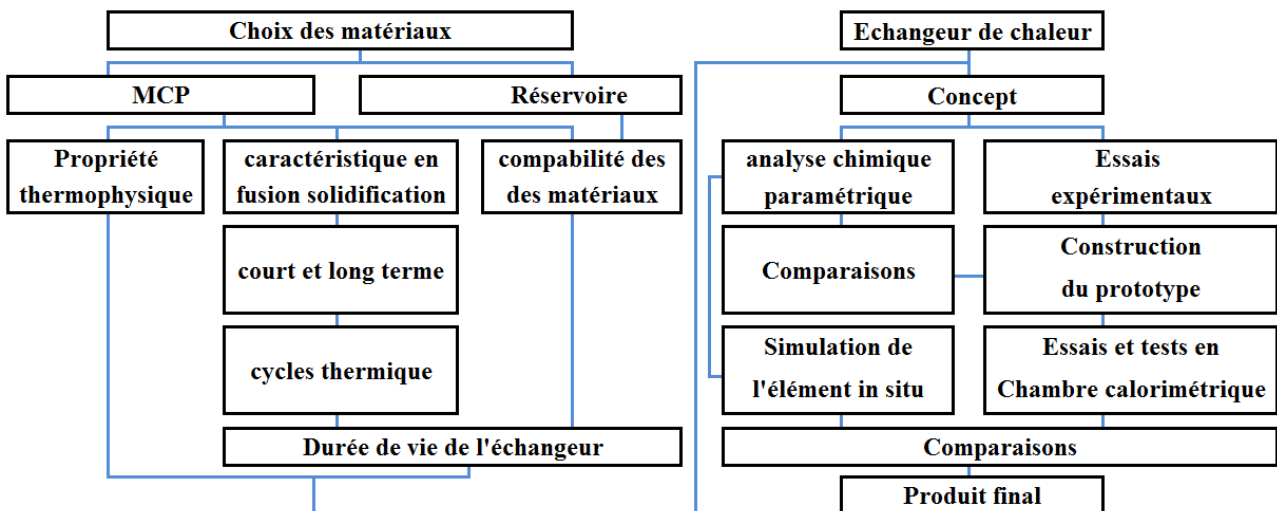


Figure 1.4: Organigramme de conception d'un ESECL [7]

## I.2.1.4. Stockage thermochimique

Le terme de stockage thermochimique recouvre deux phénomènes : la sorption et la réaction chimique. Le stockage de chaleur par sorption est intéressant pour le stockage basse température ( $T \approx 80 \text{ °C}$ ) tandis que pour des applications de type solaire concentré ( $T \approx 200 \text{ à } 2000 \text{ °C}$ ), ce sont les réactions de synthèse chimique qui semblent être les plus adaptées [9]. La Figure (1.5) présente la classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique.

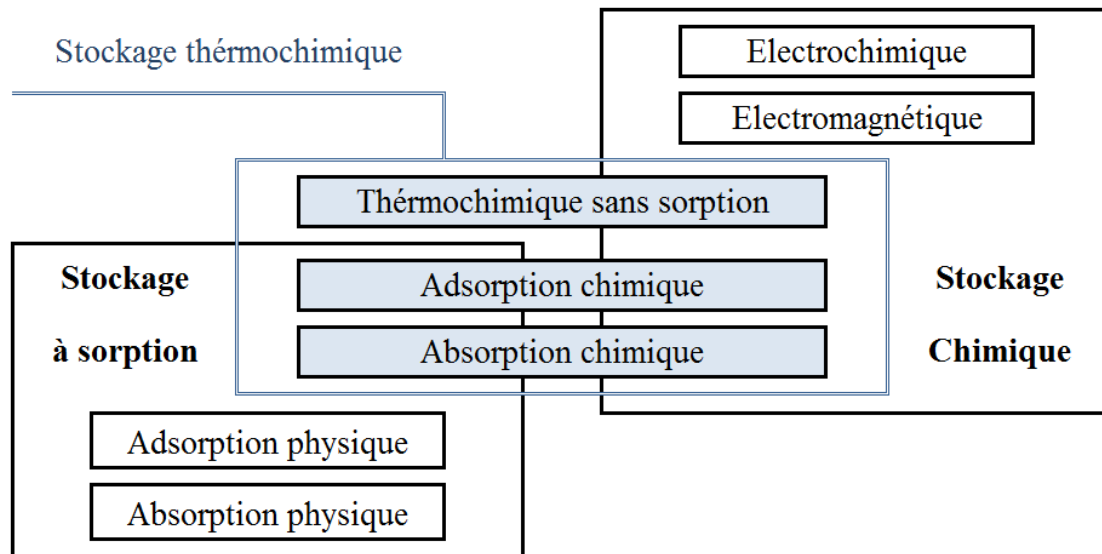


Figure 1.5. Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique [10].

### I.2.1.4.1. Principe de fonctionnement:

La voie thermochimique exploite la réversibilité des réactions chimiques pour stocker l'énergie.

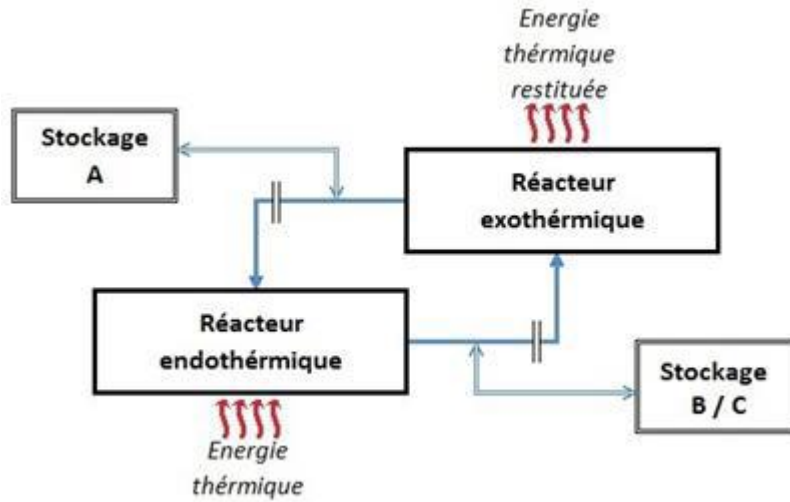
De façon générale, les réactions sont de la forme :



Les réactions les plus couramment rencontrées sont de la forme suivante :



Pour ce type de stockage, la réaction mise en jeu doit être totalement réversible afin que le procédé ne perde pas sa capacité de stockage au cours des cycles. Le schéma de principe du stockage de chaleur par voie thermochimique est présenté sur la Figure (1.6).



**Figure 1.6:** Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermo-chimique [11].

Lors de l'étape de charge, l'énergie thermique issue du champ solaire permet de mettre en œuvre la réaction endothermique. Les produits de cette réaction (B et C) sont séparés et stockés. Lorsque l'énergie thermique doit être restituée, les produits stockés (B et C) sont mis en contact afin de réaliser la réaction exothermique réversible et ainsi restituer la chaleur et régénérer le produit initial (A). La quantité d'énergie qui peut être stockée dans une réaction chimique de type  $A + \Delta H_r \rightleftharpoons B + C$  est la somme des énergies sensibles des matériaux et de la chaleur de réaction.

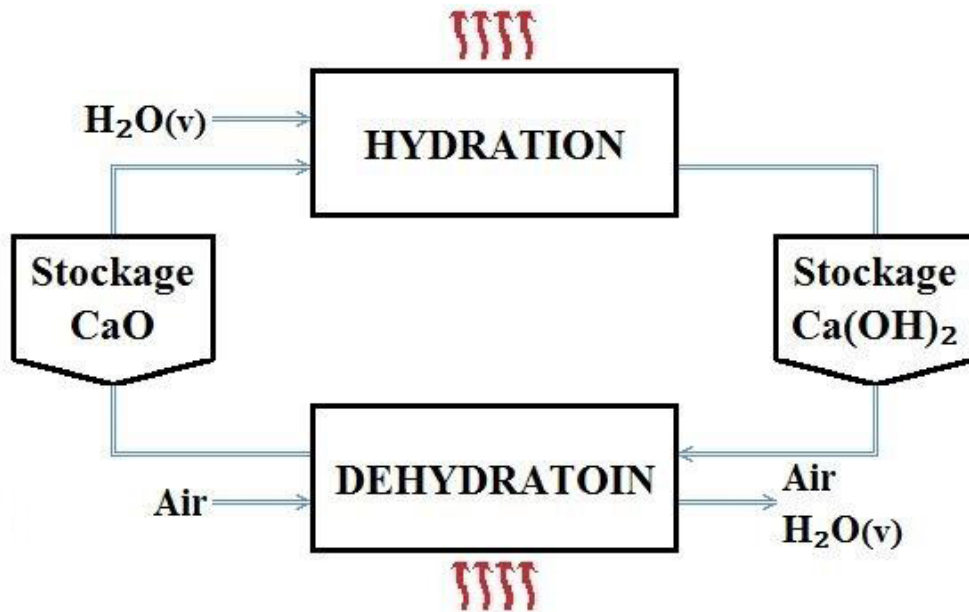
La quantité d'énergie stockée est exprimée selon la relation (1.5) [11] :

$$Q = \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_f} m_i \cdot C_{pi} \cdot dT + n_A \times \Delta H_r \quad (1.5)$$

Où, E est la quantité d'énergie stockée (J),  $n_A$  est le nombre de moles du produit A (mol),  $\Delta H_r$  est l'enthalpie de la réaction (J.mol<sup>-1</sup>). [11]

Parmi les couples les plus utilisés dans le stockage thermo-chimique, le CaO/Ca(OH)<sub>2</sub>, dont le processus de stockage est illustré par la réaction chimique suivante :





**Figure 1.7:** Concept de processus stockage thermochimique CaO/Ca(OH)<sub>2</sub>[11]

### I.3. Comparaison entre les différentes techniques de stockage thermique:

Le Tableau 1.1 répertorie les caractéristiques des trois systèmes de stockage d'énergie thermique présentés. Six paramètres fondamentaux ont été choisis : la densité énergétique, la température de stockage, la durée de stockage, le transport de l'énergie, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre du système. Dans le cadre de ce travail, le choix s'est fixé sur le stockage par chaleur sensible, vu que cette technologie a atteint une maturité qui la rend simple à exploiter.

**Tableau 1.1 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur :**

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

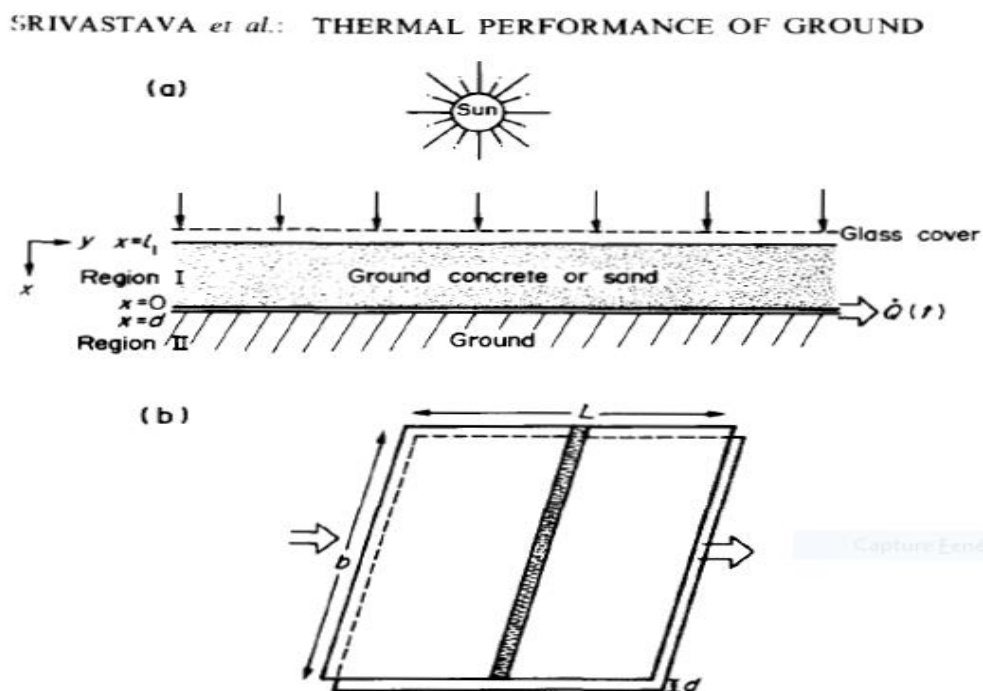
**Tableau (I.1) :** Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur [12] .

