



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétiques

Réf. : ...

Présenté et soutenu par :
HACHANA Romaiïssa

Le : mardi 8 septembre 2020

Réalisation et expérimentation d'une enceinte de stockage de la chaleur dans le sable

Jury :

Mr	GRIRA Belhi	MCA	Université de Biskra	président
Mr	ATMANI Rachid	Pr	Université de Biskra	examineur
Mr	MOUMMI Abdelhafid	Pr	Université de Biskra	encadreur

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :

Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs : Yousra, Bassma, Kaouther, Israa et Rita pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral

A toute ma famille « Hachana » pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

A toutes mes chères copines : Soraya, Samah, Saïda, Ahlam, Sihem, Sabah, Fadoua et Khaoula.

Tous mes enseignants chacun avec son nom.

Tous mes collègues : Lamia, Kinza, Z.Nesrine, T.Nesrine, Yousra, Amine, Badri, Yassine, Rafik, Aymen, et toute la promo Energetique 2019/2020.

Chaque personne qui m' a aidé chacun avec son nom.

Merci d'être toujours là pour moi.

Et 2020 Bonne année.

Remerciement

En premier lieu, tous mes remerciements vont à Allah de m'avoir donné le courage, la force et la volonté pour la réalisation et le bien mené de travail.

*Ensuite, je tiens à remercier très vivement et chaleureusement mon cher enseignant et encadreur **Pr. Abdelhafid MOUMMI** pour son aide, sa disponibilité, son indulgence ainsi que ses précieux conseils et ses encouragements durant toute la période de la préparation.*

Je lui remercie particulièrement pour sa confiance, sa patience, ses efforts, et son soutien durant toute l'année.

*Je remercie également **Ms. Charaf Eddine BENCACI** et **Ms. Sadame Houcine SELLAM** pour leurs collaborations leurs aides et leurs orientations.*

J'exprime ma reconnaissance aux enseignants du département de Génie Mécanique à l'université Mohammed Kheider Biskra, qui m'ont aidé à réaliser cette étude en apportant des renseignements ou en acceptant de répondre à mes questions.

Un grand merci à tous ceux qui m'ont bien conseillé, bien aidé, et à ceux qui m'ont encouragé de près ou de loin.

Enfin Je remercie les membres du Jury pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce modeste travail.

Sommaire

Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale	2

Chapitre I

Généralités et étude bibliographique

I.1. Introduction.....	5
I.2. Différents modes de stockage de l'énergie	5
I.3. Stockage thermique	5
I.4. Les types de stockage thermique.....	6
I.4.1. Le stockage d'énergie thermique par chaleur sensible	6
I.4.2. Stockage d'énergie thermique par chaleur latente	7
I.4.3. Stockage thermochimique.....	9
I.5. Comparaison entre les différentes techniques de stockage thermique	11
I.6. Travaux de recherches réalisées sur le stockage par chaleur sensible	13
I.7. Conclusion	19

Chapitre II

Etude théorique

II.1. Introduction	21
II.2. Stockage liquide	21
II.3. Stockage solide	22
II.4. Le fluide caloporteur	22
II.5. Le milieu poreux (granulaire).....	23
II.6. Les caractéristiques et propriétés d'un milieu poreux	24

Sommaire

II.6.1. La porosité	24
II.6.2. Volume Élémentaire Représentatif (VER)	25
II.6.3. Distribution des diamètres de grain	26
II.6.4. Fraction volumique	26
II.7. Paramètres thermiques	26
II.7.1. Capacité calorifique équivalente	26
II.7.2. Conductivité thermique équivalente.....	27
II.8. Performances thermiques	27
II.9. Transfert thermique dans un milieu poreux (granulaire)	28
II.9.1. Conduction.....	28
II.9.2. Convection	30
II.9.3. Rayonnement	31
II.10. Conclusion	32

Chapitre III

Etude expérimentale

III.1. Introduction	34
III.2. Eléments constitutants du dispositif expérimental	34
III.2.1. Cuve de Stockage	34
III.2.2. Échangeur de chaleur	35
III.2.3. Isolation thermique	36
III.2.4. Matériau du stockage (le sable)	36
III.2.5. Cuve de chauffage de l'eau	38
III.2.6. Pompe à eau (SHIMGE Home Booster)	38
III.3. Instruments de mesure	40
III.3.1. Mesure du débit d'eau	40
III.3.2. Mesure des températures	41

Sommaire

III.4. Conclusion.....	43
------------------------	----

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Introduction	45
IV.2. Résultats et discussions.....	45
IV.2.1. Variation de la température	46
IV.2.2. Variation de l'énergie stockée	50
IV.2.3. Variation de l'efficacité	53
IV.3. Conclusion	56

Chapitre V :

Simulation du comportement thermique par COMSOL

V.1. Introduction	58
V.2. Prise en main du logiciel	58
V.3. Description de la configuration	59
V.4. Modélisation 2D	60
V.4.1. Equations gouvernants	62
V.5. Résultats de la simulation	63
V.6. Conclusion.....	68
Conclusion générale	70
Références	72

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1. *Stockage par chaleur sensible et latent.*

Figure I.2. *Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.*

Figure I.3. *Equivalence entre la chaleur latente nécessaire pour fondre 1 kg de glace et la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau liquide.*

Figure I.4. *Schéma de principe du stockage thermochimique.*

Figure I.5. *Unité de stockage par chaleur sensible.*

Figure I.6. *Échantillon de sable de rivière avant et après chauffage*

Figure I.7. *Diagramme à barres illustrant la capacité calorifique spécifique d'une centaine des matériaux les plus utilisés, obtenue avec CES Sélecteur.*

Figure I.8. *Schéma du dispositif expérimental.*

Figure I.9. *Schéma physique de l'unité de stockage.*

Figure I.10. *Efficacité énergétique de charge du lit de sable en fonction du nombre de tubes de charge.*

Figure I.11. *Schéma du canal poreux.*

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. *Illustration de la taille intermédiaire l du volume élémentaire représentatif VER entre la taille du milieu poreux à l'échelle macroscopique L et la taille du pore à l'échelle microscopique d .*

Figure II.5. *Volume élémentaire d'un solide considéré pour établir l'équation différentielle de la conduction.*

Figure II.6. *Schématization des échanges de la chaleur dans un milieu granulaire poreux.*

Liste des figures

Figure II.7. *Transfert de chaleur par rayonnement à la surface d'un solide.*

Chapitre III :

Figure III.1. *Cuve de stockage en bois.*

Figure III.2. *Echangeur de chaleur en forme de serpentín en cuivre.*

Figure III.3. *Réalisation de l'échangeur serpentín.*

Figure III.4. *Cuve de stockage munie d'une double couche d'isolation thermique en polystyrène et carton ondulé.*

Figure III.5. *Emplacement de l'échangeur serpentín à l'intérieur de la cuve.*

Figure III.6. *Vue intérieur de la cuve de stockage rempli de sable ($m_{\text{sable}} = 1056 \text{ Kg}$).*

Figure III.7. *Thermorégulateur de la température de l'eau chaude*

Figure III.8. *Cuve en PVC thermorésistant de chauffage de l'eau.*

Figure III.9. *Pompe à eau de type Shimge Home Booster.*

Figure III.10. *Tableau de bords montrant le circuit hydraulique reliant les cuves de l'eau chaude et de stockage de la chaleur.*

Figure III.11. *Débit mètre à flotteur gradué de 0 à 160 l/h.*

Figure III.12. *Thermomètres digital JDP-200 avec panneau afficheur.*

Figure III.13. *Thermomètres PT 100 à 04 fils fixés sur les parois et au alentour des tubes dans le sable à une hauteur de 50 cm à partir du fond de la cuve.*

Figure III.14. *Installation des sondes PT 100 à 04 fils sur les parois des tubes et dans le sable.*

Figure III.15. *Châssis NI Compact DAQ-9188 Ethernet à 8 emplacements avec modules supporte sondes de température PT-100 à 04 fils.*

Figure III.16. *Interface de l'acquisition NI-Labview Signal Express affichant les valeurs des températures enregistrées par les thermocouples PT 100 installés dans la cuve de stockage.*

Liste des figures

Chapitre IV :

Figure IV.1. *Dessin de l'échangeur de chaleur et la cuve avec logiciel de conception mécanique Solid works.*

Figure IV.2. *Evolution de la température moyenne du sable et des tubes pendant le processus de chargement ($\dot{m}= 0.044\text{kg/s}$).*

Figure IV.3. *Evolution de la température moyenne du sable et des tubes pendant le processus de chargement ($\dot{m}= 0.025 \text{ kg/s}$).*

Figure IV.4. *Evolution de la température moyenne du sable et des tubes pendant le processus de chargement ($\dot{m}= 0.036 \text{ kg/s}$).*

Figure IV.5 *Evolution de la température moyenne du sable et des tubes pendant le chargement intermittent ($\dot{m}= 0.036 \text{ kg/s}$).*

Figure IV.6. *Variation de la température du sable et des tubes pendant le déchargement.*

Figure IV.7 : *Evolution de la température moyenne dans la cuve de stockage en phase de chargement et déchargement ($\dot{m}= 0.044\text{kg/s}$).*

Figure IV.8. *Evolution de l'énergie stockée dans la cuve de sable pendant le processus de chargement ($\dot{m}= 0.044\text{kg/s}$).*

Figure IV.9. *Evolution de l'énergie stockée dans la cuve de sable pendant le chargement ($\dot{m}= 0.025\text{kg/s}$).*

Figure IV.10. *Evolution de l'énergie stockée dans la cuve de sable pendant le chargement ($\dot{m}= 0.036\text{kg/s}$).*

Figure IV.11. *Evolution de l'énergie stockée dans la cuve de sable pendant le chargement en régime intermittent ($\dot{m}= 0.036\text{kg/s}$).*

Figure IV.12. *Evolution de l'efficacité dans la cuve de sable pour un débit de chargement $\dot{m}= 0.044\text{Kg/s}$.*

Figure IV.13. *Evolution de l'efficacité dans la cuve de sable pour un débit de chargement $\dot{m}= 0.025 \text{ Kg/s}$.*

Liste des figures

Figure IV.14. *Evolution de l'efficacité dans la cuve de sable pour un débit de chargement $\dot{m}=0.036\text{Kg/s}$.*

Figure IV.15. *Evolution de l'efficacité dans la cuve de sable pour un régime de chargement intermittent $\dot{m}=0.036\text{Kg/s}$.*

Chapitre V :

Figure V.1. *Configuration en 2D du domaine d'étude (Vue de côté)*

Figure V.2. *Maillage du domaine d'étude (Vue de côté).*

Figure V.3. *Configuration en 2D du domaine d'étude (vue dessus).*

Figure V.4. *Maillage du domaine (vue dessus).*

Figure V.5. *Distribution de la température en fonction du temps dans la cuve de sable pendant le chargement (Vue de côté).*

Figure V.6. *Contour de la température dans la cuve de sable et direction du flux de chaleur total en fonction du temps pendant le chargement (Vue de côté).*

Figure V.7. *Distribution de la température dans la cuve de sable en fonction du temps pendant le chargement (Vue de dessus).*

Figure V.8. *Contour de la température dans la cuve de sable et direction du flux de chaleur total en fonction du temps pendant le chargement (Vue de dessus).*

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I.1. *Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.*

Tableau I.2. *Propriétés thermo-physiques du matériau de stockage.*

Chapitre II :

Tableau II.1. *Porosité de quelques matériaux poreux.*

Chapitre III :

Tableau III.1. *Exemple de tableau de mesure pour les relevées expérimentales.*

Chapitre V :

Tableau V.1. *Paramètre d'entrée du modèle.*

Nomenclature

C: Compacité.

C_p : La capacité calorifique du matériau de stockage. [J.kg⁻¹.K⁻¹]

d : Diamètre. [m]

dT : La variation infinitésimale de la température durant l'étape de chargement. [K]

F: facteur d'angle. -

g : Accélération de la pesanteur. [m.s⁻²]

H : Enthalpie. [J.kg⁻¹]

h : Coefficient de transfert thermique par convection. [W.m⁻².K⁻¹]

L_s : La chaleur massique de changement d'état du matériau. [J.kg⁻¹]

m: La masse. [kg]

Q : La quantité d'énergie. [J]

S: Aire de la surface émettrice. [m²]

T : Température. [K]

t : temps. [s]

V: volume. [m³]

v : vitesse. [m.s⁻¹]

Symboles grecs :

α : La diffusivité thermique. [m².s⁻¹]

Δ : Variation. -

ε : La porosité. -

k : Conductivité thermique. [W.m⁻¹.K⁻¹]

η: L'efficacité énergétique. -

Φ: Flux de chaleur. W

σ : Constante de Boltzmann.

-

μ : La viscosité dynamique.

[Pas]

ρ : La masse volumique.

[kg.m³]

Indice :

eq : Équivalent.

f : Fluide.

ini : Initiale.

N : nombre de moles.

s : Solide.

Introduction

générale

Introduction générale

Vue le développement et l'accroissement considérable de la population mondiale et de l'activité industrielle au cours du dernier siècle, la demande de l'énergie sous ses différentes formes n'a cessé d'augmenter, les combustibles fossiles dont le pétrole, le charbon et le gaz naturel sont utilisés comme sources d'énergie pour fournir la plupart des besoins; Cependant, ces sources présentent des risques pour l'environnement, et ce sont également des sources non permanentes.

Pour cela, le développement des procédés permettant d'utiliser les énergies renouvelables est aujourd'hui un des enjeux majeurs de notre société. Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie solaire montre une attractivité spécifique puisqu'elle est en abondance sur Terre et inépuisable. D'autre part, sa nature intermittente (jour/nuit) et fluctuante cause un problème, par conséquent, il est important de développer une solution de stockage qui permet également de répondre à une demande constante.

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à conserver une énergie à un endroit donné pour faciliter son exploitation immédiate ou future. Par extension, le terme "stockage d'énergie" est souvent utilisé pour décrire le stockage de la matière qui produira cette énergie. Fondamentalement, il existe trois principales méthodes de stockage de l'énergie thermique : le stockage par chaleurs sensible, le stockage par chaleur latente et le stockage thermochimique.

[1]

En recherchant des matériaux prometteurs, avec des normes environnementales et économiques et une bonne conductivité thermique, la technologie de stockage sensible est considérée comme simple, économique et relativement mature, ce qui lui permet d'être exploitée. Le système de stockage sensible peut être classifié selon différents critères : la nature du matériau de stockage (liquide ou solide), la durée de stockage (court ou long terme).

[2]

L'objectif de notre travail porte sur l'étude de phénomènes de stockage par chaleur sensible dans un matériau solide granuleux (poreux), pour atteindre l'objectif fixé dans cette étude, on a subdivisé le travail en quatre chapitres.

Le premier chapitre donne un aperçu sur le stockage thermique et ses différentes techniques avec une étude bibliographique des travaux de recherche sur les systèmes de stockage thermique effectués.

Introduction générale

Dans le deuxième chapitre on s'intéresse au stockage thermique sensible et les matériaux utilisés pour ce type de stockage, suivie d'une généralité sur le milieu poreux (granulaire), présentant ainsi ses grandeurs caractéristiques. A l'issu de ce chapitre le choix s'est fixé sur le sable comme un milieu de stockage.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude expérimentale de ce travail, à travers lequel une description du banc d'essai utilisé comme support pour le déroulement des expérimentations et les moyens de mesure utilisés pour suivre l'évolution des paramètres fonctionnelles nécessaires.

Le quatrième chapitre, intitulé résultats et discussions, comporte l'interprétation et les discussions des résultats expérimentaux obtenues.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude numérique, la modélisation et la simulation numérique du dispositif expérimental étudié par le logiciel COMSOL Multiphysics.

Chapitre

/

I.1. Introduction :

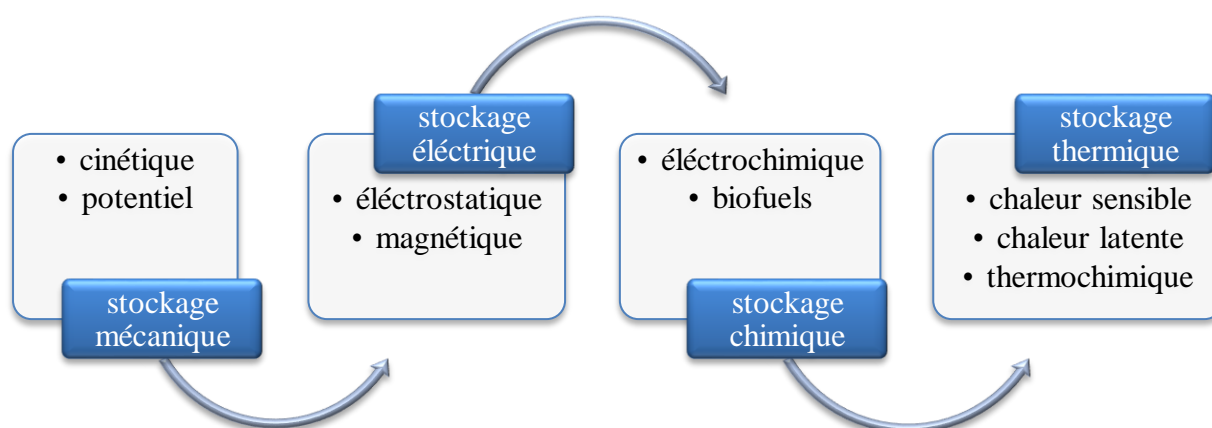
Les énergies renouvelables notamment d'origine solaire sont une ressource très importante, mais diluée, variable est souvent en décalage par rapport aux besoins, Certaines recherches s'orientent vers les méthodes d'économie d'énergie en utilisant des moyens moins coûteux et facilement accessibles, l'un de ces moyens d'économie est le stockage. La disposition de moyens de stockage efficaces et économiques permettrait d'en améliorer fortement la pénétration. [1]

Par définition « stocker de l'énergie consiste à l'emmagasiner pendant une période où elle est abondante ou moins coûteuse (solaire, tarifs de nuit...) pour l'utiliser pendant une période durant laquelle elle est rare ou plus chère» (Dumas, 2002).

Dans ce travail nous nous concentrons sur la technologie de stockage thermique d'énergie solaire par chaleur sensible.

I.2. Différents modes de stockage de l'énergie : [2]

Il existe différentes modes de stockage qui se différencient en fonction de la nature de l'énergie à emmagasiner ou à stocker.



I.3. Stockage thermique :

Fondamentalement, un stockage thermique est un composant qui permet d'accumuler de la chaleur provenant du soleil en surplus et de la restituer lors d'un besoin par les consommateurs. Physiquement, ce stockage peut être réalisé par élévation de température d'un matériau (stockage dit « sensible »), par changement d'état d'un matériau (stockage dit

«latent») ou par réaction chimique entre plusieurs composés (stockage dit «thermochimique»).[3]

I.4. Les types de stockage thermique :

Il est possible de stocker l'énergie thermique sous différentes formes, en utilisant la capacité des matériaux à libérer ou à stocker de la chaleur par le biais d'un transfert thermique. Ce transfert et ce stockage peuvent être réalisés de trois manières : [4]

I.4.1. Le stockage d'énergie thermique par chaleur sensible :

Dans une unité de stockage de chaleur sensible, l'énergie thermique est stockée par modification de la température du support de stockage (augmentation de température du matériau) au sein d'un système au sens thermodynamique, c'est-à-dire sans échange avec le milieu extérieur.

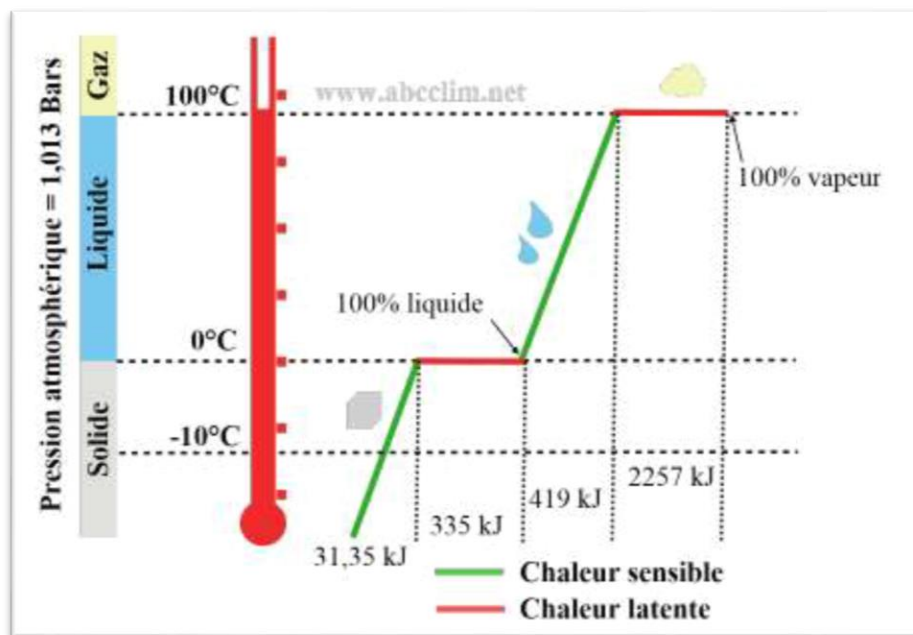


Figure I.1. Stockage par chaleur sensible et latent. [5]

La quantité d'énergie stockée dans l'unité dépend de la capacité calorifique du fluide, des changements de température et de la quantité du matériau de stockage. [5]

L'expression de la chaleur sensible pouvant être stockée découle du premier principe de la thermodynamique qui peut être décrite par l'expression suivante :

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

Q : est la quantité d'énergie stockée (J).

