

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Énergies renouvelables

Spécialité : Énergies renouvelables en mécanique

Thème

Etude expérimentale d'échangeur de chaleur pour améliorer
l'efficacité de réservoir de stockage thermique

Devant le jury composé de :

Laouini abdeljalile
Karoua houcine
Megdoud soufiane

Président
Examineur
Encadreur

Présenté par :

- CHERIET AHMED ZAKI
- KHIARI LAID

2017-2018

Remerciements

Ce mémoire de master est le résultat de travail de recherche de plusieurs mois.

Nous souhaitons adresser tous nos remerciements aux personnes qui nous ont apporté leur soutien et qui ont ainsi contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Nous remercions vivement et chaleureusement Dr. Megdoud Soufiane encadreur

de ce mémoire, pour nous avoir guidé et soutenu tout au long de ce mémoire.

Nous la remercions particulièrement pour la confiance qu'elle nous a accordée, pour sa rigueur scientifique, pour sa patience et pour ses conseils judicieux qui ont contribué à la réalisation et à l'accomplissement de ce travail.

Nous tenons à remercier également les membres de jury d'avoir bien accepté d'examiner notre travail.

Nous exprimons notre reconnaissance aux enseignants du département de Génie Mécanique à l'université Hamma Lakhdar d'El Oued, pour l'encadrement pédagogique durant ces deux années de formation de master.

Nous adressons enfin nos remerciements à nos familles et nos amis pour leurs encouragements le long de la réalisation de ce travail.

Dédicace

Nous avons le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :

Nos chers parents, qui nous toujours soutenu dans notre études.

Tous nos frères et soeurs chacun avec son nom.

Tous nos familles chacun son nom.

Tous nos enseignants chacun son nom.

Tous nos collègues chacun son nom.

Chaque personne qui nous aidé chacun son nom.

Promo énergie renouvelable en mecanique 2017/2018

SOMMAIRE

Listes des figures.....	iii
Listes des tableaux.....	vi
Nomenclature :.....	vii
Symboles grecs :	vii
Indices et exposants :	vii
Introduction générale.....	1

Chapitre I: Stockage de Chaleur technique et matériaux

Introduction	3
1. Synthèse bibliographique (état de l'art).....	4
2. Energie solaire :.....	5
2-1-Importance de l'énergie solaire.....	5
2-2-L'importance de stockage de chaleur :	6
3. Etat de l'art du stockage thermique – modes de stockage	8
3.1 Stockage par chaleur latente	8
4.2. Stockage par chaleur sensible.....	10
4.3. Lit entassé de roches.....	13
4.4. Comparaisons des différents types de stockage thermique	17
Conclusion.....	18

Chapitre II Modélisation mathématique

Introduction	20
1. Notions fondamentales	21
1.1. La température.....	21
1.2. La chaleur	21
1.3. La relation entre température et chaleur	21
1.4. La Conservation de l'énergie.....	22
2. Les principaux modes de transfert de chaleur	22
2.1. Conduction	22
2.2. Convection:.....	24
2.3. Rayonnement.....	24
3. Modélisation du comportement thermique d'un système.....	26
3.1 Description de la configuration étudiée.....	26
3.2. Modélisation 2D	26
4. Modélisation mathématique :	28
4-1 Nombres adimensionnels:	29
Conclusion.....	30

Chapitre III Etude Expérimentale

Introduction:	32
1.Hypothèses:	34
2.Conception du système de stockage:	34
2.1. Description de la configuration étudiée :	35
3.- Matérielle le mesure de température:	36
3-1-Thermomètre:.....	36
3-2-Thermocouple :	36
3-3- Équipement utilisé pour mesurer le poids :.....	37
4.Etude expérimentale sur le réservoir du stockage :	37
4-1 Nombres adimensionnels:	37
5.Montage du module de stockage :	37
5-1 - le capteur solaire:	37
5-2-Fabrication du l'unité de stockage:	38
5-3 Composant l'unité de stockage (module plan):	39
6- Résultats obtenus à partir des mesures :	40
7- Les résultats dans le cas de Stockage de chaleur dans le sable:	41
7-1-Efficacité du stockage dans le sable:	43
8- Les résultats dans le cas de stockage de chaleur dans le plâtre(Gypse)	44
8-1 - L'énergie stockée dans le plâtre:	45
8-2 - Efficacité de stockage dans le plâtre:	46
9- résultats dans le cas de stockage de chaleur dans le sel:	46
9-1- L'énergie stockée dans le sel:	48
9-2 - Efficacité de stockage dans le sel:	48
10-Les résultats dans le cas de stockage de chaleur dans le (plâtre+sel):.....	49
10-1 L'énergie stockée dans le mélange (Plâtre + sel):	50
10-2 Efficacité de stockage dans le (plâtre +sel):	51
11 -Les résultats dans le cas de stockage de chaleur dans le rose de sable (les roches):	51
11-1-L'énergie stockée dans le rose de sable:.....	53
11-2- Efficacité de stockage dans le rose de sable :	53
12- Estimation de l'efficacité globale des matériaux et du module plan :	54
❖Comparaison numérique :	54
Conclusion général	56
Bibliographies	55

Listes des figures

Figure I-1 illustre les spectres d'irradiations solaires atteignant l'atmosphère et le sol

Figure I-2 : Décalage saisonnier entre l'irradiation solaire et la demande de chaleur

Figure I-3 : Evolution de la consommation d'énergie par région

Figure I-4 : Les différentes étapes de stockage de la chaleur par un matériau en fonction de la température.

Figure I-5 : Classification des matériaux à changement de phase (MCP)

Figure I-6 : Les concepts de stockage de la chaleur sensible à haute température

Figure I-7 : Schéma de principe de fonctionnement d'une unité de stockage de lit entassé de roches.

Figure I-8 : Stockage thermocline sur lit de roche

Figure I-9 : Echanges de chaleur dans un lit de roches

Figure I-10 : Les différentes formes de stockage thermique

Figure II.1. Lisent de la chaleur et la températur

Figure II.2. Accumulation de la quantité de chaleur

Figure II.3. Représentation sur un élément de volume, du flux thermique dans les trois directions.

Figure II.4. Transfert de chaleur par convection à la surface d'un solide

Figure II.5. Transfert de chaleur par rayonnement à la surface d'un solide.

Figure II.6. Schéma physique de l'unité de stockage.

Figure II.7. Configuration en 2D du domaine d'étude ((a) coupe dans le plan xy, (b) symétrie considérée).

Fig. II.8.a: Schéma Unité de stockage par chaleur latente.

Fig. II 8.b : Module de stockage par chaleur latente

Listes des figures

Figure III.1 Moyenne annuelle globale reçu sur une surface horizontale de la région d'El Oued

Figure III.2: Schéma simplifié de l'unité de stockage.

Figure III.3: Schéma de principe du système de stockage expérimental.

Figure III.4 : Schéma de principe du système de stockage.

Figure III.5: Image thermomètre pour mesurer la température

Figure III.6: Image thermocouples

Figure III.7: Images du balance romain

Figure III.8: Images du capteur solaire

Figure III.9. l'image montre les étapes fabrication du l'unité de stockage

Figure III.10: Schéma dumodule plan de stockage : (1) les dimensions du module plan, (2) isolation, (3) photographie de module plan.

Figure III.11: dimensionnement de l'unité à l'intérieur.

Figure III.12: illustration simplifié de model plan de stockage thermique dans sable.

Figure III.13: Evolution temporelle de la température moyenne stocké dans le sable

Figure III.14 : Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de sable.

Figure III.15: Evolution du rendement instantané dans le module plan de sable

Figure III.16: illustration simplifié de model plan de stockage thermique dans le gypse.

Figure III.17: Evolution temporelle de la température moyenne du plâtre .

Figure III.18: Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de gypse

. Figure III.19: Evolution du rendement instantané dans le module plan de gypse.

Figure III.20: illustration simplifié de model plan de stockage thermique dans le sel

Figure III.21: Evolution temporelle de la température moyenne du sel.

Figure III.22: Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de sel.

Figure III.23: Evolution du rendement instantané dans le module plan de sel.

Listes des figures

Figure III.24: illustration simplifié de model plan de stockage thermique dans le (plâtre +sel).

Figure III.25: Evolution temporelle de la température moyenne du (gypse+sel).

Figure III.26: Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de (plâtre +sel).

Figure III.27: Evolution du rendement instantané dans le Module plan de (plâtre +sel).

Figure III.28: illustration simplifié de model plan de stockage thermique dans le rose de sable

Figure III.29: Evolution temporelle de la température moyenne du rose de sable.

Listes des tableaux

Tableau I-1 : Classification des MCP en fonction de la gamme de température de travail.

Tableau I-2 : Comparaison de l'air avec le Therminol VP1 et l'huile végétale de colza.

Tableau I-3 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de la chaleur.

Tableau III.1: Propriétés thermo physique de la matière.

Tableau III.2: Résultats de stockage de chaleur (mode de sable) date 30 /04 /2018.

Tableau III.3 Résultats de stockage de chaleur (cas de gypse) date 05 /05/2018.

Tableau III.4 Résultats de stockage de chaleur (cas de sel) date 03 /05/2018.

Tableau III.5 : Résultats de stockage de chaleur (cas de plâtre+sel) date 06 /05/2018.

Tableau III.6 : Résultats de stockage de chaleur (cas du rose de sable) date 07 /05/2018.

Listes des tableaux

Nomenclature :

C_p	chaleur spécifique	$J.Kg^{-1}.k^{-1}$
E	quantité d'énergie	J
H	l'enthalpie	$J. Kg^{-1}$
h	coefficient d'échange thermique superficiel	$m^{-2}.k^{-1}$
K	la conductivité thermique	$W .m^{-1}.k^{-1}$
L	Chaleur latente de changement de phase	$J. Kg^{-1}$
m	masse	Kg
n	nombre de mole	mol
Q	quantité de chaleur	J
T	température	K
t	temps	min

Symboles grecs :

Δ	variation
P	la masse volumique $kg.m^{-3}$
τ	la constante de temps
θ	température adimensionnel
μ	la viscosité dynamique $kg/m.s$
η	rendement

Indices et exposants :

MCP	Matériau à Changement de Phase
ZF	ZONE FROID
ZC	ZONE CHAUD

Introduction générale

Introduction Générale

Aujourd'hui, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique. La limitation de la quantité de ces réserves, la crise successive du pétrole en 1973 jusqu'à aujourd'hui et l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays du monde ont conduit les pays industrialisés à chercher et à développer de nouvelles sources d'approvisionnement.

Les chercheurs ont développé une autre forme d'énergie dite « énergie renouvelable ». Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie solaire, éolienne et hydraulique.

La nature intermittente de l'énergie solaire fait intervenir les systèmes de stockage d'énergie. Le concept de "stockage d'énergie" est d'apporter de la flexibilité et de renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques. Il s'agit d'équilibrer dans le temps l'offre et la demande en énergie, aussi bien pour la fourniture d'électricité, de chaleur et de froid.

Il est nécessaire de développer.

L'action de stockage consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Il existe différentes manières de stocker l'énergie, à titre d'exemple les stations hydrauliques, les cuves d'air comprimé, le stockage à volant d'inertie, le stockage chimique (batterie) et le stockage thermique. Le stockage thermique représente une solution prometteuse pour des applications liées à l'énergie solaire. Différents types d'unités de stockage ont été conçus et étudiés. Ils diffèrent tous par la nature du matériau servant de support de stockage et la géométrie du module.

Cette étude s'est intéressée particulièrement au stockage passif par chaleur sensible, à travers une investigation pratique des performances de stockage (température, temps de stockage, efficacité, et énergie stockée).

Le but d'étudier de ce travail est l'amélioration du stockage d'énergie thermique solaire par chaleur sensible dans un module plan à partir d'introduire et tester des matériaux économiques et écologiques aussi disponibles dans la région d'El-Oued, ces matériaux locaux présentés par le sable, le sel local, le plâtre (gypse) et la roche (Rose de sable).

Ce mémoire est divisé en trois chapitres. Le premier chapitre nous avons discuté une présentation générale de stockage thermique qui dépend de la principale source de ce qui est le soleil, Le gisement solaire en Algérie et l'importance du stockage thermique dans la région d'El-Oued. Deuxième chapitre est destiné à la modélisation mathématique du transfert de chaleur dans un milieu de stockage thermique dans les tubes cylindriques. Enfin, Le troisième chapitre présente les techniques de stockage et les matériaux utilisés (sable, plâtre, sel et rose de sable) avec les résultats de la réalisée étude expérimentale du stockage par chaleur sensible.

Chapitre I: Stockage de Chaleur technique et matériaux

Introduction

Les fluctuations de l'énergie solaire imposent l'utilisation d'un stockage thermique pour garder une efficacité acceptable. Le développement de ce système est lié à la mise en place de moyens de stockage adaptés, suffisamment performants, viables écologiquement et économiquement. Le choix du matériau de stockage est donc crucial en termes de performances et du coût. La technologie de stockage la plus mature est le stockage par chaleur sensible. En utilisant les roches naturelles comme matériaux de stockage qui sont peu coûteux et disponibles en grande quantité et dont l'impact financier de stockage est moindre. Un lit de roches est donc l'un des systèmes qui apparaît comme le plus pertinent financièrement. Cependant, ce procédé possède quelques inconvénients comme la fatigue mécanique pendant le cyclage thermique.

1. Synthèse bibliographique (état de l'art)

Durant ces dernières années, la demande en énergie ne cesse d'augmenter, les chercheurs trouvent que le stockage d'énergie sous forme de chaleur est l'une des solutions incontournables

Le stockage thermique intervient sous différentes formes : stockage sensible (variation de température), stockage latent (changement de phase) ou stockage thermochimique (réaction chimique) [3-4]. Il peut intervenir aussi sous combinaison entre la chaleur sensible et la chaleur latente [5]. Le mécanisme de transfert d'énergie a pour but de charger et décharger la chaleur du système de stockage de manière efficace.

Un nombre important d'études concernant les technologies de stockage thermique sont disponibles dans la littérature. Hasnain [6] a examiné plusieurs technologies de stockage thermique et comparé le stockage par chaleur sensible et le stockage par chaleur latente. Ismail et Stuginsky [7] ont comparé différents modèles numériques pour le stockage thermique sensible et latent. Gil et al. [8] ont examiné et classé les différents concepts de stockage thermique et ont donné une revue des matériaux utilisés dans les applications de stockage à haute température. Un examen approfondi des divers systèmes et technologies de stockage thermique applicables aux centrales solaires CSP a été publié par Kuraviet al. [9]. Zanganeh et al. ont proposé la combinaison de stockage thermique par chaleur sensible et par chaleur latente pour stabiliser la température de l'air sortant d'un lit emballé de roches pendant la décharge. La même approche a été utilisée récemment par Geissbuhler et al. [10]. Cot-Gores et al. [11] ont fait une revue des études expérimentales sur le stockage thermochimique. Ils ont souligné que le faible rendement thermodynamique est parmi les inconvénients des réactions chimiques solide-gaz.

Il y a quelque travaux locaux dans cet axe de recherche, on peut citer les suivantes :

bechiri.m [12]

Ce travail traite le phénomène de stockage/déstockage de l'énergie thermique par chaleur sensible et/ou latente, dans un système à plaques parallèles et tube cylindrique. Cependant, l'efficacité du stockage et l'énergie stockée sont étudiées en fonction des différents paramètres physiques et géométriques.

Bekkari z et messaoudi mohamed meftah [13]

Dans ce travail, il a mené une étude théorique et numérique en vue de quantifier les performances d'une unité de stockage en utilisant le sable comme milieu de stockage. Dans le but d'analyser l'effet de la géométrie de l'échangeur de chaleur qui fait circuler le fluide caloporteur sur les performances de stockage, différentes configurations ont été testées.

L'analyse thermique a été réalisée à travers une simulation numérique via le logiciel COMSOL Multiphysics.

Mahfoudhi n [14]

Les travaux présentés dans cette thèse concernent l'étude du comportement thermique d'un matériau à la fois écologique et économique, qui est le sable, pour une application destinée au stockage thermique de l'énergie solaire.