### I.4. Quelques travaux des recherches réalisés sur le stockage par chaleur sensible :

Durant ces dernières années, la demande en énergie ne cesse d'augmenter, les chercheurs trouvent que le stockage d'énergie sous forme de chaleur est l'une des solutions incontournables. Le stockage thermique a fait l'objet de différentes applications, à citer le chauffage solaire, l'air conditionné, les systèmes hybrides (solaire/électrique), le chauffage passif (mur massif), l'eau chaude sanitaire, ...etc.

Dans ce qui suit, nous présentons certains des travaux publiés dans ce contexte.

**Srivastava et al [13]** ont analysé la performance de stockage d'un plancher solaire avec le béton comme matériau de stockage. Ils ont remarqué que l'efficacité du système augmente avec la vitesse d'écoulement et diminue avec la profondeur du planché et que le béton présente un choix intéressant comme matériau de stockage par chaleur sensible, en se référant au coût de ce dernier.



**Figure 1.8:** (a) Schéma de principe du système peu coûteux de stockage et de traitement des capteurs solaires au sol. (b) Croquis schématique de la coupe transversale de l'espace de récupération de chaleur; qui peut être considéré comme réservoir dans lequel l'eau est remplie et se déplaçant vers la direction  $y$ . [13]



## Chapitre I : Généralités et étude bibliographique

**N. Mahfoudi [14]** a étudié expérimentalement et numériquement le comportement transitoire et la capacité de stockage thermique d'une unité de stockage de chaleur sensible de configuration cubique avec des tubes de charge intégrés utilisant le sable comme support de stockage, le matériau utilisé dans cette expérimentation (sable de région d'El-oued, au sud de l'Algérie) a été caractérisé par sa granulométrie, sa densité et sa capacité calorifique.

	$C_p$ (J .Kg-1.K-1)	$\rho$ (Kg.m-3)	K (W.m-1.K-1)
Sable	835	1600	1

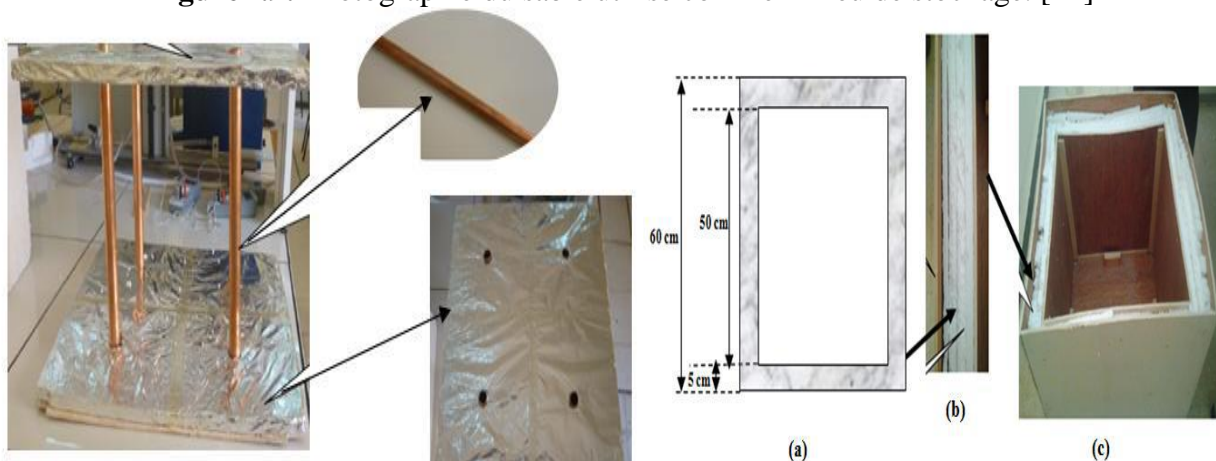
**Tableau (I.2) :** Paramètres thermo physiques du sable [14].

Le sable qui est le milieu du stockage est placé à l'intérieur de la cuve. Il sert à accumuler la chaleur en provenance d'un capteur solaire plan à air, véhiculé par le fluide caloporteur (air).

La figure I.9, présente un échantillon du sable caractérisé auparavant et utilisé dans le cadre de ce travail.[14]



**Figure I.9:** Photographie du sable utilisé comme milieu de stockage. [14]



**Figure I.10:** Configuration de l'échangeur de chaleur dans la cuve de stockage. [14]

## Chapitre I : Généralités et étude bibliographique

**R. LalithaPriya et al [15]**, ont mené une étude de caractérisation du sable de rivière en tant que moyen de stockage de chaleur à haute température, l'étude est réalisée de préférence sur la capacité thermique spécifique du sable de rivière.

Un échantillon de sable de rivière sélectionné sur les rives de Cauvery a été caractérisé à l'aide d'analyses TGA (Analyse Gravimétrique Thermique), FT-IR (Infrarouge à Transformée de Fourier) et DSC (Calorimètre à Balayage Différentiel).

Ils ont observé que, lorsque l'échantillon de sable est soumis à un procédé de chauffage initial, il y avait une perte de masse considérable mais lorsque l'échantillon est soumis à plusieurs cycles thermiques, il n'y a pas de perte de masse. Cela prouve la durabilité de l'échantillon de sable jusqu'à une température de  $1087^{\circ}\text{C}$ , où le composé carbonate est manquant après chauffage qui indique le dégagement de dioxyde de carbone. D'après l'observation colorimétrique, la capacité calorifique de l'échantillon de sable de rivière était  $1041 \text{ J/Kg. K}$ , ce qui en fait une option appropriée pour le stockage de l'énergie thermique.

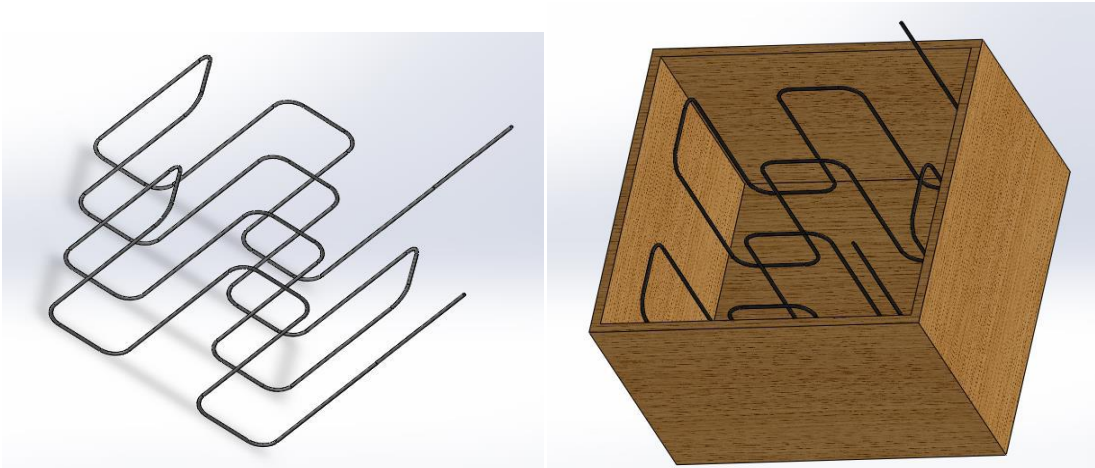


**Figure I.11** : Échantillon de sable de rivière avant et après chauffage. [14]

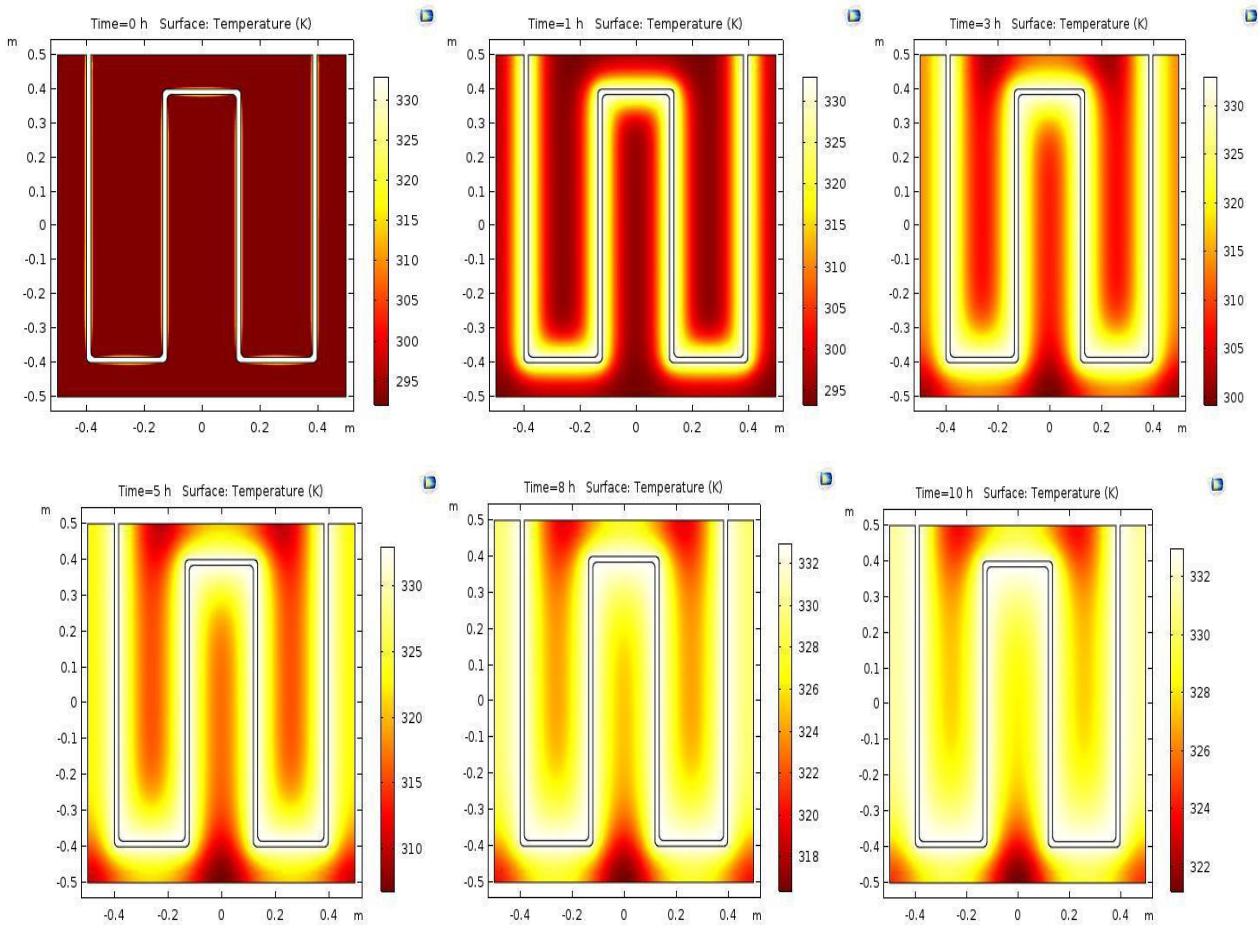
**Hachana Romaiassa [16]** a étudiée expérimentalement et par simulation numérique le comportement thermique et la capacité de stockage thermique d'une cuve de stockage de chaleur sensible cubique de  $01 \text{ m}^3$ , comporte un échangeur de chaleur de forme serpentin immergé dans le sable qui a été utilisé comme support de stockage. Le sable utilisé comme milieu de stockage a les propriétés thermo physiques d'après le tableau (I.3) :

	$C_p \text{ J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\rho \text{ Kg.m}^{-3}$	$K \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Sable	920	2700	1

**Tableau (I.3)** : Paramètres thermo-physiques du sable [15].



**Figure I.12.** Dessin de l'échangeur de chaleur et la cuve avec logiciel de conception mécanique Solid Works. [16]



**Figure I.13.** Distribution de la température en fonction du temps dans la cuve de sable pendant le chargement (Vue de côté). [16]

### **I.5. Conclusion :**

Dans ce chapitre consacré à une étude bibliographique, un récapitulatif de quelques notions sur le stockage de l'énergie thermique avec une comparaison des ses différents types a été présenté, ce qui nous a permis de montrer que le stockage thermique est une solution intéressante pour emmagasiner de l'énergie et également de connaître les avantages et les raisons d'utiliser le stockage sensible solide.

# Chapitre II

### II.1. Introduction :

Le stockage par chaleur sensible (SHS) est le système le plus courant à l'heure actuelle, il est utilisé pour stocker de l'énergie thermique dans un milieu en augmentant sa température. Le choix du milieu de stockage est généralement conditionné par le système [17].

Les milieux de stockage les plus utilisés sont : l'eau, les sels fondus, les huiles synthétiques (stockage liquide), les pierres, le béton, le sable, la céramique, l'acier (stockage solide).

Notre attention sera particulièrement portée sur un stockage solide et sensible, la granularité est l'objet de cette étude.

Pour ce travail, le matériau de stockage utilisé est du sable. L'intérêt de ce dernier est sa disponibilité, ses caractéristiques écologiques et son faible coût, particulièrement dans la région de Biskra en Algérie.