Chapitre I : Généralités et étude bibliographique

m : est la masse du matériau de stockage (kg).

C_p : la chaleur spécifique du matériau de stockage ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)

dT est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K).

Les matériaux de stockage par chaleur sensible se divisent en deux catégories : les liquides, comme l'eau, l'huile, les sels fondus etc., et les solides, tels que la pierre, la brique, le sable etc.

De nombreuses applications de ce type de stockage existent dans le secteur du bâtiment. Les matériaux entrant en jeu dans le stockage par chaleur sensible sont stockés dans des réservoirs de natures différentes comme des cuves de petites ou grandes tailles (notamment des ballons d'eau chaude), dans des systèmes de stockage souterrain, en aquifère artificiel, ou encore dans des matériaux spéciaux : matériau utilisé pour fabriquer des briques réfractaires à haut pouvoir d'accumulation). [6]

Ce mode de stockage est le moyen le plus ancien, le plus simple et le moins onéreux d'emmagasiner de l'énergie. Cependant, la faible densité de stockage de ce type de système est un inconvénient majeur. Le stockage par chaleur sensible s'accompagne d'une élévation de la température mais la structure moléculaire du matériau de stockage ne change pas. Selon l'état physique du matériau de stockage. [7]

I.4.2. Stockage d'énergie thermique par chaleur latente :

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est emmagasinée grâce au changement d'état d'un matériau de stockage. La chaleur latente est la quantité de chaleur absorbée ou restituée par un matériau lors de son changement de phase, à température et pression constantes. Elle s'exprime ainsi par :

$$Q_{latente} = m \cdot L_s \quad (I.2)$$

Avec, m : la masse du matériau de stockage (kg).

L_s : la chaleur massique de changement d'état du matériau ($J.kg^{-1}$).

L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente et de la quantité du matériau de stockage qui change d'état. Le stockage par chaleur latente permet de stocker de plus grandes quantités d'énergie avec des masses et des volumes réduits. [8]

Il existe plusieurs chaleurs latentes:

Chapitre I : Généralités et étude bibliographique

- Chaleur latente de liquéfaction : quantité de chaleur pour passer de l'état (solide à liquide).
- Chaleur latente de vaporisation : quantité de chaleur pour passer de l'état (liquide à gazeux).
- Chaleur latent de condensation : quantité de chaleur pour passer de l'état (gazeux à liquide).
- Chaleur latente de solidification : quantité de chaleur pour passer de l'état (liquide à solide). [9]

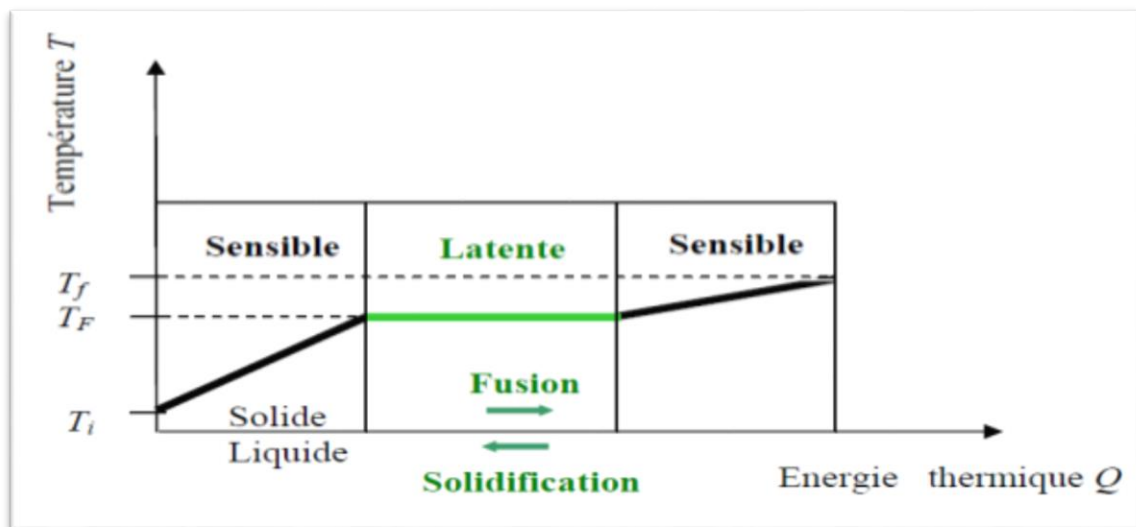


Figure I.2. Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état. [10]

Pour donner des ordres de grandeur, l'énergie demandée pour fondre 1 kg de glace est 80 fois l'énergie demandée pour augmenter la température de 1 kg d'eau de 1°C, autrement dit et pour chiffrer l'énergie nécessaire, alors que l'on a besoin d'une énergie de 4,2 kJ pour diminuer la température de 1 kg d'eau d'une température de 1 °C à 0°C, il faut 335 kJ pour compléter sa solidification en glace à $T = 0$ °C. Une autre image en est donnée figure I.3 : [10]

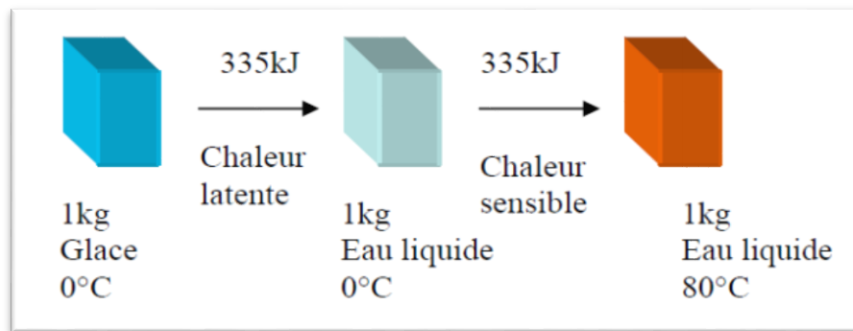


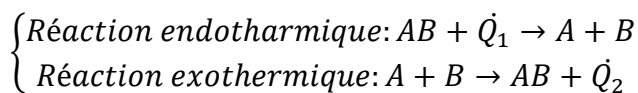
Figure I.3. *Equivalence entre la chaleur latente nécessaire pour fondre 1 kg de glace et la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau liquide. [10]*

I.4.3. Stockage thermochimique :

Certaines réactions chimiques réversibles peuvent être utilisées comme solution pour le stockage thermique de l'énergie. Ce type de stockage est dit : stockage thermochimique.

L'énergie thermochimique est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le stockage d'énergie thermochimique est basé sur l'énergie des liaisons des composés chimiques mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles.

Le principe de base du stockage thermochimique est décrit par les équations :



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 I.4 :

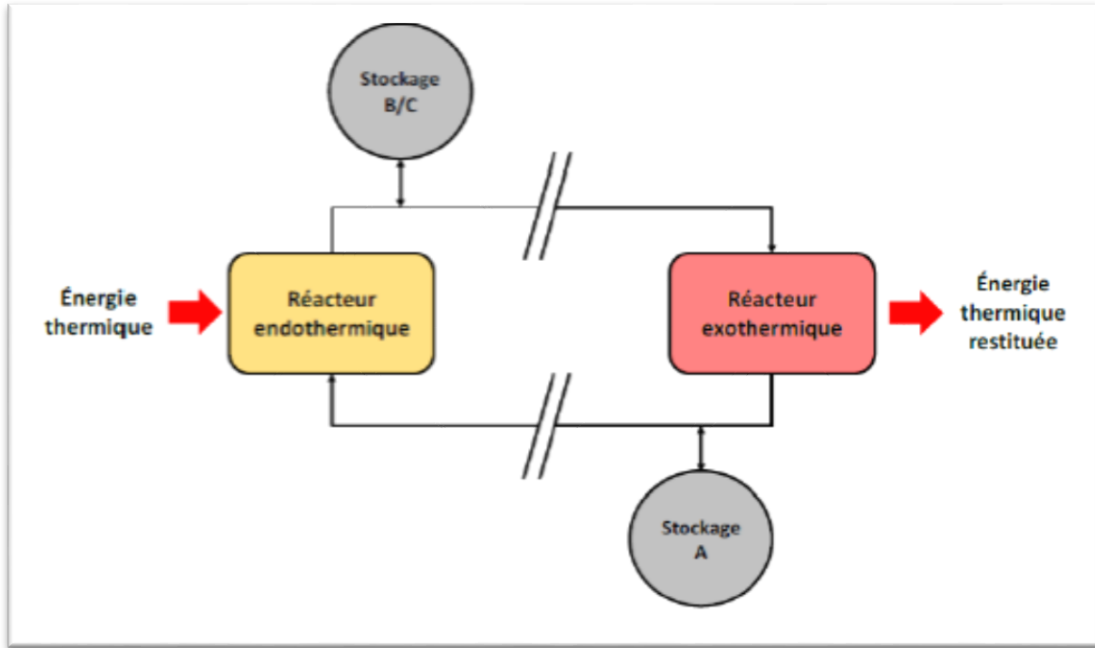


Figure I.4. Schéma de principe du stockage thermochimique. [11]

Lors de l'étape de charge, l'énergie thermique issue d'une source de chaleur, notamment du champ solaire, permet de mettre en œuvre la réaction endothermique. Les produits de cette réaction (A et B) sont séparés et stockés. Lorsque l'énergie thermique doit être restituée, les produits stockés (A et B) sont mis en contact afin de réaliser la réaction exothermique réversible et ainsi de restituer la chaleur emmagasinée et régénérer le produit initial (AB).

La quantité d'énergie qui peut être stockée dans une réaction chimique (I.3) est la somme des énergies sensibles des matériaux et de la chaleur de réaction. La quantité d'énergie stockée est exprimée selon la relation :

$$E = \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_f} m_i \cdot C_p \cdot dT + n_A \times \Delta H_r \quad (\text{I.3})$$

Où, E est la quantité d'énergie stockée (J), n_A est le nombre de moles du produit A (mol),

ΔH_r est l'enthalpie de la réaction ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ A). [11]

I.5. Comparaison entre les différentes techniques de stockage thermique :

Le tableau I.1 répertorie les caractéristiques des trois types 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 vue qu'elle est le procédé de stockage thermique le plus mature. [11]

Chapitre I : Généralités et étude bibliographique

Tableau I.1 : *Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.* [11]

		Stockage sensible	Stockage latente	Stockage thermochimique
Densité énergétique	Volumique	Faible ~15 - 60 kWh.m ⁻³	Moyenne ~ 50 - 100 kWh.m ⁻³	Elevée ~100 - 500 kWh.m ⁻³
	Massique	Faible ~ 0,02 - 0,03 kWh.kg ⁻¹	Moyenne ~ 0,05 - 0,1 kWh.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 température ambiante
Durée de stockage		Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes thermiques)	Théoriquement illimitée
Transport de l'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance théoriquement illimitée
Maturité		Echelle industrielle (20 MW _e)	Echelle pilote (100 kW _{th})	Echelle laboratoire (1-5 kW _{th})
Technologie		Simple	Moyenne	Complexe

I.6. Travaux des recherches réalisés sur le stockage par chaleur sensible :

A travers une étude numérique en 3D, **Prasad et Muthukumar [12]** ont examinés la conception et l'optimisation d'un prototype de stockage de la chaleur sensible de configuration cylindrique avec tubes à l'échelle du laboratoire pour une application de centrale thermique solaire, utilisant trois matériaux à savoir le béton, la fonte et l'acier moulé ; pour étudier leurs caractéristiques de stockage de chaleur, un modèle mathématique 3D a été développé à l'aide de COMSOL Multiphysics. Le nombre de tube de chargement a été optimisé en fonction du temps de chargement du lit de stockage, les résultats prévenus numériquement correspondent étroitement aux données rapportées dans la littérature. La technique d'amélioration du transfert de chaleur est mise en œuvre en ajoutant des ailettes sur la surface extérieure des tubes de charge, l'effet de l'ajout d'ailettes sur les tubes de charge du lit de béton est analysé dans trois cas, à savoir les tubes de charge sans ailettes, les tubes de charge à 4 ailettes et les tubes de charge à 6 ailettes, Les réductions de temps de charge sont de 35,48% (temps de charge 1307 s) pour une caisse à quatre ailettes et de 41,41% (temps de charge 1187 s) pour une caisse à six ailettes par rapport à un lit de béton avec des tubes de charge lisses.

Pour la fonte et le lit en acier moulé, l'augmentation de la vitesse entraîne une réduction du temps de charge presque identique, alors que cet effet est moindre dans le béton en raison de la faible conductivité thermique et d'une plus grande capacité calorifique.

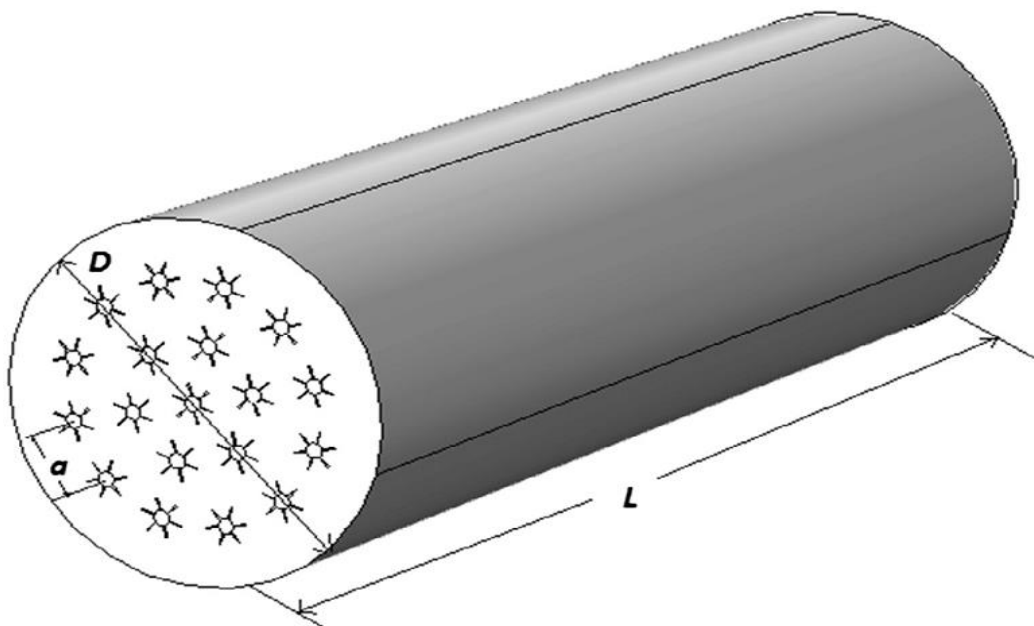


Figure I.5. *Unité de stockage par chaleur sensible.* [12]

Chapitre I : Généralités et étude bibliographique

R.Lalitha Priya et al [13], ont étudié les caractérisations 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).

Il a été observé que, lorsque l'échantillon de sable était soumis à un procédé de chauffage initial, il y avait une perte de masse considérable mais lorsque l'échantillon était soumis à plusieurs cycles thermiques, il n'y avait pas de perte de masse. Cela prouve la durabilité de l'échantillon de sable jusqu'à une température de 1087°C , on constate que le composé carbonate était 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 J/Kg.K , ce qui en fait une option appropriée pour le stockage de l'énergie thermique.



Figure I.6. *Échantillon de sable de rivière avant et après chauffage.* [13]

Chapitre I : Généralités et étude bibliographique

Fernandez, al [14], ont présenté une méthodologie de recherche des matériaux à potentiels utilisés dans le stockage d'énergie thermique par chaleur sensible, chaque année des milliers des matériaux sont connus et un nombre de nouveaux matériaux sont développés, le stockage par chaleur sensible à des températures comprises entre 150 et 200 C° est défini comme une étude de cas et deux scénarios différents ont été envisagés : le stockage par chaleur sensible à long terme et à court terme dans le but de réduire les couts au minimum.

La méthodologie proposée permet de combiner plusieurs objectifs et restrictions d'utilisation pour évaluer les matériaux d'ingénierie les plus utilisés pour les applications de stockage d'énergie thermique. Non seulement les propriétés physiques peuvent être prises en compte, mais d'autres facteurs tels que le coût, la disponibilité ou des aspects environnementaux tels que l'énergie intrinsèque ou l'empreinte CO² peuvent également être pris en compte pour évaluer un matériau potentiel.

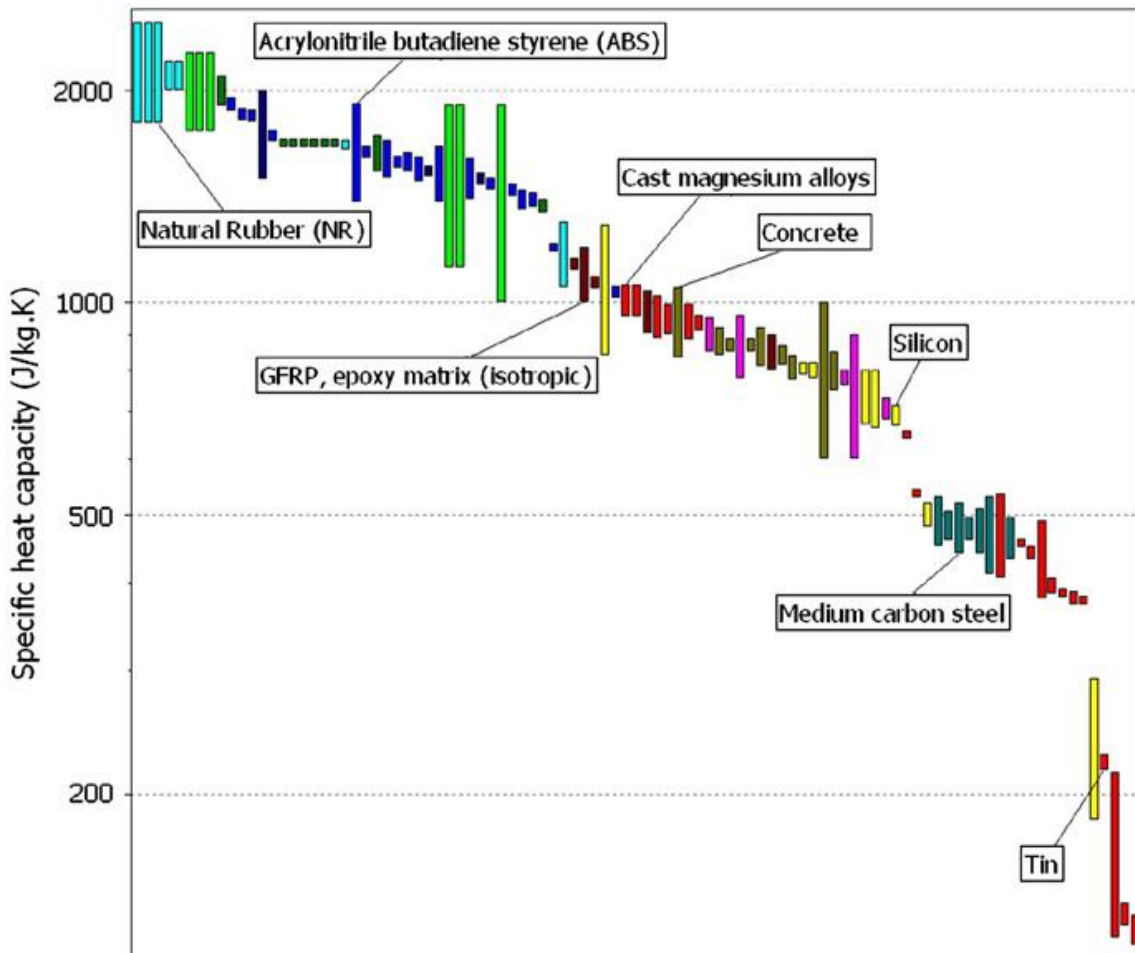


Figure I.7. Diagramme à barres illustrant la capacité calorifique spécifique d'une centaine des matériaux les plus utilisés, obtenue avec CES Sélecteur. [14]

Chapitre I : Généralités et étude bibliographique

Mahfoudi et al, [15][16] ont analysé 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.