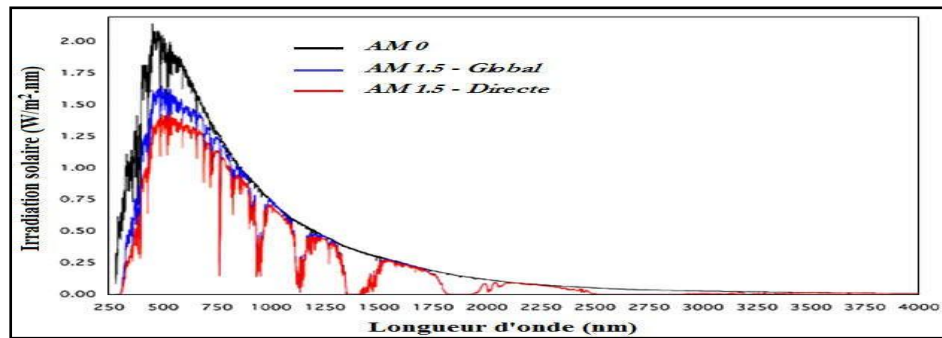
Djabalah b [15] :

Dans ce travail l'étude se fait autour de stockage d'énergie par chaleur sensible dans un système composé d'une unité de stockage sous forme de plaques parallèles. Le fluide caloporteur qui circule à l'intérieur des conduites est soumis à une température d'entrée périodique. Quatre matériaux de stockage thermiquement différents sont testés. Les performances thermiques de ces matériaux sont évaluées en termes de la température moyenne du fluide à la sortie, de l'efficacité de stockage et de l'énergie totale stockée.

L'objet de la suite de ce document sera consacré à la mise au point de ces matériaux de stockage ainsi que les diverses méthodes de caractérisation appliquées à ces derniers.

2. Energie solaire :**2-1-Importance de l'énergie solaire**

Non polluante et inépuisable, l'énergie solaire est une source qui suscite beaucoup d'intérêts aujourd'hui par son grand potentiel non exploité. Elle permet de respecter l'environnement et de préserver les ressources énergétiques, sans produire de déchets ni d'émissions polluantes, notamment les gaz à effet de serre. La puissance du rayonnement solaire résulte de la fusion de quatre noyaux d'hydrogène avec un noyau d'hélium. Le soleil libère une puissance de 3.845×10^{26} W. Cette énergie est transférée par rayonnement et convection à l'extérieur de la photosphère. La densité de puissance fournie à la Terre en permanence est de 1361 W.m^{-2} . Ce rayonnement électromagnétique s'étale sur une large plage de longueurs d'onde (de 100 nm à 2500 nm) se répartissant pour moitié dans la plage du visible (400-700 nm) et pour moitié dans la plage de l'infrarouge (700-2500 nm), avec 1 % dans la gamme ultraviolet ($<400 \text{ nm}$) [16].



La figure I-1 illustre les spectres d'irradiations solaires atteignant l'atmosphère et le sol [13]. Figure I-1 : Irradiation solaire au sommet de l'atmosphère (AM 0), globale au niveau du sol (AM 1.5 - Global) et directe au sol (AM 1.5 - Directe); d'après [17]

2-2-L'importance de stockage de chaleur :

Basé sur un certain nombre de technologies qui stockent l'énergie thermique dans les dépôts de stockage d'énergie pour une utilisation ultérieure. L'énergie stockée dans l'équation de la demande d'énergie est utilisée entre le jour et la nuit. Le stock de chaleur peut être stocké à une température plus élevée (plus chaude) ou plus froide (plus froide) que la température ambiante. Une des utilisations de l'énergie stockée aujourd'hui est la production de glace ou d'eau refroidie ou de solutions solubles la nuit ou l'eau chaude, qui est ensuite utilisée dans des environnements froids ou chauds pendant la journée . par exemple le stockage de chaleur dans les Plancher et pour le réchauffer , Le (FigureI-2) est un exemple de l'exploitation de l'énergie stockée



Figure I-2 : Photo montrant comment réchauffer le sol

Le développement économique, aussi bien dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de développement est directement lié à l'énergie. Ainsi, la demande

énergétique mondiale augmente constamment ce qui est dû à l'accroissement rapide de la population et l'augmentation du niveau de vie. La figure I-3 donne un aperçu de l'évolution de la consommation mondiale en énergie primaire pour des années entre 1971 et 2012. Entre 1973 et 2012, la consommation d'énergie dans le monde a presque doublé (+ 92%). Cette évolution est due à la consommation des pays anciennement industrialisés, représentés par le groupe des pays de l'OCDE, et des nouvelles économies qui sont en forte croissance [18].

La Chine, exemple des nouveaux pays industrialisés, a vu sa consommation d'énergie plus que tripler de 1990 à 2008. Sa part dans la consommation mondiale a doublé et elle est passée de 7,5% à 16,4 %. La consommation de l'Afrique a augmenté de 50% de 1990 à 2008, mais elle est restée marginale dans la consommation mondiale (environ 5,7% pour plus de 15% de la population mondiale) [14].

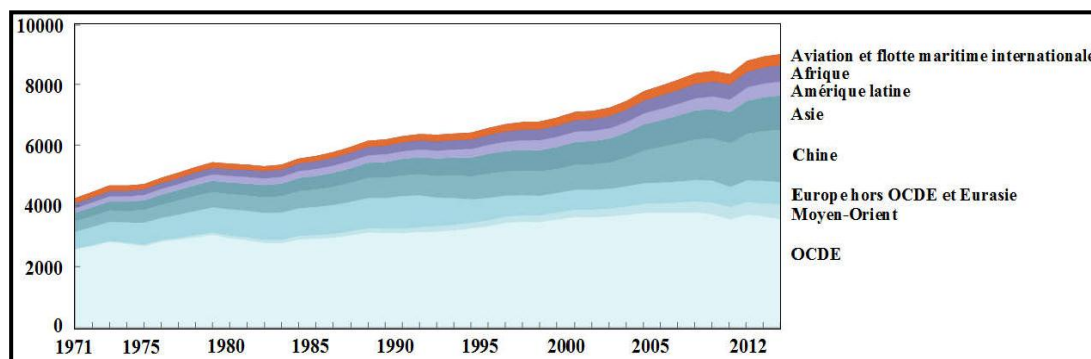


Figure I-3 : Evolution de la consommation d'énergie par région [19]

La solution de ces problèmes mentionnés ci-dessus est donc de stocker la chaleur produite par l'énergie solaire lorsque celle-ci est en excès. Le stockage thermique est reconnu comme facile à utiliser et combine de hauts rendements, de grandes capacités de stockage et des faibles coûts [20]. Il permet d'atteindre l'objectif de production à 100% en énergie issue du solaire et de rendre la production de la chaleur constante et indépendante de la disponibilité du rayonnement solaire. De plus, il constitue un aspect important des centrales solaires et permet de prolonger au maximum leur période de fonctionnement et augmenter leur facteur de capacité.

3. Etat de l'art du stockage thermique – modes de stockage

3.1. Stockage par chaleur latente

3.1.1 Principe

La chaleur latente est l'énergie associée à un changement d'état. Lors du processus de stockage, une grande quantité d'énergie peut être emmagasinée autour de la température de changement d'état [8].

Les matériaux utilisés sont appelés matériaux à changement de phase (MCP). La plupart des systèmes de stockage par chaleur latente sont des solides, ce qui fait que l'énergie est stockée sous forme de chaleur latente de fusion L_f est définie d'après [20] comme suit :

$$L_{\text{fusion}}(T_{\text{fusion}}) = h_L(T_{\text{fusion}}) - h_S(T_{\text{fusion}}) \quad (\text{I-1})$$

Où $h_L(T_{\text{fusion}})$ et $h_S(T_{\text{fusion}})$ sont les enthalpies massiques du liquide et du solide à la température de fusion. Pendant le changement de phase des matériaux, la chaleur peut être stockée de façon isotherme, dépendant ainsi de la chaleur latente du matériau et de la quantité de matériau utilisée. Durant l'étape de charge, l'énergie thermique fournie au matériau permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. Ce changement d'état se fait à température constante et l'énergie apportée par l'extérieur sert alors à rompre les liaisons existantes dans le solide. Une fois que la matière est entièrement transformée de l'état solide à l'état liquide et si le système continue à recevoir de l'énergie, alors celle-ci sera de nouveau cumulée par le matériau sous forme de chaleur sensible. Lors de l'étape de décharge, le matériau change de nouveau la phase à la même température durant le processus de charge et reprend son état initial en libérant la chaleur. La figure I-4 illustre les différentes étapes d'un système de stockage par chaleur latente[21] .

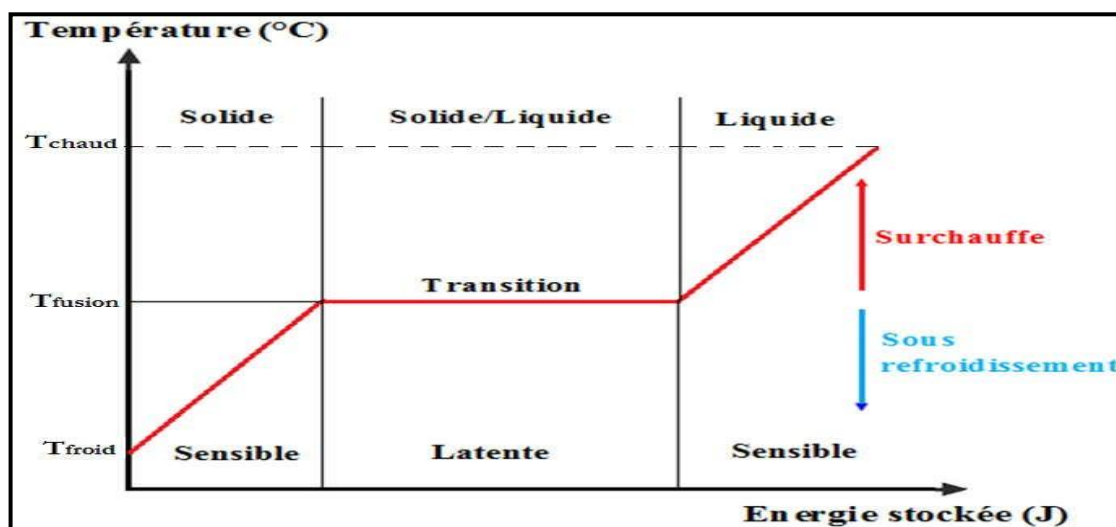


Figure I-4 : Les différentes étapes de stockage de la chaleur par un matériau en fonction de la température.

La quantité d'énergie stockée dans le MCP est la somme de l'énergie sensible et de

l'énergie latente suivant la relation (I-2). La majeure partie de l'énergie stockée est comprise dans l'enthalpie de changement de phase du matériau. L'état final correspond à l'état d'équilibre.

$$Q = \int_{T_{froid}}^{T_{fusion}} m c_{pd} dT + m l_f + \int_{T_{fusion}}^{T_{chaud}} m C_{pd} dT \quad (I - 2)$$

Où, Q est la quantité d'énergie stockée (J), m est la masse du matériau de stockage (kg), C_{ps} et C_{pl} sont respectivement les chaleurs spécifiques des matériaux solide et liquide ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), L_f est l'enthalpie de changement de phase ($J.kg^{-1}$) ou la chaleur latente et dT est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K).

4.2.2 Matériaux de stockage :

De nombreuses substances ont été étudiées comme matériaux à changement de phase (MCP), mais seuls quelques-uns sont commercialisés en tant que tels. Zalba et al. [22] ont donné une revue des systèmes de stockage thermique basés sur les matériaux à changement de phase (MCP) et Kenisarin et al.

ont donné une revue complète des matériaux de stockage latent à haute température. La figure I-5 représente une classification des MCP [3,22].

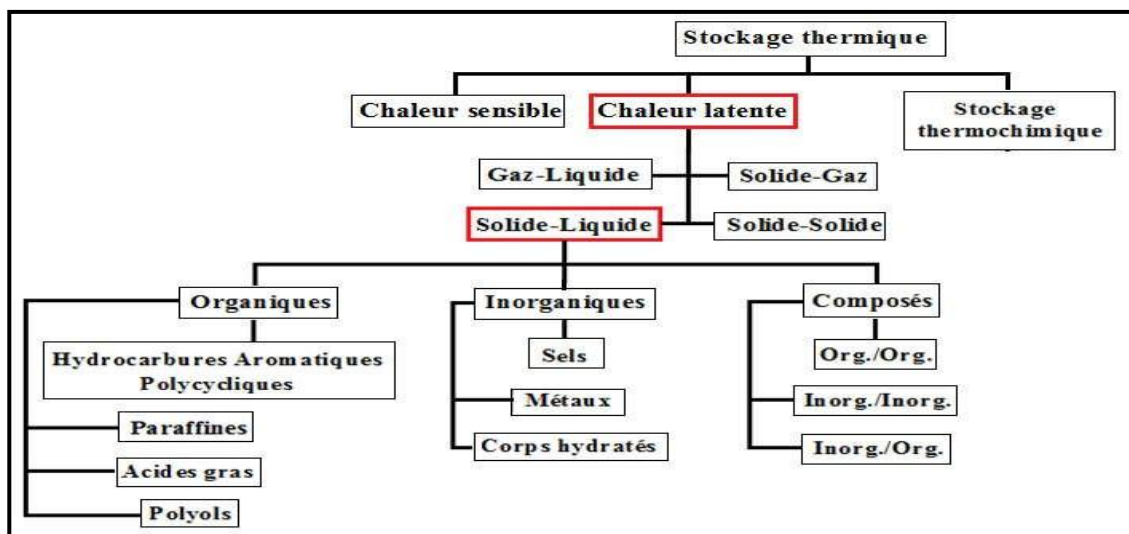


Figure I-5 : Classification des matériaux à changement de phase (MCP)

Les MCP peuvent être classés en trois catégories: les MCP organiques, les MCP inorganiques et les MCP composés (eutectiques). Chacune de ces classes peut être subdivisée en familles de matériaux. on peut classer également les MCP en fonction de la gamme de température de travail tel qu'il est montré dans le tableau I-5 . Ce critère est fondamental pour toute application et permet de limiter l'étude de choix préliminaire de MCP pour une application visée [23] .

Tableau I-1 : Classification des MCP en fonction de la gamme de température de travail

Gamme de température (°C)	Matériaux
0-100	Eau, paraffines, acides gras, sels hydratés
100-400	Chlorures, nitrates, hydroxydes, pyroxydes, nitrites
400-800	Carbonates, sulfates, hydroxydes, métaux, perchlorates
800-1500	Métaux, fluorures, silicates

Les transitions de phases liquide-gaz ou solide-gaz sont les plus énergétiques. Néanmoins, le stockage de grandes quantités de matériau en phase gazeuse à haute pression (pour avoir une densité énergétique acceptable) et à haute température est assez délicat techniquement. C'est pour cette raison que la transition solide-liquide est la plus couramment utilisée dans le domaine du stockage d'énergie par chaleur latente.

Parmi les travaux réalisés sur les matériaux de stockage par chaleur latente, Liu et al. ont consacré une partie de leur publication à la revue bibliographique des MCP ayant une température de fusion supérieure à 300 °C. ont présenté une synthèse des technologies de stockage par chaleur latente pour des températures supérieures à 100 °C.

4.2. Stockage par chaleur sensible

4.2.1 Principe

Dans le cas du stockage par chaleur sensible, l'énergie est emmagasinée via l'augmentation de température du matériau. Ce mode de stockage est le moyen le plus ancien, le plus simple et le moins onéreux d'emmagasiner de l'énergie. La quantité d'énergie stockée est directement proportionnelle à la masse, à l'écart de température, et à la chaleur spécifique du matériau de stockage. Dans ce cas, le matériau cède ou stocke de l'énergie dans une gamme de températures excluant le changement d'état. En effet, si la température s'élève de T_i à T_f pour un matériau de masse m , la quantité de chaleur Q stockée ou récupérée par ce matériau est équivalente à la variation de l'enthalpie du corps ΔH :

$$Q = \Delta H = \int \rho \cdot V \cdot c_p \cdot (T) dT \quad (I - 3)$$

où Q est la quantité d'énergie stockée (J), ρ est la masse volumique du

matériau de stockage (kg), V est le volume de matériau (m^3), C_p est la chaleur spécifique du matériau de stockage ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) et dT est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K).

En supposant la capacité calorifique indépendante de la température, la relation (I-3) devient :

$$Q = \rho v c_p (T_f - T_i) \quad (I - 4)$$

L'équation (I-4) indique que les propriétés importantes pour un matériau de stockage sont la masse volumique et la chaleur spécifique. Pour un volume donné, un matériau stockera d'autant plus de chaleur que le produit ρc_p sera élevé.

D'autres propriétés sont importantes, telles que la conductivité thermique, la diffusivité thermique, le coefficient de dilatation thermique, la stabilité cyclique, l'abondance, le coût et l'empreinte environnementale [24]. Il indique aussi que ce type de stockage est efficace dans le cas de systèmes fonctionnant dans de larges intervalles de température.