### II.2. Stockage liquide :

Les liquides utilisés dans le stockage thermique sont abondants et économiquement compétitifs. Cependant, l'eau reste le liquide le plus utilisé pour des applications à basse température (25 – 90°C). Pour une variation de température de 60 °C, l'eau stocke 250 kJ/kg, par conséquent, elle est largement utilisée dans les applications solaires destinées au chauffage des bâtiments et à l'eau chaude sanitaire [18]. Par contre son utilisation dans des applications à haute température est conditionnée par sa grande pression de vapeur qui présente un inconvénient majeur. A cet effet, l'utilisation de grands réservoirs de stockage est recommandée.

D'autres liquides sont utilisés pour le stockage sensible, les plus usuels sont : les sels fondus et les huiles organiques [19]. Toujours conditionné par des problèmes de sécurité et de stabilité, l'utilisation de ces liquides nécessite des installations très sophistiquées du point de vue du contrôle [20].

Les matériaux susceptibles d'être utilisés doivent posséder les qualités suivantes :

- Une bonne stabilité et inertie chimiques
- Une masse volumique forte afin de réduire le dimensionnement de l'installation
- Une toxicité très faible
- Une bonne conductivité et diffusivité thermique ( $\alpha$ ) élevée. [21]

### II.3. Stockage solide :

Le stockage dans les milieux solides peut être utilisé à la fois pour des applications à basses, moyennes et hautes températures, En plus de leurs capacités calorifiques importantes, les matériaux solides ne présentent aucun problème dû à la pression de vapeur, Les métaux sont de bons candidats pour le stockage thermique. Cependant, ils restent couteux en comparaison avec d'autres matériaux solides, notamment, la roche, le béton et la brique, leur stabilité à long terme, leur disponibilité et leur prix abordable en font de bons matériaux. Mais En général, le stockage sensible par un solide nécessite un plus grand volume que le stockage par un liquide. [22].

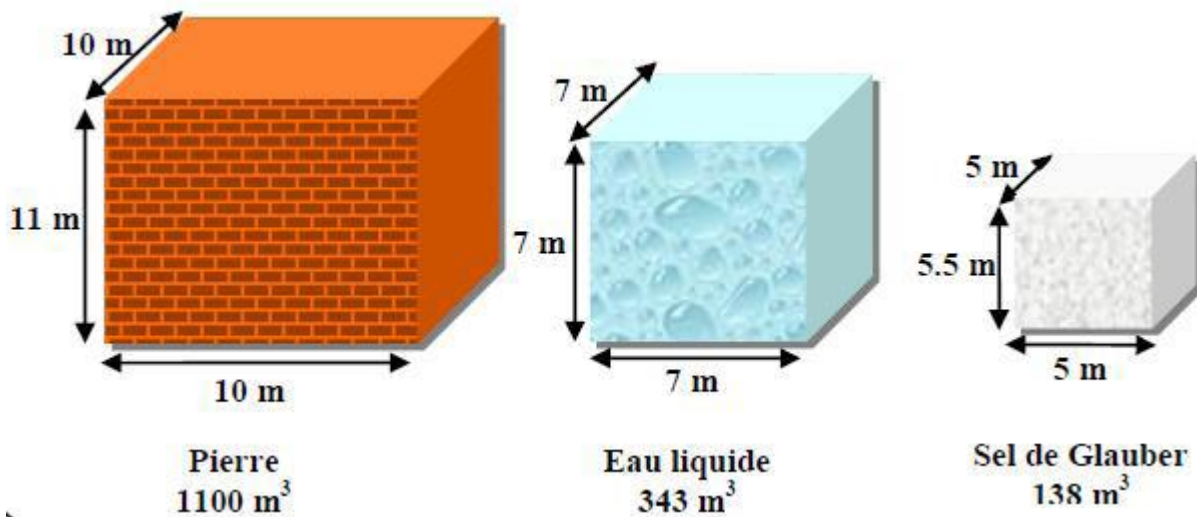


Figure II.1. Volume nécessaire pour la même énergie stockée. [23]

Pour les applications de stockage à grande échelle, les aquifères souterrains ont été pris en compte. Les aquifères sont constitués d'eaux saturées de sable ou de gravier et offrent un moyen potentiel de stocker l'énergie thermique pendant une longue période. Dans les applications à basses températures, telles que le chauffage des locaux, le chauffage d'eau et le dessalement solaire, les matériaux solides (roche, sable et béton) sont largement utilisés comme supports de stockage thermique.

### II.4. Le fluide caloporteur :

Le fluide caloporteur est utilisé comme moyen de transfert pour transférer l'énergie thermique de ou vers le milieu de stockage pendant les processus de charge et de décharge. Le fluide caloporteur peut se déplacer librement dans le milieu pour charger ou évacuer de la chaleur dans le milieu, en particulier dans les milieux à lit compacté, tels que le lit de roche.

En revanche, le fluide caloporteur peut circuler dans les tubes inclus dans le support de stockage et cette manière est habituellement conduite dans le lit entassé de petites particules, tel qu'un lit tassé de sable. La quantité de chaleur stockée dans ces systèmes dépend de la capacité calorifique du fluide, du changement de température dans le fluide et de la quantité de matériau de stockage, peut être exprimé par :

$$E = \int_{T_2}^{T_1} m C_p dT \quad (\text{II.1})$$

Avec:

m : La masse en kg du matériau

C<sub>p</sub> : La chaleur spécifique du matériau de stockage [23].

T<sub>1</sub>: La température de fluide caloporteur (Eau).

T<sub>2</sub> : La température de matériau de stockage (sable).

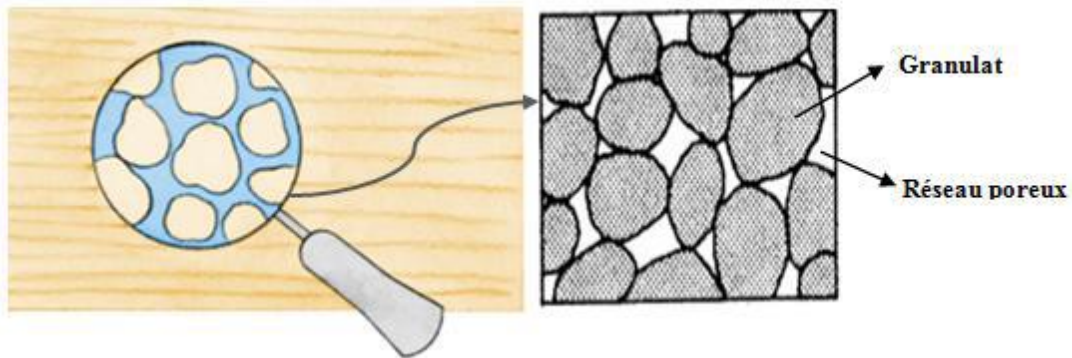
Dans les systèmes de stockage sensible solide, les procédés les plus fameuses sont le lit fixe et le lit fluidisé utilisant l'air (fluide caloporteur), mais dans le cas étudié on utilise l'eau comme fluide caloporteur parce qu'elle est peu coûteuse, non toxique et a une grande capacité de stockage (supérieure à celle de l'air).



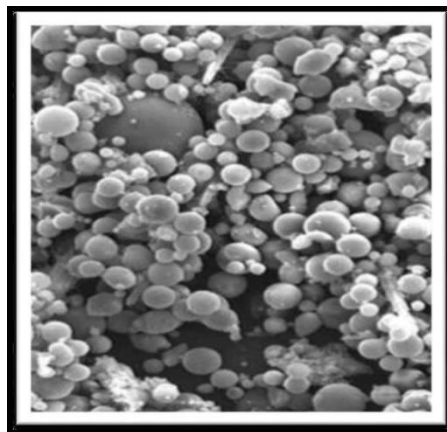
### II.5. Le milieu poreux (granulaire) :

Généralement un milieu poreux est défini comme un milieu composé d'une matrice solide et un milieu fluide. Les milieux poreux ont des formes compliquées et englobant des vides appelés pores. Ces vides peuvent communiquer entre eux et contenir une ou plusieurs phases fluides pouvant s'écouler et éventuellement, échanger entre elles et/ou avec le solide de la matière et/ou de l'énergie. La matrice solide, peut être déformable. Les milieux poreux peuvent être:

- Non consolidés : graviers, sables, limons, les lits poreux de billes ou autres éléments les fibres (amiante, laine de verre, coton, laine).
- Consolidé : les calcaires, grés, argiles..., les céramiques, les poudres frittés, les tissus végétaux et animaux vivants ou morts comme le bois et le cuir. [24]



**Figure II.2:** Schéma simplifié d'un milieu granulaire. [22]



**Figure (II.3) :** Milieu granulaire réel (sable) [16].

## II.6. Procédés de stockage sensible solide :

### II.6.1. Le Lit fixe entassé :

La technique des lits entassés consiste en un amas de matériau de stockage solide à travers lequel un fluide caloporteur peut circuler. Ce dernier traverse le lit de haut en bas assurant ainsi le transfert de chaleur au matériau pendant la période de chargement. Durant la période de décharge, le sens de l'écoulement du fluide caloporteur est inversé. En général cette technique est utilisée avec un capteur solaire à air (cf. figure II.4). Dans certaines configurations des conduites sont utilisées pour assurer le transport du fluide caloporteur.

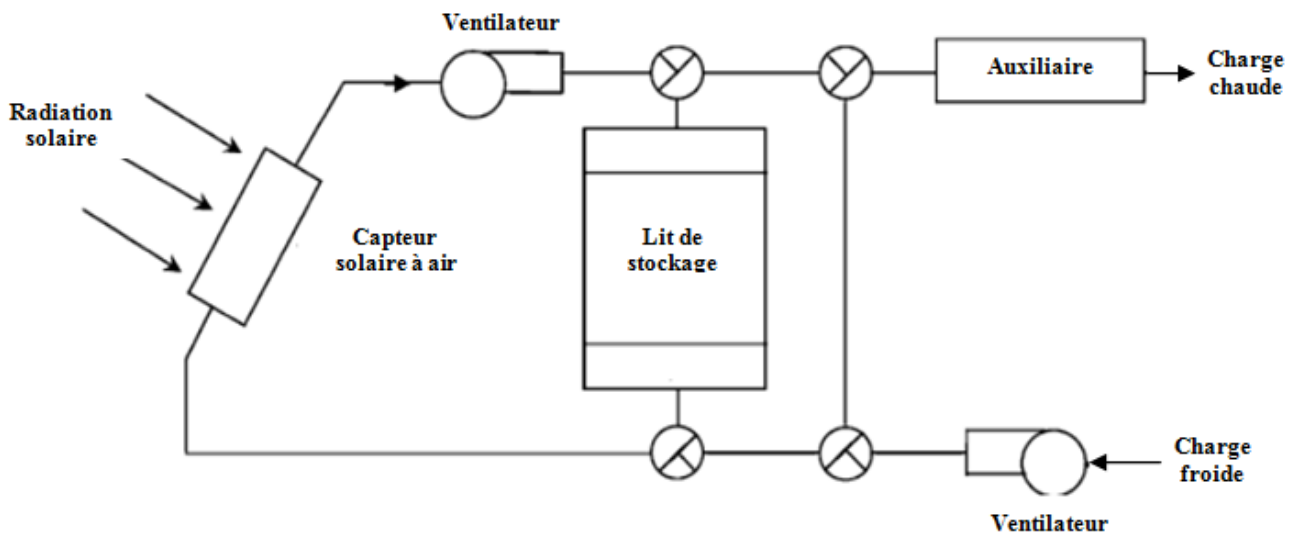


Figure II.4 : Schéma d'un système de stockage à lit entassé. [20]

Les matériaux utilisés dans ce type de stockage sont généralement des matériaux granulaires tels que : les pierres, les roches, les sables...etc. Quelques métaux sont utilisés dans le cas où une importante conductivité thermique est exigée en faveur du coût [20].

### II.6.2. Le Lit fluidisé :

La fluidisation est un procédé qui consiste à mettre en suspension des particules solides (lit) sous l'action d'un courant fluide ascendant (cf. figure II.5). Cet état résulte de la compensation du poids des particules par l'action du fluide sur celles-ci. L'écoulement diphasique ainsi créé, présente une instabilité naturelle qui donne lieu à une dynamique complexe. Cette technique favorise d'avantage le transfert de chaleur entre les particules solides et le fluide, ce qui bénéficie pour les applications de stockage thermique, notamment les applications solaires (cf. figure II.6).