Tableau I.2. Propriétés thermo-physiques du matériau de stockage.

	C_p	ρ	k
Sable	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	$kg.m^{-3}$	$W.m^{-1}.K^{-1}$
	835	1600	1

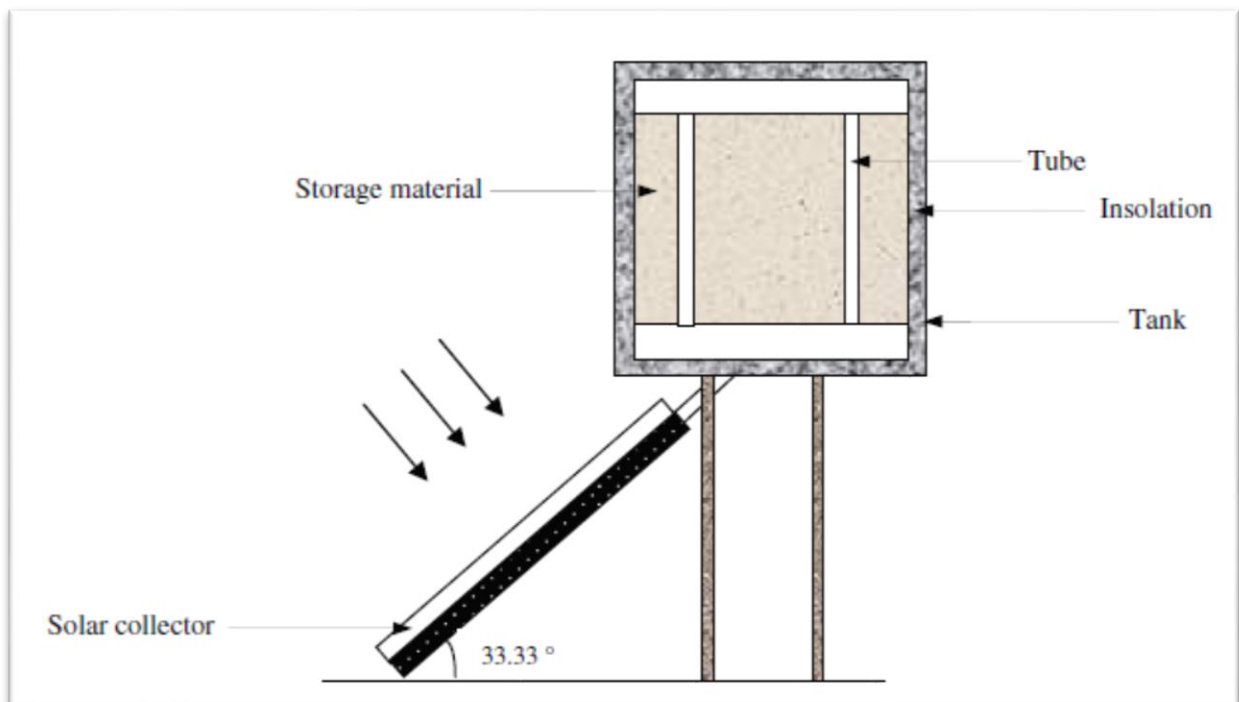


Figure I.8. Schéma du dispositif expérimental. [15]

Dans cette étude un modèle mathématique 2D à éléments finis a été développé à l'aide de COMSOL Multiphysics. L'énergie stockée et l'efficacité de charge peuvent être augmentées en augmentant le nombre des tubes de charge.

Les résultats montrent que le sable a une inertie thermique importante, cependant, il est intéressant de développer ce procédé de stockage dans la région où le sable et l'énergie solaire sont abondants.

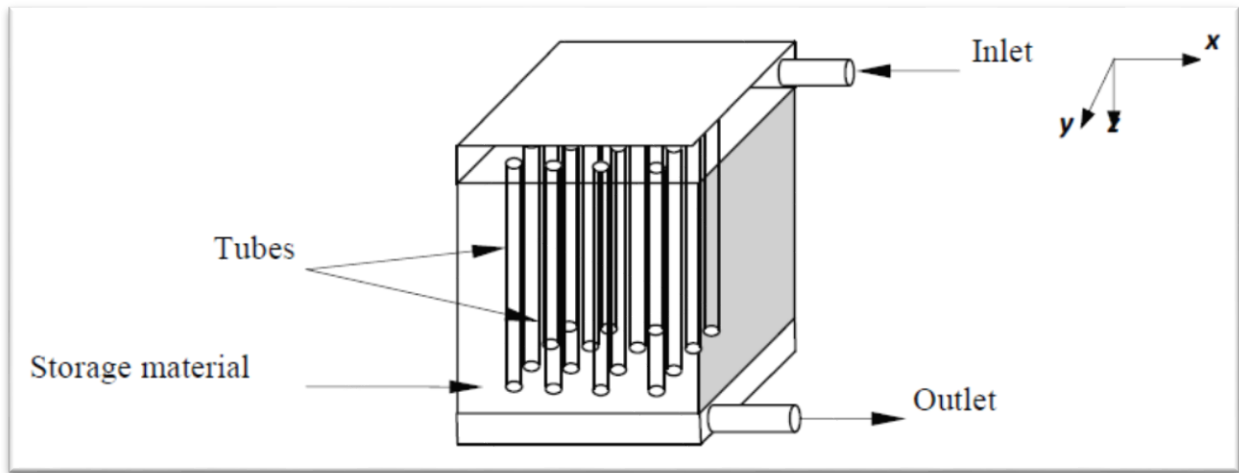


Figure I.9. Schéma physique de l'unité de stockage. [16]

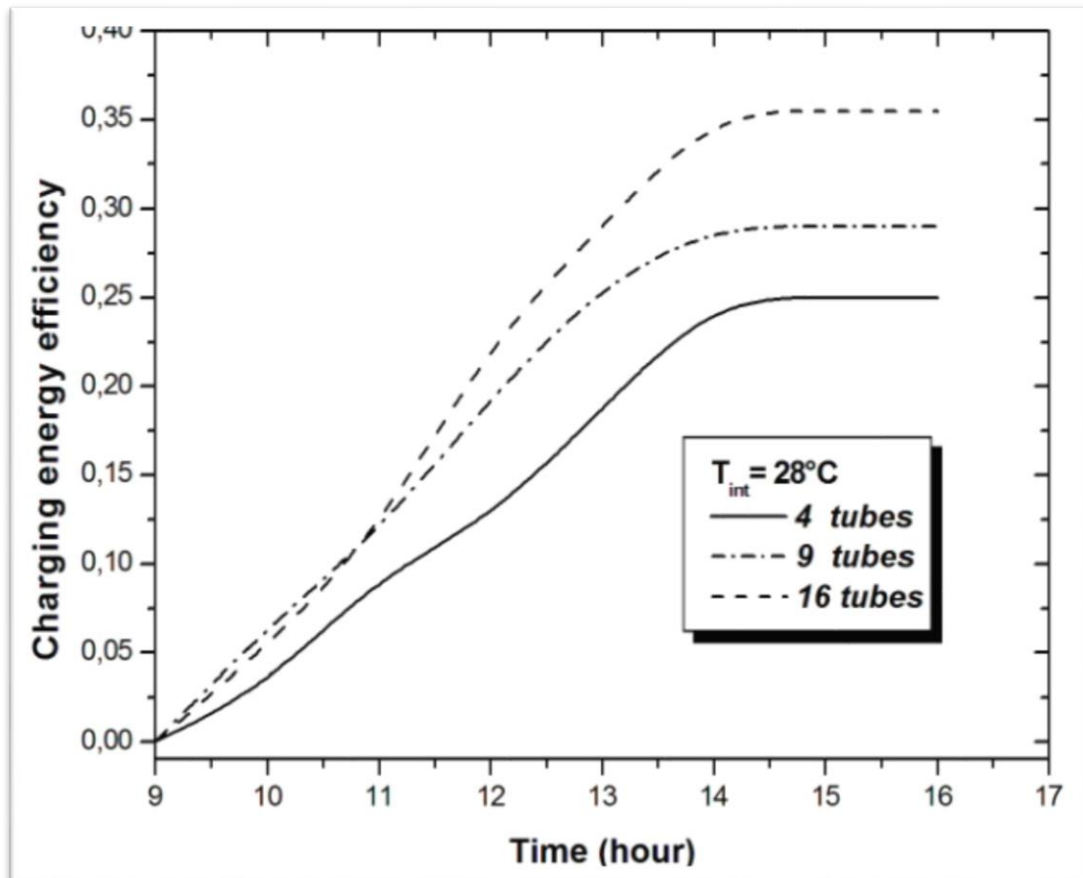


Figure I.10. Efficacité énergétique de charge du lit de sable en fonction du nombre de tubes de charge. [15]

Chapitre I : Généralités et étude bibliographique

A travers une étude expérimentale **B.Dhifaoui et al [17]** ont montré l'intérêt d'utiliser les matériaux poreux comme matériaux de stockage, cette étude concerne le stockage de l'énergie thermique dans un lit poreux formé principalement par un canal vertical rempli de billes de verre chauffé sur l'une des parois verticales par un flux de chaleur constant, l'utilisation de billes de verre est motivée par l'utilisation possible d'un tel système de stockage de l'énergie solaire par chaleur sensible et son optimisation. La modélisation dynamique du système au premier ordre par comparaison avec les expériences permet d'évaluer le coefficient d'échange thermique et de prédire la réponse du système à un flux de chaleur correspondant à des données solaires réelles afin d'atteindre l'objectif principal qui est l'optimisation du comportement du système sous un flux solaire.

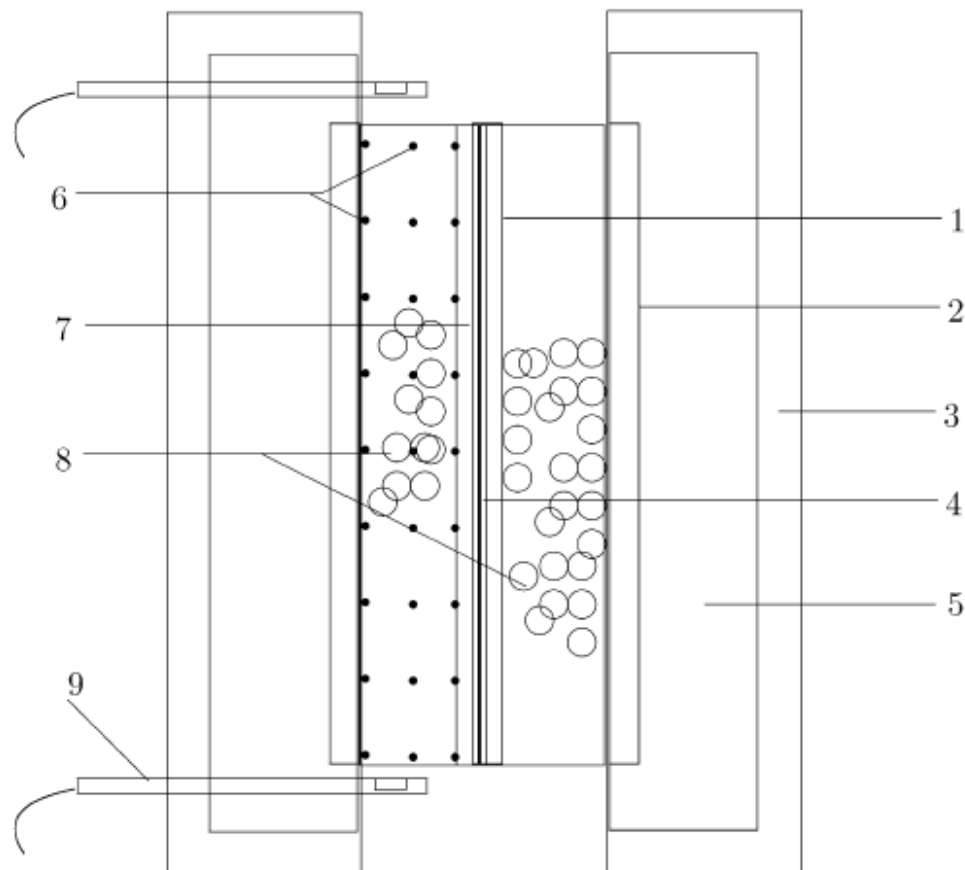


Figure I.11. Schéma du canal poreux. [17]

1: plaque chauffante, 2: plaque quasi-adiabatique, 3: cadre en bois, 4: résistance en feuilles de carbone, 5: isolant thermique (liège), 6: thermocouples de type K, 7: plaques en samicanite (isolant électrique), 8: perles de verre, 9: sondes (anémomètre à fil chaud).

I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre consacré à une 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.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 conditionner par le système. [1]

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

Notre attention sera portée particulièrement sur le stockage sensible par un solide granulaire qui fait l'objet de cette étude.

Dans le cadre de ce travail, le matériau de stockage utilisé est le sable. L'intérêt que présente ce dernier, est sa disponibilité, son caractère écologique, et son coût bas (cas de la région de Biskra en Algérie).

II.2. Stockage liquide :

L'eau est le moyen de stockage le plus fréquemment utilisé pour les systèmes liquides aux basses températures, même si la boucle de collecte peut utiliser de l'eau, des huiles, des mélanges eau-glycol ou tout autre moyen de transfert de chaleur comme fluide de récupération. Ce fluide ayant une chaleur massique ($C_p=4180 \text{ J/Kg.C}^\circ$) parmi les plus élevées. [2]

Malheureusement, quand la température dépasse 100°C , la pression doit être maintenue à des valeurs élevées et le coût des réservoirs deviennent plus important pour des stockages volumineux. [3]

D'autres liquides sont utilisés pour le stockage sensible, les plus usuels sont : les sels fondus et les huiles organiques. 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 et de sécurité. [4]

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 (α) élevée. [3]

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. [4]

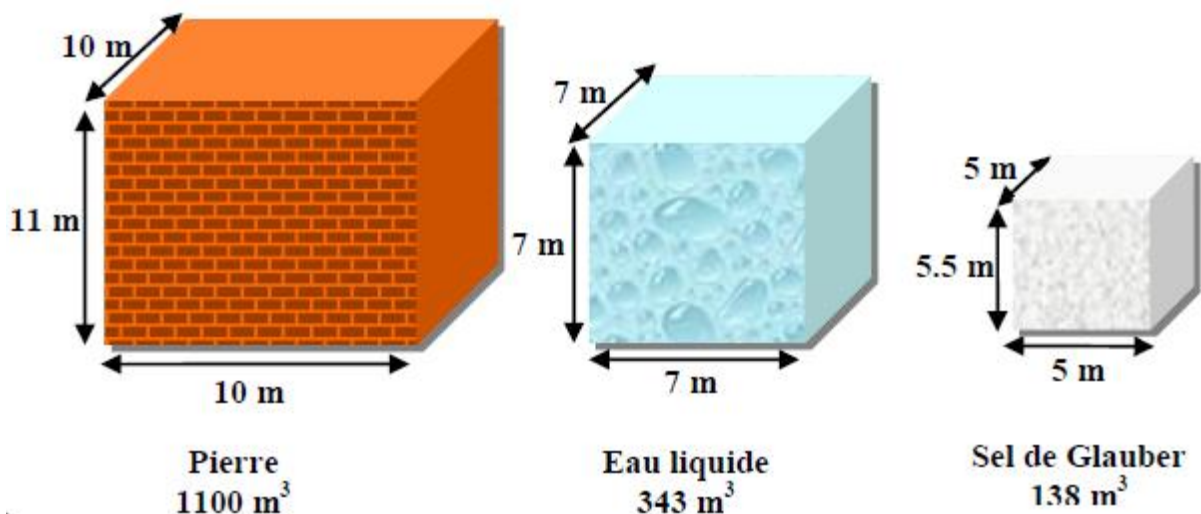


Figure II.1. Volume nécessaire pour la même énergie stockée. [4]

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.

Chapitre II : Etude théorique

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 :

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

Où, m est la masse et C_p la chaleur spécifique. [5]

Dans les systèmes de stockage sensible solide, les procédés les plus fameuses sont le lit fixe (Packed Bed) 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. [6]

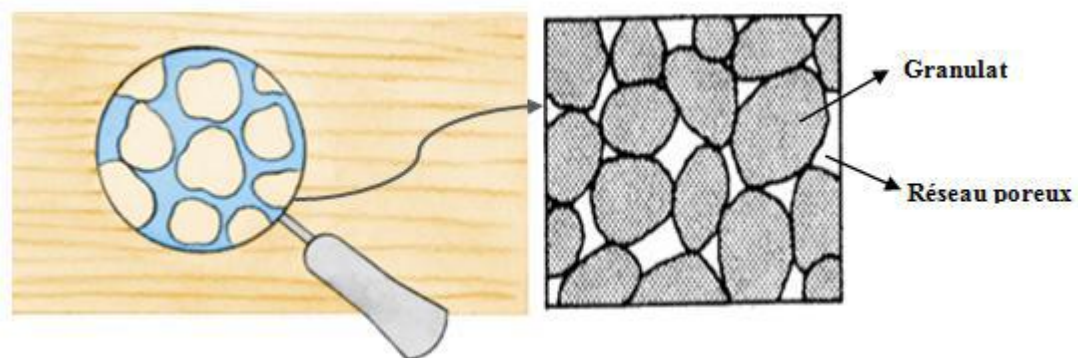


Figure II.2. Schéma simplifié d'un milieu granulaire. [4]

Chapitre II : Etude théorique

Le sable est l'un des matériaux utilisés comme support de stockage thermique dans les applications à basses et à hautes températures. Il est considéré comme un milieu poreux (granulaire). Le sable convient en raison de ses propriétés, qui incluent une stabilité thermique élevée en cycle thermique, la compatibilité avec son confinement et une capacité thermique élevée. [5]

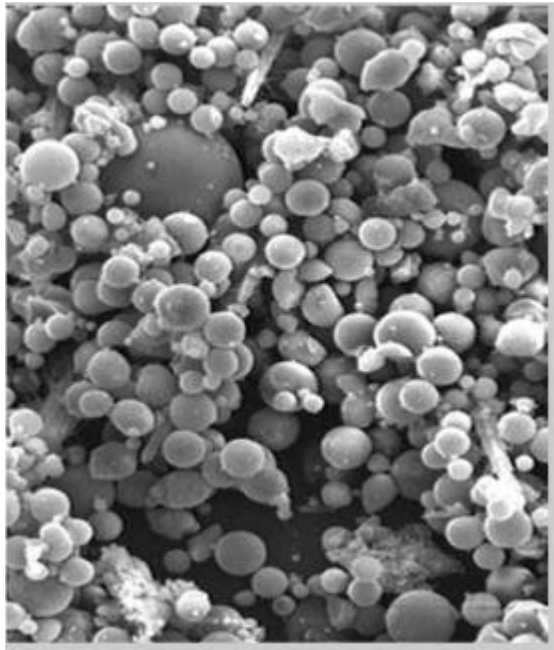


Figure II.3. Milieu granulaire réel (sable). [4]

II.6. Les caractéristiques et propriétés d'un milieu poreux :

II.6.1. La 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. [4]

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

Où, ε : 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.

Chapitre II : Etude théorique

Tableau II.1 : Porosité de quelques matériaux poreux. [6]

Matériaux	Charbon	Cuivre (en poudre)	Brique	Sable	Lits de billes sphériques
Porosité ε	0.02 à 0.12	0.09 à 0.34	0.12 à 0.34	0.37 à 0.50	0.36 à 0.43

II.6.2. 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 solutions 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. [7]

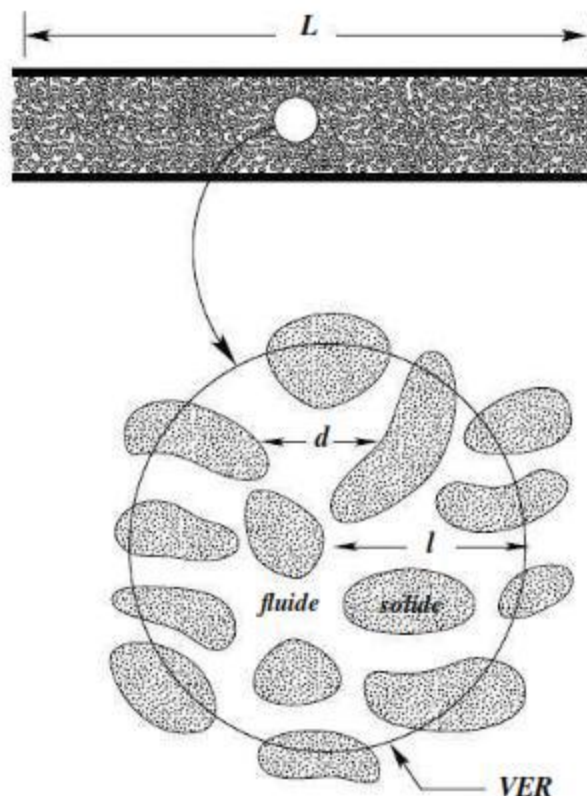


Figure II.3. Illustration de la taille intermédiaire l du volume élémentaire représentatif VER entre la taille du milieu poreux à l'échelle macroscopique L et la taille du pore à l'échelle microscopique d . [7]

II.6.3. Distribution des diamètres de grain :

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

$$v = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_g - \rho_{eau})}{18\mu} = \frac{h}{t} \quad (\text{II.3})$$

Où, v est la vitesse de sédimentation (m/s), g est l'accélération de la pesanteur (m/s^2), d est le diamètre équivalent (m), ρ_g et ρ_{eau} sont respectivement la masse volumique des grains et de l'eau (kg/m^3), μ est la viscosité dynamique du liquide (Pa.s), h est la profondeur (m), t est le temps (s).