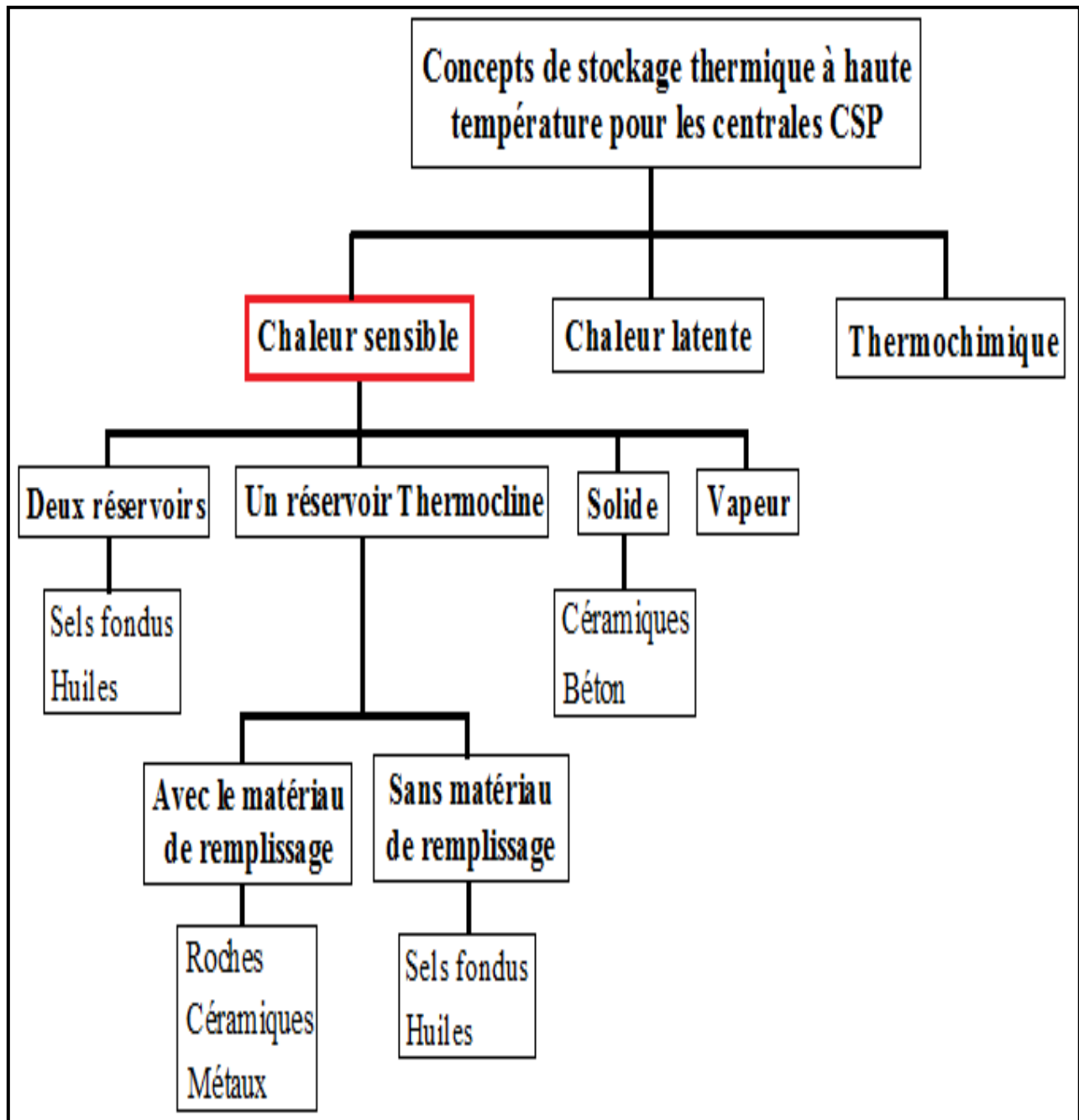


Figure I-6 : Les concepts de stockage de la chaleur sensible à haute température

La figure I-6 résume les concepts de stockage de la chaleur sensible à haute température appliqués pour les centrales solaires à concentration [25].

4.3. Lit entassé de roches

a. Principe

Par définition, un lit entassé de roches est un milieu poreux formé de roches autour desquelles existent des espaces vides appelés pores. Ces vides peuvent être occupés par un fluide caloporteur. La forme du lit couramment utilisé est cylindrique. Ainsi, les lits de forme conique tronqué et rectangulaire sont aussi utilisés pour le stockage thermique.

Le lit de roche utilisant l'air comme fluide caloporteur est devenu l'une des solutions les plus optimales pour le stockage thermique dans les centrales solaires car il offre plusieurs avantages tels que les coûts d'investissement faibles, l'efficacité, la fiabilité et le respect de l'environnement [26]. Il est bien adapté pour les centrales CSP puisqu'il s'agit d'une technique simple permettant un rendement thermique global élevé. Selon Heller et Gauché et Barton et al , il n'a pas besoin d'un échangeur de chaleur supplémentaire entre le collecteur et le réservoir de chaleur. En plus, Pacheco et al. ont démontré que la mise en œuvre d'un stockage thermocline sur un lit de roches permet une diminution de 34 % de l'investissement financier en comparaison avec une technologie utilisant un stockage avec deux réservoirs.

Un schéma d'une unité de stockage de lit entassé de roches est représenté sur la figure I-7 .

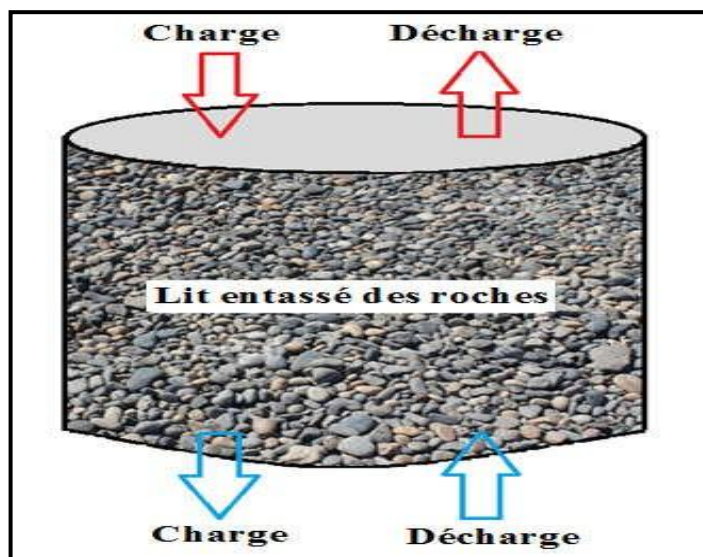


Figure I-7 : Schéma de principe de fonctionnement d'une unité de stockage de lit entassé de roches.

Lors de charge, le fluide chaud (FC) reçu à partir des capteurs solaires est introduit dans le lit par la partie supérieure. En descendant, il transfère ses calories aux roches et il sort ensuite avec une température presque égale à celle des couches inférieures. Ainsi, la température des couches supérieures est beaucoup plus importante que les autres parties du lit (stratification thermique). Lors de décharge, lorsque l'énergie est nécessaire, le fluide froid

(FF) est introduit dans le lit par la partie inférieure. En ascendant, il enlève la chaleur emmagasinée dans les roches. Le sens choisi de l'écoulement d'air lors de charge et décharge du réservoir permet d'augmenter la surface de contact solide/fluide et le transfert thermique, ainsi que de maintenir la stratification thermique dans le lit .

Contrairement aux cas de deux réservoirs, un réservoir unique utilise un gradient thermique pour séparer la zone chaude ZC de la zone froide ZF. La figure I-8 présente le principe de fonctionnement de la zone dite « thermocline » [6]. Cette zone peut représenter jusqu'à un tiers de la hauteur du réservoir.

Elle se déplace axialement suivant les phases de charge ou de décharge. En général, une vitesse du fluide caloporteur faible est nécessaire pour permettre la formation de cette zone. Cela impose un flux laminaire à travers le lit de roches et donc un faible nombre de Reynolds de l'ordre de 500 .

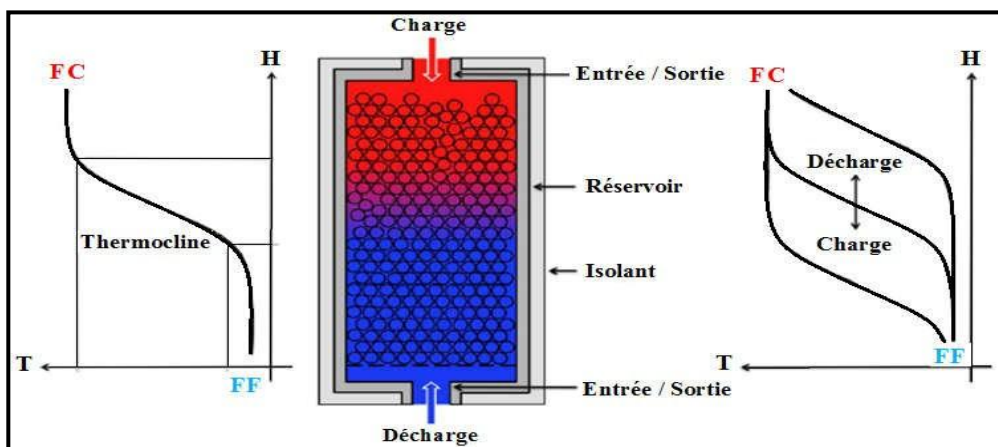


Figure I-8 : Stockage thermocline sur lit de roche [6].

Pour décrire le transfert de chaleur dans le lit de roches, les mécanismes suivants sont rencontrés : conduction thermique à travers le fluide caloporteur, conduction à travers les particules, conduction à travers les surfaces de contact entre deux particules, transfert radiatif entre les surfaces des particules et transfert thermique convectif fluide-particule (Figure I-9). Habituellement la différence de température entre le fluide et la particule est de 0,5°C environ [6] .

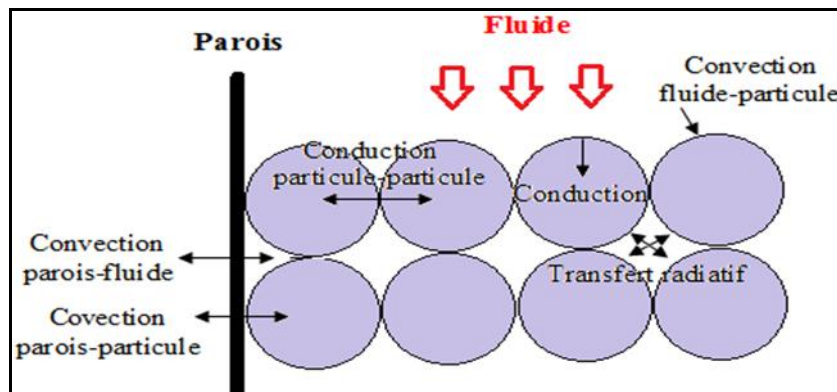


Figure I-9 : Echanges de chaleur dans un lit de roches [6].

Un inconvénient majeur du système de stockage thermocline sur le lit de roches est la possibilité d'une fatigue mécanique du matériau de stockage et de la paroi du réservoir pendant le cyclage thermique. En effet, les parois du réservoir se dilatent lors du stockage entraînant une augmentation du diamètre. Combiné au cyclage thermique des roches, ce stress mécanique répété peut provoquer une rupture de la paroi du réservoir.

4.3.1. Fluides de transfert de chaleur

Un fluide caloporteur également appelé le fluide de transfert de chaleur (FTC) est un fluide qui permet le transport de chaleur d'un endroit à un autre. Il permet de faire le lien entre le récepteur solaire et le groupe de puissance en transférant la chaleur du premier au second. Le FTC doit avoir les propriétés suivantes : un point de solidification au voisinage de la température ambiante, des propriétés thermiques et thermo- physiques élevées pour favoriser les transferts de chaleur dans le récepteur solaire et pour participer pleinement au processus de stockage , une viscosité plus faible possible pour limiter la puissance de la pompe, une corrosivité négligeable avec les matériaux de contact (tube et réservoir) et les matériaux de stockage, une faible toxicité, inflammabilité et explosivité pour éviter tout incident malencontreux durant l'utilisation, un respect à l'environnement, et une disponibilité en grande quantité pour ne pas être un frein au développement des centrales solaires.

saturée qui peut être aussi utilisée comme FTC ne correspond pas à un système de stockage sur lit de roches par effet thermocline et elle nécessite une installation adaptée pour gérer les hautes pressions de la vapeur. Le tableau I-3 compare les différentes caractéristiques de l'air avec celles du fluide synthétique et végétal.

Tableau I-2 : Comparaison de l'air avec le Therminol VP1 et l'huile végétale de colza.

Fluid colporteur	Huilethermique : Therminol VP1	Huile de colza	Air
Composition	73.5% oxyde de diphényle et 26.5 % de diphényle	Acidegras	21 % O ₂ et 78 % N ₂
Température de solidification	12 °C	-21 °C	-
Temperature maximale d'utilisation	400 °C	250 °C	Très élevée
Pression de vapeur	10.9 bars à 400 °C	0 bars à 300 °C	1.01 bars à 100 °C
Capacité de stockage thermique (250 °C)	1.89 MJ/m ³ .K	2.02 MJ/m ³ .K	0.70 MJ/m ³ .K
Conductivité thermique (250 °C)	0.106 W/m.K	0.139 W/m.K	0.042 W/m.K
Viscosité dynamique (250 °C)	0.29 mPa.s	2.5 mPa.s	2.26 10 ⁻⁵ kg.m ⁻¹ .s
Compatibilité chimique	-	Bonne	Très bonne
Coût d'investissement	5.7 € kg ⁻¹	0.8 € kg ⁻¹	Nulle
Disponibilité	Faible	Elevée	Partout
GES	3 kg CO ₂ eq kg ⁻¹	2 kg CO ₂ eq kg ⁻¹	Nulle
Dangerosité	Elevée	Faible	Nulle

En comparant les FTC trouvés dans la littérature, l'air est le plus abondant, le moins cher et disponible partout. Il est inflammable, non toxique, non dégradable et écologique. Il peut fonctionner à haute température. Selon Coutier et Faber, le système le plus approprié pour stocker la chaleur utilise l'air comme FTC. De plus, avec l'air, l'opération de stockage est également simple.

4.4. Comparaisons des différents types de stockage thermique

Le tableau I-3 représente les caractéristiques des trois types de stockage de la chaleur. Six paramètres fondamentaux ont été choisis : la densité énergétique, la température de stockage, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre du système, les avantages du matériau de stockage et les inconvénients du système. Actuellement le stockage par chaleur sensible est le procédé de stockage thermique le plus mature.

Tableau I-3 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de la chaleur [21]

<i>Stockage</i>		<i>Sensible</i>	<i>Latente</i>	<i>Thermochimique</i>
<i>Densité énergétique</i>	<i>Volumique</i>	15-60 kWh/m ³	50-100 kWh/m ³	100-500 kWh/m ³
	<i>Massique</i>	0.02-0.03 kWh/kg	0.05-0.1 kWh/kg	0.5-1 kWh/kg
<i>Température de stockage</i>		Température de charge	Température de charge	Température de charge ou température ambiante
<i>Maturité</i>		Echelle industrielle (20 MWe)	Echelle pilote (100 kWth)	Echelle laboratoire (1-5 kWth)

<i>Technologie</i>	Simple	Moyenne	Complexe
<i>Avantages du matériau de stockage</i>	Bon marché, simple à contrôler	Densité énergétique élevée, température isotherme	Densité énergétique élevée
<i>Inconvénients</i>	Grand volume, faible densité énergétique	Cristallisation, matériaux chers, corrosion	Mauvais transfert de chaleur à sorption

La figure I-10 montre une comparaison des différentes formes de stockage thermique. Grâce à sa maturité, le stockage par chaleur sensible est bien implantée dans l'industrie du solaire thermique. Elle est utilisée industriellement dans plusieurs centrales solaires thermodynamiques surtout celles qui utilisent deux réservoirs de stockage en sels fondus.