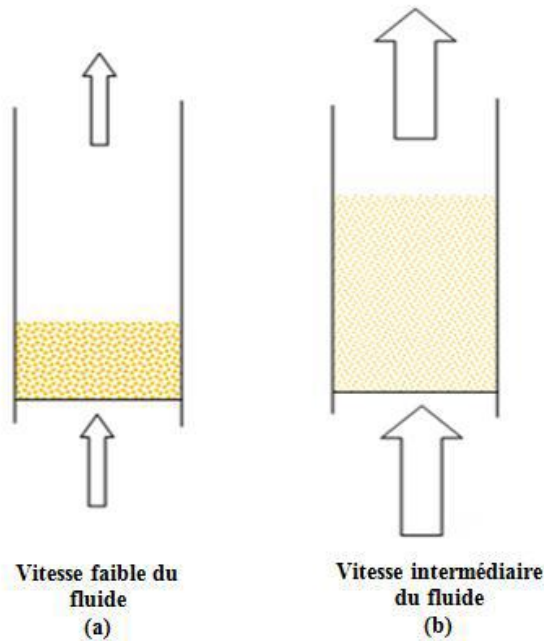


Figure II.5: Principe de fluidisation (a) lit fixe, (b) lit fluidisé.

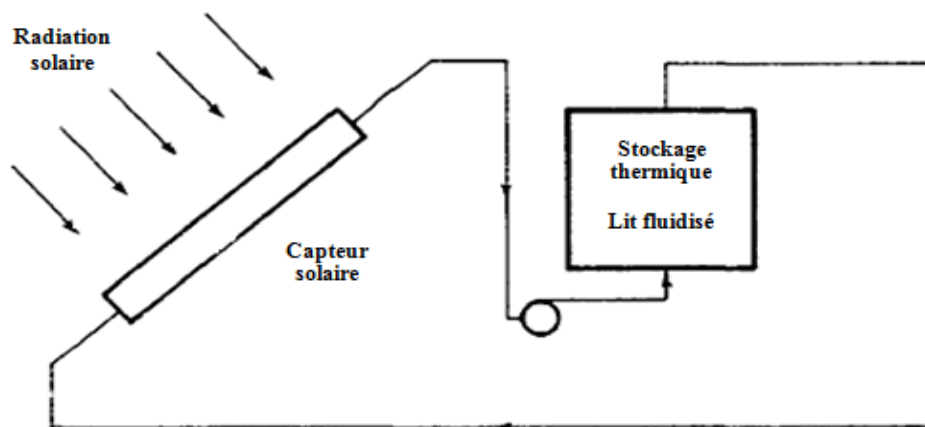


Figure II.6: Schéma d'un système de stockage thermique à lit fluidisé.

### II.7. Caractéristiques et propriétés d'un milieu poreux :

#### II.7.1. Porosité :

Une des principales propriétés structurelles d'un milieu poreux est sans aucun doute, sa porosité : il s'agit du rapport entre le volume de la phase fluide (volume des pores) et le volume total du milieu. [22]

$$\varepsilon = \frac{V_{pores}}{V_{tot}} = 1 - \frac{V_{solide}}{V_{tot}} \quad (\text{II.2})$$

Où,

$\varepsilon$  : La porosité du milieu.

$V_{pores}$  : Le volume des pores.

$V_{tot}$  : Le volume total.

$V_{solide}$  : Le volume de la phase solide du milieu poreux.

#### II.7.2. Volume Élémentaire Représentatif (VER) :

Pour quantifier un problème de la physique en utilisant les outils mathématiques de solution qu'offrent les équations différentielles, il est nécessaire d'avoir un milieu contenu pour établir des relations aux dérivées partielles. Dans les milieux poreux, les propriétés physiques (porosité, perméabilité, . . .) sont discontinues au niveau microscopique. La dérivation de la solution de problèmes d'écoulement doit donc toujours faire appel, implicitement ou explicitement à la définition d'un volume élémentaire représentatif VER à l'intérieur duquel les propriétés moyennes des fluides et des matériaux sont supposées uniformes et continues [25].

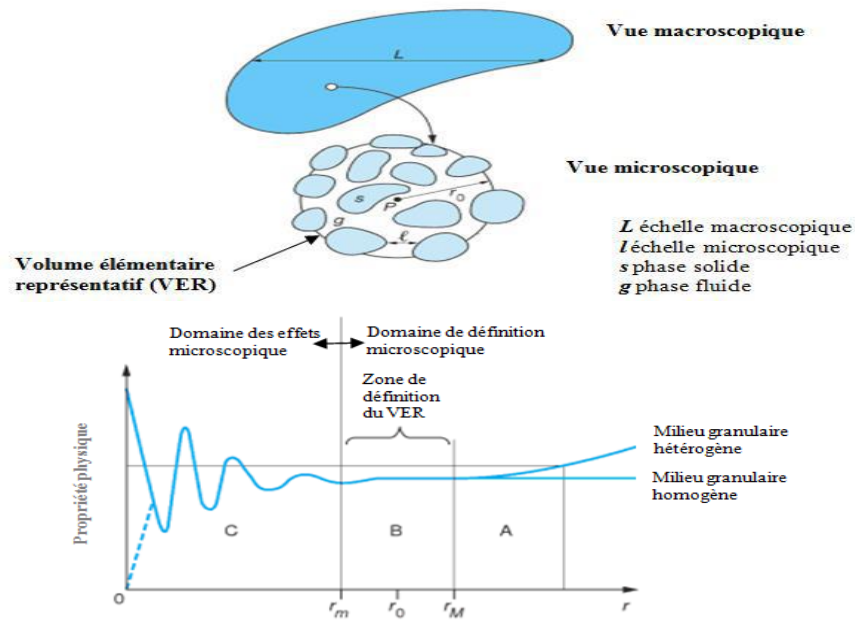


Figure II.7. Notion de volume élémentaire représentatif.

### II.7.3. La distribution de diamètres de grain:

Pour caractériser la phase solide granulaire, on considère généralement, la distribution de diamètres de grain, qui est exprimé en pourcentage de grains de diamètre sphérique équivalent inférieur à  $d$  et tracée en fonction du logarithme décimal de ce diamètre [26]. Le diamètre d'équivalent est donné par la loi de Stokes [27]:

$$\mathcal{V} = \frac{g \cdot d \cdot (\rho_g - \rho_{eau})}{18\mu} = \frac{h}{t} \quad (II.4)$$

Avec :

$\mathcal{V}$  : La vitesse de sédimentation (m/s).

$g$  : L'accélération de la pesanteur (m/s<sup>2</sup>).

$d$  : Le diamètre équivalent (m).

$\rho_g$  et  $\rho_{eau}$  : La masse volumique des grains et de l'eau (kg/m<sup>3</sup>).

$\mu$  : La viscosité dynamique du liquide (Pa.s).

$h$  : La profondeur (m).

$t$  : Le temps (s) [28].

### II.7.4. Fraction volumique :

La fraction volumique  $\Phi$  est une propriété qui caractérise l'empilement des particules. Elle est définie comme le rapport entre le volume occupé par les grains sur le volume occupé par l'empilement [29]. Elle est connue aussi sous le terme de compacité, donnée par la relation ci-après :

$$\Phi = \frac{V_{grains}}{V_{total}} \quad (II.5)$$

Ce rapport ne doit pas être supérieur à 1.

Deux types d'empilement à distinguer selon le mode de fabrication :

- Empilement lâche dont la valeur de la fraction volumique est faible.
- Empilement dense lorsque que la valeur de la fraction volumique atteint sa valeur maximale [30].

### II.8. Paramètres thermiques:

Les paramètres thermiques qu'on cherche à définir dans le cadre de cette étude sont, la capacité calorifique et la conductivité thermique. La signification de ces deux propriétés, dans le cas d'un milieu granulaire qui un milieu composite et poly phasique est moins clair que pour un milieu homogène. C'est pourquoi, on a introduit la notion des paramètres thermiques équivalents. Qui sont des caractéristiques thermiques globales du milieu homogène équivalent au milieu granulaire et estimées à partir des constituants en tenant compte de sa structure. [25]

### II.8.1. Capacité calorifique équivalente :

$$(\rho C_p)_{eq} = \varepsilon (\rho C_p)_{fluide} + (1 - \varepsilon) (\rho C_p)_{solide} \quad (II.6)$$

Où

$\rho$  : La masse volumique.

$C_p$  : La capacité calorifique.

$\varepsilon$  : La porosité.

### II.8.2. Conductivité thermique équivalente :

L'évaluation de l'expression de la conductivité thermique équivalente d'un milieu granulaire n'est pas aussi simple. En effet, elle ne dépend pas que des propriétés physiques des éléments constituant de milieu et de leurs proportions relatives, mais aussi, de la géométrie de l'empilement, décrit par de nombreux paramètres, qui sont parfois difficilement accessibles.

Plusieurs modèles sont proposés pour déterminer la conductivité thermique équivalente. Ces modèles considèrent généralement le milieu comme un assemblage régulier de solide. Nous allons essayer de citer quelques-uns sans chercher à être exhaustif. Tous ces modèles sont conçus en se basant sur le fait que la conductivité thermique équivalente de tout milieu hétérogène est comprise entre celle d'un milieu en strate en parallèle, et celle d'un milieu en strate en série (cf. figure II.7).

[14]

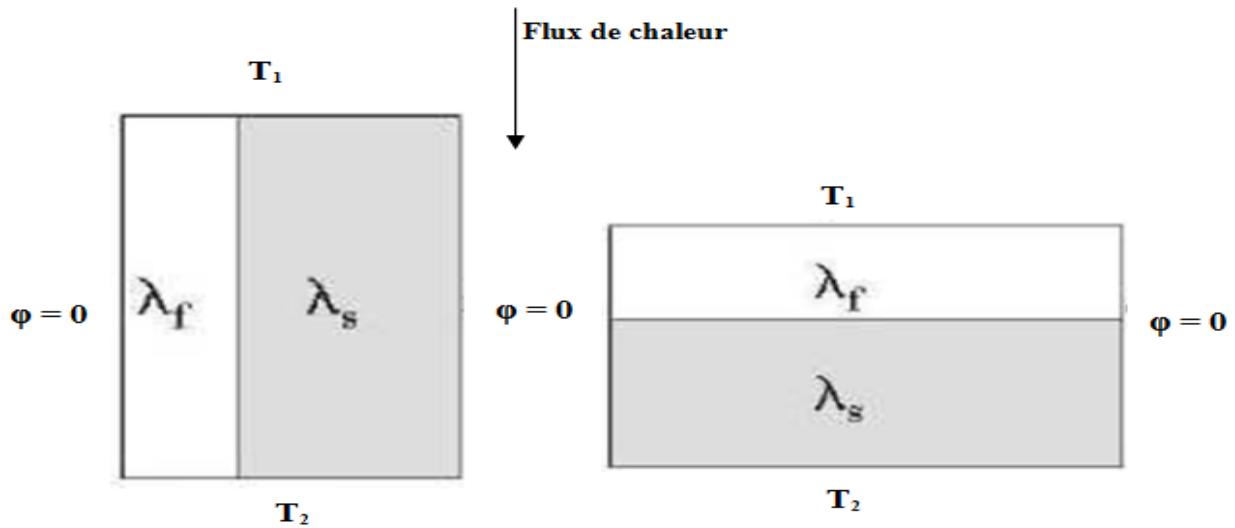


Figure II.7: Strates en série et en parallèle. [14]

La porosité des milieux poreux affecte la conductivité thermique effective :

$$K_{\text{effective}} = (1 - \varepsilon) k_{\text{solide}} + \varepsilon k_{\text{fluide}} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$\varepsilon$  : La porosité d'un milieu poreux.

$K_{\text{solide}}$  et  $k_{\text{fluide}}$  : Les conductivités thermiques du solide et fluide [30].

## II.9. Performances thermiques :

Pour déterminer les performances du système de stockage, il est nécessaire de calculer l'énergie stockée et l'efficacité énergétique de la charge, cette dernière est basée sur la première loi de la thermodynamique qui explique la capacité du matériau de stockage à capter l'énergie thermique du fluide caloporteur HTF (Heat Transfer Fluid).



L'efficacité énergétique de la charge est le rapport entre l'énergie réelle stockée par le matériau de stockage et l'énergie maximale disponible en entrée du matériau de stockage, définit par la relation :

$$\eta = \frac{T(t) - T_{ini}}{T_{inlet} - T_{ini}} \quad (\text{II.7})$$

Avec:

$T(t)$  : est la température moyenne dans le volume du système de stockage en fonction du temps.

$T_{ini}$  et  $T_{inlet}$  : sont respectivement la température initiale du système et la température d'entrée du fluide caloporteur. [31]

L'énergie stockée et le rendement de la cuve dépendent tous deux de la température instantanée du sable, où l'énergie stockée est donnée par la relation : [22]

$$Q_{stockée} = (m \cdot C_p)_{sable} \cdot (T(t) - T_{ini})_{sable} \quad (\text{II.8})$$

Où

$m$  est la masse du sable,

$C_p$  est la capacité calorifique

$T_{ini}$  est la température initiale.