II.6.4. Fraction volumique :

La fraction volumique 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. Elle est connue aussi sous le terme de compacité, donnée par la relation ci après : [4]

$$C = \frac{V_{solide}}{V_{tot}} \quad (\text{II.4})$$

II.7. 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 poreux qui un milieu composite et polyphasique est moins clair que pour un milieu homogène. C'est pourquoi, on introduit la notion des paramètres thermiques équivalents. Qui sont des caractéristiques thermiques globales du milieu homogène équivalant au milieu poreux et estimées à partir des constituants en tenant compte de sa structure. [7]

II.7.1. Capacité calorifique équivalente :

L'enthalpie d'un système est une grandeur extensive, il est donc possible d'évaluer la capacité calorifique volumique en écrivant simplement la loi des mélanges, Cette propriété du matériau se révèle indispensable lors de l'établissement du bilan de chaleur sur la cuve de

Chapitre II : Etude théorique

stockage, car la quantité de chaleur sensible emmagasinée par le solide est directement liée à sa chaleur spécifique : [4]

$$(\rho C_p)_{eq} = \varepsilon(\rho C_p)_{fluide} + (1 - \varepsilon)(\rho C_p)_{solide} \quad (\text{II.5})$$

Où ρ : La masse volumique.

C_p : La capacité calorifique.

ε : La porosité.

II.7.2. Conductivité thermique équivalente :

La conductivité thermique peut être définie comme une propriété d'un matériau de transmettre de la chaleur. Ainsi, lorsque la conductivité thermique d'un matériau est importante, il a une bonne capacité de transmission de la chaleur. Dans le même scénario, la faible valeur de la conductivité thermique signifie que le matériau a moins de capacité à transmettre de la chaleur, de sorte que le matériau peut être appelé matériau isolant. La conductivité thermique d'un milieu poreux est mesurée sur la base de la conductivité thermique effective, qui est une combinaison de la conductivité thermique des particules du milieu poreux et de la conductivité thermique du fluide saturé en milieux poreux, tels que l'eau ou l'air. La porosité d'un milieu poreux peut affecter la conductivité thermique effective :

$$k_{effective} = (1 - \varepsilon)k_{solide} + \varepsilon k_{fluide} \quad (\text{II.6})$$

Où, ε est la porosité d'un milieu poreux, k_{solide} et k_{fluide} sont respectivement les conductivités thermiques du solide et fluide. [8]

II.8. 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 :

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

Chapitre II : Etude théorique

Où $T(t)$ 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. [9]

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 : [4]

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

Où, m est la masse du sable, C_p est la capacité calorifique, T_{ini} est la température initiale.

II.9. Transfert thermique dans un milieu poreux (granulaire) :

Après avoir détaillé les différentes propriétés physiques d'un milieu poreux, il est important de définir les principaux modes de transfert de chaleur dominant dans une unité de stockage sensible constitué d'un matériau granulaire. Le transfert thermique est un processus complexe qui est réalisé par la superposition des trois modes fondamentaux de transfert : conduction, convection et rayonnement. Dans le cas où l'un de ces trois modes est prépondérant, les effets des autres sont faibles et ils peuvent être négligés, ce qui simplifie considérablement l'analyse du cas concerné.

II.9.1. Conduction :

La conduction représente le processus de propagation de la chaleur par contact direct entre les particules d'un corps ou entre des corps ayant des niveaux d'énergie, donc des températures différentes en raison du mouvement de ces particules élémentaires.

Dans le cas des gaz, le transfert thermique par conduction est le résultat de la diffusion moléculaire et dans les liquides et les solides diélectriques, il a lieu à l'aide des ondes élastiques.

Pour les métaux, la conduction est essentiellement due à la diffusion des électrons libres des zones plus chaudes vers les zones plus froides, les oscillations élastiques de la matrice cristalline jouant un rôle mineur.

Dans n'importe quel milieu, ce mode de transfert thermique tend à uniformiser la répartition d'énergie cinétique des particules qui constituent le corps. [10]

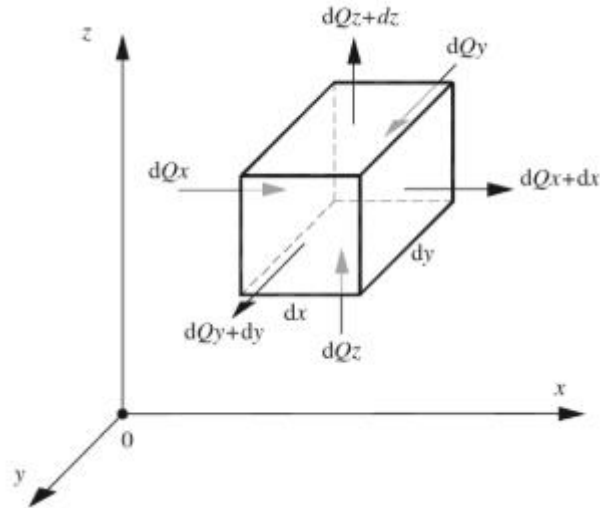


Figure II.4. Volume élémentaire d'un solide considéré pour établir l'équation différentielle de la conduction. [10]

Dans le système de stockage de la chaleur étudié, on trouve :

- Le transfert de chaleur des tubes vers le sable s'effectuant uniquement par conduction. (paroi-grain)
- La conduction thermique à travers la surface de contact entre deux particules, (grain-grain), en effet les grains de sable sont très petits de telles sortes que l'espace entre deux granulés est quasiment inexistant.

L'équation de conduction thermique est régie par la loi de Fourier :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(k_i \nabla T) + \dot{q} \quad (\text{II.9})$$

$$\mathbf{q}_{cond} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

\dot{q} : Le terme source [W.m^{-3}].

ρ : La masse volumique [kg.m^{-3}].

C_p : La capacité calorifique du sable [$\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$].

k_i : La conductivité thermique du sable [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$].

T : La température dans le solide (sable) [K].

q_{cond} : La densité du flux thermique [W.m^{-2}].

t : Le temps [s].

x : L'espace [m].

Chapitre II : Etude théorique

L'indice i est relatif aux différentes directions (si le matériau est considéré isotrope alors $k_i=k$), dans ce cas une autre grandeur physique est utilisée, c'est la diffusivité thermique définie par : [7]

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (\text{II.11})$$

Où, α est la diffusivité thermique, k est la conductivité thermique, ρ est la masse volumique et C_p est la capacité calorifique du matériau.

II.9.2. Convection :

Le phénomène de convection se réfère au transfert thermique qui a lieu dans les fluides – liquide ou gaz en mouvement.

Il est déterminé par le mouvement des particules élémentaires d'un fluide entre des zones ayant des températures différentes, ce mouvement entraîne un mélange qui génère des échanges de chaleur et de quantité de mouvement. Compte tenu des forces qui produisent le mouvement du fluide ; on a deux types de convection (forcée et naturelle ou libre). [10]

Quelle que soit la nature du processus de transfert de chaleur par convection, l'équation de la convection est connue sous la loi de Newton :

$$q_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (\text{II.12})$$

Où, q_{conv} : Le flux de chaleur convectif [W.m^{-2}] est proportionnel à la différence de température entre la surface du solide et la température du fluide, T_s et T_∞ respectivement.

h [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$], nommée coefficient de transfert thermique par convection. Il dépend des conditions aux limites, qui sont influencées par la géométrie de la surface, la nature du fluide en mouvement et les propriétés de transport. [11]

Le phénomène de convection est observé entre un fluide en mouvement et une paroi, il est majoritaire dans la plupart des échangeurs de chaleur. [7]

Et en présence d'écoulement du fluide caloporteur dans le milieu de stockage étudié dans le cadre de ce travail, le transfert de chaleur par convection se trouve entre les parois et le fluide d'une part, d'autre part ce mode de transfert dans le sable dépend de l'espace entre deux grains qui est caractérisé par la porosité. Donc, si on prend en considération la porosité entre les granulés constituant le matériau de stockage, le terme de transfert de chaleur par convection n'est plus négligeable figure (II.5).

- Le transfert thermique par convection solide-fluide-solide (grain-fluide).

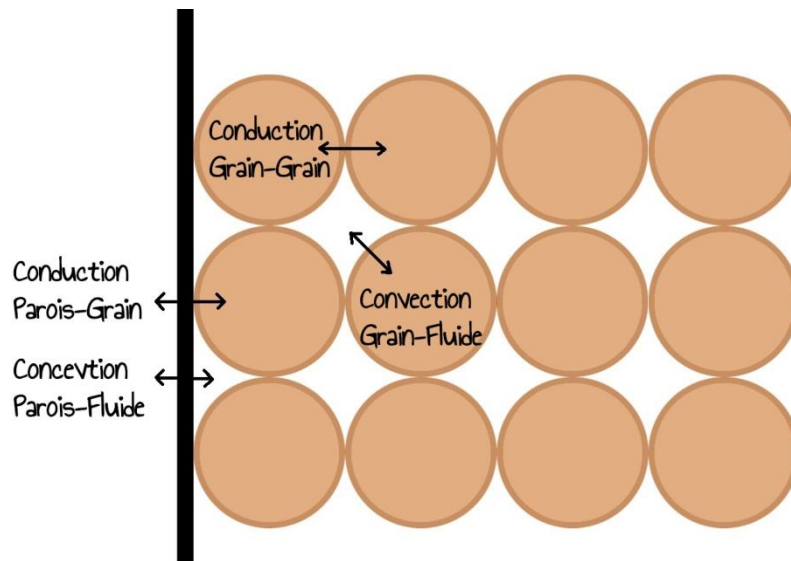


Figure II.5. Schématisation des échanges de la chaleur dans un milieu granulaire poreux.

Cependant, lorsque les particules du sable utilisées dans cette étude sont très fines et très proches les unes des autres (porosité très faible), par conséquent le transfert thermique par convection entre les grains et les parois, également entre les grains elles mêmes est négligeable.

II.9.3. Rayonnement :

Le rayonnement thermique ou rayonnement électromagnétique, décrit les émissions d'énergie susceptible de se transmettre dans le vide. Dans la pratique, le rayonnement s'effectue en présence d'un gaz, c'est la raison pour laquelle le rayonnement est rarement le seul type d'échange thermique mis en jeu : la convection et la conduction sont également présentes. Cependant aux hautes températures, le rayonnement prend une importance prépondérante.

Le mécanisme de rayonnement est créé par l'émission ou l'absorption des ondes électromagnétiques porteuse d'énergie rayonnante et par la transformation de celle ci en chaleur par le changement d'état énergétique sous forme d'énergie interne des corps qui la retiennent. [10]

La transmission de la chaleur par rayonnement entre les surfaces de deux solides, obéit à la loi de Boltzmann. Son exactitude et son accord avec les faits surpassent celles des autres lois de transmission de la chaleur. Cette loi s'exprime par une relation de la forme:

$$\Phi = \varepsilon \cdot F \cdot \sigma \cdot S(T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{II.13})$$

Chapitre II : Etude théorique

Φ : Flux de chaleur transmis en watts.

T_1 : Température (T_{solide}) de la surface émettrice en K°.

T_2 : Température ($T_{surface}$) de la surface réceptrice en K°.

σ : Constante de Boltzmann égale à $5,73 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

S : Aire de la surface émettrice.

ε : Coefficient mutuel de rayonnement.

F : facteur d'angle de la surface réceptrice par rapport à la surface émettrice. [7]

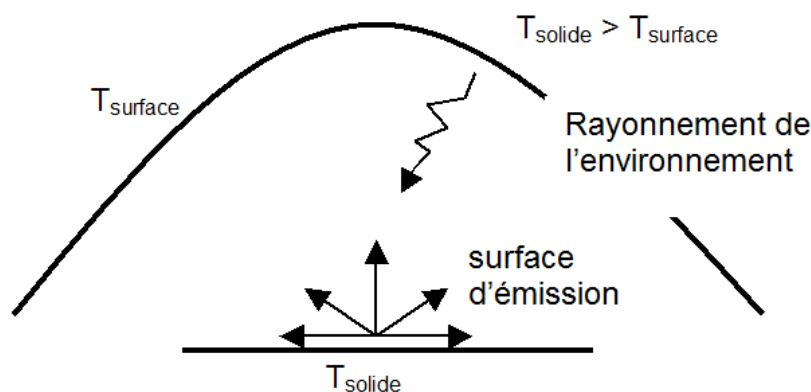


Figure II.6. *Transfert de chaleur par rayonnement à la surface d'un solide.* [7]

II.10. Conclusion :

Le stockage par chaleur sensible est reconnu pour son faible coût et sa facilité de conception et de construction. En conséquence, dans les grandes installations, outre l'augmentation de l'efficacité des centrales solaires grâce au stockage d'énergie thermique, le stockage sensible peut contribuer à rendre les centrales solaires économiquement abordables.

Le stockage sensible est l'objet de ce chapitre en particulier le stockage sensible dans le milieu granuleux, où on a essayé d'aborder les différents mécanismes de transfert de chaleur qui peuvent avoir lieu, à travers une étude théorique succincte sur les milieux poreux (granulaire) en général et sur le sable en particulier, notamment ses caractéristiques et propriétés physiques avec un aperçu sur le transfert thermique dans le milieu de stockage granulaire.

Chapitre

III

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera une description générale du banc d'essai expérimentale qui a fait l'objet de notre étude, ainsi que les différentes étapes de réalisation de ce projet proposé. Il s'agit d'une enceinte de stockage de la chaleur dans le sable qui a été réalisée dans le hall technologique du département de Génie mécanique de l'Université de Biskra.

III.2. Eléments constituant du dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental a été réalisé dans le Hall technologique du département génie mécanique de l'université de Biskra afin d'étudier le comportement thermique ainsi la capacité de stockage thermique du sable, pour cela on a conçu un système composé d'une cuve contenant un échangeur de chaleur en forme de serpentín est immergé dans le sable couplée à un réservoir d'eau chaude.

Le banc d'essai expérimental réalisé est constitué des éléments suivants :

III.2.1. Cuve de Stockage :

La cuve de stockage est conçue de bois de forme cubique (01mx 01mx01m) Figure (III.1) d'une épaisseur de 01 cm avec couvercle et supports métalliques découpés d'acier galvanisé pour assurer la rigidité de la cuve durant le remplissage par le matériau de stockage.



Figure III.1. *Cuve de stockage en bois.*

III.2.2. Echangeur de chaleur :

L'échangeur de chaleur en forme de serpentín est réalisé de cuivre de 16 mm de diamètre extérieur, comporte 16 tubes verticaux (78 cm) sont reliés les uns aux autres par 15 tubes horizontaux (24.5 cm) sont découpés avec un coupe métaux. Figure (III.2)



Figure III.2. *Echangeur de chaleur en forme de serpentín en cuivre.*

L'échangeur est constitué de quatre rangées, chacune est formée de quatre tubes verticaux reliées par des coudes avec quatre tubes horizontaux, la liaison entre les tubes est obtenue par soudage à l'étain avec un chalumeau à gaz butane (Figure III.3).

- La longueur totale de l'échangeur serpentín en contact avec le matériau de stockage est égale à 16.85 m.
- La surface d'échange totale mise en jeu entre le fluide chaud et le matériau de stockage est égale à 0.846 m²



Découpage des tubes en cuivre

Soudage par flamme de chalumeau à l'étain

Tubes horizontaux avec coudes soudés à l'étain

Figure III.3. Réalisation de l'échangeur serpentin.

III.2.3. Isolation thermique :

Afin d'obtenir une bonne isolation et réduire les déperditions thermiques vers l'extérieur, on a utilisé une double paroi composée d'une couche épaisse de 05 cm en polystyrène et de carton ondulée de 1.5 cm d'épaisseur respectivement Figure (III.4). Le volume total net de stockage est égale à $V_{total} = 0.658 \text{ m}^3$.



Figure III.4. Cuve de stockage munie d'une double couche d'isolation thermique en polystyrène et carton ondulé.

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

Le matériau de stockage utilisé dans ce travail est le sable a été récupéré sur la route nationale de Aïn Ben Naoui située dans la région Biskra.

Chapitre III : Etude expérimentale

Afin d'obtenir un matériau de stockage homogène, le sable a été tamisé pour éliminer les débris des plantes et les caillots...etc. Après tamisage, le milieu de stockage est placé ensuite dans la cuve en bois dans laquelle l'échangeur serpentin a été placé initialement.

Pour maintenir une distance identique entre les éléments de l'échangeur serpentin, notamment les tubes verticaux, on a utilisé des morceaux de bois dont les extrémités ont été préalablement tronquées en forme de demi cercles de diamètre égale à 16 mm, de telle sorte qu'ils soient équidistants et qui correspondrait à une diffusion uniforme de la chaleur entre les tubes et les amas de sable avoisinant les tubes Figure (III.5).



Figure III.5. *Emplacement de l'échangeur serpentin à l'intérieur de la cuve.*

Le remplissage de sable a été réalisé par un bidon en plastique de référence, ceci étant afin d'estimer la masse de sable utilisé qui vaut 1056 Kg après remplissage totale de la cuve Figure (III.6). A la fin de remplissage par le sable, la cuve est ensuite couverte en haut par une double paroi en carton ondulé et de polystyrène pour une isolation thermique uniforme sur toutes les parois de la cuve.



Tamisage de sable

Remplissage de la cuve

Fin de remplissage

Figure III.6. *Vue intérieure de la cuve de stockage rempli de sable ($m_{sable} = 1056$ Kg).*

III.2.5. Cuve de chauffage de l'eau :

Dans ce travail, le stockage de la chaleur est réalisé par l'eau chaude comme fluide caloporteur qui permis de véhiculer la chaleur à travers les parois de l'échangeur serpentin en contact direct avec le sable, dont la longueur et la surface d'échange sont $L_{ech} = 16.85$ m et $S_{ech} = 0.846$ m² respectivement. L'eau véhiculé à travers l'échangeur serpentin est chauffée dans un réservoir par une résistance électrique Figure (III.8), dont la température est régulée par le biais d'un thermostat de type STC 1000 Figure (III.7), doté de 04 principales fonctions, notamment l'ajustement de la température maximale à ne pas dépassée, dans notre cas la température est fixée à 60 °C, et l'écart de température de régulation qui vaut 05 °C, de telle sorte que la température de l'eau chaude dans la cuve bascule entre 60 et 55 °C.



Figure III.7. Thermostat de la température de l'eau chaude.



Figure III.8. Cuve en PVC thermorésistant de chauffage de l'eau.

III.2.6. Pompe à eau (SHIMGE Home Booster) :

Pour assurer un écoulement permanent de l'eau chaude avec un débit constant, on a employé une pompe à eau spécifique de type « SHIMGE Home Booster » Figure (III.9) qui permis de véhiculer des fluides chauds jusqu'à une température au voisinage de 100 °C. La pompe a pour rôle d'assurer la circulation de l'eau dans un circuit fermé entre la cuve de l'eau chaude et l'échangeur serpentin, dont le débit est ajusté manuellement par une vanne de réglage manuelle de débit qui se trouve intégré à un débitmètre à flotteur Figure (III.10).