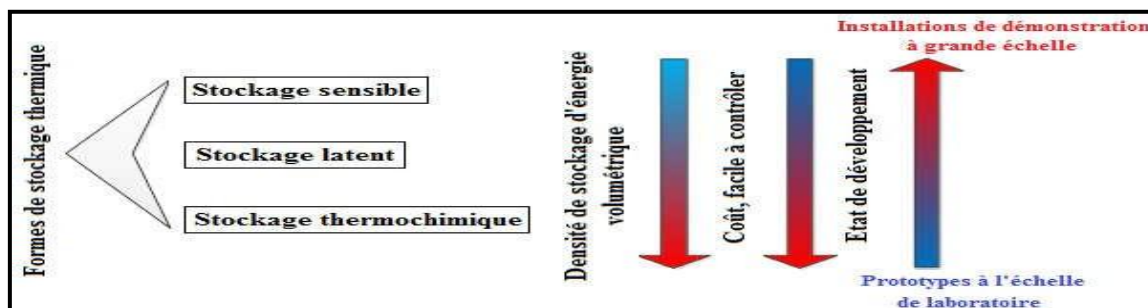


Figure I-10 : Les différentes formes de stockage thermique [21]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté les caractéristiques de l'énergie solaire et les raisons de stockage de la chaleur. Ensuite nous avons abordé, une étude bibliographique sur les systèmes et les modes de stockage de la chaleur nous a permis de recenser général quant au stockage thermique de l'énergie. Celui-ci permettra de remédier au problème d'intermittence limitant l'utilisation des sources d'énergies renouvelables, telle que l'énergie solaire. La comparaison des différents types et matériaux de stockage thermique a permis de montrer les avantages de l'utilisation du stockage sensible solide, notamment la maturité de la technologie, la simplicité, et la stabilité. Ceci nous a encore orientés vers la valorisation des roches qui sont à la fois écologiques et économiques.

Chapitre II Modélisation mathématique

Introduction

Pour prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre on doit utiliser les équations de la thermodynamique. Aussi la thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

Les caractéristiques thermo physiques des matériaux représentent la faculté qu'a la chaleur de se propager dans un corps ou d'y être stockée. Pour introduire les caractéristiques thermo physiques internes des matériaux, nous allons rappeler quelques notions de base sur la propagation de la chaleur dans les solides.

Selon les principes fondamentaux de la thermodynamique [27], le transfert d'énergie s'explique par les interactions d'un système avec l'extérieur. Il existe trois modes de transferts thermiques au sein d'un matériau [28], le transfert par conduction, convection, rayonnement.

Le rayonnement est issu de l'interaction entre une onde électromagnétique et le matériau. Ce mode de transfert devient non négligeable au sein des solides à haute température [29].

La convection intervient entre une surface et un fluide [29]. Enfin, la conduction se fait par propagation de chaleur au sein du corps concerné.

1. Notions fondamentaux

L'étude des phénomènes calorifiques a conduit les physiciens à préciser deux notions différentes: celle de température et celle de quantité de chaleur. La distinction entre ces deux notions est due à BLACK, physicien Britannique du 18ème siècle.

1.1. La température

La température est la manifestation mesurable de la chaleur stockée [30]. La « température » caractérise l'état d'un corps. Elle a son origine dans nos sensations : Un corps nous paraît, au toucher, froid, tiède ou chaud. Lorsque nous mettons en contact un corps chaud et un corps froid, nous constatons (par le sens du toucher) que le corps chaud se refroidit, le corps froid s'échauffe. En général, on remarque que: « Deux corps mis en contact prolongé se mettent en équilibre thermique ».

1.2. La chaleur

C'est une forme de l'énergie. Lorsqu'on introduit une quantité de chaleur dans un corps, la température de ce dernier augmente. Dans le cas d'un changement de phase, tout ou une partie de cette chaleur est utilisée pour satisfaire les besoins thermiques liés à ce phénomène (fusion, évaporation, solidification).

1.3. La relation entre température et chaleur

Les liens entre température et quantité de chaleur se traduisent par deux types de phénomènes :

- Lorsqu'un corps reçoit une certaine quantité de chaleur, sa température s'élève ou il se produit un changement de phase (fusion, vaporisation, sublimation) .
- Lorsque deux corps sont à des températures différentes le plus chaud cède de la chaleur au moins chaud, de sorte que les températures tendent à s'uniformiser [30]. On exprime alors un lien de causalité (cf. figure II.1) :

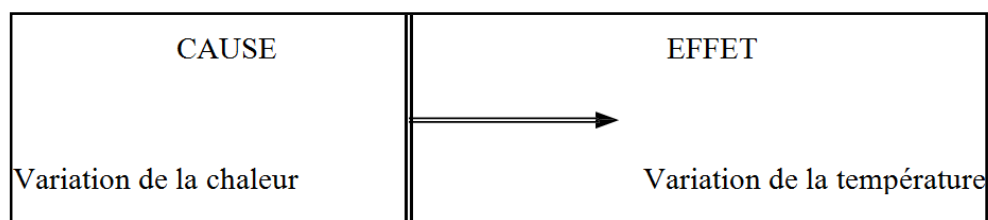


Figure II.1. Lien de la chaleur et la température

1.4. La Conservation de l'énergie

Une fois que l'énergie a été transformée en chaleur (par combustion, effet joule, frottements, etc.....). Cette dernière se « conserve » lors des différents transferts qu'elle subit.

Soit un corps solide (système S), (cf. figure II2), qui échange des quantités de chaleur Q et Q' avec le milieu ambiant.

- Quantité de chaleur entrant dans (S)
- Quantité de chaleur sortant de (S)

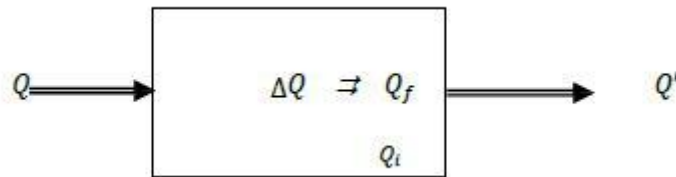


Figure II.2. Accumulation de la quantité de chaleur

Le système a accumulé la quantité de chaleur :

$$\Delta Q = Q - Q^1 \quad (2.1)$$

S'il possédait « avant », il contiendra comme quantité de chaleur « après »:

$$Q_f = Q_1 + \Delta Q \quad (2.2)$$

La chaleur stockée, suit la relation fondamentale suivante :

$$\Delta Q = mc_p \Delta T \quad (2.3)$$

ΔQ en J, m en Kg, C_p (chaleur spécifique) en J/Kg C°, et ΔT en C°.

2. Les principaux modes de transfert de chaleur

Le transfert thermique est un processus complexe qui, dans le cas général, résulte de 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 problème [31]. Le mécanisme d'apparition de chacun de ces modes est présenté brièvement ci-dessous.

2.1. Conduction

L'énergie interne d'un corps solide, liquide ou gazeux correspond à l'énergie

cinétique de ses éléments constitutants qui sont en mouvement permanent (atomes, molécules, électrons libres). La conduction [32], 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 – différents 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 s'effectue par ondes élastiques. Pour les métaux, la conduction est essentiellement le fait de 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.

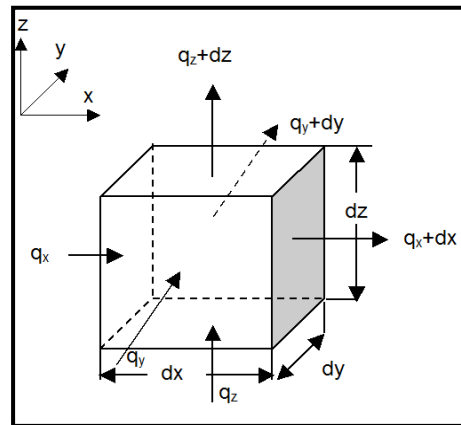


Figure II.3. Représentation sur un élément de volume, du flux thermique dans les trois directions.

La méthode analytique d'étude de la conduction considère les corps comme des milieux continus, en négligeant leur structure moléculaire. Cette hypothèse n'est pas gênante, du fait que dans la majorité des cas, les dimensions des corps observés sont beaucoup plus grandes que celles de leurs particules élémentaires ainsi que les distances qui les séparent. Il faut mentionner que le plus souvent, les applications techniques de la conduction thermique sont relatives à des corps solides (cf. figure II.3); dans les liquides et les gaz, elle ne se manifeste que si le transfert par convection est totalement exclu. La conduction thermique est régie par la loi de Fourier:

$$\text{div}(k_i \cdot \nabla T) + q = \rho c_p \frac{dt}{dt} \quad (2.4) \quad \bullet \text{ Le terme source } [W \cdot m^{-3}]$$

$$q_{cond} = -K \frac{dt}{dx} \quad (2.5) \quad \bullet \text{ la masse volumique } [kg \cdot m^{-3}]$$

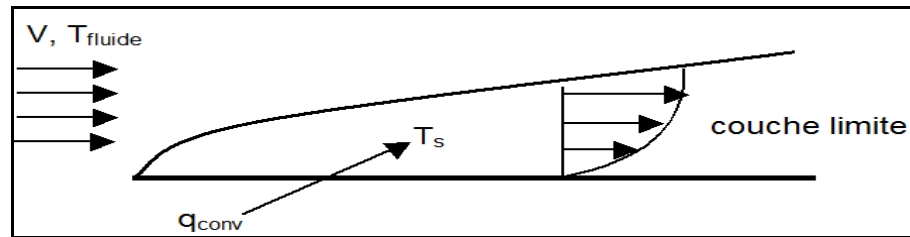


Figure II.4. Transfert de chaleur par convection à la surface d'un solide

- La capacité calorifique du matériau [$\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$]
- la conductivité thermique [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
- La température dans le solide [K]
- La densité du flux thermique [W.m^{-2}]
- Le temps [s]
- L'espace [m]

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:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (2.6)$$

2.2. Convection:

Le phénomène de convection [33] est relatif aux transferts thermiques, ayant lieu dans les fluides – liquides ou gaz – en mouvement. Il est déterminé par le mouvement des particules élémentaires du fluide – liquide ou gaz – entre des zones ayant des températures différentes; ce mélange génère des échanges d'énergie (chaleur) et de quantité de mouvement.

C'est le phénomène observé entre un fluide en mouvement et une paroi (cf. figure 2. 4), il est majoritaire dans la plupart des échangeurs de chaleur. Le flux de chaleur convectif q_{conv} (W.m^{-2}) est proportionnel à la différence de température entre la surface du solide et la température du fluide, T_s et T_f respectivement.

$$q_{\text{conv}} = h \cdot s (T_s - T_f) \quad (2.7)$$

Cette expression est connue sous le nom de la loi de Newton [34]. La constante de proportionnalité h ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), nommée coefficient de transfert thermique par convection est fonction des conditions aux limites, qui sont influencées par la géométrie de la surface, la nature du fluide en mouvement et les propriétés de transport.

2.3. Rayonnement

Tous les corps solides, liquides ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Il

s'agit d'un flux de chaleur. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de leur énergie interne. Ce rayonnement n'est pas monochromatique; Il est composé de radiations de longueurs d'ondes différentes (0,3 μm à 100 μm). Son intensité dépend de la température du corps [35] .

La transmission de la chaleur par rayonnement (cf. figure 2.5), 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 :

$$Q = \varepsilon \cdot F \cdot \sigma \cdot S (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.8)$$

Flux de chaleur transmis en watts:

T_1 : Température (T_{solide}) de la surface émettrice en $^{\circ}\text{K}$

T_2 : Température (T_{surface}) de la surface réceptrice en $^{\circ}\text{K}$;

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 [30].

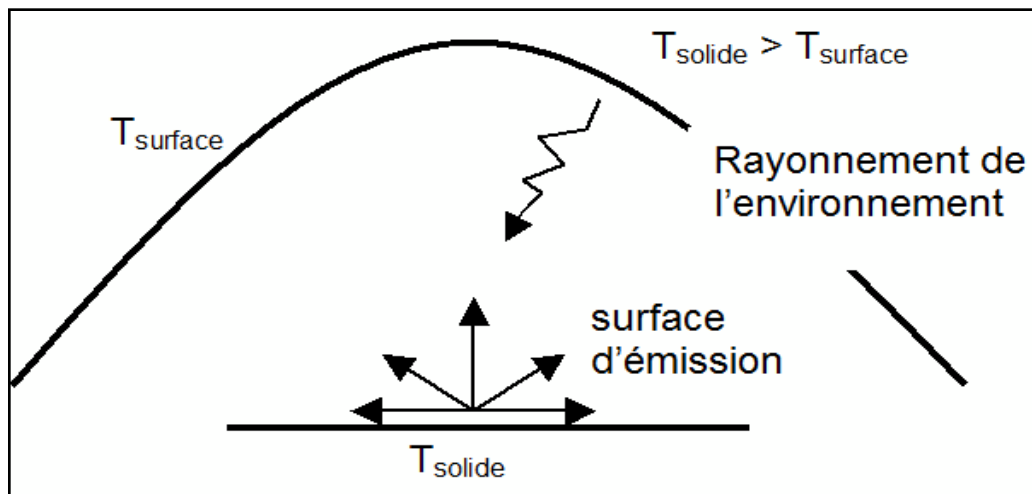


Figure II.5. Transfert de chaleur par rayonnement à la surface d'un solide.

3. Modélisation du comportement thermique du sable :

Cette étude vise à modéliser un système de stockage sensible utilisant le sable comme milieu de stockage, à l'échelle macroscopique. Ainsi, la configuration de l'unité de stockage permet d'assimiler le sable à un milieu solide. Au préalable, les travaux de modélisation nécessitent la définition d'un système représentatif du système de stockage réel.

3.1. Description de la configuration étudiée

La figure II.6 représente le schéma physique du système étudié. Il s'agit d'une cuve cubique de côtés L , formant un lit fixe contenant le matériau de stockage (sable) à l'intérieur duquel, sont installés des tubes de diamètre d , constituant l'échangeur de chaleur. Ces derniers permettent la circulation du fluide caloporteur. Le stockage d'énergie dans la cuve, s'effectue de manière active à l'aide d'un courant d'air chaud provenant du capteur solaire plan à air.

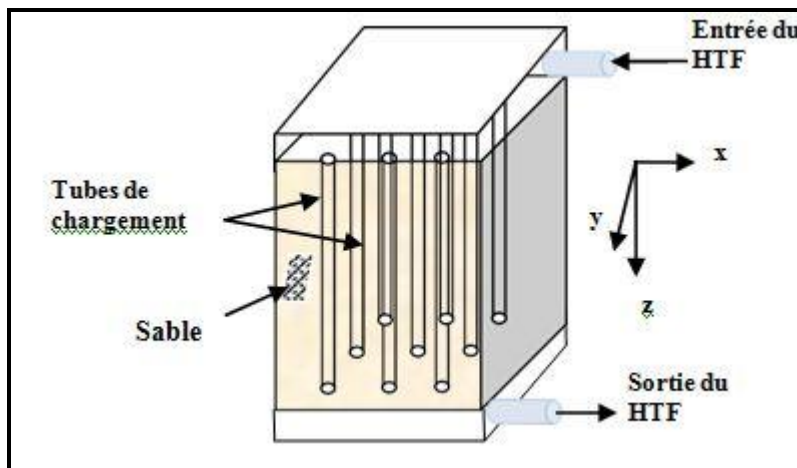


Figure II.6. Schéma physique de l'unité de stockage[14].

3.2. Modélisation 2D

3.2.1 Hypothèses

Dans le but d'étudier le comportement du stockage de la chaleur du système, un modèle thermique est développé en se basant sur les hypothèses suivantes :

- A l'entrée de l'unité de stockage l'écoulement est développé;
- 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;
- La température des tubes en contact avec le milieu de stockage est imposée constante.

Une coupe dans le plan (xy) permet d'obtenir la configuration en deux dimensions du système de stockage (ch. figure II.7 (a)). En tenant compte de la symétrie existante, le domaine d'étude à considérer en deux dimensions est présenté dans la figure II.7 (b).

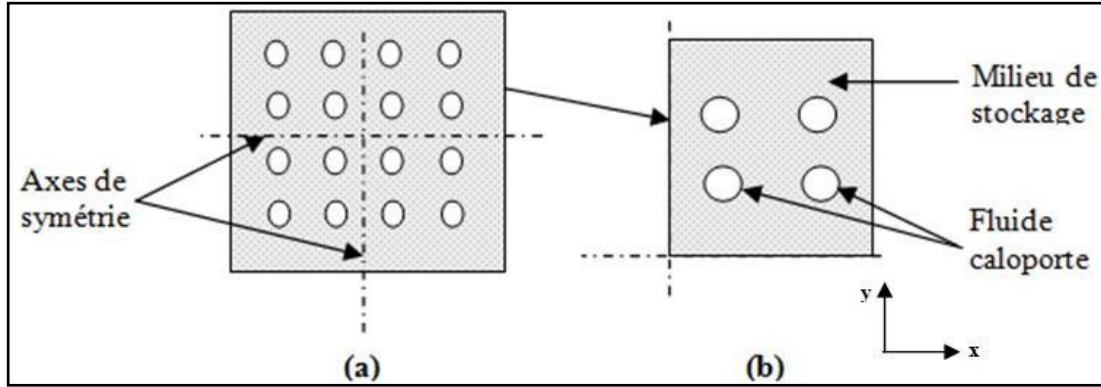


Figure II.7. Configuration en 2D du domaine d'étude ((a) coupe dans le plan xy, (b) symétrie considérée).