# Chapitre III

### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous décrivons les principales étapes de la réalisation et de la conception de la hotte de stockage thermique au niveau du hall technique de la Faculté de Génie Mécanique de l'Université de Biskra. Ces travaux ont été réalisés entre avril 2022 et mai 2022. L'enceinte de stockage est reliée par un circuit fermé à un capteur solaire à eau horizontal, qui chauffe l'eau afin que l'énergie thermique puisse être transférée au matériau de stockage, qui est du sable dans notre cas.



**Figure (III.1) :** Photo prise à l'intérieur du Hall Technique de l'Université de Biskra.

### III.2. Enceinte de stockage:

Il se compose des éléments suivants:

#### III.2.1. Cuve de Stockage :

La cuve de stockage est en bois de 01 cm d'épaisseur, a la forme d'un cuboïde et a des dimensions (49.5cm/51cm/67.5cm) Figure (III.2).



**Figure (III.2) :** Cuve de stockage en bois.

### III.2.2. Echangeur de chaleur :

L'échangeur de chaleur à serpentin est en cuivre d'un diamètre intérieur de 14 mm et d'un diamètre extérieur de 16 mm, avec 16 tubes verticaux, 02 tubes de 60 cm et 14 tubes de 45 cm reliés à 15 tubes horizontaux de 07 cm, avec du métal Coupe au couteau. Graphique (III.3).



**Figure (III.3) :** Echangeur de chaleur tubulaire en forme de serpentin.

L'échangeur de chaleur se compose de quatre rangées, chaque rangée se compose de quatre tubes. Les quatre tuyaux horizontaux sont reliés verticalement par des coudes, la liaison entre les tubes est obtenue par soudage à l'étain avec un chalumeau à gaz butane.

- La longueur totale de l'échangeur serpentin =  $871\text{cm}=8.71\text{m}$ .
- La surface d'échange totale =  $4378.123\text{cm}^2=0.43798123\text{ m}^2$ .



**Etapes de raccordement des éléments de l'échangeur de chaleur**

**Figure (III.4) :** Réalisation de l'échangeur serpentin.

### III.2.3. Isolation thermique :

Pour obtenir une bonne isolation et réduire les déperditions de chaleur vers l'environnement extérieur, la double paroi est composée d'une couche de 05 cm de polystyrène et de 0,5 cm de carton ondulé, chacune comme le montre la figure (III .5).

La quantité totale de stockage propre est égale à  $V_{total} = 170403.75\text{cm}^3=0.17040375\text{m}^3$



Figure (III.5) : Isolation en double couche de Polystyrène et carton ondulée.

### III.2.4. Matériau du stockage (le sable) :

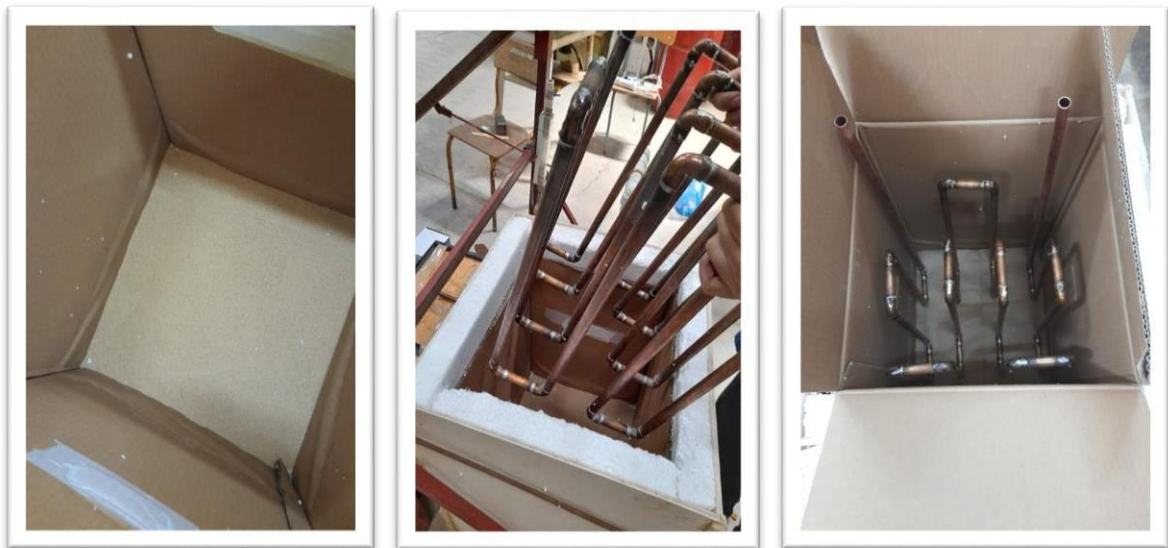
Le matériau de stockage utilisé dans ce travail était du sable, qui a été récupéré sur la route nationale Aïn Ben Naoui dans la région de Biskra. Figure (III.6).



Figure (III.6) : sable de la région d'Aïn Ben Naoui

Le remplissage de sable est effectué dans une boîte en plastique de référence, qui sert à estimer le poids du sable utilisé, et après avoir rempli le bac à sable en plastique, le bac à sable est pesé pour déterminer le poids net du sable 10 kg.

L'échangeur de chaleur est situé dans le réservoir de stockage, où nous avons essayé de garder la même distance de tous les côtés avec des morceaux de bois entre les éléments de l'échangeur serpentin afin que les tubes verticaux soient uniformément répartis et pour assurer un transfert de chaleur homogène Figure (III. 7).



**Figure (III.7) :** Étape de pose du sable et de l'échangeur de chaleur dans la cuve.

Le sable est versé dans le réservoir jusqu'à ce qu'il atteigne le centre de l'échangeur de chaleur, où se trouve une sonde thermométrique pour surveiller l'évolution des changements de température dans le sable. Et une fois le réservoir complètement rempli, le poids total du matériau stocké est de 106,45 kg.

A la fin du remplissage de sable, le réservoir est ensuite recouvert d'une double paroi de carton ondulé et de polystyrène, c'est-à-dire pour obtenir une isolation thermique uniforme de toutes les parois du réservoir, avec une couche de silicone à haute densité. Jointolement entre carton ondulé et bordure en polystyrène Figure (III.8).

Pour mesurer la quantité de chaleur stockée dans le sable lors de la circulation du fluide caloporteur (eau chaude) du capteur solaire plan, deux sondes de température sont installées reliées au capteur, chacune affichant les températures d'entrée et de sortie. Sortie vers le réservoir de stockage de chaleur Figure (III.9).



**Figure (III.8) :** Fermeture de la cuve de stockage et assemblage des éléments par une colle spéciale en silicone.



**Figure (III.9):** Installation des captures de mesure de température a entrée et la sortie De l'enceinte de stockage.



**Figure (III.10):** Raccordement de la cuve de stockage avec le capteur solaire plan à eau

Pour remplir le circuit en eau, nous avons utilisé un système composé de 03 robinets, comme le montre la figure (III.11). Le circuit hydraulique est composé de 02 vannes et d'une vanne principale.



Lorsque l'eau est fournie par le premier robinet en position ouverte, par contre, le deuxième robinet est également en position ouverte et en dénazification

Circuit hydraulique et éliminer les bulles d'air avec la vanne fermée jusqu'à ce que le circuit soit complètement rempli d'eau et s'assurer qu'il n'y a pas de bulles d'air dans le circuit fermé.

Dès que le circuit est rempli d'eau, la pompe à eau est mise en circulation Figure (III.12), après fermeture de la vanne 01 et ouverture de la vanne principale, afin que l'eau puisse circuler indépendamment du circuit hydraulique.



Figure (III.11) : Système de remplissage du circuit.



Figure (III.12) : Pompe à eau de type Shimge home booster.

### III.3. Principe de fonctionnement de l'installation :

L'étude expérimentale commence par l'alimentation en liquide au moyen d'une pompe à eau du piège solaire, qui, complètement incliné vers le sud, reçoit le rayonnement solaire, la plaque absorbante est chauffée en transférant une partie de la chaleur convertie en liquide coule dans la chaleur armoires de rangement.

Les principaux paramètres qui caractérisent les performances thermiques de l'installation sont mesurés toutes les heures par des appareils de mesure, qui sont en fait les températures à la sortie du

caisson de stockage, le rayonnement solaire global reçu par le capteur solaire, la quantité d'eau circulant dans l'environnement. Installation, d'autre part, pour surveiller l'évolution de la température du support de stockage, une sonde est également insérée au milieu de la quantité de stockage, qui peut avoir une température moyenne, les données sont données dans des tableaux de mesure qui incluent la date de l'expérience et la nature du ciel.

### III.4. Instrumentations de mesure :

#### III.4.1. Mesure du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire reçu par le plan incliné du collecteur d'eau solaire est mesuré par un pyromètre portable à affichage à cristaux liquides, qui indique l'intensité lumineuse en  $W / m^2$  Figure (III.13), dont la mesure d'intervalle est enregistrée entre 0 -1999  $W / m^2$ , avec une résolution de 1  $W / m^2$  et une précision de  $\pm 5 \%$ .

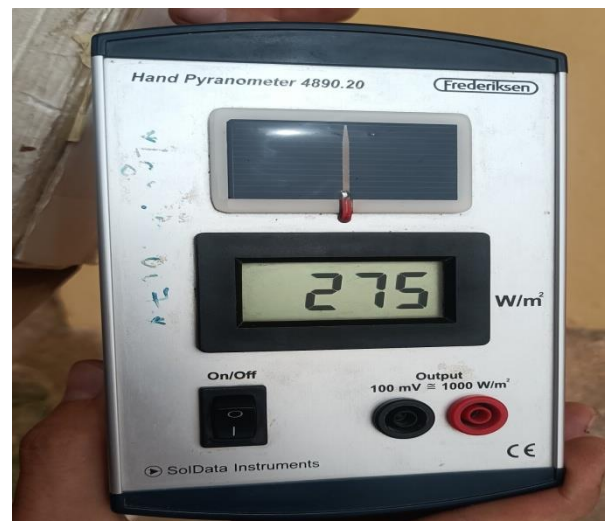


Figure (III.13) : Pyromètre portatif.

#### III.4.2. Mesure du débit d'eau :

Le débit d'eau dans le circuit est mesuré en installant un débitmètre volumétrique à flotteur avec une vanne manuelle et en vérifiant le débit d'eau requis autour du circuit fermé Figure (III.14).



Figure (III.14) : Débit mètre à flotteur gradué de 0 à 160 l/h.

### III.4.3. Mesure des températures :

La surveillance de la température de l'eau d'entrée et de sortie au niveau de l'espace de stockage est effectuée par des capteurs de température électroniques, qui fournissent des valeurs de température sur le bouton d'affichage à cristaux liquides de type JDP-200, numéro (III .14).

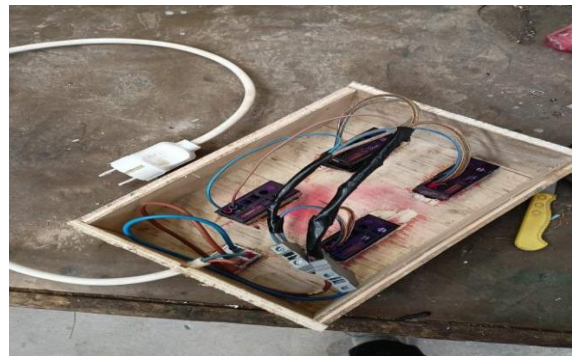


Figure (III.15): Thermomètres digital JDP-200 avec écran afficheur.

### III.5. Conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons essayé de présenter les différentes étapes de fabrication et de montage d'un équipement expérimental constitué d'un espace de stockage de chaleur. D'autre part, divers instruments de mesure utilisés lors de manipulations expérimentales ont été découverts, qui permet de suivre l'évolution de nombreux paramètres importants pour la quantification de la puissance calorifique dans notre installation thermique

# Chapitre IV

**IV.1. Introduction:**

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors des expériences menées à l'extérieur du hall technologique de Département de Génie Mécanique de l'Université Mohammed Khider de Biskra, où nous nous intéressons à la présentation et discussion des résultats obtenus à partir des mesures et lectures effectuées sur le banc d'essai. Nous portons également une attention particulière au contrôle des températures du sable à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur en fonction du temps.

**IV.2. Résultats et discussions :**

Il s'agit de plusieurs tests expérimentaux qui ont été menés du 05mai au 12mai 2022 sous les conditions climatiques variées de la région de Biskra.