Figure III.9. Pompe à eau de type Shimge Home Booster

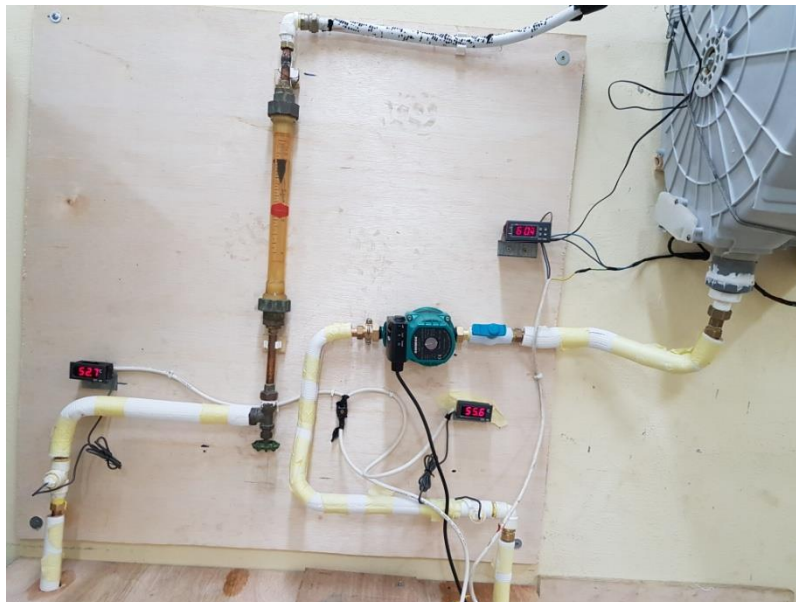


Figure III.10. Tableau de bords montrant le circuit hydraulique reliant
Les cuves de l'eau chaude et de stockage de la chaleur

III.3. Instruments de mesure :

III.3.1. Mesure du débit d'eau :

Le débit volumique de l'eau est mesuré par un débitmètre à flotteur gradué ajustable au moyen d'une vanne de réglage manuelle Figure (III.11). Le débitmètre à flotteur est placé juste à la sortie de l'échangeur serpentin, telle que la montre la Figure (III.10) ci-dessus.



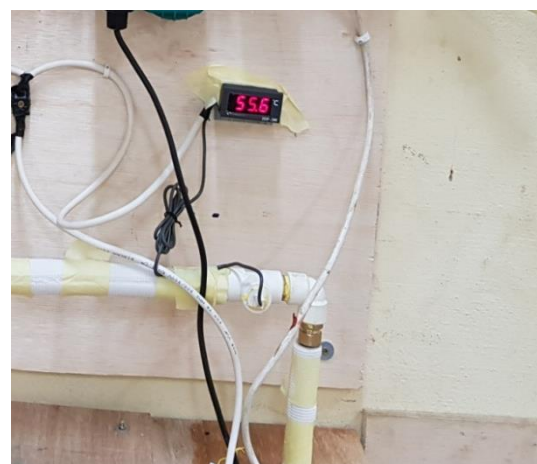
Figure III.11. Débit mètre à flotteur gradué de 0 à 160 l/h.

III.3.2. Mesure des températures :

Pour mesurer la quantité de chaleur stockée par le sable lors de la circulation de l'eau chaude provenant de la cuve de chauffage, on a introduit deux sondes de température respectivement à l'entrée et à la sortie de la conduite en cuivre de l'échangeur serpentin Figure (III.12), où les valeurs des températures sont lues en temps réel sur un cadran afficheur à cristaux liquide de type JDP 200, à noter que les thermocouples sont intégrés directement au circuit de l'eau chaude de l'échangeur serpentin.



Afficheur de température à la sortie de la cuve de stockage



Afficheur de température à l'entrée de la cuve de stockage

Figure III.12. Thermomètres digital JDP-200 avec panneau afficheur.

Chapitre III : Etude expérimentale

D'autre part, afin suivre le comportement thermique dans la cuve de stockage de la chaleur 16 thermocouples de contact de type PT 100 ont été installés sur deux niveaux, 08 sondes à 50 cm et à 80 cm respectivement compté à partir du fond de la cuve Figure (III.13). A chaque niveau, 04 thermocouples sont fixés sur les parois des tubes de l'échangeur serpentin figure (III.14), et les 04 autres sont installées dans le sable exactement à une distance médiane entre deux tubes successives, ceci étant pour vérifier que la diffusion de la chaleur par conduction à travers le sable s'effectue symétriquement.



Figure III.13. *Thermomètres PT 100 à 04 fils fixés sur les parois et au alentour des tubes dans le sable à une hauteur de 50 cm à partir du fond de la cuve*



Figure III.14. *Installation des sondes PT 100 à 04 fils sur les parois des tubes et dans le sable.*

Chapitre III : Etude expérimentale

La lecture des températures est effectuée via une acquisition NI-Labview Signal Express constituée d'un châssis de type NI Compact DAQ-9188 Ethernet à 8 emplacements avec 08 modules qui supporte les 16 sondes de température de Type PT-100 à 04 fils Figure III.15), reliée à un ordinateur par un câble réseau où les valeurs sont directement prises sur l'écran d'un micro ordinateur qui indique les valeurs en temps réel des températures .



Figure III.15. Châssis NI Compact DAQ-9188 Ethernet à 8 emplacements avec modules supporte sondes de température PT-100 à 04 fils

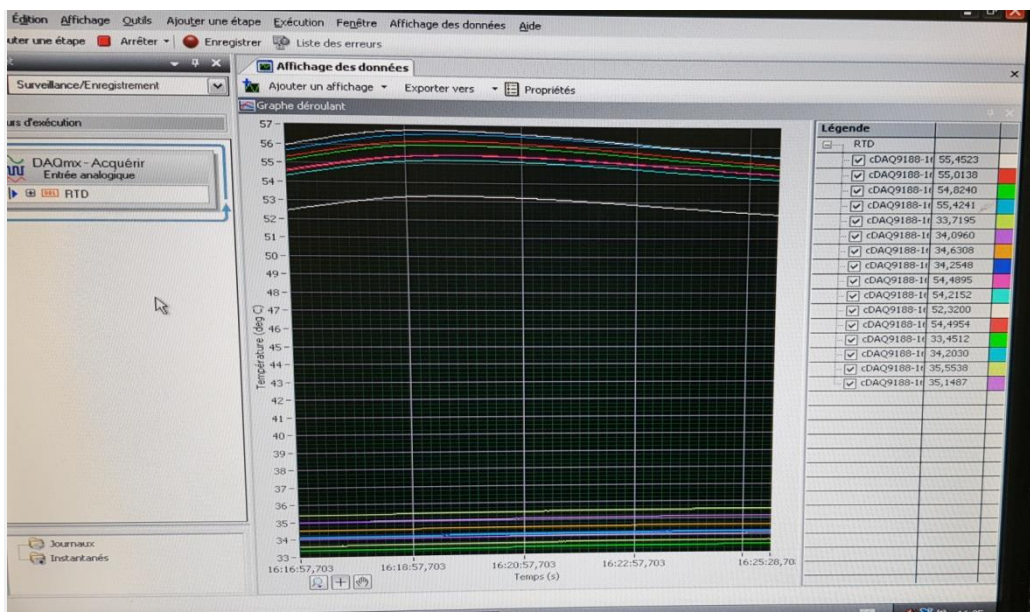


Figure III.16. Interface de l'acquisition NI-Labview Signal Express affichant les valeurs des températures enregistrées par les thermocouples PT 100 installés dans la cuve de stockage.

Chapitre III : Etude expérimentale

Les valeurs des températures enregistrées par les thermocouples PT 100 installés dans la cuve et celles qui sont obtenues par les afficheurs à cristaux liquide de type JDP 200 fixés à l'entrée et à la sortie de l'échangeur serpentin, sont reportés sur un tableau de mesure Tableau (III.1), pour un débit massique réglable maintenu constant par le biais d'un débitmètre à flotteur. Les relevées expérimentales nous permettra par la suite d'entamer une discussion et interprétation des résultats en fonction des conditions de fonctionnement qui fera l'objet du quatrième chapitre.

Heure	T _{entrée}	T _{sortie}	Tube inférieur				sable inférieur				Tube supérieur				sable supérieur				
			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	

Tableau III.1. Exemple de tableau de mesure pour les relevées expérimentales.

III.4. Conclusion :

Ce chapitre comporte les différentes étapes de réalisation du dispositif expérimental qui étudie la faisabilité d'un système de stockage utilisant le sable comme un milieu d'accumulation de la chaleur, ainsi que les différents instruments de mesures employés durant le déroulement des manipulations expérimentales, qui a permis de suivre l'évolution de la température dans les sables à différents endroits en fonction de temps pour plusieurs débits massiques de l'eau chaude.

Chapitre

IV

Chapitre IV: Résultats et discussions

IV.1. Introduction :

Ce chapitre concerne la présentation, la discussion et l'interprétation des résultats obtenues à partir des mesures et relevées expérimentales effectuées sur le banc d'essai de stockage de la chaleur expliqué dans le chapitre précédent, on s'intéresse à suivre l'évolution des températures dans le sable et dans l'échangeur, ainsi que la celle de l'entrée et de sortie de la cuve de stockage en fonction de temps et de débit massique de l'eau chaude.

L'objectif de ce chapitre est de décrire le comportement thermique du sable pendant un cycle chargement/déchargement et de déterminer les performances du système.

IV.2. Résultats et discussions :

Les tests expérimentaux ont été menés du 08 au 12 mars 2020 dans le hall technologique du département de génie mécanique de l'université de Biskra. Les paramètres mesurables nous permis par la suite de déterminer les performances du système de stockage.

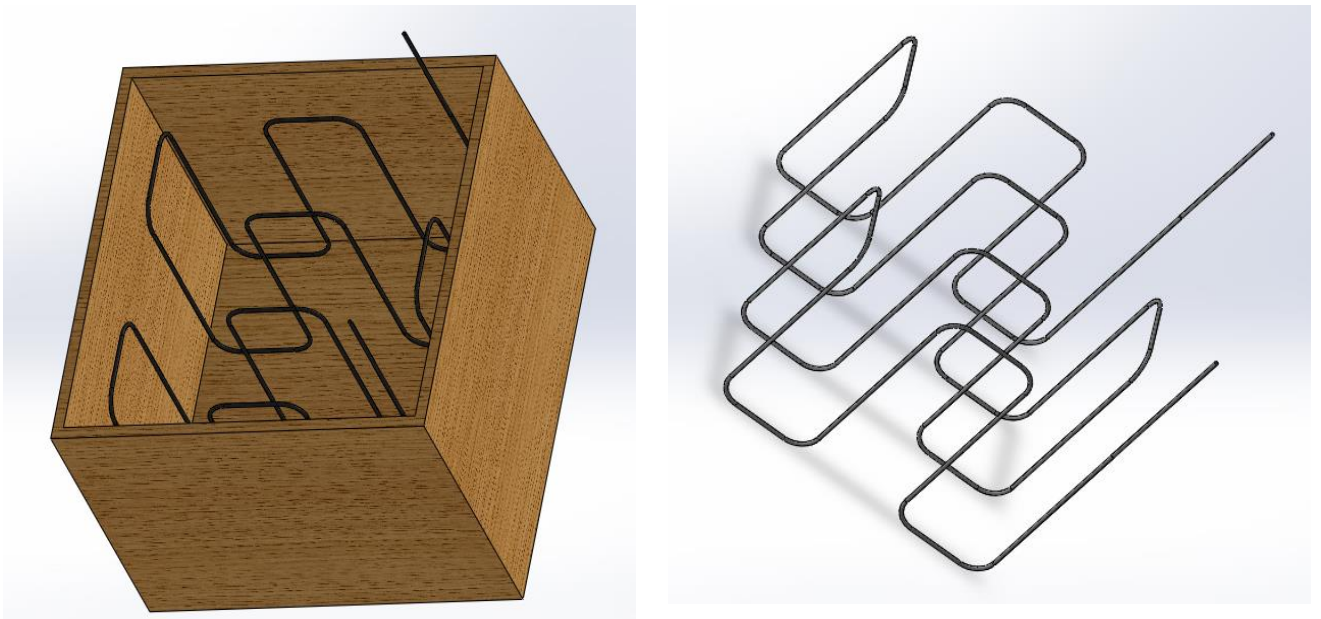


Figure IV.1. *Dessin de l'échangeur de chaleur et la cuve avec logiciel de conception mécanique Solid works.*

Chapitre IV: Résultats et discussions

IV.2.1. Variation de la température :

Les figures (IV.2, IV.3, IV.4 et IV.5) montrent la variation de la température moyenne du sable et des tubes en fonction du temps pendant le chargement pour trois valeurs de débit massique égales à 0.044 kg/s, 0.025 kg/s, 0.036 kg/s et un débit intermittent respectivement.

Comme le montre la figure IV.2, le chargement pour le débit 0.044kg/s est effectué durant un jour et demi (entre 8 :30 à 16 :30 du 1^{er} jour et 13 :00 à 16 :30 du jour qui suit), où on remarque que la température moyenne du sable augmente progressivement de 22 à 34.5 °C, par contre pour un débit égale à 0.025kg/s et 0.036kg/s (Figure IV.3, IV.4) effectué en une seule journée pour le chargement.

Dans la figure IV.3 la température augmente de 26 à 33.5 °C après avoir précédés à un de déchargement avec un débit massique égal à 0.044 kg/s

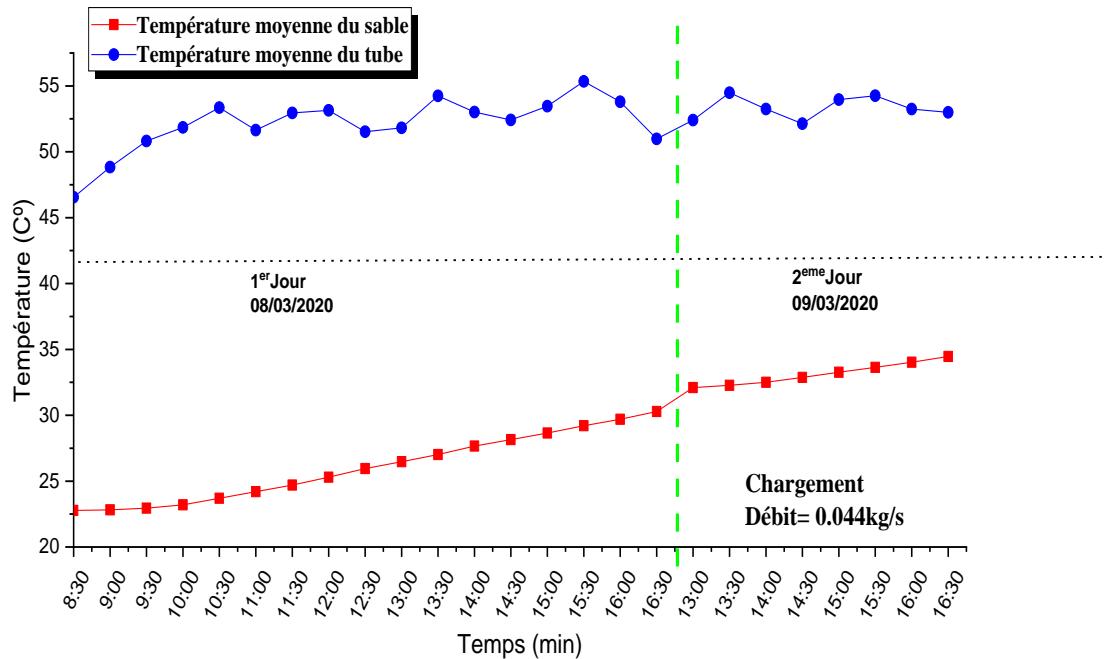


Figure IV.2. Evolution de la température moyenne du sable et des tubes pendant le processus de chargement ($\dot{m} = 0.044 \text{ kg/s}$).

Chapitre IV: Résultats et discussions

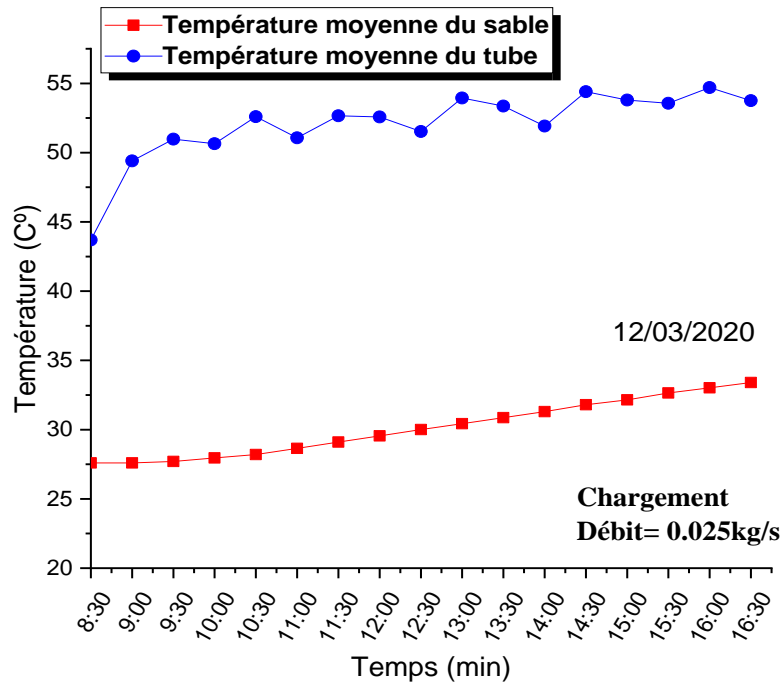


Figure IV.3. Evolution de la température moyenne du sable et des tubes pendant le processus de chargement ($\dot{m}= 0.025$ kg/s).

Les résultats obtenus d'après les figures IV.4 et IV.5 dont les relevées ont été effectuée après 03 mois de rupture par la suite d'un confinement obligatoire proclamé le 15 mars 2020 et d'arrêter momentanément les expériences, ce qui a modifié les conditions de travail, où on a observé que le sable a emmagasiné la chaleur durant cette période entre le mois de mars et juin 2020. Par conséquent, la température du sable pour un débit moyen de 0.036 kg/s augmente de 30 à 36 °C. Cette augmentation est due à l'apport de chaleur par l'eau chaude provenant de la cuve de chauffage de l'eau, en revanche la température moyenne du tube échangeur est variable, augmentant et diminuant pendant la période de chargement oscillant entre 43 et 55 °C sous l'effet de la température du fluide caloporteur (eau chaude) contrôlée avec un thermorégulateur (tel que illustré dans le chapitre III).

La figure IV.5, où on a procédé à un chargement en régime intermittent pour le même débit (0.036kg/s) montre que durant les deux premières heures la température du sable reste constante puis elle commence d'accroître de 37 à 41 °C.

Chapitre IV: Résultats et discussions

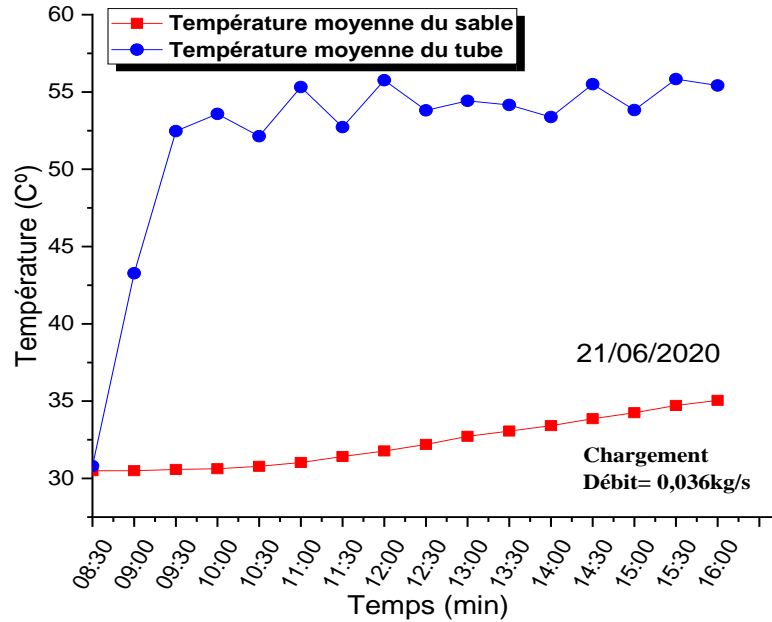


Figure IV.4. Evolution de la température moyenne du sable et des tubes pendant le processus de chargement ($\dot{m}= 0.036$ kg/s).