3.2.2 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 :

$$\rho_s c_{ps} \frac{dT}{dt} = k_s \nabla^2 T \quad (2.9)$$

Avec,

ρ_s : est la densité du solide [kg/m^3] ;

c_{ps} : est la capacité thermique à pression constante du solide [J/kg.K] ;

k_s : est la conductivité thermique du solide [W/m.K] ;

T : est la température du milieu solide [K].

Cette équation est accompagnée des conditions aux limites suivantes :

$$A, x = 0, y = 0 \text{ (symétrie)} \quad (2.10)$$

$$A, x = l/2, y = l/2 \text{ (parois isolées)} \quad (2.11)$$

Sur les parois circulaires, représentant la surface des tubes en contact avec le milieu de stockage une température est imposée :

$$T = T_p \quad (2.12)$$

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

4. Modélisation mathématique :

Le système de stockage par chaleur latente à étudier est composé de plusieurs tubes en PCM, (cf. fig. (II.8 a)). Le fluide caloporteur en écoulement laminaire charge/décharge le PCM.

Une approche simpliste permet d'étudier l'échange de chaleur et le comportement transitoire d'un élément typique à savoir un conduit cylindrique avec une surface extérieure adiabatique et une température d'entrée constante, cf. fig. (II.8 b).

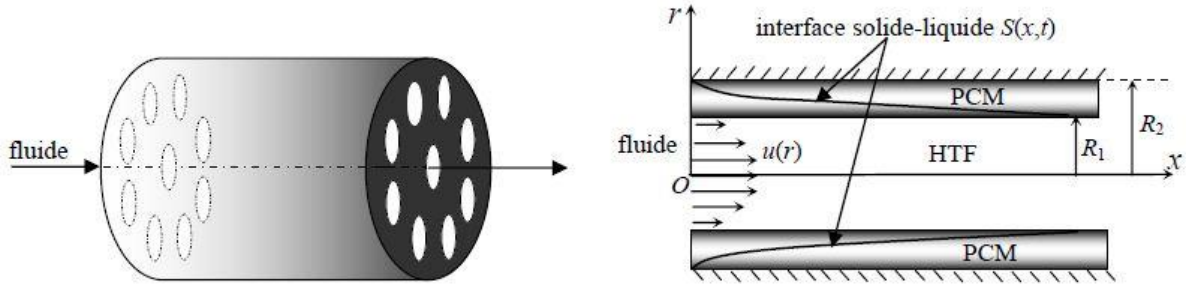


Fig. II.8 a : Unité de stockage par chaleur latente. Fig. II.8 b : Module de stockage par chaleur latente.

Le modèle mathématique, formulé en coordonnées cylindriques bidimensionnelles peut être écrit sous la forme dimensionnelle tel que[36]:

- Pour le HTF:

$$\frac{\partial T_f(x,r,t)}{\partial t} + u(r) \frac{\partial T_f(x,r,t)}{\partial x} = \alpha_f \left(\frac{\partial^2 T_f(x,r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f(x,r,t)}{\partial r} \right) \quad t > 0, 0 < r < R_1, x > 0 \quad (2.13)$$

$$T_f(0,r,t) = T_0, \quad t > 0, 0 \leq r \leq R_1$$

- Pour le PCM (phase liquid) :

$$\frac{\partial T_s^2(x,r,t)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s(x,r,t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_{pcm}} \frac{\partial T_s(x,r,t)}{\partial t} \quad t > 0, R_1 < r < S(x,t), x > 0 \quad (2.14)$$

$$-h(T^f(x,r,t) - T_l) = K_{pcm} \frac{\partial T_l(x,r,t)}{\partial r} \quad t > 0, R_1 = r, x = 0$$

- Pour le PCM (phase solid) :

$$\frac{\partial T_s^2(x,r,t)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_l(x,r,t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_{pcm}} \frac{\partial T_l(x,r,t)}{\partial t}, \quad t > 0, S(x,t) < r < R_1, x > 0 \quad (2.15)$$

$$T_s(x,r,t) = T_{int}, \quad t > 0, R_1 < r < R_2, x > 0$$

- A l'interface solide-liquide :

$$-K_{pcm} \frac{\partial T_f(x,r,t)}{\partial r} + k_{pcm} \frac{\partial T_f(x,r,t)}{\partial r} = \rho_{pcm} q \frac{\partial S(x,t)}{\partial t}, \quad t > 0, S(x,t) = r, x > 0 \quad (2.16)$$

$$T_s(x,r,t) = T_l(x,r,t) = T_m, \quad t > 0, S(x,t) = r, x > 0$$

4.1. Nombres adimensionnels:

L'existence de multiples régimes de fluidisation avec des structures d'écoulement distincts et qui dépendent de plusieurs paramètres, (masse volumique, viscosité, débit, propriétés des particules solides, concentration), conduit à l'utilisation de nombres adimensionnels qui regroupent ces paramètres pour l'étude du comportement des modules. On récapitule les nombres adimensionnels utilisés :

- **Nombre de Reynolds:**

Nombre adimensionnel, représente le rapport entre les forces d'inertie et de viscosité:

$$R_s = \frac{F^i}{F^v} = \frac{\rho U^2 L^2}{\mu UL} = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu} \quad (2.17)$$

$$R_s = \frac{UD_h}{\nu} = \frac{4Q}{\pi D_h \nu} \quad (2.18)$$

Permet la caractérisation du régime d'écoulement d'un fluide :

- $Re < 2300$: régime **laminaire**.
- $2300 < Re < 4000$: régime **transitoire**
- $Re > 2300$: régime **turbulent**

Conclusion

Dans ce chapitre, l'énergie par stockage raisonnable passe entre deux chaleur tubes cylindriques en parallèles, et l'étude portait sur la forme mathématique en plaçant des hypothèses pour faciliter les équations et la conclusion était dans les dernières nous appellerons la fonction du stockage quantité. Nous limitant dans ce travail au seul module de stockage, partie essentielle de l'ensemble, nous avons démontré la possibilité d'atténuer considérablement les fluctuations de température du fluide caloporteur

Chapitre III Etude Expérimentale

Introduction:

Dans ce chapitre il est question du système de stockage de chaleur sensible et le développement de matériaux spécifiques comme support de stockage. Les matériaux proposés dans cette étude sont des matériaux naturels et sont disponibles dans la région d'el-oued (sable / plâtre /sel) En plus du nouveau moyen est aussi la source de la nature (le rose de sable) . par le choix de ce système (appelé module plan), on étudie ces matériaux sous forme des tubes cylindrées entre lesquelles passe le fluide caloporteur (air) qui circule à l'intérieur des conduites et soumis à une température d'entrée périodique afin d'extraire les résultats et commenter en fournissant les hypothèses suivantes.

Dans le chapitre précédent, le choix a été fixé sur l'utilisation du sable comme milieu de stockage, sachant que ce matériau est abondant dans le sud de l'Algérie, représentant ainsi 40% de la superficie du pays. Dans le cadre de ce travail, le sable utilisé est celui des dunes de la région d'El Oued située au sud de l'Algérie à une latitude de 33.50° et une longitude de 6.78° . Cette région est favorisée pour l'exploitation de l'énergie solaire

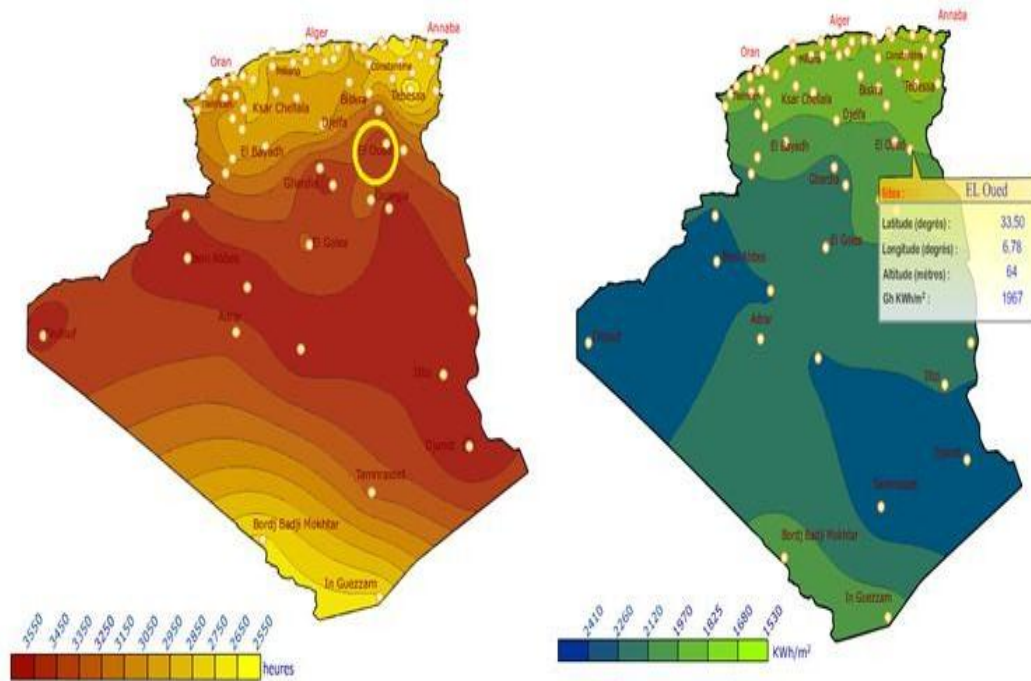


Figure III.1. Moyenne annuelle globale reçue sur une surface horizontale de la région d'ElOued[14].

1. Hypothèses :

Le schéma simplifié du module plan de stockage est représenté dans la figure suivant:

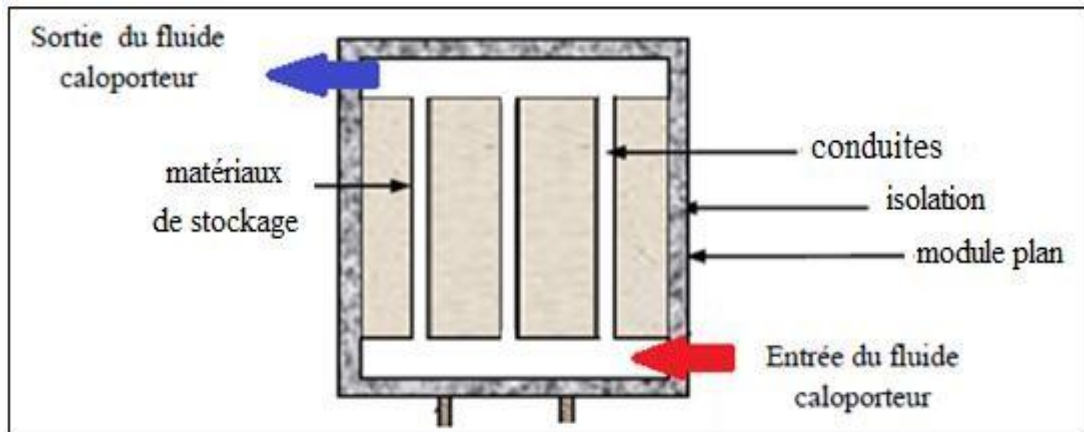


Figure III.2: Schéma simplifié de l'unité de stockage[15].

Le modèle étudié est basé sur les hypothèses suivantes:

- La module plan de stockage est parfaitement isolée.
- l'influence de la paroi sur les tubes (fabriqué en fer) est négligeable.
- La chute de pression dans les conduites est négligeable.
- Les modes de transfert thermique (conduction, convection et la rayonnement) entre les particules solides de stockage sont faites naturellement.
- Les gradients de températures se fait naturellement à l'intérieur des particules des matériaux de Stockage.
- La vitesse moyenne d'écoulement du fluide est constante dans tout le module.

2. Conception du système de stockage:

Le dispositif expérimental a été réalisé dans le laboratoire afin d'étudier le comportement thermique du sable et du plâtre, et ainsi déterminer sa capacité à stocker de la chaleur pour une application solaire. pour cela, un système composé d'un capteur solaire à air reliée par un échangeur de chaleur a été conçu (Figure III.3).

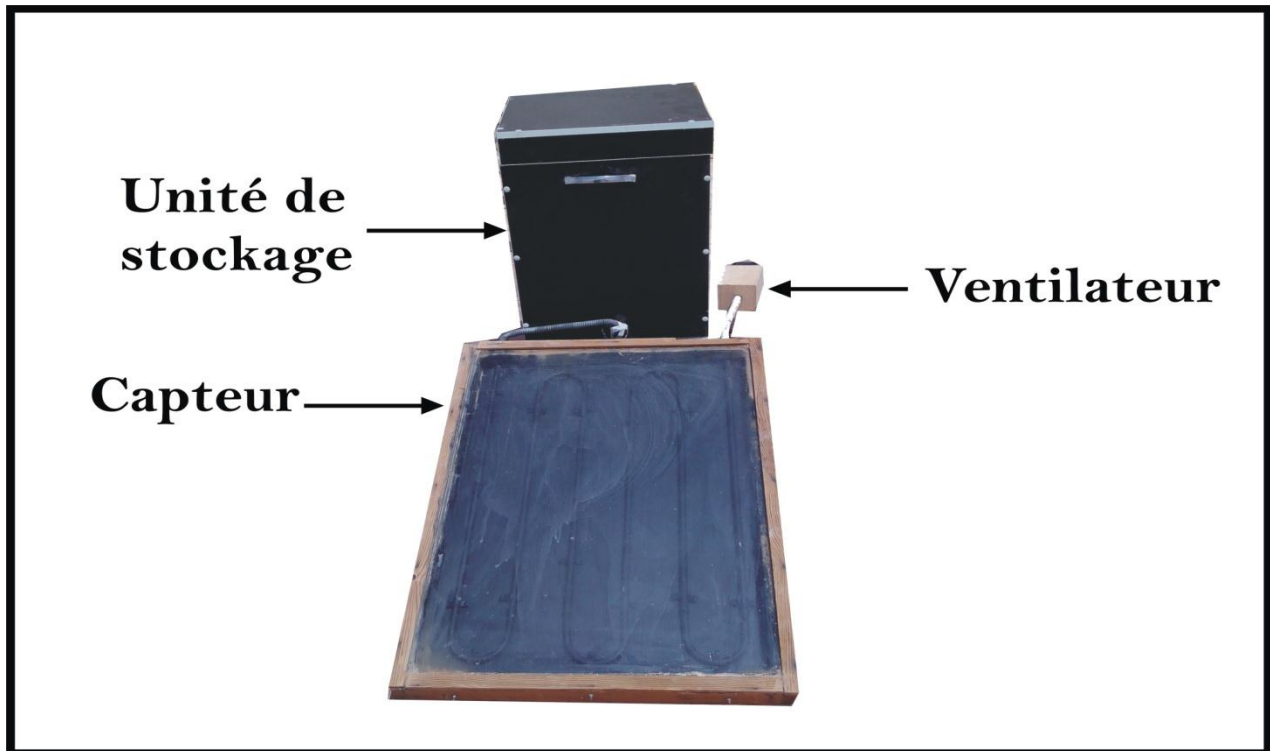


Figure III.3: Schéma de principe du système de stockage expérimental.

2.1. Description de la configuration étudiée :

La figure III.4 représente le schéma physique du système étudié. Il s'agit d'une cuve cubique de côtés (50 cm), formant un module plan contenant les matériaux de stockage (sable / plâtre / Sel / rose de sable) à l'intérieur duquel, sont installés des conduites cylindriques de diamètre (15 mm), constituant l'échangeur de chaleur. Ces derniers permettent la circulation du fluide caloporteur.

Le stockage d'énergie dans la cuve, s'effectue de manière active à l'aide d'un courant d'air Chaud provenant du capteur solaire plan à air.