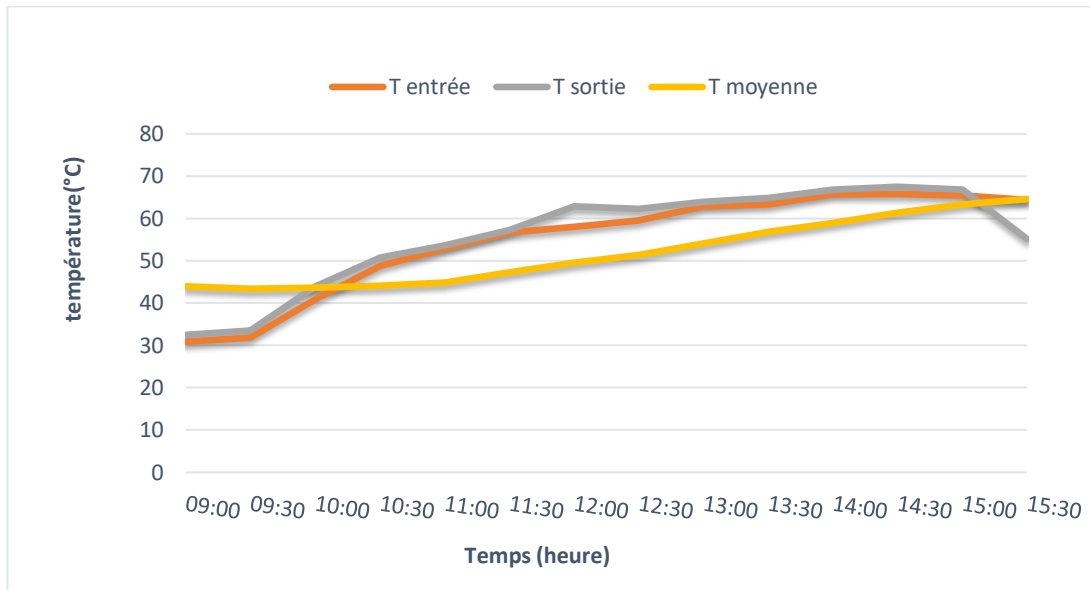
Le tableau (IV.1) représente un exemple de l'ensemble des relevées expérimentales effectuées avec le calcul de l'efficacité de chargement et la quantité de chaleur stockée dans le sable en fonction du temps.

Heure	I <sub>g</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Capteur solaire		Enceinte Stockage			efficacité	Q <sub>chaleur</sub> [calories]
		T <sub>entrée</sub> [°C]	T <sub>sortie</sub> [°C]	T <sub>entrée</sub> [°C]	T <sub>sortie</sub> [°C]	T <sub>moyenne</sub> [°C]		
09:00	700	30,9	32,5	32,5	31,4	43,9		107727,4
09:30	722	31,9	33,5	33,5	32,4	43,4	0,042	107727,4
10:00	770	40,9	43,9	43,9	41,4	43,6	0,1	244835
15:00	387	65,5	66,8	66,8	65,5	63,3	0,898	127314,2
15:30	356	64,4	55,1	66,1	63,8	64,6		225248,2

**Tableaux(IV.1):** Relevées expérimentaux et calcul des performances thermiques de la cuve de stockage pour un débit égale à 0.0278 kg/s.

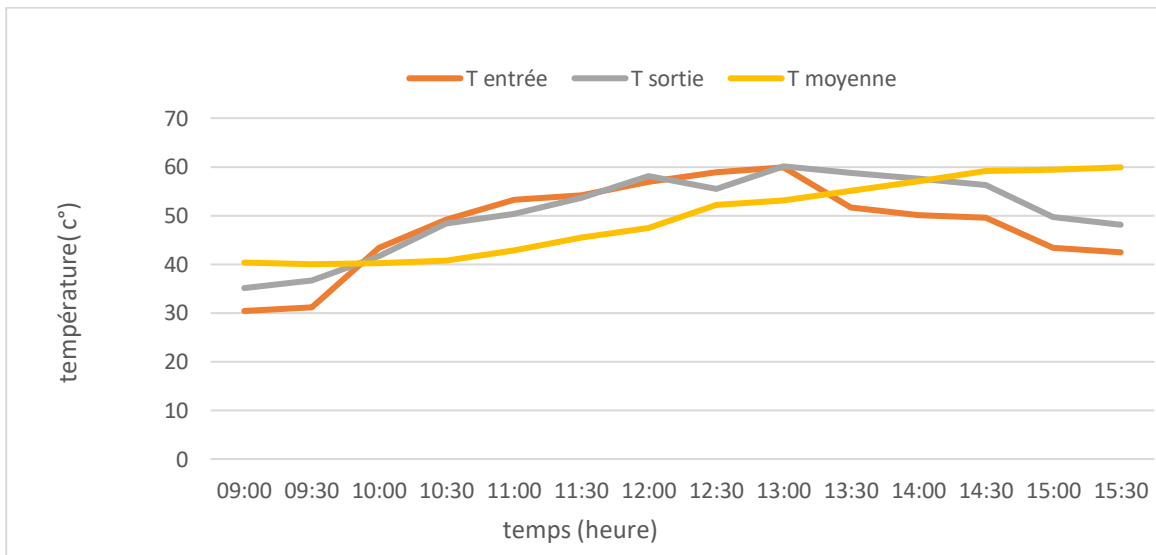
**IV.2.1. Variation de la température :**

Les figures (IV.1, IV.2 et IV.3) montrent la variation de la température à l'entrée et à la sortie de l'eau au niveau de la cuve de stockage, ainsi que la température moyenne du sable en fonction du temps pendant le chargement, pour trois valeurs de débit massique égale à 0,0278 kg/s, 0,0236 kg/s et 0,0125 kg/s respectivement.



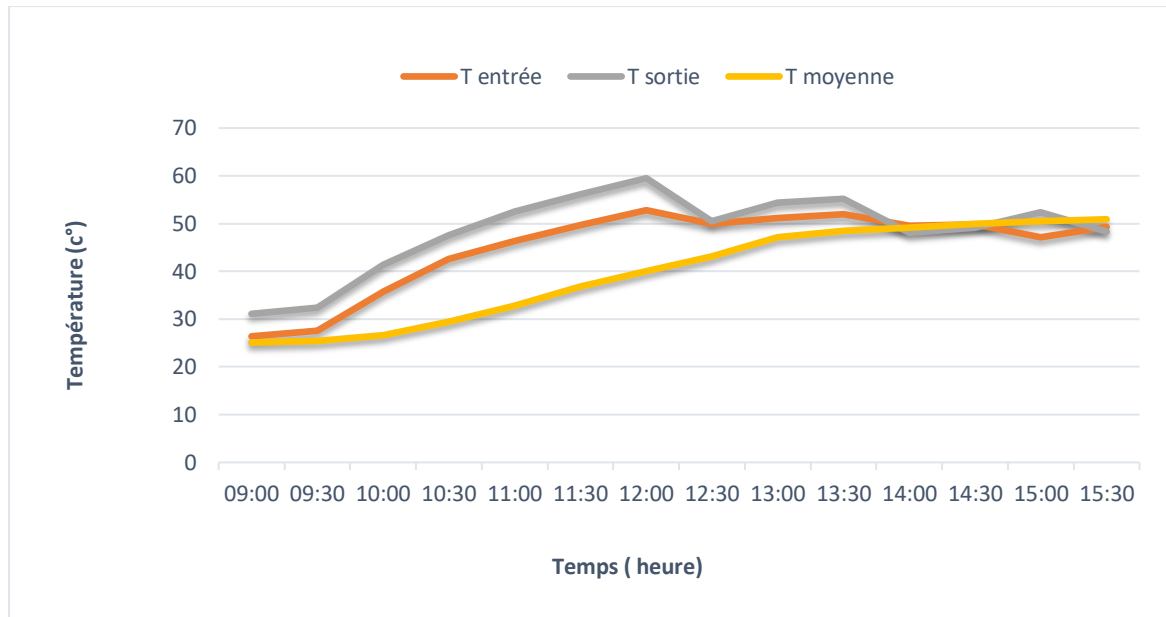
**Figure (IV.1) :** Variation de la température de l'eau entrante et sortante de la cuve et la température moyenne du sable pour un débit de 0,0278 Kg/s.

Pour un débit massique de 0,0278 kg/s Figure (IV.1), on remarque que la température moyenne de l'enceinte augmente progressivement de 43,9 à 64.6 °C, atteint la température d'entrée du fluide à la fin de la journée entre 14H:30 mn et 15H:30 min de l'après-midi, où la température de sortie de l'enceinte avoisine celle à l'entrée vers 15 H qui correspond à un au chargement optimal de l'enceinte.



**Figure (IV.2) :** Variation de la température de l'eau entrante et sortante de la cuve et la température moyenne du sable pour un débit de 0.0236 Kg/s.

Comme le montre la figure (IV.2), pour un débit massique moyen égal à 0,0236 kg/s, le chargement a été effectué entre 9H00 et 15H30, dans des conditions de ciel nuageux, nous avons remarqué que la température moyenne du sable progressivement est passée de 40,4°C à 59,9°C, l'écart minimal entre l'entrée et la sortie de l'enceinte est dû au fait qu'il s'agit d'un circuit fermé et que le transfert de chaleur dans le sable est très lent.



**Figure (IV.3) :** Variation de la température de l'eau entrante et sortante de la cuve et la température moyenne du sable pour un débit de 0,0125kg/s.

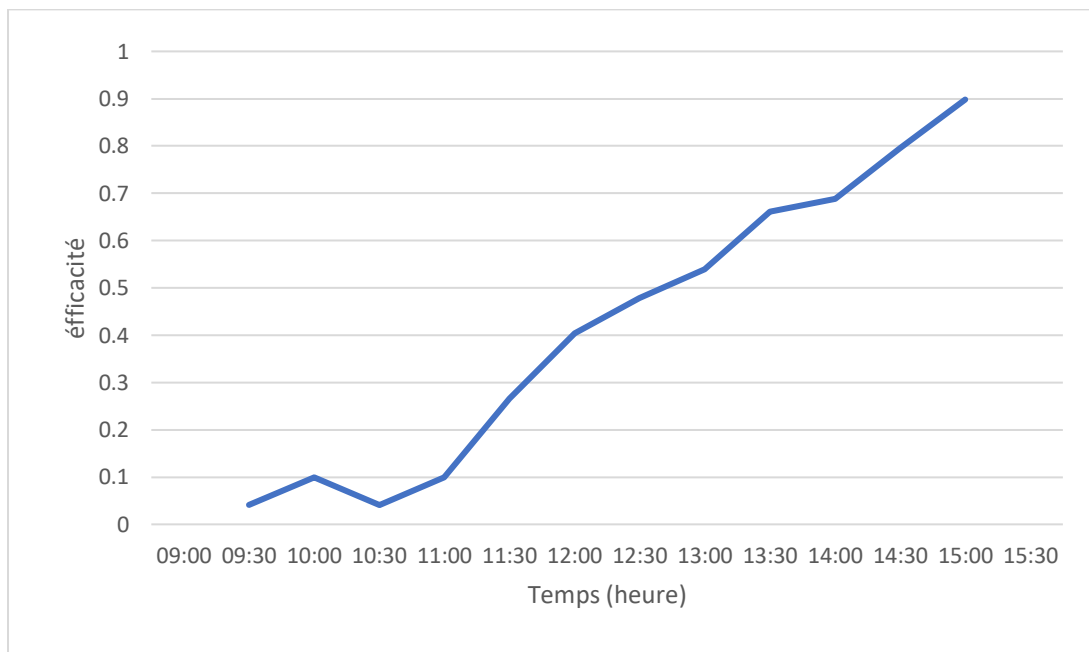
Durant le troisième jour, comme le montre la Figure (IV.3), le chargement est effectué avec un débit massique de 0,0125 kg/s entre 09 H00 et 15 H30, les relevées ont été entamé durant une journée relativement ensoleillée et peu nuageuse, on observe que la température moyenne du sable a augmenté progressivement de 25,1 °C jusqu'à 50,9° C, se rapprochant de la température à l'entrée de l'enceinte vers 14 H de l'après-midi.