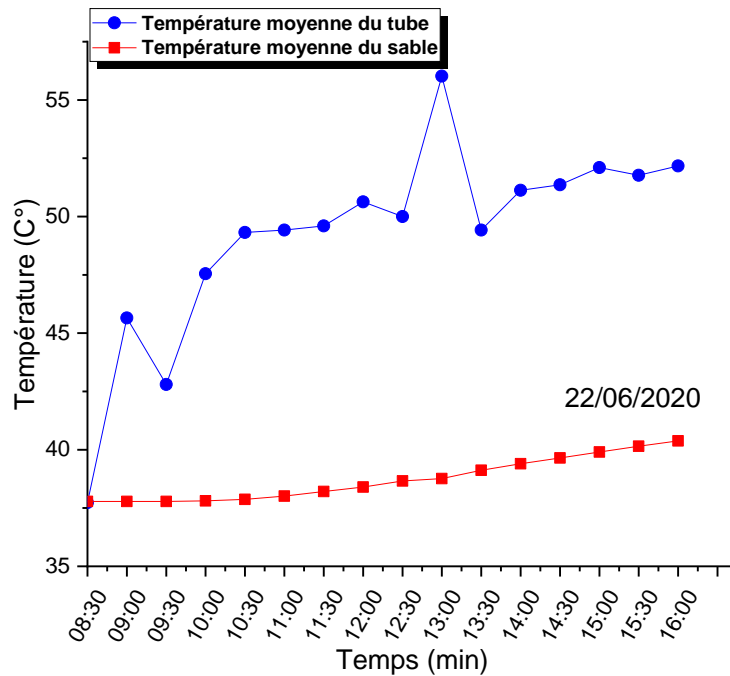


Figure IV.5. Evolution de la température moyenne du sable et des tubes pendant le chargement intermittent ($\dot{m}= 0.036$ kg/s).

Chapitre IV: Résultats et discussions

La figure IV.6 montre la variation de la température du sable et des tubes dans le cas de déchargement pour un débit de 0.044 kg/s. Le déchargement prend deux jours consécutifs entre 08:30 à 16:30, où on observe que la température de la cuve de sable diminue progressivement au cours de ces deux jours de 35 à 29 °C. Pendant le déchargement, le chauffage de l'eau avec résistance thermique a été interrompu durant cette période, alors que pour accélérer le déchargement de la chaleur stockée dans la cuve de sable, on a utilisé un système de refroidissement de l'eau par ajout de morceaux de glaces introduit directement dans le réservoir d'eau.

L'analyse des profils des températures Figures (IV.6 et VI.7), montre que la durée de déchargement est assez importante pour atteindre la température initiale de 22 °C comparativement avec celle de chargement, ceci est dû par manque d'un système de déstockage de la chaleur par un échangeur de chaleur intégré à la cuve de stockage, telles que les applications de chauffage des bâtiments et des serres agricoles en période d'hivers où les températures sont très basses.

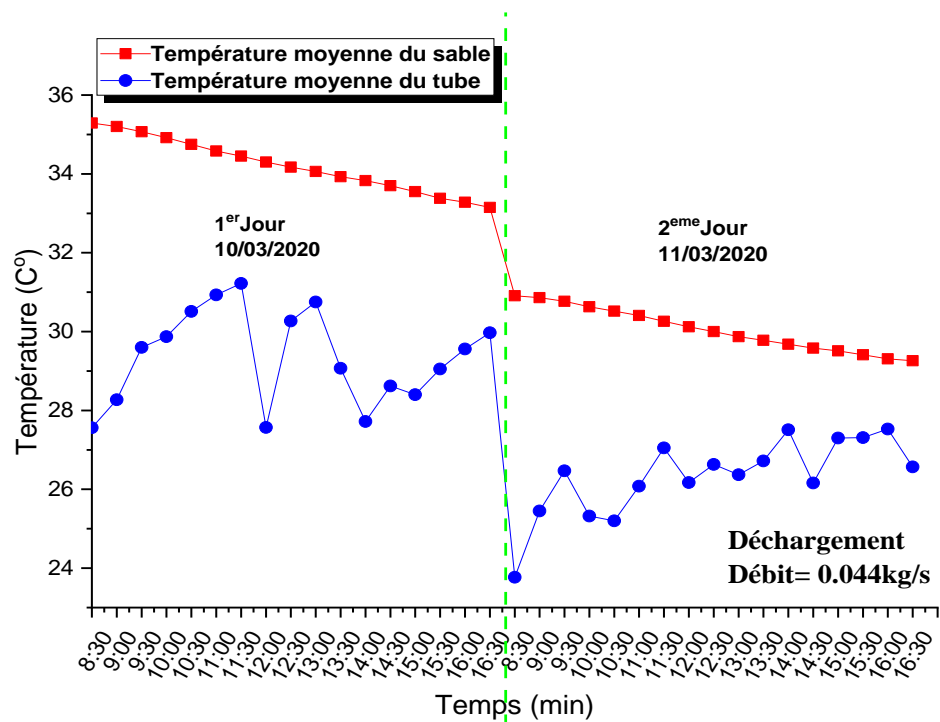


Figure IV.6. Variation de la température du sable et des tubes pendant le déchargement.

D'autre part, l'évolution de la température moyenne dans le sable montre que la diminution du débit de l'eau de chauffage en phase de chargement accélère le transfert de

Chapitre IV: Résultats et discussions

chaleur entre l'échangeur de chaleur serpentin et le sable, ce qui conduit à une élévation rapide de la température du sable.

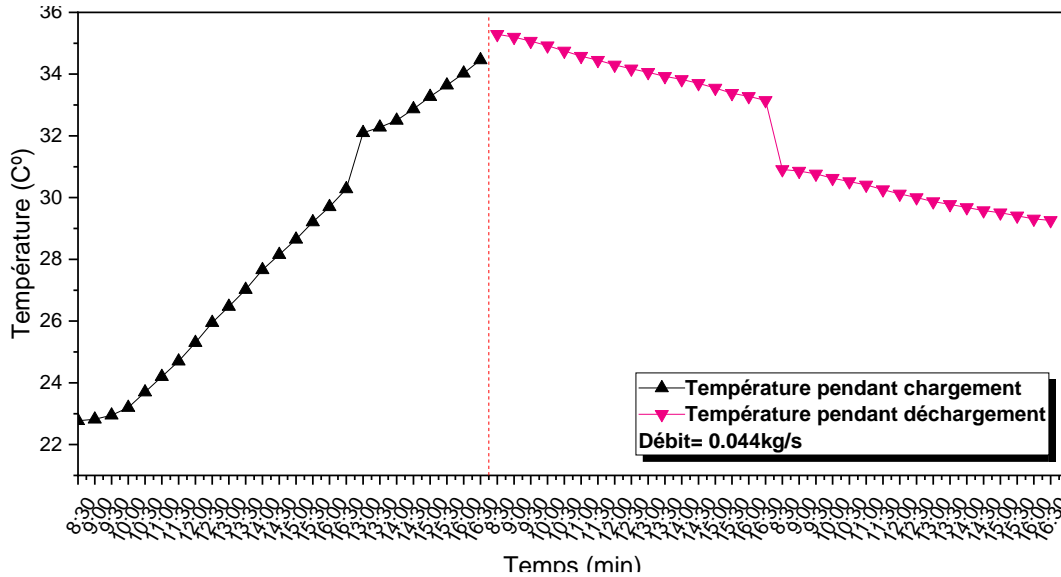


Figure IV.7 : Evolution de la température moyenne dans la cuve de stockage en phase de chargement et déchargement ($\dot{m} = 0.044\text{kg/s}$).

IV.2.2. Variation de l'énergie stockée :

Les figures (IV.8, IV.9, IV.10, IV.11) représentent la variation d'énergie stockée en fonction du temps durant le chargement avec des débits de chargement de 0.044kg/s , 0.025kg/s , 0.036kg/s et intermittent (15min) respectivement, on remarque que l'énergie stockée continue d'augmenter avec le temps et prend presque la même allure pour les quatre débits. L'énergie stockée est donnée par la relation :

$$Q_{\text{stockée}} = (m \cdot C_p)_{\text{sable}} \cdot (T(t) - T_{\text{ini}})_{\text{sable}} \quad (\text{IV.1})$$

Chapitre IV: Résultats et discussions

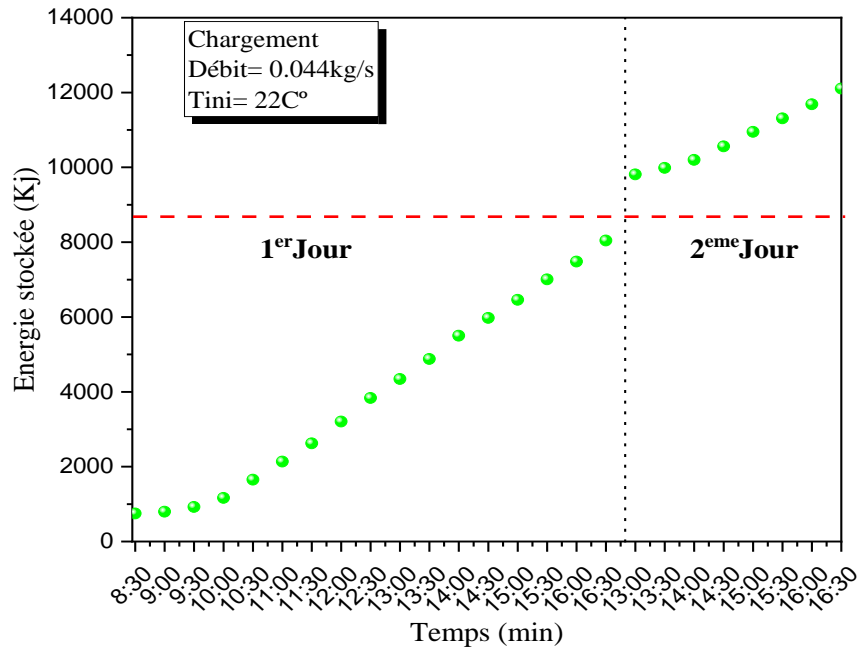


Figure IV.8. Evolution de l'énergie stockée dans la cuve de sable pendant le processus de chargement ($\dot{m}= 0.044\text{kg/s}$).

On remarque également que pour une durée de chargement identique de l'ordre de 07 heures de 08H:30 à 16H:30, la quantité de chaleur stockée avec un débit de chargement $\dot{m}= 0.025 \text{ kg/s}$ d'eau chaude peut atteindre 11000 KJ à 16H30 Figure (IV.9), alors qu'elle n'est au voisinage de 8800 KJ pour un débit de chargement $\dot{m}= 0.044\text{kg/s}$ Figure (IV.8) respectivement, pour une durée de fonctionnement identique et avec une température initiale identique de 22 °C.

Pour le même débit d'eau chaude égale à $\dot{m}=0.036 \text{ kg/s}$, l'énergie stockée obtenue est de l'ordre de 10000 KJ à 16 H avec un régime de chargement intermittent à raison de 15 minutes figure (IV.11), alors qu'elle n'est que de 5500 KJ à 16 H avec un régime de chargement normal, avec une température initiale de 30 °C.

Ce qui confirme qu'avec des débits de chargement faibles, on peut atteindre de bonnes performances de stockage de la chaleur dans le sable, d'autre part le régime de chargement intermittent paraît également comme une solution économique et performante.

Chapitre IV: Résultats et discussions

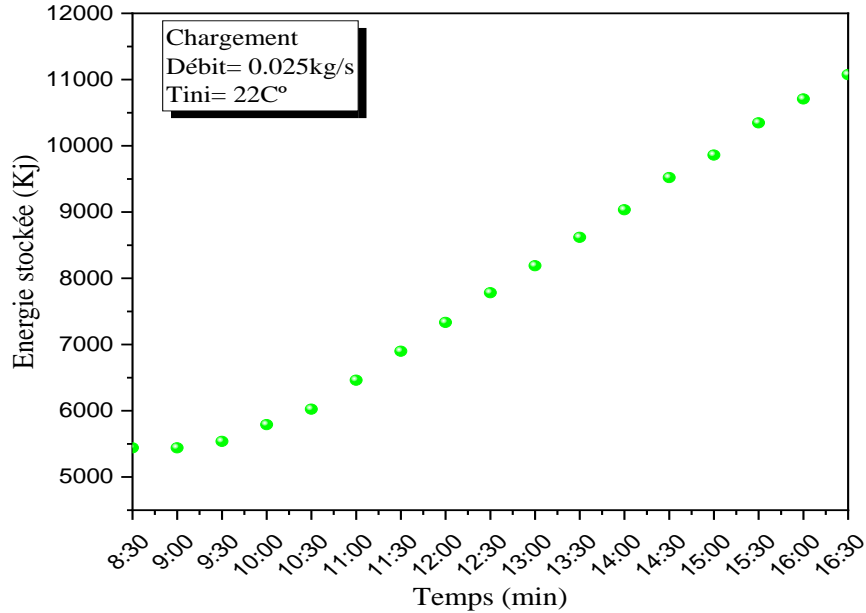


Figure IV.9. Evolution de l'énergie stockée dans la cuve de sable pendant le chargement
($\dot{m} = 0.025\text{kg/s}$).

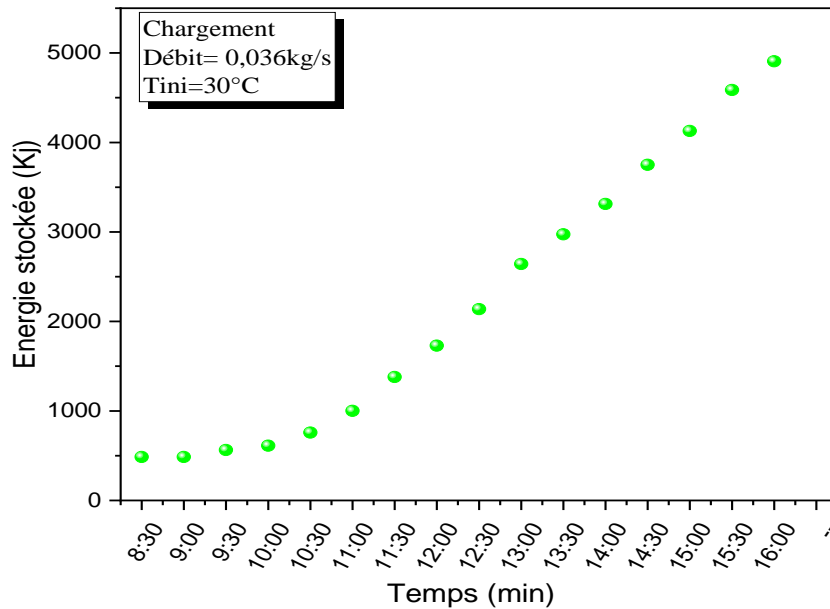


Figure IV.10. Evolution de l'énergie stockée dans la cuve de sable pendant le chargement
($\dot{m} = 0.036\text{kg/s}$).

Chapitre IV: Résultats et discussions

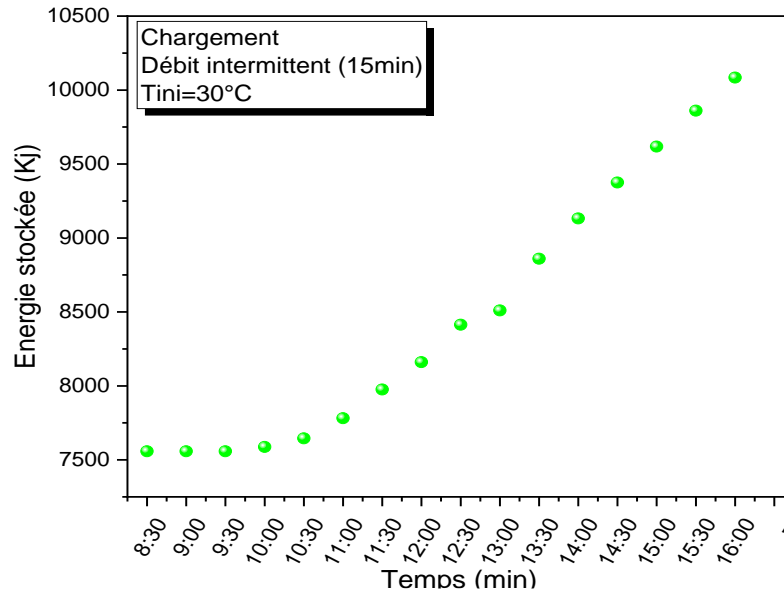


Figure IV.11. Evolution de l'énergie stockée dans la cuve de sable pendant le chargement en régime intermittent ($\dot{m}= 0.036\text{kg/s}$).

IV.2.3. Variation de l'efficacité :

La variation de l'efficacité de la cuve de stockage pour quatre débits de chargement 0.044, 0.025 et 0.036 Kg/s et intermittent respectivement, telles que illustrées par les figures IV.12, IV.13, IV.14 et IV.15, montre que l'efficacité démarre initialement avec de faibles valeurs, ensuite elle augmente progressivement sous l'effet de la diffusion et absorption par le matériaux de stockage de la chaleur véhiculée par le fluide caloporteur (eau chaude) pour atteindre une valeur maximale de l'ordre de 57 % avec un régime de chargement intermittent et avec un débit massique égale à 0.036 Kg/s Figure (VI.15).

Pour une durée de chargement identique de l'ordre de 07H30, l'efficacité de stockage est au voisinage de 32 % pour un débit de chargement $\dot{m}= 0.044\text{Kg/s}$ Figure (IV.8), alors qu'elle de l'ordre de 35 % pour un débit de chargement $\dot{m}= 0.025 \text{ Kg/s}$ avec une température initiale respectivement identique de 22°C . D'autre part, pour un débit de chargement égale $\dot{m}=0.036 \text{ Kg/s}$ et avec une température initiale similaire de 30°C , l'efficacité peut atteindre 57% avec un régime intermittent, alors qu'elle de 22% avec le régime de chargement continu.

Autrement, un stockage efficace de la chaleur dans le sable, est obtenu pour des débits de chargement faibles et surtout avec des régimes intermittents.

Chapitre IV: Résultats et discussions

L'analyse des allures des courbes montre que l'énergie stockée et l'efficacité de chargement de la chaleur dans la cuve dépendent de la température instantanée du sable.

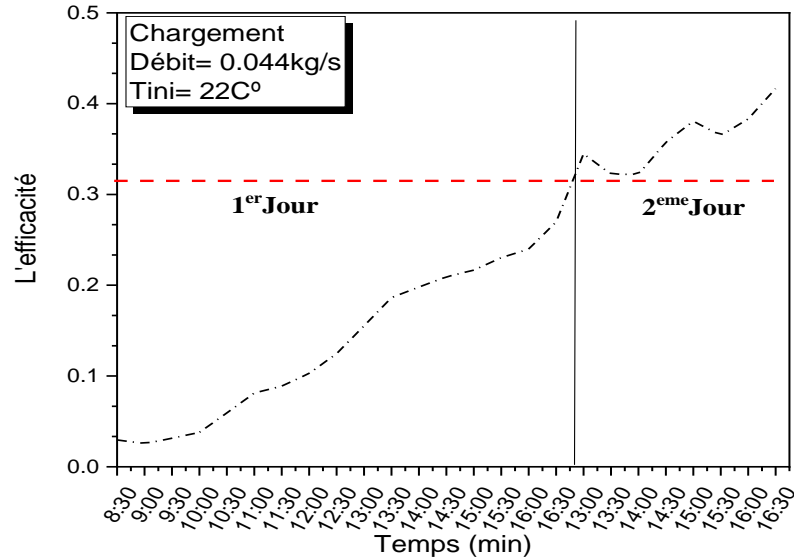


Figure IV.12. Evolution de l'efficacité dans la cuve de sable pour un débit de chargement $\dot{m} = 0.044 \text{ Kg/s}$.

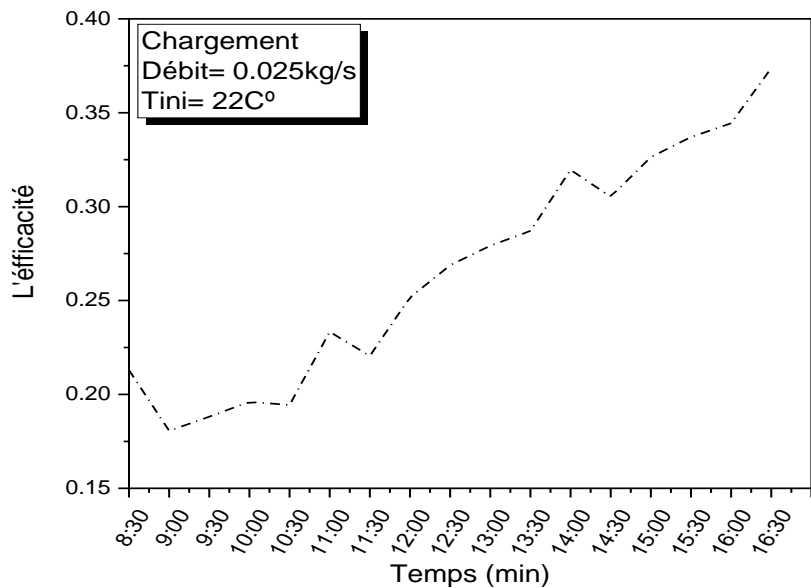


Figure IV.13. Evolution de l'efficacité dans la cuve de sable pour un débit de chargement $\dot{m} = 0.025 \text{ Kg/s}$.