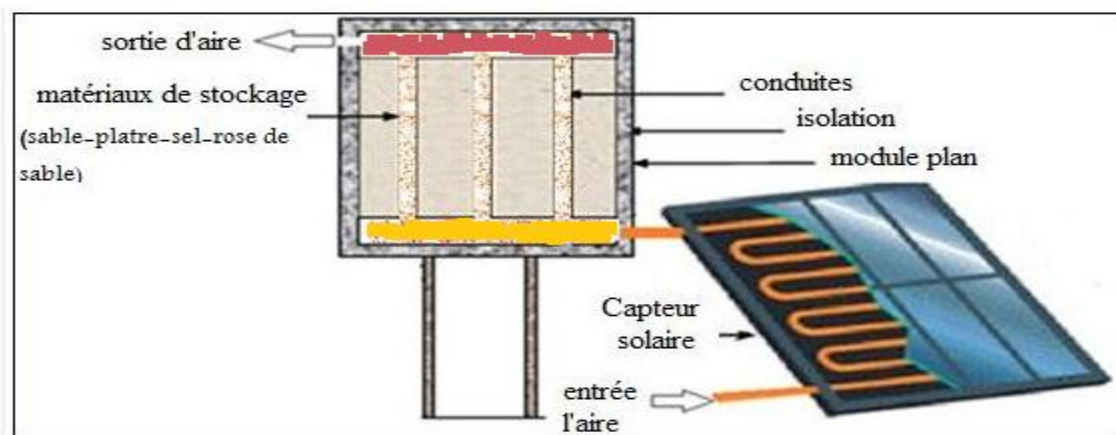


Figure III.4 : Schéma de principe du système de stockage[15].

3. - Matérielle le mesure de température:

3-1-Thermomètre:

Est un appareil qui sert à mesurer et à afficher la valeur de la température. C'est le domaine d'étude de la thermométrie. Développé durant les XVIe et XVIIe siècles, le thermomètre est utilisé dans différents domaines. Les applications des thermomètres sont multiples, en météorologie, en médecine, en cuisine, pour la régulation, dans les procédés industriels, etc.



Figure III.5: Image thermomètre pour mesurer la température.

3-2-Thermocouple :

Les thermocouples, ou couples thermoélectriques, sont en physique des couples de matériaux dont l'effet Seebeck, découvert en 1821 par le physicien allemand Thomas Johann Seebeck, est utilisé pour la mesure de la température. Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures. La principale limite est la précision obtenue. Il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une incertitude inférieure à $0,1^{\circ}\text{C}$.



Figure III.6: Image thermocouples.

3-3- Équipement utilisé pour mesurer le poids :

Balance

romaine



Figure III.7: Images du balance romaine

La **balance romaine** ou « romaine » est une balance qui se compose d'un fléau suspendu par une anse qui le divise en deux bras inégaux. Le bras le plus court porte un bassin (appelé « romaine ») ou un crochet (quintalier) destiné à soutenir l'objet à peser. L'équilibre est obtenu à l'aide d'un poids constant (curseur) qui, au moyen d'un anneau, glisse sur le bras le plus long : ce seul poids mobile permet de peser divers objets. L'équilibre a lieu lorsque le fléau est horizontal. Si la suspension est établie à l'aide de « couteaux » appui idéal sur un point que l'on retrouve dans le trébuchet des apothicaires et qu'on puisse négliger le frottement

4. Etude expérimentale sur le réservoir du stockage :

4-1 Nombres adimensionnels:

L'existence de multiples régimes de fluidisation avec des structures d'écoulement distincts et qui dépendent de plusieurs paramètres, (masse volumique, viscosité, débit, propriétés des particules solides, concentration), conduit à l'utilisation de nombres adimensionnels qui regroupent ces paramètres pour l'étude du comportement des modules plan.

5. Montage du module de stockage :

Les étapes de la fabrication en expérimentation avec la clarification :

5-1 - le capteur solaire:

Le capteur solaire utilisé dans le cadre de cette expérimentation est un capteur plan à air réalisé au laboratoire, de dimension 100×75cm.



Figure III.8: Images du capteur solaire

5-2-Fabrication du l'unité de stockage:



Figure III.9: l'image montre les étapes fabrication du l'unité de stockage

- Module plan fabriqué dans l'atelier spécial, par des matériaux en bois, car celui-ci est un matériau isolant.
- nous avons ajouté (Polyester) dans les aspects six Parce qu'il est le matériau idéal pour l'isolation thermique.
- Nous avons installé 12 tubes cylindriques dans laquelle l'air passe pour réaliser le stockage de chaleur d'un modèle.
- puis mettre le matériau là où il y a le stockage de la chaleur.
- Dans la phase finale de l'installation et fermeture du système pour faire l'expérience et extraire les résultats (comme dans l'image).

5-3 Composant l'unité de stockage (module plan):

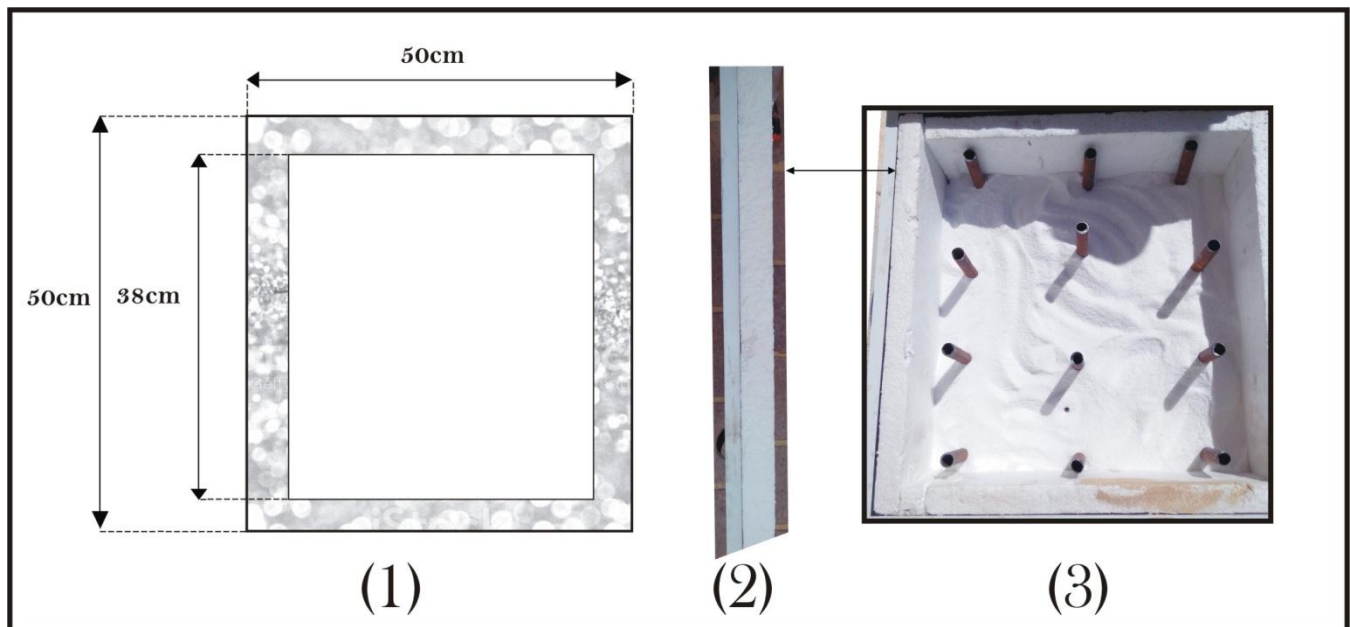


Figure III.10: Schéma du module plan de stockage : (1) les dimensions du module plan,(2) isolation, (3) photographie de module plan.

Le transfert de chaleur vers les matériaux est assuré par un échangeur de chaleur constitué de conduite tubulaire de 1.5 cm d'épaisseur extérieur et de 50 cm de longueur, par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (air) qui circule entre le capteur solaire à air et la cuve de stockage de bas en haut. La configuration de l'échangeur est illustrée par la figure suivante:

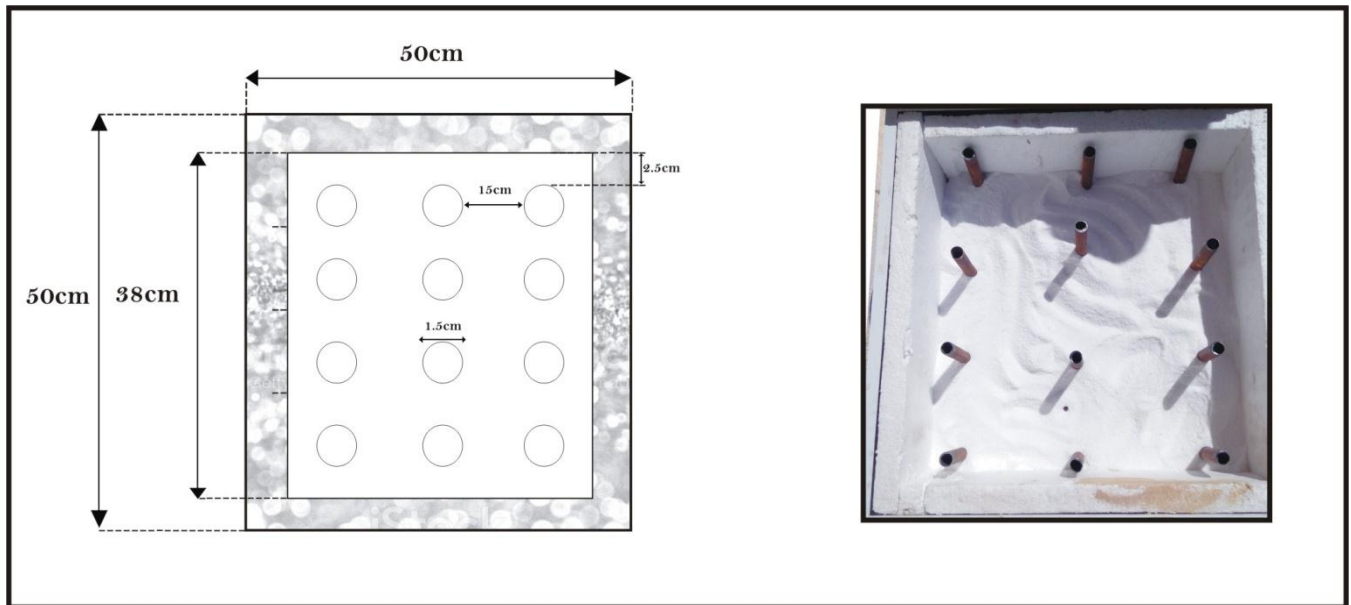


Figure III.11: dimensionnement de l'unité à l'intérieur.

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

6 - Résultats obtenus à partir des mesures :

Pour tous les tests expérimentaux, et la masse de sable utilisé et le plâtre est de 110 kg et 100 kg respectivement. Principe expérimental : la chaleur est installée dans la zone sur laquelle il est installé les tubes inférieure et supérieure et de calculer la température moyenne pour mesurer la température dans le sable. La température en dehors du système est mesurée (température ambiante) à l'aide d'un thermomètre. Avant d'exposer le capteur avion solaire à la lumière du soleil, il enregistre le degré de température de la matière, nous Capte de lumière solaire, et chaque fois que les températures sont enregistrées dans la plage de détection.

Matière de stockage thermique	C_p [J/kg. K]	ρ [kg/m ³]	K [W/m. K]
Sable	920	1600	2700
plâtre	1000	1500	0.56
sel	864.13	2163	-
Air	1006	1.17	0.026
Rose de sable	960	2100	0.78

Tableau III.1 : Propriétés thermo physique de la matière.

7 - Les résultats dans le cas de Stockage de chaleur dans le sable:



Figure III.12: illustration simplifié de model plan de stockage thermique dans sable.

Temps (h)	Température de milieu de stockage (k)					T (k)	T (k)	T (k)
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T _{moy}	ambiante	entrée	sortie
10 :00	303	303	303	303	303	303	303	303
10.30	305	305	305	305	305	304	306	307
11 :00	308	307,5	307	307,5	307,5	306,5	310	311
11 :30	310	309	309	310,5	309,6	308	311,5	313
12 :00	312,5	312,5	313	312	312,5	309,5	312	313
12 :30	313,5	314	313,5	313,5	313,6	311,5	313	315
13 :00	314,5	313,5	313,5	314,5	314	312,5	314	315
13 :30	314	314	314,5	314,5	314,2	312,5	315	316
14 :00	314,5	314,5	315	314,5	314,6	312,5	316,5	317,5
14 :30	314,5	315	314,5	315	314,7	312	318,5	319,5
15 :00	313	313	311	312	312,2	311	316	318
15 :30	312	312,5	311	311	311,6	310	314,5	316
16 :00	311	311	311	310,5	310,8	309	313	315

Tableau III.2: Résultats de stockage de chaleur (mode de sable) date
30 /04 /2018 .

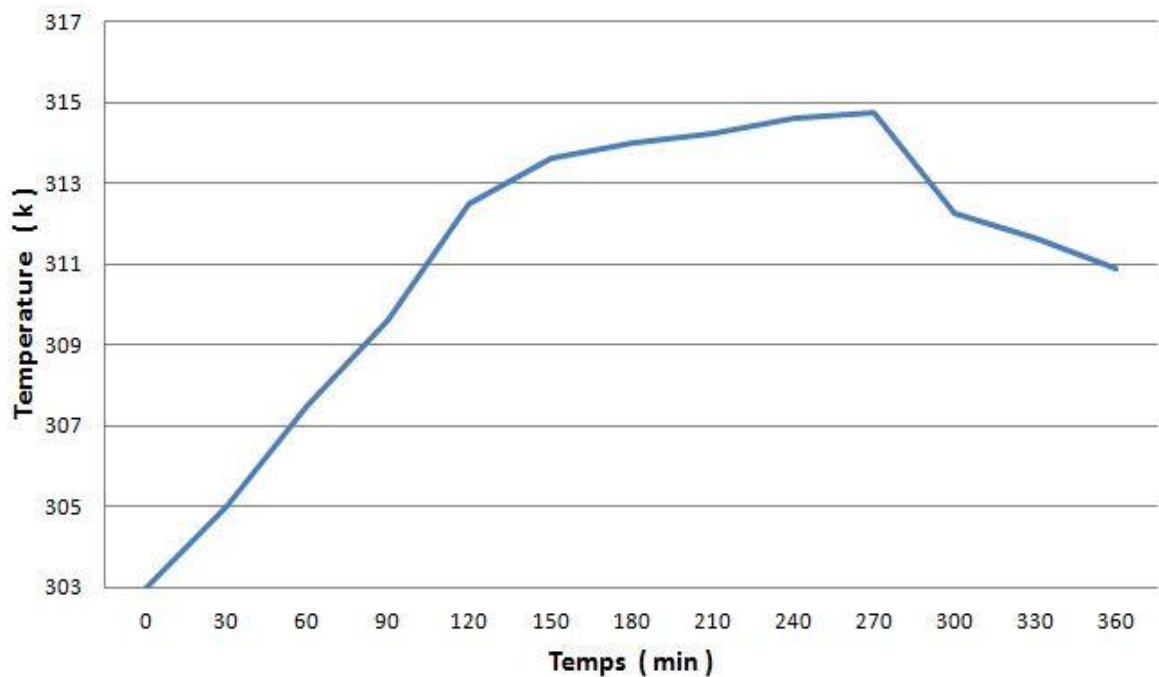


Figure III.13: Evolution temporelle de la température moyenne stockée dans le sable

Il ressort clairement de la figure (IV.11) l'évolution de degré la température unité de stockage pendant six heures (10:00 ; 16:00)

La chaleur stockée dans le sable stabilisé à 41.7 C° a 14h30, Et puis nous voyons la température baisser progressivement jusqu'à atteindre 37.9 C° à 16h00. La température ambiante va entre 30 C ° et 36 C ° a toute au long de l'expérience, Et la température de l'entrée et de la sortie est respectivement limitée entre (40 et 45,5) (42 et 46.5) C°, Nous avons pris les valeurs maximales de l'entrée et de la sortie car nous avons les valeurs de stockage les plus élevées (une relation positive).

IV.10.1. L'énergie stockée dans le sable:

$m=110[\text{Kg}]$, $C_p=920[\text{J/kg. K}]$; $T(t)=\text{Température instantanée du sable}$, $T(i)_{\text{sable}} = 30$.