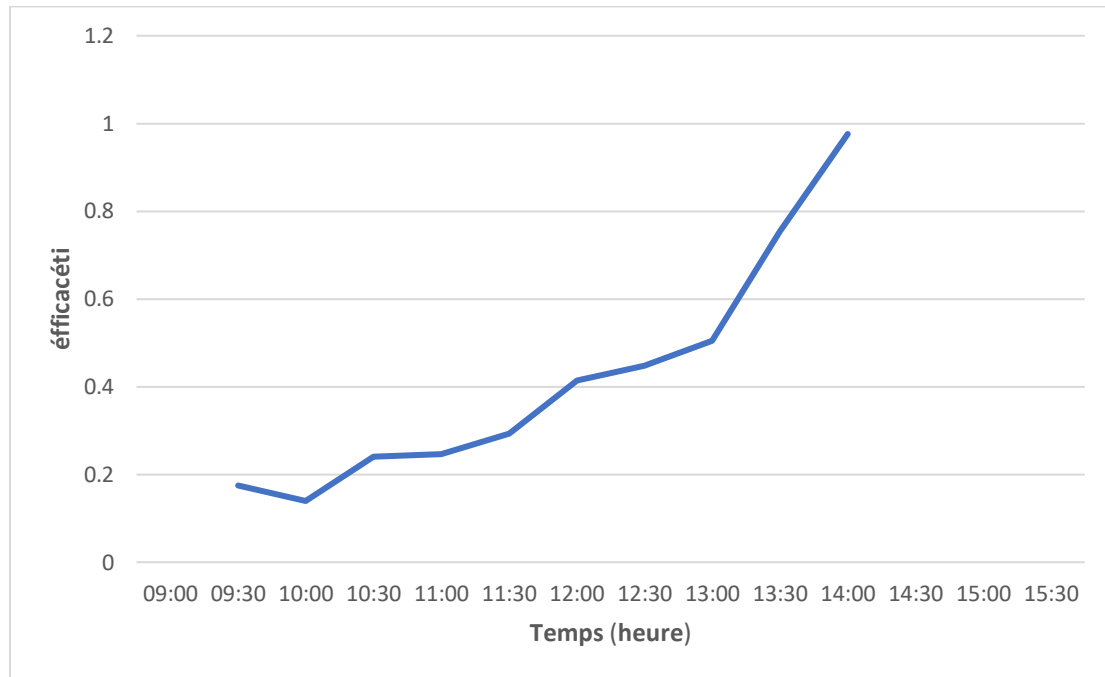
### IV.2.2. Variation de l'efficacité :

La variation de l'efficacité de la cuve de stockage est suivie pour trois valeurs de débits de chargement 0,0278 kg/s, 0,0236 kg/s, 0,0125 kg/s respectivement, telles que illustrées par les figures (IV.4, IV.5, IV.6).

D'après la figure (IV.4) l'efficacité de chargement augmente avec l'évolution de la température moyenne du sable sous l'effet de la diffusion et absorption par le matériau de stockage de la chaleur véhiculée par le fluide caloporteur (eau chaude) pour atteindre une valeur maximale de l'ordre de 0.898 à 15 :00 H qui correspond à un chargement optimal de la cuve.



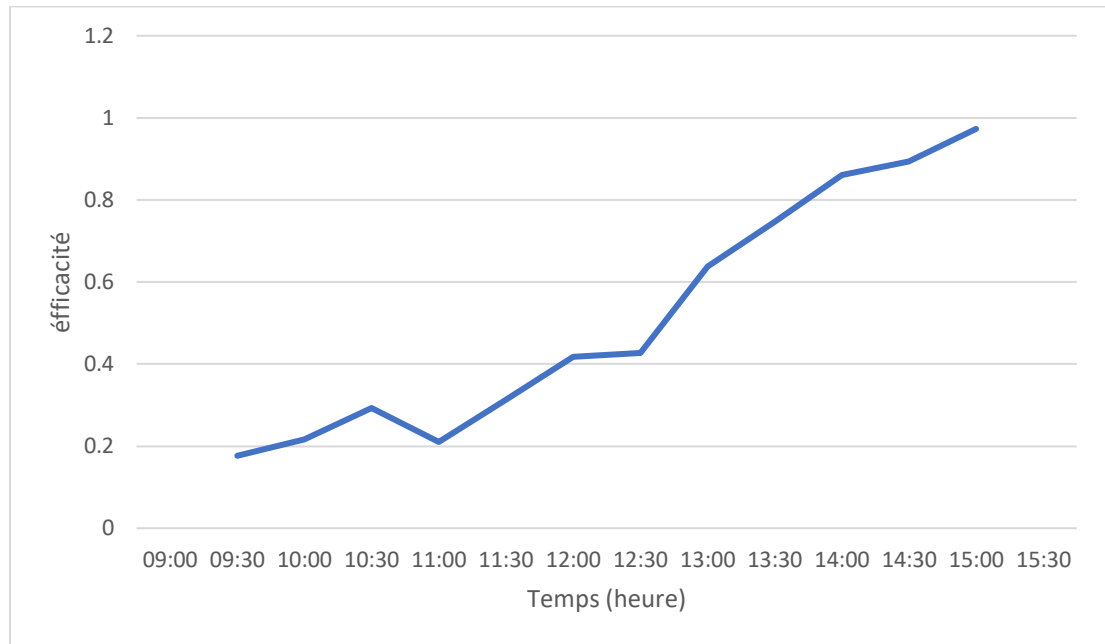
**Figure (IV.4) :** Evolution de l'efficacité dans la cuve pour un débit d'eau égal à 0,0278 kg/s.



**Figure (IV.5) :** Evolution de l'efficacité dans la cuve pour un débit d'eau égal à 0,0236 kg/s.

Comme pour un débit moyen de 0,0236 kg/s, la figure (IV.5) montre la variation de l'efficacité de chargement thermique qui augmente au fur et à mesure avec le profil de la température moyenne du sable pour atteindre une valeur maximale d'environ 0,976 à 14h00, à noter que des irrégularités des points de la courbe sont dus aux perturbations d'ensoleillement par des passages de nuages au cours du début de la journée telle que le montre la figure (IV.5), avec un déchargement vers 11H:00 par manque d'éclairement solaire dans le circuit fermé de l'installation.

Pour un débit moyen de 0,0125 kg/s, comme le montre la figure (IV.6), l'efficacité de la charge thermique augmente avec l'augmentation de la température moyenne du sable pour atteindre une valeur maximale d'environ 0,973 à 15H00.

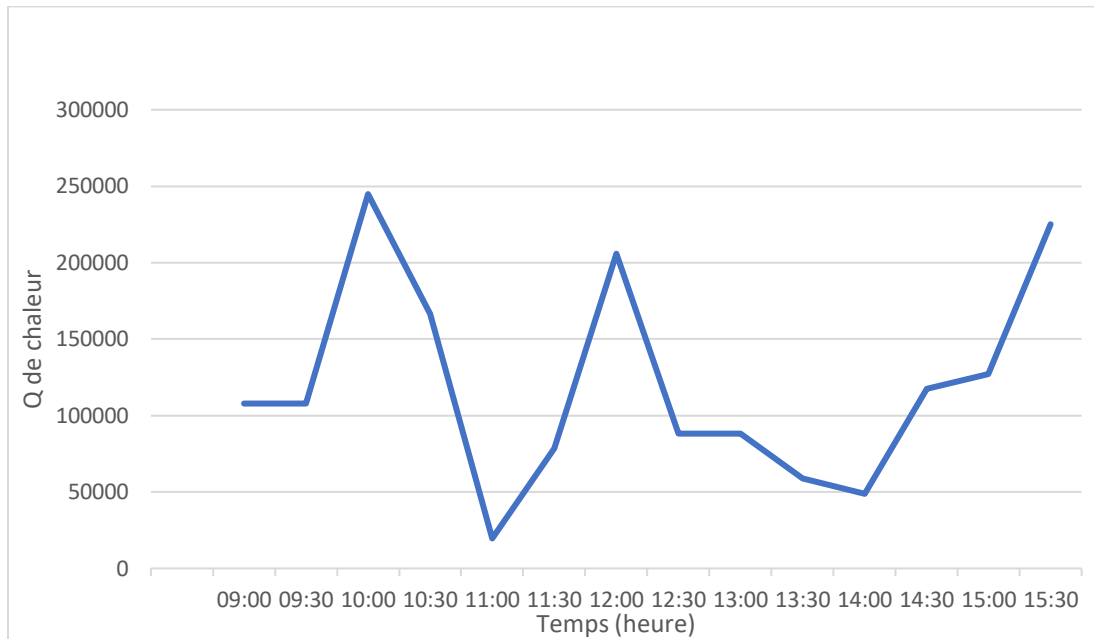


**Figure (IV.6):** Evolution de l'efficacité dans la cuve pour un débit d'eau égal à 0,0125kg/s.

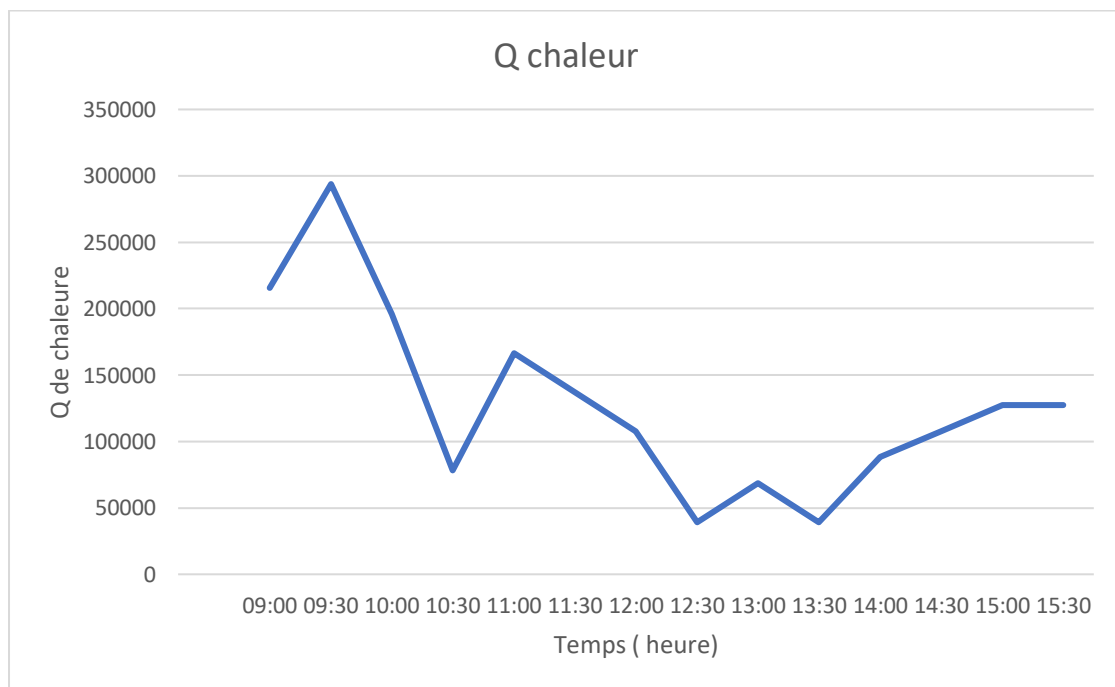
### IV.2.3. Variation de la quantité de chaleur stockée :

La variation de la quantité de chaleur stockée dans la cuve de stockage pour trois valeurs de débits de chargement 0,0278 kg/s, 0,0236 kg/s et 0,0125 kg/s respectivement, telles que illustrées par les figures (IV.7, IV.8 et IV.9).

D'après la figure (IV.7), on observe une fluctuation de la quantité de chaleur stockée dans la cuve avec l'évolution de la température moyenne du sable, sous l'influence de la diffusion et de l'absorption par le matériau de stockage de la chaleur transféré par le fluide caloporteur (eau chaude), ceci étant pour atteindre la valeur maximale de chargement de l'ordre de 244,835 Kcal après 15 H :00 de l'après midi, qui correspond au chargement optimal de l'enceinte de stockage.

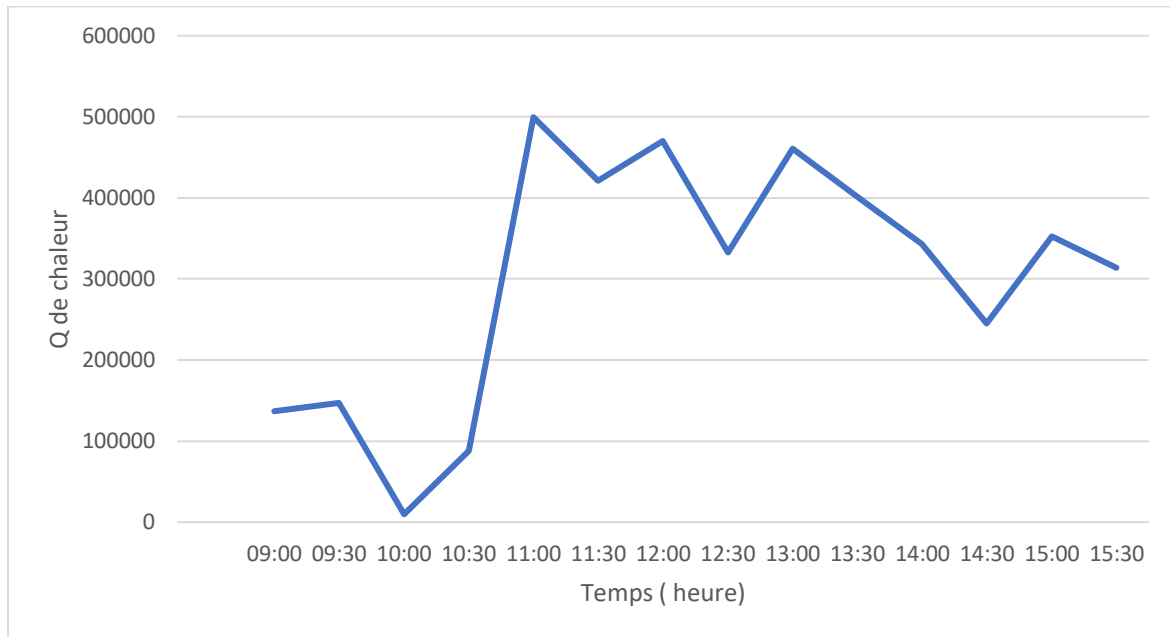


**Figure (IV.7) :** Evolution de stockage de chaleur dans la cuve pour un débit d'eau égal à 0,0278 kg/s.



**Figure (IV.8) :** Evolution de stockage de chaleur dans la cuve pour un débit d'eau égal à 0,0236 kg/s.

Pour la figure (IV.8), on observe une fluctuation de la quantité de chaleur stockée dans la cuve avec l'évolution de la température moyenne du sable sous l'effet de la diffusion de la chaleur véhiculé par le fluide caloporteur vers le matériau de stockage, pour atteindre une valeur maximale de chargement égale à 293,802 Kcal, d'autre part on remarque que la quantité de chaleur stockée a diminué de 127,314 Kcal en fin de journée vers 15H30 à cause des fluctuation de l'éclairement solaire.