Chapitre IV: Résultats et discussions

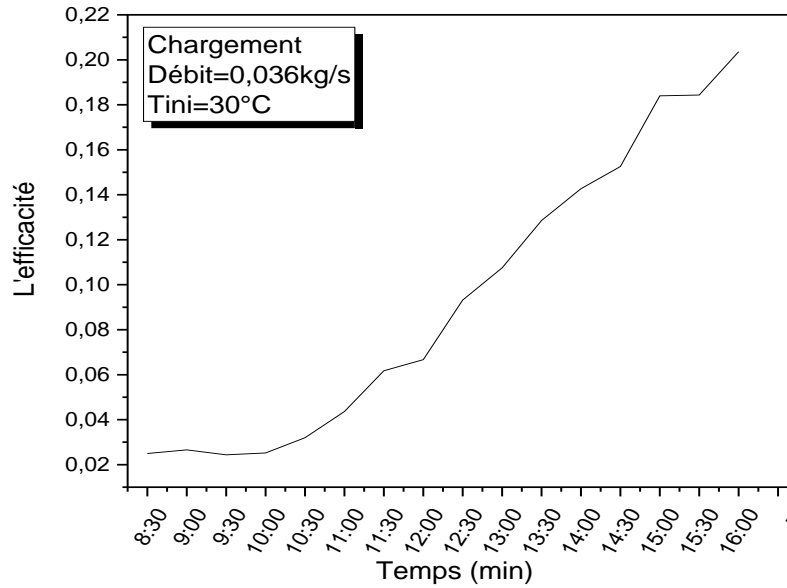


Figure IV.14. Evolution de l'efficacité dans la cuve de sable pour un débit de chargement $\dot{m}= 0.036Kg/s$.

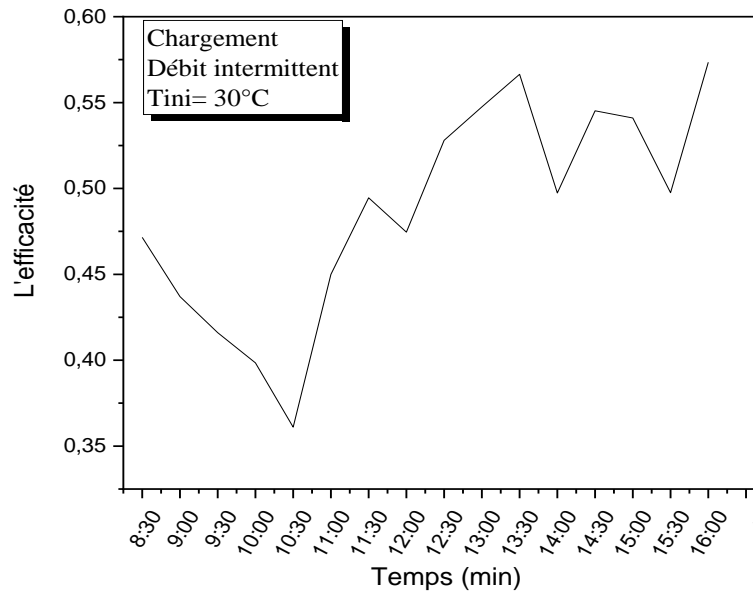


Figure IV.15. Evolution de l'efficacité dans la cuve de sable pour un régime de chargement intermittent $\dot{m}=0.036Kg/s$.

Chapitre IV: Résultats et discussions

IV.3. Conclusion :

A travers ce chapitre, on a essayé d'analyser les résultats obtenus sous formes des courbes qui traduisent le comportement thermique du prototype de stockage de la chaleur par le sable de la région de Biskra. Ces courbes illustrées sont basées sur des expériences réelles pour étudier la faisabilité de stockage de la chaleur par un matériau solide granuleux, le sable, à travers un dispositif expérimental pilote monté et conçu au laboratoire de génie mécanique de l'Université de Biskra.

A partir de cette étude expérimentale on a conclu qu'il est possible de stockée l'énergie thermique avec des moindres coûts possibles, on a pu montrer aussi l'intérêt de l'utilisation de sable comme milieu de stockage surtout pour les régions où ce matériau est disponible de façon abondante.

Chapitre

V

V.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on présente une étude de simulation numérique par le logiciel COMSOL Multiphysics 5.3 sur un système de stockage thermique par chaleur sensible avec un matériau poreux qui est le sable.

Comme nous le savons, la simulation numérique est devenue un élément essentiel et indispensable pour de nombreux scientifiques au même titre que l'approche théorique et l'expérimentation, Les mesures, de leur côté, permettent de quantifier les contraintes et les paramètres avec lesquels peuvent être réalisés les essais, qu'ils soient physiques ou numériques.

Il est très intéressant d'avoir un environnement de simulation qui inclut la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle étudié. C'est dans cette philosophie la que COMSOL Multiphysics a été développé. Différentes modules physiques existent sous COMSOL, parmi lesquels on trouve la mécanique des fluides, le transfert thermique, l'électricité, l'électromagnétisme, la chimie, la mécanique des structures... Il est possible de combiner plusieurs phénomènes physiques lors d'une même simulation numérique : c'est un des points forts de ce logiciel. [29]

C'est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire permettant de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel, la modélisation est appliquée à un système de stockage réel qui a été expérimentalement étudié précédemment, une configuration d'écoulement qui correspond à une échangeur serpentin immergé dans le sable (voir chapitre III).

V.2. Prise en main du logiciel :

Le processus de modélisation et de simulation numérique sous COMSOL Multiphysics implique plusieurs étapes :

- La définition globale des paramètres et des variables liées au modèle.
- La définition de la géométrie.
- La prise en compte des différents phénomènes physiques qui peuvent exister dans le problème considéré.
- La résolution du problème à l'aide d'un des différents solveurs.

Chapitre V : Simulation du comportement thermique par COMSOL

- La visualisation des résultats.

Lors du lancement de COMSOL, l'assistant Modèle (Model Wizard) permet de définir toutes les étapes de la modélisation brièvement évoquées ci-dessus. Ces étapes sont les suivantes [29] :

- ✓ Exécutez l'Assistant Modèle ce qui implique de choisir le système de coordonnées pour le modèle, la physique appropriée au problème, et le type d'étude que l'on souhaite effectuer ; stationnaire ou en fonction du temps.
- ✓ Définir les paramètres, les équations et les variables pertinentes pour le modèle (dans le répertoire Définitions Globales)
- ✓ Définir la géométrie du modèle (Geometry)
 1. Sélectionnez le ou les matériaux adéquats du modèle dans le répertoire (Materials).
- ✓ Choisir les conditions initiales et aux limites du modèle pour chaque phénomène physique étudié.
- ✓ Choisir la taille des éléments à utiliser pour le maillage ainsi que les différents types de maillage qui existent.
- ✓ Régler les paramètres du solveur et lancer les calculs dans le répertoire études (Study).
- ✓ Afficher les résultats souhaités de la manière la plus significative dans le répertoire résultat (Result).

V.3. Description de la configuration :

Cette étude vise à modéliser en 2D un système de stockage sensible. Il s'agit d'une cuve cubique contenant un matériau de stockage granulaire (sable) à l'intérieur duquel est installé un échangeur de chaleur constitué d'un faisceau de 16 tubes en cuivre de 16 mm de diamètre, d'une longueur $L = 16.85$ m. Ce dernier permet la circulation du fluide caloporteur à l'intérieur de l'échangeur en faisceau tubulaire rectiligne, dont les parois se trouvent directement en contact avec le sable, ce qui permettra la diffusion de la chaleur par conduction pure du fait que le matériau est constitué de granulés de sable très fins.

Durant cette étude de simulation numérique par COMSOL Multiphysics 5.3, vue la complexité de l'écoulement dans une conduite en forme de serpent et la différence de température faible, estimée à environ d'un degré ; on a considéré la symétrie avec une

Chapitre V : Simulation du comportement thermique par COMSOL

configuration plus simple, il s'agit d'un échangeur serpentin Figure (V.1), immergé dans la cuve de sable qui a pratiquement les mêmes dimensions que le dispositif expérimental considéré.

V.4. Modélisation 2D :

Le modèle thermique est développé en se basant sur les hypothèses suivantes :

- ✓ Les paramètres thermo physiques sont supposés constants.
- ✓ Les parois des tubes ont une faible épaisseur ce qui implique une résistance thermique négligeable.
- ✓ La chute de pression dans les tubes est négligeable.
- ✓ La cuve de stockage est parfaitement isolée.
- ✓ Le matériau de stockage est isotrope.
- ✓ Le transfert de chaleur entre les tubes et le sable s'effectue par une conduction pure.
- ✓ La température des tubes en contact avec le milieu de stockage est imposée constante.

Pour des résultats plus précis et pour avoir plus de détails sur le comportement thermique du sable, on a considéré une autre configuration simple avec un changement de vision (vue de dessus), il s'agit d'un échangeur à faisceaux constitué de 16 tubes rectilignes Figure(V.3), à condition que l'hypothèse soit ajoutée c'est que l'écoulement du fluide chaud s'effectue du haut vers le bas en même temps dans les 16 tubes.

Une coupe dans le plan (x, y) permet d'obtenir la configuration en deux dimensions du système de stockage (figure V.1 et V.3)

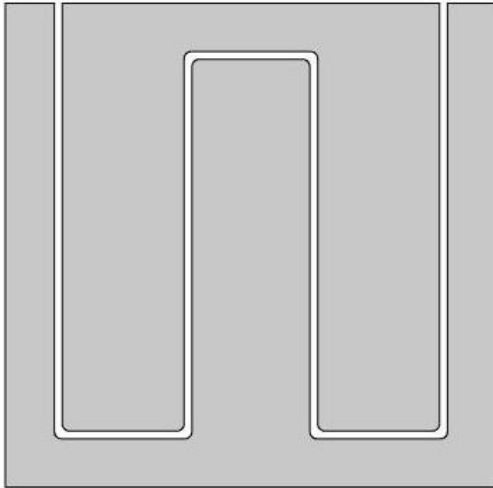


Figure V.1. Configuration en 2D du domaine d'étude (Vue de côté).

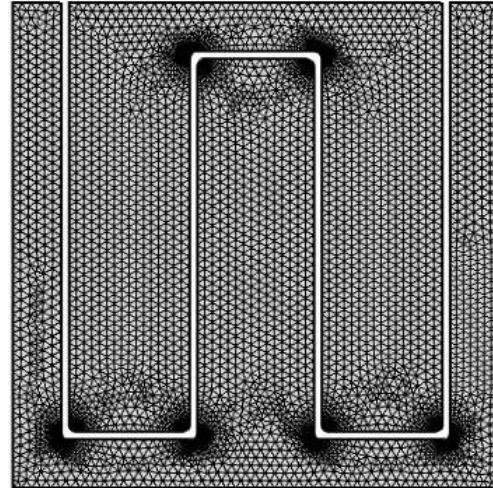


Figure V.2. Maillage du domaine d'étude (Vue de côté).

La discrétisation du domaine d'étude est schématisée dans la figure V.2 et V.4, pour cela deux maillages triangulaires de 8779 éléments (vue coté) et de 47626 (vue de dessus) sont adoptés.

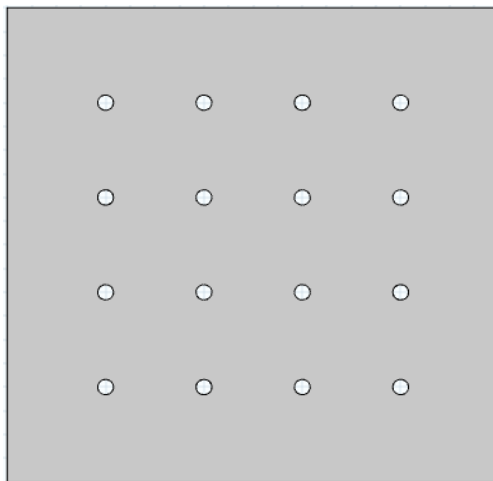


Figure V.3. Configuration en 2D du domaine d'étude (vue dessus).

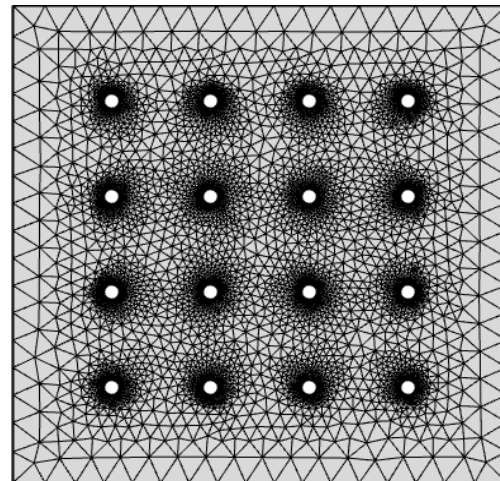


Figure V.4. Maillage du domaine (vue dessus).

Chapitre V : Simulation du comportement thermique par COMSOL

V.4.1. Equations gouvernantes :

En adoptant les hypothèses citées ci-dessus, le transfert de chaleur dans le sable est géré par l'équation de la chaleur en régime transitoire dans un solide donnée par l'équation :

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} = k_s \nabla^2 T \quad (\text{V.1})$$

ρ_s : Densité du solide [kg/m³].

C_{ps} : Capacité thermique à pression constante du solide [J/kg.K].

k : Conductivité thermique du solide [W/m.K].

T : Température du milieu solide [K].

Cette équation est accompagnée des conditions aux limites suivantes :

$$A (x = 1/2) \quad -n(-k_s \Delta T) = 0 \quad (\text{V.2})$$

$$A (x = -1/2) \quad -n(-k_s \Delta T) = 0 \quad (\text{V.3})$$

$$A (y = 1/2) \quad -n(-k_s \Delta T) = 0 \quad (\text{V.4})$$

$$A (y = -1/2) \quad -n(-k_s \Delta T) = 0 \quad (\text{V.5})$$

Sur les parois horizontales représentant la surface des tubes en contact avec le milieu de stockage une température est imposée : $T = T_p$

Et à l'état initial ($t=0$), la température du sable est T_{ini} .

Les propriétés physiques qui ont été déterminés auparavant dans la section précédente [13], seront utilisées pour cette partie.

Tableau V.1. Paramètres d'entrées du modèle.

	C_p	ρ	k
Sable	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	kg.m ⁻³	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	920	2700	1

V.3. Résultats de la simulation :

Le processus du chargement d'une cuve de sable de 01 m de côté est simulé, d'autre part comme il est indiqué auparavant, les propriétés physiques sont mentionnées dans le tableau V.1.

Le sable est initialement à une température ambiante, par contre la température des parois des tubes de l'échangeur est imposée à 60 C°.

Dans le but de visualiser le comportement thermique du sable dans la cuve de stockage, la distribution de la température des surfaces de la cuve de sable, pendant le chargement est présentée d'après les figures V.5 et V.7.

Les figures V.6 et V.8 présentent la direction de la propagation du flux de chaleur ainsi que les contours des températures de vue de côté et de dessus respectivement.

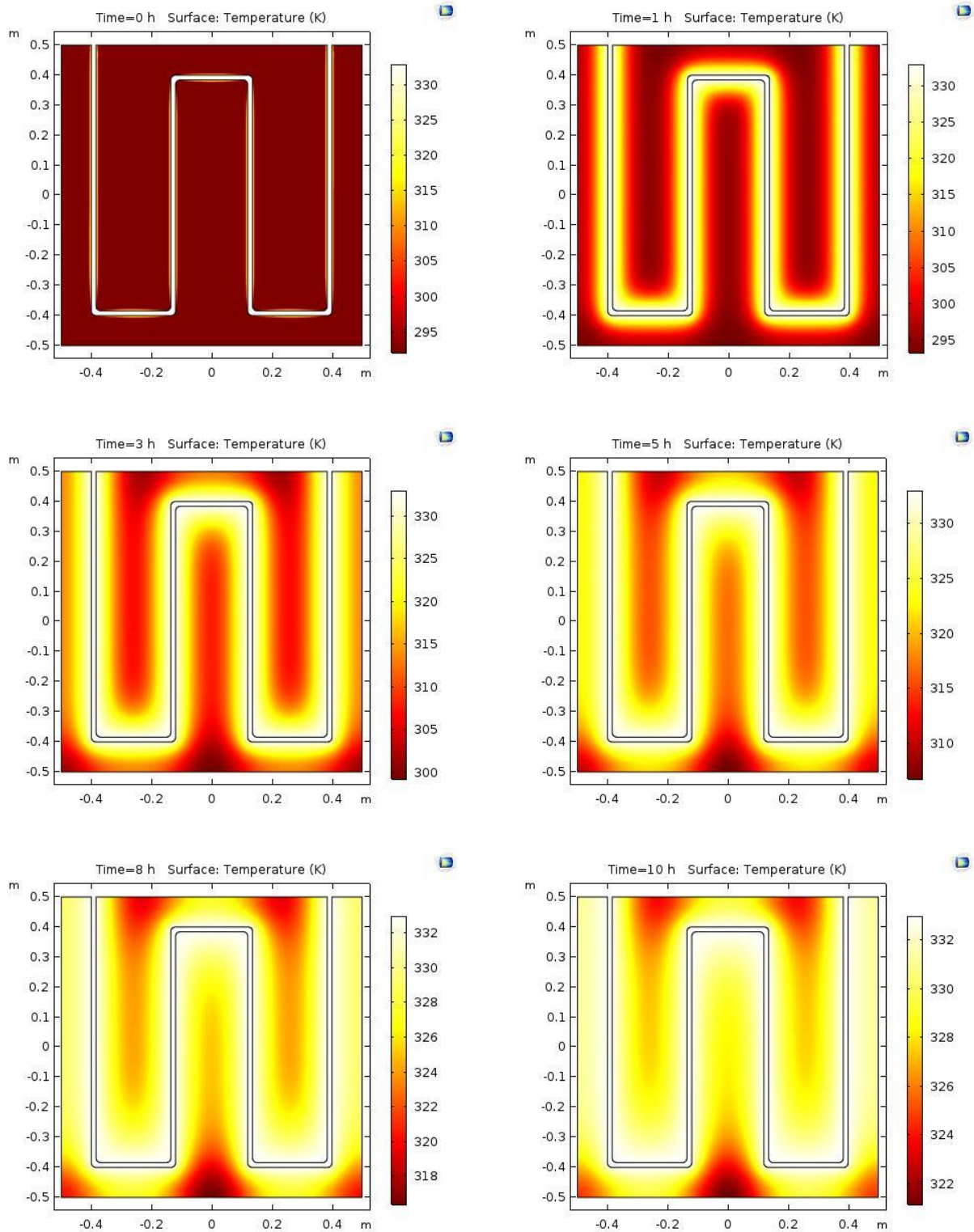


Figure V.5. *Distribution de la température en fonction du temps dans la cuve de sable pendant le chargement (Vue de côté).*

Chapitre V : Simulation du comportement thermique par COMSOL

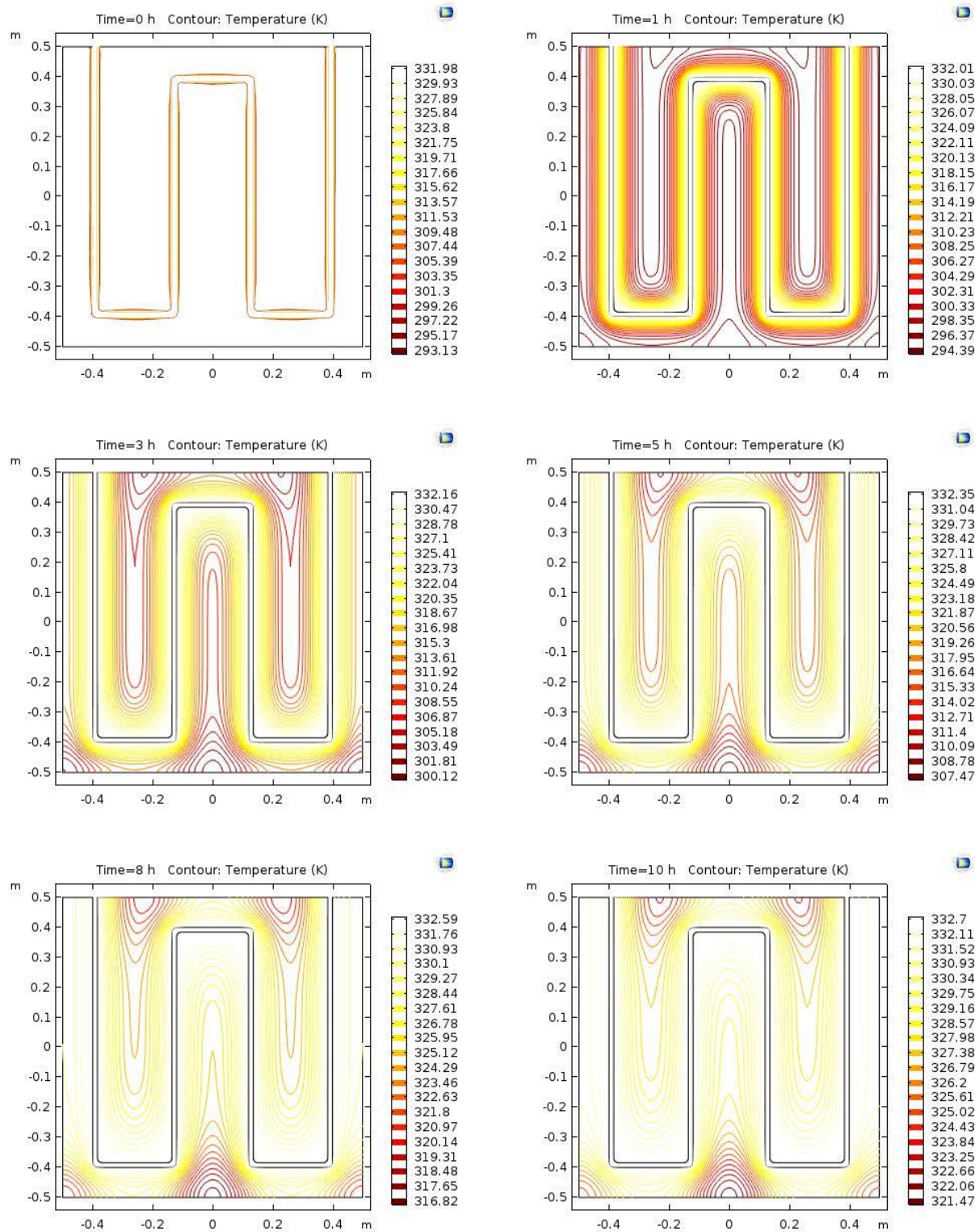


Figure V.6. Contour de la température dans la cuve de sable et direction du flux de chaleur total en fonction du temps pendant le chargement (Vue de côté).