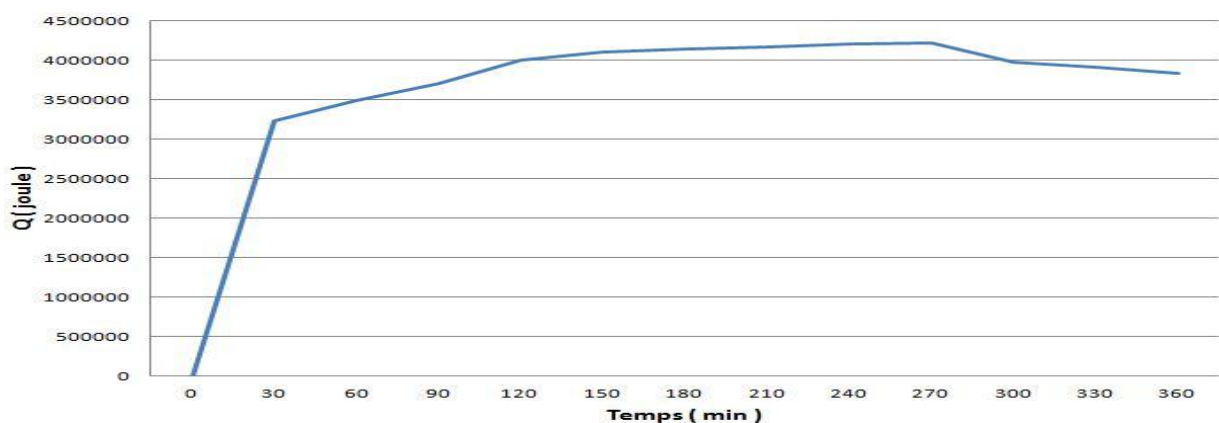


Figure III.14: Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de sable.

Dans cette Figure on remarque que l'énergie stockée dans le module plan de sable augmente progressivement jusqu'à s'atteindre à 4225 (KJ) à 14h30 , Et puis nous voyons la descente du graphique graduellement jusqu'à atteindre 3832 kj à 16h00.

7-1-Efficacité du stockage dans le sable:

Pour déterminer [11] les performances du système de stockage, il est nécessaire de calculer l'efficacité de charge (stockage), qui est basée sur la première loi de la thermodynamique, définie par le rapport entre l'énergie stockée par le matériau et l'énergie maximale reçue par le système (eq. IV. 4) :

$$\eta = \frac{T(t) - T_{ini}}{T_{sortie} - T_{ini}} \quad (. IV. 4)$$

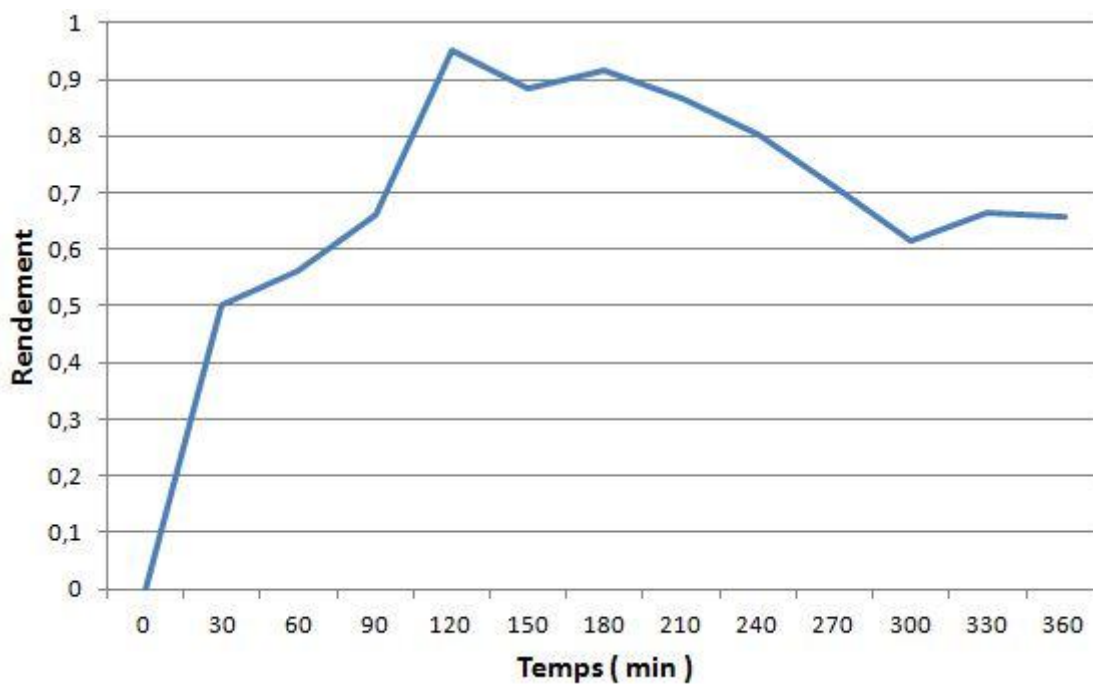


Figure III.15: Evolution du rendement instantané dans le module plan de sable

De cette courbe nous notons que le rendement augmente au cours du processus de sable , matériau de stockage de chaleur est à croissance rapide, Il montre un bon effort de 91% .

8 - Les résultats dans le cas de stockage de chaleur dans le plâtre(Gypse)



Figure III.16: illustration simplifié de model plan de stockage thermique dans le gypse.

Temps (h)	Température de milieu de stockage (k)					T (k) ambiante	T (k) entrée	T (k) sortie
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T _{moy}			
10 :00	299	299	299	299	299	299	299	299
10.30	301	300	300	301	300,5	301	307	309
11 :00	302	301	301,5	301,5	301,5	303,5	309	310
11 :30	303	302,5	302	302	302,3	304,5	311	312,5
12 :00	303	303	302,5	303	302,8	305	311,5	313
12 :30	303	303,5	304	303,5	303,5	307	312,5	314
13 :00	304	304	304	304	304	308	313,5	315
13 :30	305	304,5	305	304	304,6	308,5	314	316,5
14 :00	305,5	305	305	305,5	305,2	309	315	317
14 :30	305,5	304,5	305	304,5	304,8	308	315	317
15 :00	304,5	304,5	303,5	304	304,1	308	314	316
15 :30	304	304	304	303,5	303,8	307	315	317
16 :00	303	303	303	303,5	303,1	306	314,5	317

**Tableau III.3 Résultats de stockage de chaleur (cas de gypse) date
05 /05/2018.**

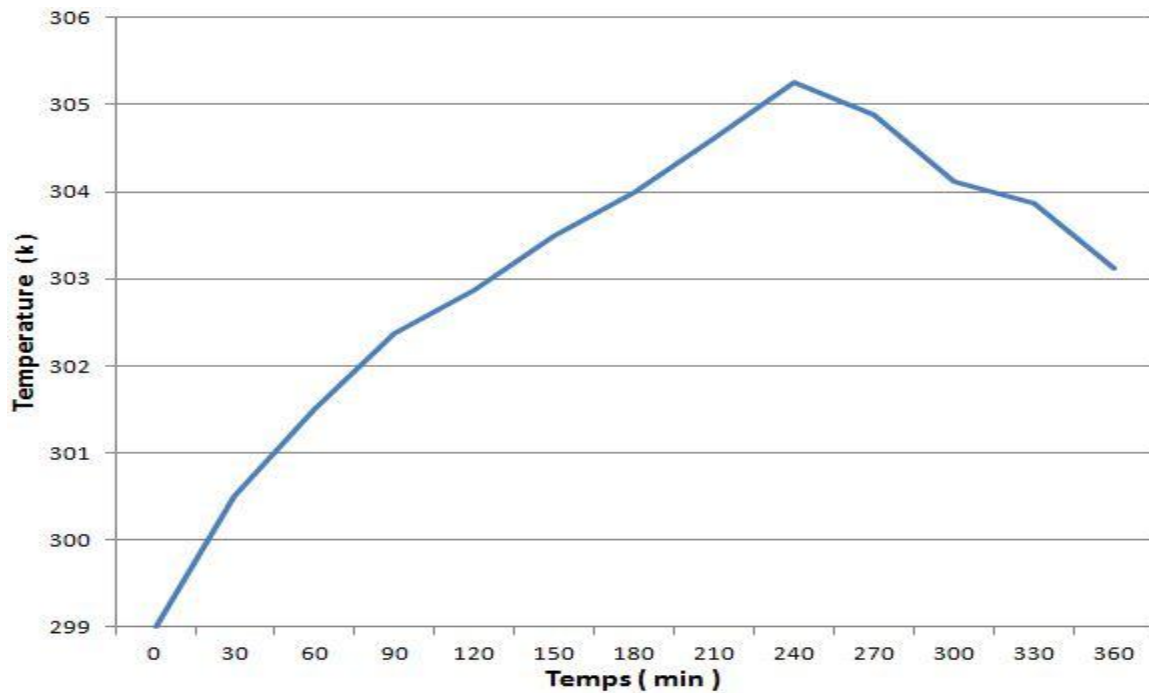


Figure III.17: Evolution temporelle de la température moyenne du plâtre

Il ressort clairement de la figure (IV.16) l'évolution de degré la température unité de stockage pendant six heures (10:00 ; 16:00)

La chaleur stockée dans le plâtre stabilisé à 32.25 C° a 14h00 , Et puis nous voyons la température baisser progressivement jusqu'à atteindre 30.2 C° à 16h00 . La température ambiante va entre 26 C ° et 36 C ° a toute au long de l'expérience, Et la température de l'entrée et de la sortie est respectivement limitée entre (41 et 42) (42 et 44) C°. Nous avons pris les valeurs maximales de l'entrée et de la sortie car nous avons les valeurs de stockage les plus élevées (une relation positive).

8-1 - L'énergie stockée dans le plâtre:

$m=100[\text{Kg}]$, $C_p=1000[\text{J/kg. K}]$; $T(t)=\text{Température instantanée du sable}, T(i)_{\text{plâtre}}= 26$

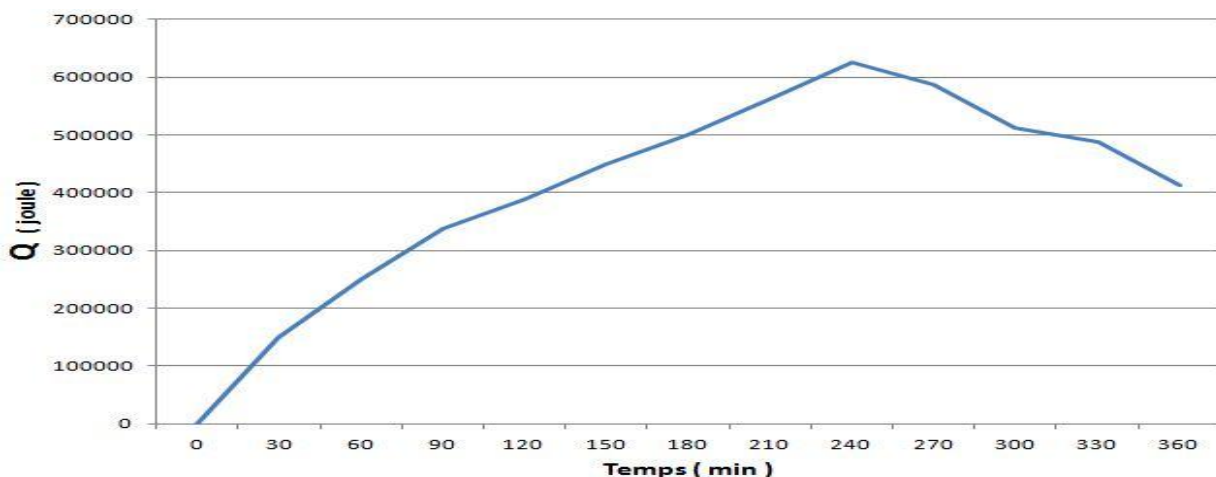


Figure III.18: Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de gypse

Dans cette Figure on remarque que l'énergie stockée dans le module plan de sable augment progressivement jusqu'à s'atteindre à 625 (KJ) a 14h30, Et puis nous voyons la descente du graphique graduellement jusqu'à atteindre 412.5 kJ à 16h00.

8-2 - Efficacité de stockage dans le plâtre:

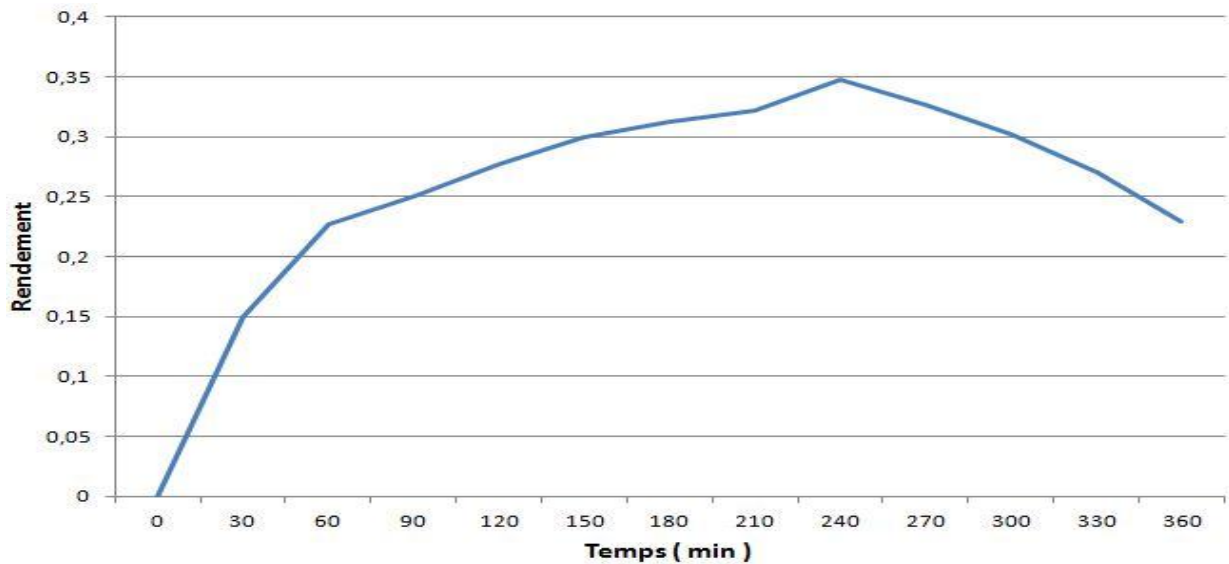


Figure III.19: Evolution du rendement instantané dans le module plan de gypse.

De cette courbe nous notons que le rendement augmente au cours du processus de plâtre, matériau de stockage de chaleur à croissance lente, Lorsqu'il apparaît que le rendement ne dépasse pas 34%.

9 - résultats dans le cas de stockage de chaleur dans le sel:



Figure III.20: illustration simplifiée de model plan de stockage thermique dans le sel

Temps (h)	Température de milieu de stockage (k)					T (k)	T (k)	T (k)
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T _{moy}	ambiante	entrée	sortie
10 :00	297	297	297	297	297	297	297	297
10.30	300	299	299	300	298,75	300	304	306
11 :00	302	301,5	301	302	301,1	300,5	308	311
11 :30	302,5	302,5	302,5	302,5	302,3	302	309,5	311,5
12 :00	303	303,5	304	303	303,2	302,5	310	312
12 :30	304	304,5	304,5	305	304,2	303	310,5	312,5
13 :00	304	305	305	305	304,7	303,5	310	313
013 :30	305	305	305	305	304,7	303,5	310,5	313
14 :00	305,5	305	305,5	305	305,1	303	310,5	312,5
14 :30	305	305	305	305	305,1	303,5	310	312,5
15 :00	304,5	304,5	304	305	304,6	303	309	311
15 :30	304,5	304	303,5	305	304,2	302	308,5	310
16 :00	303	304	304	304	304,1	301,5	308	309

**Tableau III.4 Résultats de stockage de chaleur (cas de sel) date
03 /05/2018.**

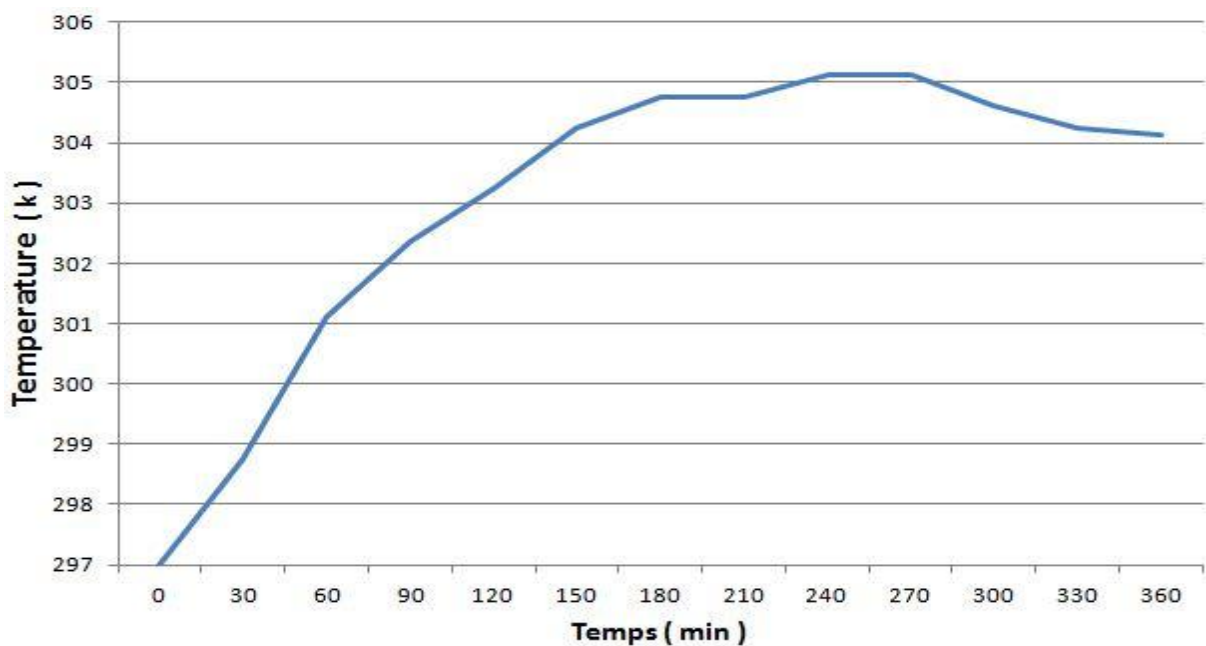


Figure III.21: Evolution temporelle de la température moyenne du sel.