**.Figure (IV.9) :** Evolution de stockage de chaleur dans la cuve pour un débit d'eau égal à 0,0125 kg/s.

Pour la figure (IV.9), une fluctuation de la quantité de chaleur stockée dans la cuve est observée avec l'évolution de la température moyenne du sable, pour atteindre une valeur maximale aux environs de 499,463 Kcal à 11H00, puis a rechutée vers 313,388 Kcal à 15H30, influencée par les passages nuageuses qui affectent l'éclairement solaire incident.

### IV.3. Conclusion:

A travers ce chapitre, on a essayé d'analyser les résultats expérimentaux obtenus sous forme de courbe qui représentent l'évolution des paramètres de fonctionnement de l'installation. Ces représentations graphiques sont basées sur des expériences réelles.

La faisabilité de stockage de la chaleur dans le sable comme matériau solide granulaire a été éprouvé à travers un dispositif expérimental pilote installer et conçu dans le laboratoire de génie mécanique de l'université Biskra.

A l'issue de cette étude expérimentale, nous concluons que nous pouvons utiliser des matériaux simples et disponibles dans le stockage de la chaleur, comme le sable, un matériau typique moins cher, disponible et qui participe à la sauvegarde de l'environnement.

*Conclusion*  
*générale*

Notre travail porte sur la conception et la construction d'enceintes de stockage de chaleur sensible utilisant le sable comme support de stockage poreux. Cette étude expérimentale vise à analyser le comportement thermique de ce milieu, dont les travaux ont été réalisés au Laboratoire de Génie Mécanique de l'Université Mohamed Khider de Biskra.

Initialement, nous avons entrepris de concevoir un système de stockage composé d'une enceinte cuboïde remplie de sable, où on a intégré un échangeur de chaleur serpentin qui sert d'interface d'échange dans lequel circule un fluide caloporteur (eau) relié à un capteur solaire plan à eau pour produire l'énergie thermique solaire.

Pour calculer les performances thermiques du dispositif expérimental, en particulier l'efficacité thermique, nous avons effectué plusieurs expériences de chargement dans des conditions spécifiques du climat de la région de Biskra, pour mettre en évidence l'évolution de la température dans le sable.

Les conclusions tirées des résultats présentés dans les sections ci-dessus peuvent être résumées comme suit :

- Du point de vue du coût d'investissement, le phénomène de stockage d'énergie thermique par chaleur sensible dans les milieux solides est une option intéressante, notamment dans les milieux poreux (particules), ce qui est très important si l'on considère le nombre de travaux publiés dans ce domaine.
- Durant la phase de stockage, la température du matériau de stockage augmente en fonction du temps (de l'ensoleillement dans notre cas).
- L'intérêt de l'utilisation du sable, comme matériau à la fois écologique et économique dans des applications de stockage thermique, notamment des applications solaires.
- La diminution du débit permet d'accélérer le processus de chargement ce qui conduit à une efficacité élevée dans un intervalle de temps réduit

## Bibliographies

- [1]. Indian Journal of Science and Technology, Vol 9(30), DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i30/99010, August 2016.
- [2]. I. Dinçer, M. Rosen, Thermal energy storage: Systems and Applications, Wiley Edition, England, 2002.
- [3]. A.Moumami, Cours échangeurs de chaleur, Master II, option énergétique, Université de Biskra, 2020.
- [4]. S. M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part 1 : heat storage materials and techniques, Energy Conversion and Management, vol. 39, n°. 11, pp. 1127-1138, 1998.
- [5]. S. Berreksi et S. Latarsa, Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule sphérique, Mémoire du Master, Université M'Hamed Bougara-Boumerdés, 2016.
- [6]. [http://www.physique-et-matiere.com/materiau\\_a\\_changement\\_de\\_phase\\_\(thermique\).php](http://www.physique-et-matiere.com/materiau_a_changement_de_phase_(thermique).php), le 03/04/2022.
- [7]. J. Millette, Conception, instrumentation, modélisation et analyse d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke .1999.
- [8]. A. Abhat, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials, Solar Energy, Vol 30, pp.313-332. 1983.
- [9]. A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lazaro, al. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1: Concepts, materials and modelisation, Renewable and sustainable energy reviews, Vol 14, n°1, pp.31-55, 2010.
- [10]. K. Edemn'tsoukpoe ,al. A review on long-term sorption solar energy storage, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.13, pp. 2385–2396, 2009.
- [11]. BEKKARI Zoubir, MESSAOUDI Mohamed-Meftah, Effet de la géométrie de l'échangeur de chaleur sur les performances d'un réservoir de stockage thermique solide. Mémoire de master, université Echahid hamma lakhder El Oued, 2015-2016.pp24/26.
- [12]. M. Pierre Pedro, Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermo-chimique, Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2013.
- [13]. A. Srivastava, S. Hussain, B. Sharma, Thermal performance of ground as an inexpensive solar collector and storage. Energy Conversion and Management. Vol. 22, pp. 197-204, 1982.



- [14]. N. Mahfoudi, Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide, Thèse de Doctorat, Université de Mohamed Khider de Biskra, 2016.
- [15]. R. Lalitha Priya, S. Subi, B. Vaishnu et K. R. M. Vijaya Chandrakala, Study on Characterization of River Sand as Heat Storage Medium, Indian Journal of Science and Technology, Vol.9, n°30, 2016.
- [16]. R.Hachana, "Réalisation et expérimentation d'une enceinte de stockage de la chaleur dans le sable mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2020.
- [17]. Dincer and M. Rosen, Thermal energy storage: systems and applications", 2nd ed. John Wiley & Sons, 2011.
- [18]. K. Hollands and M. Lightstone, A review of low-flow, stratified-tank solar water heating systems, Solar energy, Vol.43, pp.97-105, 1989.
- [19]. S. Kalaiselvam and R. Parameshwaran, Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability: Systems Design, Assessment and Applications, 2014.
- [20]. 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.
- [21]. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/stockage-de-lenergie-42638210/stockage-de-la-chaleur-be8597/>, le 22/05/2022.
- [22]. [http://www.asprom.com/stockage\\_energie/olives.pdf](http://www.asprom.com/stockage_energie/olives.pdf), le 22/05/2022.
- [23]. [http://www.amorce.asso.fr/media/filer\\_public/6d/e8/6de8899d-1a6c-4816-92e6-ad2384fa38ad/rct45-le\\_stockagethermiquedans\\_les\\_reseaux\\_de\\_chaleur.pdf](http://www.amorce.asso.fr/media/filer_public/6d/e8/6de8899d-1a6c-4816-92e6-ad2384fa38ad/rct45-le_stockagethermiquedans_les_reseaux_de_chaleur.pdf), le 14/05/2022.
- [24]. <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/energies-renouvelables-stocker-la-chaleur-de-l-ete-pour-l-hiver.17635>, le 14/05/2022.
- [25]. A. Akrouche, Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase, Mémoire du Magister, Université de M'Hamed Bougara -Boumerdès, 2011.
- [26]. M. Sahimi and T. T. Tsotsis, Transient diffusion and conduction in heterogeneous media: Beyond the classical effective-medium approximation," Industrial & engineering chemistry research, Vol. 36, pp.3043-3052, 1997.
- [27]. P.-G. de Gennes, Granular matter: a tentative view," Reviews of Modern Physics, vol. 71, 1999.
- [28]. R. Bird, W. Stewart, E. Lightfoot, and R. E. Meredith, Transport Phenomena, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 108, pp.78C-79C, 1961.

- [29]. D.Rhoufar et N.Nsiri, "Revue sur les modèles d'empilement granulaire avec un zoom sur les applications du génie civil ", Thèse de Doctorat, Ecole des mines de douai, 2016-2017
- [30]. M. Duquesne, Résolution et réduction d'un modèle non linéaire de stockage d'énergie par adsorption sur des zéolithes, Thèse de Doctorat, Université de bordeaux, 2013.
- [31]. M. Boutaoui, Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique, Mémoire du Master, Université M'Hamed Bougara-Boumerdès, 2016.
- [27] P.-G. de Gennes, "Granular matter: a tentative view," *Reviews of Modern Physics*, vol. 71, p. S374, 1999.
- [28] R. Bird, W. Stewart, E. Lightfoot, and R. E. Meredith, "Transport Phenomena," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 108, pp. 78C-79C, 1961.
- [29] D.Rhoufar et N.Nsiri, "Revue sur les modèles d'empilement granulaire avec un zoom sur les applications du génie civil ", Ecole des mines de douai, 2016-2017
- [30] M. Duquesne, "Résolution et réduction d'un modèle non linéaire de stockage d'énergie par adsorption sur des zéolithes ", Thèse de Doctorat, Université de bordeaux, 2013.
- [31] M. Boutaoui, « Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique », Mémoire du Master, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 2016.

### Résumé :

Dans ce travail on s'intéresse à l'étude de stockage de la chaleur dans un matériau granulaire la fois écologique et économique, qui est le sable de la région de Biskra. Pour atteindre cet objectif on a conçu et réalisé un banc d'essai expérimental destinée au stockage thermique de l'énergie solaire par le sable.

L'enceinte de stockage mise en œuvre est une cuve cuboïde reliée à un capteur solaire plan à eau pour produire l'énergie thermique à partir du soleil. Plusieurs expériences ont été réalisés sous les conditions climatiques de la région de Biskra, ce qui a permis d'obtenir des résultats encourageants qui ont montré l'intérêt de l'utilisation du sable pour le stockage de l'énergie thermique en analysant ses performances thermiques lors des processus de chargement.

Mots clés : stockage thermique, énergie solaire, sable, efficacité thermique, économie d'énergie.

### المخلص:

نهتم في هذا العمل بدراسة تخزين الطاقة الحرارية باستخدام مادة حبيبية صديقة للبيئة واقتصادية باستخدام الرمل الموجود في منطقة بسكرة. من اجل تحقيق هذا الهدف، قمنا بتصميم وانجاز جهاز تجريبي لتخزين الحرارة بواسطة الطاقة الشمسية الحرارية في وسط رملي.

حاوية التخزين الحراري المستخدمة ذات شكل مكعب موصولة بلاقط شمسي مسطح لتسخين الماء، وذلك من اجل إنتاج الطاقة الحرارية الشمسية. قمنا بعدة تجارب في الظروف المناخية لمنطقة بسكرة، حيث تحصلنا على نتائج مشجعة، أظهرت أهمية استخدام مادة الرمل كوسيط حبيبي للتخزين الحراري من خلال السلوك والكفاءة الحرارية أثناء عملية التحميل.

الكلمات المفتاحية: التخزين الحراري، الطاقة الشمسية، الرمل، الكفاءة الحرارية، اقتصاد الطاقة.

### Abstract:

In this work we are interested in the study of heat storage in a granular material that is both ecological and economical, which is sand. To achieve this objective, an experimental test bed was designed and produced for the thermal storage of solar energy by sand.

The implemented storage enclosure is a cuboid tank connected to a flat-water solar collector to produce thermal energy from the sun. Several experiments were carried out under the climatic conditions of the Biskra region, which made it possible to obtain encouraging results which showed the interest of the use of sand for the storage of thermal energy, and this by analyzing its thermal behavior during loading processes.

Keywords: thermal Storage, Solar energy, sand, thermal efficiency, energy saving.