Chapitre V : Simulation du comportement thermique par COMSOL

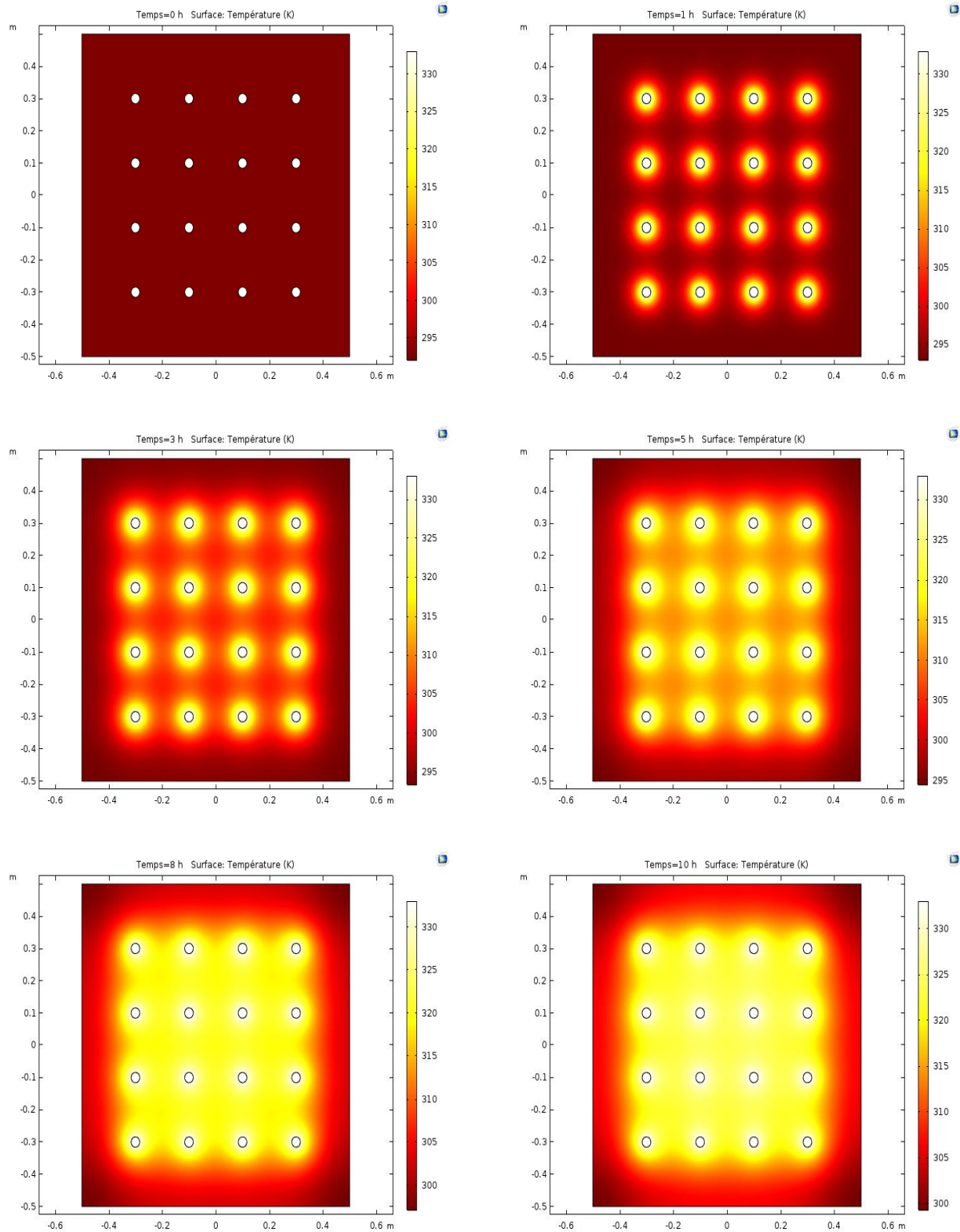


Figure V.7. Distribution de la température dans la cuve de sable en fonction du temps pendant le chargement (Vue de dessus).

Chapitre V : Simulation du comportement thermique par COMSOL

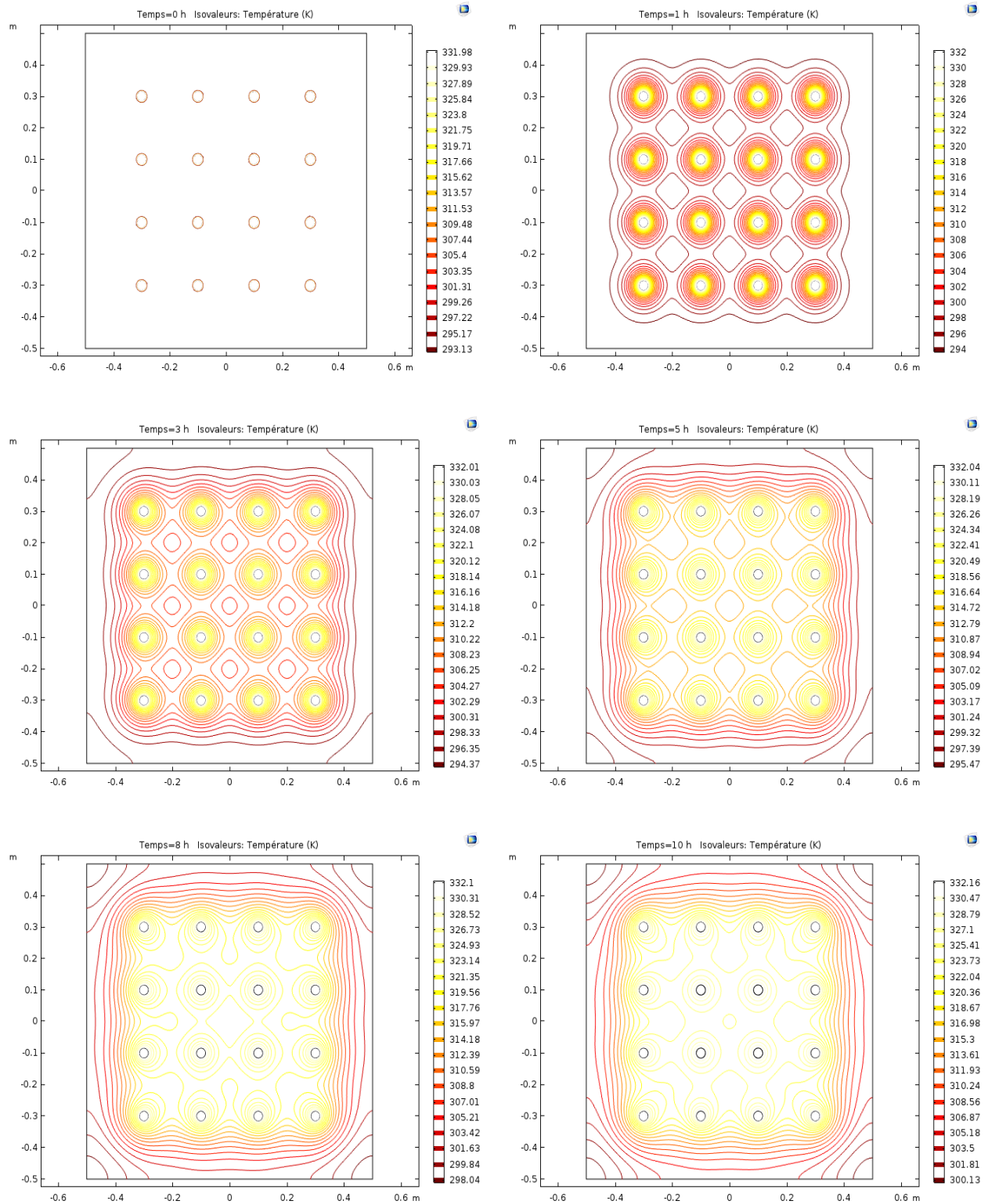


Figure V.8. Contour de la température dans la cuve de sable et direction du flux de chaleur total en fonction du temps pendant le chargement (Vue de dessus).

Chapitre V : Simulation du comportement thermique par COMSOL

A l'état initial à $t = 0$ s, la température du lit est uniforme et égale à la température initiale. Vu que les grains de sable sont très petits, par conséquent le transfert de chaleur dominant est effectué par conduction thermique des tubes vers les grains de sable ; ce dernier commence à s'échauffer progressivement au fur et à mesure en fonction du temps, où on remarque que la diffusion de la chaleur dans le lit de sable suit le sens de l'écoulement d'eau chaude dans l'échangeur de chaleur. Après une heure de chargement, la température du sable est au voisinage de $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ et continue d'augmenter pour atteindre $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ après 5 Heures de fonctionnement continu. Après environ 10 Heures, il atteint sa température maximale de l'ordre $56\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Contrairement, aux résultats de la simulation par COMSOL, les expérimentations réellement réalisées par nous-même, telle que mentionné dans le chapitre IV, montre qu'il fallait environ 12 Heures de chargement continu pour atteindre une température maximale mais qui est inférieure à $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ qui correspond à 10 Heures de fonctionnement estimée par COMSOL dans la cuve de sable, cet écart est dû par le fait que les hypothèses considérées au départ sont très loin de la réalité, d'autre part, les paramètres thermo physiques du sable de la région de Biskra adoptés dans notre cas sont tirés de certains travaux rencontrés dans la littérature.

V.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons fait appel à la simulation numérique, qui est un outil à la fois performant et économique pour avoir plus de détails sur le comportement thermique d'un système de stockage de la chaleur utilisant le sable. La simulation numérique permet d'étudier un nombre important de cas et de configurations d'écoulement en fonction de certains paramètres déterminés a priori.

Conclusion

générale

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire comporte une étude expérimentale et numérique sur une cuve de stockage de la chaleur réalisée au laboratoire du génie mécanique de l'université de Biskra, cette étude a pour objectif d'analyser le comportement thermique du sable qui a été utilisé comme un milieu de stockage.

Dans un premier temps, nous avons procédé à la conception d'un système de stockage constitué d'une cuve de forme cubique avec un échangeur de chaleur serpentin où circule le fluide caloporteur (eau) provenant de la cuve de chauffage d'eau, l'échangeur est immergé dans une enceinte cubique contenant le sable.

Pour calculer les performances thermiques du dispositif expérimental, notamment l'efficacité thermique et la quantité de chaleur stockée, nous avons mené plusieurs expériences avec un chargement dans certaines conditions telles que le débit et la température de l'eau (chargement/déchargement) pour mettre en évidence l'évolution de la température dans le sable.

Nous avons également réalisé une modélisation numérique en 2D pour la même configuration considérée dans la partie expérimentale avec deux vues pour plus de détails sur le comportement thermique du sable.

Les conclusions tirées à partir des résultats présentés dans les chapitres précités peuvent être résumées par les points suivants :

- Le phénomène du stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible dans les milieux solides est une option intéressante de point de vue coûts d'investissement, en particulier le stockage dans les milieux poreux (granulaires), il est de grande importance si on regarde le nombre des travaux publiés dans ce domaine.
- A travers cette étude on a pu montrer qu'il est possible de stocker de l'énergie thermique avec des moindres coûts possibles.
- 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/déchargement et d'atteindre une efficacité élevée dans un intervalle de temps réduit.

Conclusion Générale

Il convient, également, d'approfondir la présente étude en considérant le couplage de l'enceinte de stockage à un capteur solaire à eau pour mettre en évidence la faisabilité d'un système de stockage de la chaleur par l'énergie solaire thermique, notamment dans les régions arides et semi arides où l'ensoleillement journalier est important et abondant.

Références:

- [1] Dincer and M. Rosen, " Thermal energy storage: systems and applications", 2nd ed. John Wiley & Sons, pp. 84/141, 2011.
- [2] J. Xu, R. Wang, and Y. Li, "A review of available technologies for seasonal thermal energy storage", Solar energy, vol. 103, pp. 610-638, 2014.
- [3] (22-10-2019).Stockage de la chaleur - Techniques de l'Ingénieur .[Online].
<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/stockage-de-lenergie-42638210/stockage-de-la-chaleur-be8597/>
- [4] (22-10-2019).Stockage d'énergie thermique dans les centrales électro solaire – Asprom. [Online]
http://www.asprom.com/stockage_energie/olives.pdf
- [5] (23-10-2019). Le stockage thermique dans les réseaux de chaleur.[Online]
http://www.amorce.asso.fr/media/filer_public/6d/e8/6de8899d-1a6c-4816-92e6-ad2384fa38ad/rct45-_le_stockage_thermique_dans_les_reseaux_de_chaleur.pdf
- [6] (24-10-2019).Énergies renouvelables Stocker la chaleur de l'été pour l'hiver.[Online]
<https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/energies-renouvelables-stocker-la-chaleur-de-l-ete-pour-l-hiver.17635>
- [7] A. Akrouche, « Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase », Mémoire du Magister, Université de M'Hamed Bougara -Boumerdes, 2011.
- [8] 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.
- [9] M. Boutaoui, « Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique », Mémoire du Master, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 2016.
- [10] S. Berreksi et S. Latarsa, « Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule sphérique », Mémoire du Master, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 2016.
- [11] M. Pierre Pedro, «Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique», Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2013.

- [12] G. Abassi, « Etude numérique des transferts de chaleur et de masse lors de la fusion d'un matériau à changement de phase », Mémoire du Master Académique, Université de Mohamed Larbi Ben M'hidi- Oum El bouaghi, 2018.
- [13] N. Mahfoudi, « Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide », Thèse de Doctorat, Université de Mohamed Khider de Biskra, 2016.
- [14] L. Prasad et P. Muthukumar, « Design and optimization of lab-scale sensible heat storage prototype for solar thermal power plant application », *Solar Energy*, Vol.97, pp. 217-229, 2013.
- [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(30), 2016.
- [16] A. Fernandez, M. Martinez, M. Segarra, al. « Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol.94, pp.1723-1729, 2010.
- [17] N. Mahfoudi, A. Khachkouch, A. Moummi, B. Benhaoua, M. El Ganaoui, « Design and characterization of a portable heat storage facility », *Mechanics and Industry*, Vol.16, pp.411, 2015.
- [18] N. Mahfoudi, A. Moummi, M. El Ganaoui. « Sand as a Heat Storage Media for a Solar Application: Simulation Results » .*Applied Mechanics and Materials*, Vol.621, pp.214-220, 2014.
- [19] B. Dhifaoui, S. Benjabrallah, A. Belghith, al. « Experimental study of the dynamic behavior of a porous medium submitted to a wall heat flux in view of thermal energy storage by sensible heat », *International Journal of Thermal Sciences*. Vol.46, pp.1056-1063, 2007.
- [20] R. Benard, G, Menguy, M, Schwartz, « Le rayonnement solaire. Conversion thermique et application», *Technique et documentations*, Paris, 1980.
- [21] S.A. Kalogirou, « Solar energy engineering», processes and system, 1st ed, ELSEVIER 2009.
- [22] Godefroy Thiombiano, « Contribution à l'étude du stockage de l'énergie solaire par chaleur sensible », Thèse de Doctorat, Université de Dakar, 1982.

- [23] Ahmed J. Al Edhari, «Thermal energy storage using natural porous media », Mémoire du Master, Université d'État de Californie, Fullerton, 2017.
- [24] M. Trad, « Convection naturelle et forcée dans un cylindre vertical poreux. Analyse numérique du transfert de chaleur et influence de la matrice solide sur l'écoulement », Thèse de Docteur en Sciences, Université de Batna, 2015.
- [25] Z. Bekkari et M. Messaoudi, « Effet de la géométrie de l'échangeur de chaleur sur les performances d'un réservoir de stockage thermique solide », Mémoire du Master académique, Université Echahid Hamma Lakhder – El-oued, 2015/2016.
- [26] Nield, D. A. et Bejan, A, « Convection in Porous Media », 3rd Edition, Springer, New York, 2006.
- [27] Ana-Maria Bianchi et al, « Transferts thermiques », presses polytechniques et universitaire Romandes, Lausanne, 1ère édition, 2004.
- [28] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, « Fundamentals of heat and mass transfer », 5th ed, New York: J. Wiley & Sons, 2002.
- [29] N. Fekiri, « Transferts de chaleur dans des éléments micro et nano structurés : Simulation et expérimentation par thermographie infrarouge et microscopie SThM », Rapport de stage, Université de Lorraine, 2013.

Résumé :

Dans ce travail on s'intéresse à la conception et réalisation d'un dispositif de stockage de la chaleur pour connaître l'importance du stockage de chaleur, en étudiant le comportement thermique du matériau écologique et économique en même temps, qu'il s'agit de sable. Cette étude est réalisée par modélisation, simulation et expérimentation.

Cette étude consiste à réaliser une unité de stockage cubique et à effectuer plusieurs expériences sur celui-ci. En parallèle une étude numérique a été menée par le logiciel COMSOL Multiphysics. Les résultats ont montré l'intérêt de l'utilisation du sable pour le stockage de l'énergie thermique, et cela en analysant son comportement thermique lors des processus de chargement et de déchargement.

Mots clés : Stockage thermique, sable, milieux poreux, échangeur de chaleur.

Abstract:

In this work, we are interested in the design and the realization of a heat storage device to know the importance of heat storage, by studying the thermal behavior of ecologically and economically material, that it is sand. This study is carried out by modeling, simulation and experimentation.

This study consists of making a storage unit and carrying out several experiments on it. In parallel, a numerical study was carried out by the COMSOL Multiphysics software, and the results show the interest of using sand for the storage of thermal energy, and this by analyzing its thermal behavior during a charge / discharge processes.

Keywords: Heat storage, sand, porous media, heat exchanger.

ملخص :

في هذا العمل نهتم بتصميم و إنجاز جهاز لتخزين الحرارة وذلك لمعرفة أهمية تخزين الحرارة المتوفرة من خلال دراسة السلوك الحراري لمادة الرمل كوسط بيئي و اقتصادي. أجريت هذه الدراسة من خلال النمذجة والمحاكاة والتجريب.

هذه الدراسة تتمثل في إنجاز و تركيب خزان ذو شكل مكعب، أجريت العديد من التجارب عليه ، بالموازاة لذلك أجريت دراسة عددية بواسطة برنامج COMSOL Multiphysics. النتائج المتحصل عليها تظهر الفائدة من استخدام الرمل كوسط حراري و ذلك عن طريق تحليل سلوكه الحراري خلال دورة الشحن و التفريغ.

الكلمات المفتاحية : التخزين الحراري الرمل الوسط المسامي المبادل الحراري.