La chaleur stockée dans le sel stabilisé à 32.25 C°a 14h00 , Et puis nous voyons la température baisser progressivement jusqu'à atteindre 31.2 C° à 16h00 . La température ambiante va entre 24 C ° et 30.5 C ° a toute au long de l'expérience , Et la température de l'entrée et de la sortie est respectivement limitée entre (35 et 37.5) (36 et 40) C°. Nous avons pris les valeurs maximales de l'entrée et de la sortie car nous avons les valeurs de stockage les plus élevées (une relation positive).

9-1- L'énergie stockée dans le sel:

$m=65[\text{Kg}]$, $C_p=864.13 [\text{J/kg. K}]$; $T(t)=\text{Température instantanée du sel}$, $T(i)_{\text{sel}}= 26$

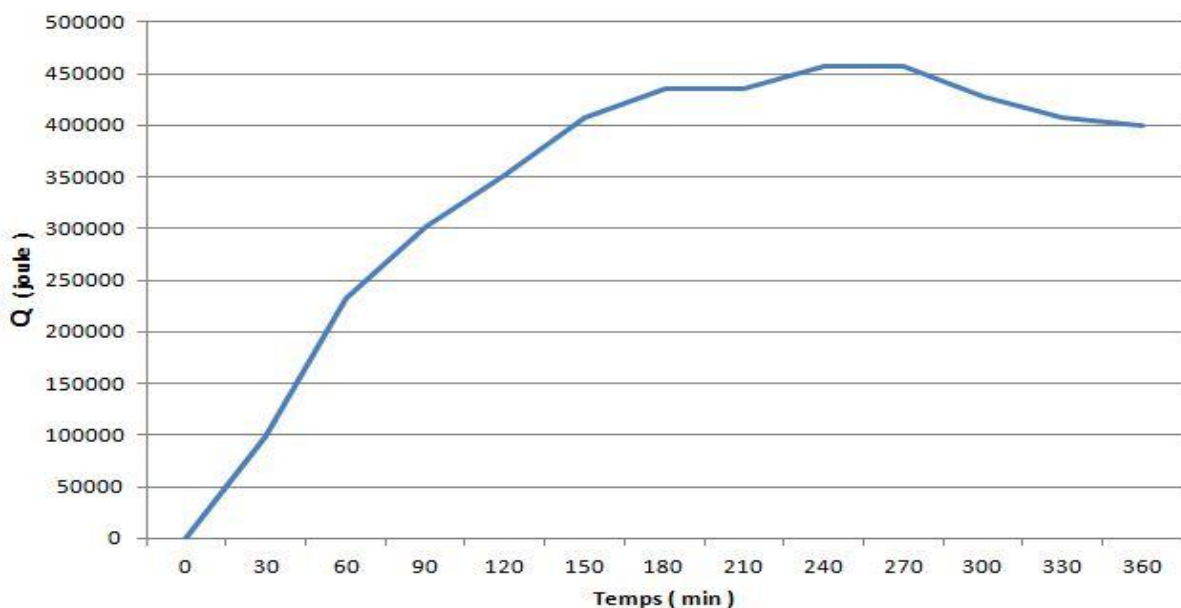


Figure III.22: Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de sel.

Dans cette Figure on remarque que l'énergie stockée dans le module plan de sel augment progressivement jusqu'à s'atteindre à 456.4 (KJ) a 14h30, Et puis nous voyons la descente du graphique graduellement jusqu'à atteindre 400.2 kJ à 16h00.

9-2 - Efficacité de stockage dans le sel:

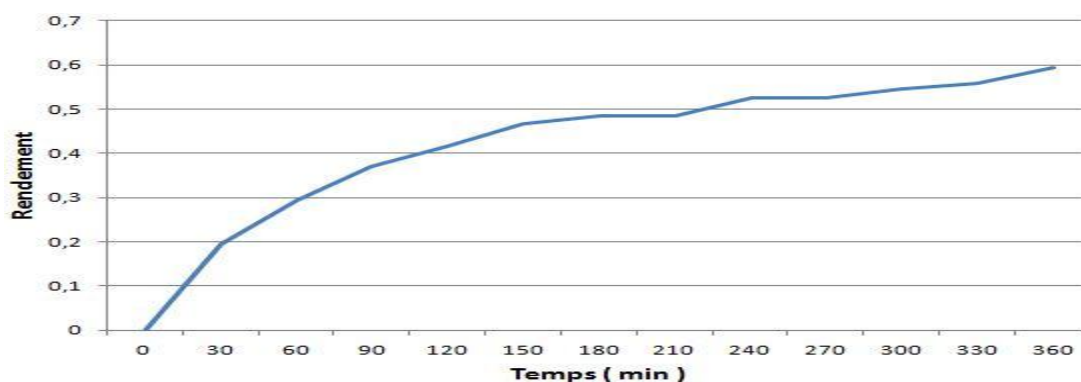


Figure III.23: Evolution du rendement instantané dans le module plan de sel.

De cette courbe nous notons que le rendement augmente au cours du processus de sable, matériau de stockage de chaleur est à croissance rapide, Il montre un bon effort de 59% et a été limité en ce moment.

10-Les résultats dans le cas de stockage de chaleur dans le (plâtre+sel):



Figure III.24: illustration simplifiée de model plan de stockage thermique dans le (plâtre +sel).

Temps (h)	Température de milieu de stockage (k)					T (k) ambiante	T (k) entrée	T (k) sortie
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T _{moy}			
10 :00	299	299	299	299	299	299	299	299
10.30	303	303	303	303	303	301	310	312
11 :00	305	305,5	305	305,5	305,2	303,5	312	313,5
11 :30	306	305,5	306	306	305,8	305,5	313	314
12 :00	307,5	308	308	308,5	308	307,5	315	318
12 :30	309,5	309	308,5	309	309	309	316	320
13 :00	311,5	311	311,5	311	311,2	310	317	321
013 :30	312	313	313	313	312,7	310,5	317	321
14 :00	312	312,5	312,5	313	312,5	310	316	320
14 :30	311,5	312	311,5	312	311,7	309,5	314	318
15 :00	311	311	310,5	311,5	311	309	314	317
15 :30	310	310,5	310,5	311	310,5	308	313	315
16 :00	310	310,5	309,5	310	310	307,5	312	314

Tableau III.5 : Résultats de stockage de chaleur (cas de plâtre+sel) date 06 /05/2018.

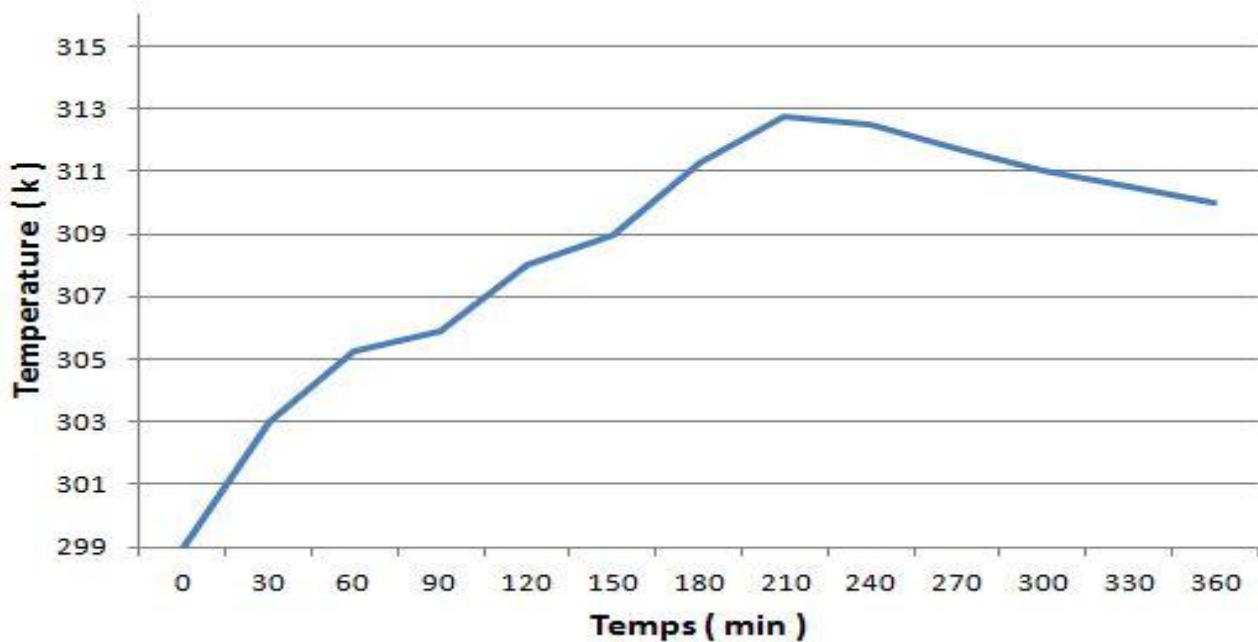


Figure III.25: Evolution temporelle de la température moyenne du (gypse+sel).

La chaleur stockée dans le sel stabilisé à 39.8 C° a 14h00 , Et puis nous voyons la température baisser progressivement jusqu'à atteindre 37 C° à 16h00 . La température ambiante va entre 26 C ° et 37.5 C ° a toute au long de l'expérience, Et la température de l'entrée et de la sortie est respectivement limitée entre (39 et 44) (42 et 48) C°. Nous avons pris les valeurs maximales de l'entrée et de la sortie car nous avons les valeurs de stockage les plus élevées (une relation positive).

10-1 L'énergie stockée dans le mélange (Plâtre + sel):

$$C_{P(platre+sel)} = \frac{C_{p sel} + C_{p platre}}{2} = 932.07 \left[\frac{J}{kg} \cdot K \right]$$

$m=90[Kg]$, $T(t)$ = Température instantanée du (Plâtre+sel) , $T(i)_{mélange}=26$.

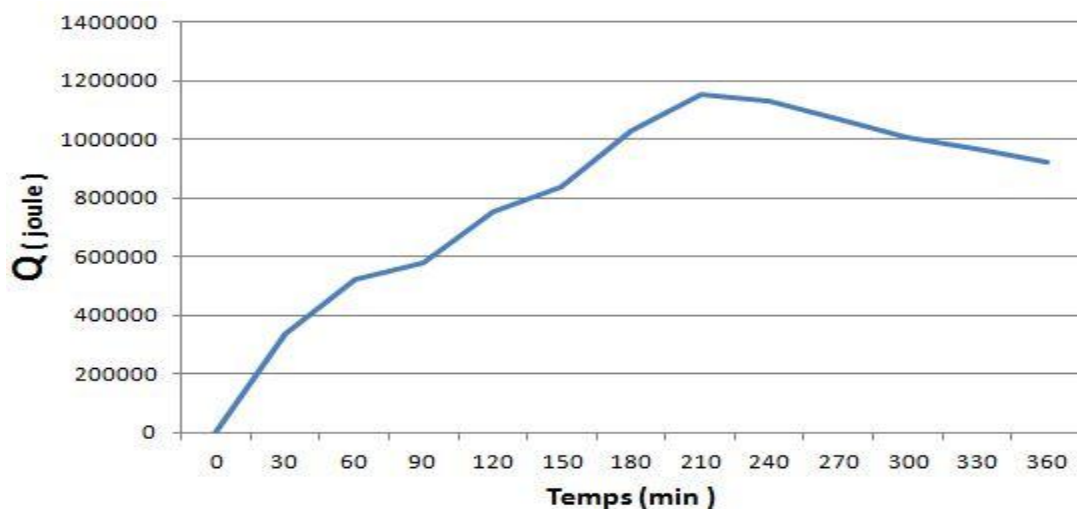


Figure III.26: Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de (plâtre +sel).

Dans cette Figure on remarque que l'énergie stockée dans le module plan de sel augment progressivement jusqu'à s'atteindre à 1153.4 (KJ) a 14h30, Et puis nous voyons la descente du graphique graduellement jusqu'à atteindre 922.7 kJ à 16h00.

10-2 Efficacité de stockage dans le (plâtre +sel):

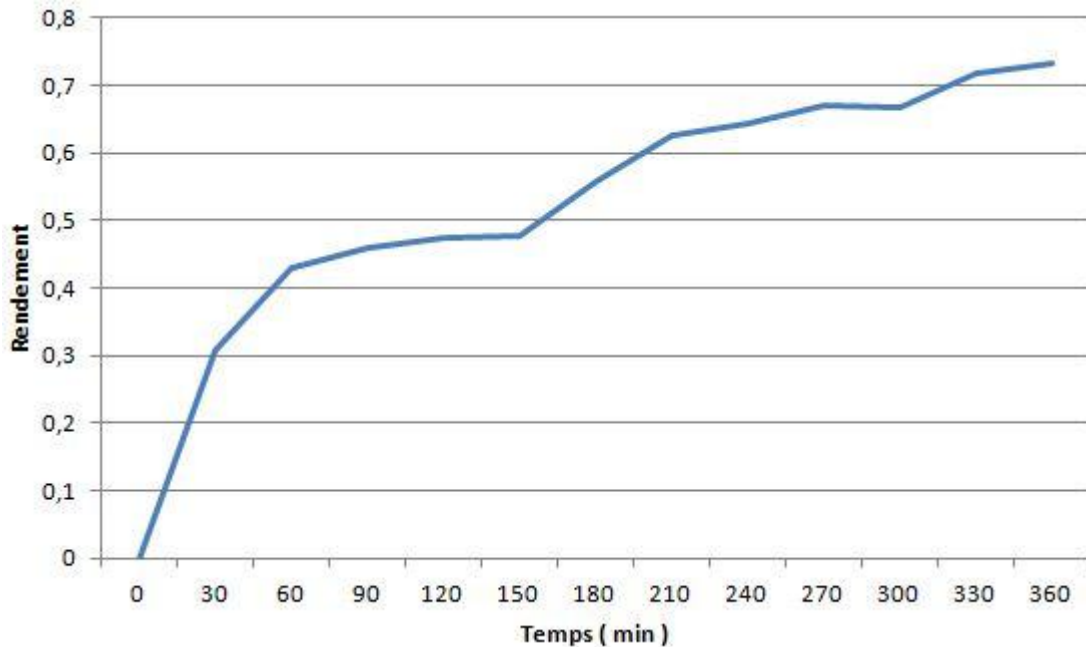


Figure III.27: Evolution du rendement instantané dans le Module plan de (plâtre +sel).

De cette courbe nous notons que le rendement augmente au cours du processus de (plâtre +sel), matériau de stockage de chaleur est à croissance rapide, Il montre un bon effort de 73% et a été limité en ce moment.

11 -Les résultats dans le cas de stockage de chaleur dans le rose de sable (les roches):



Figure III.28: illustration simplifié de model plan de stockage thermique dans le rose de sable (les roches).

Temps (h)	Température de milieu de stockage (c)					T (c)	T (c)	T (c)
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T _{moy}	ambiante	entrée	sortie
10 :00	302	302	302	302	302	302	302	302
10.30	305	305	305	305	305	305	308	309
11 :00	307	307	308	308	307,5	306	309	310
11 :30	308	308	309	309	308,5	308	310	312
12 :00	309,5	309	309	308,5	309	309,5	311	313
12 :30	311	311,5	310,5	311	311	311,5	313	314
13 :00	312	313	314	313	313	312	315	316
13 :30	315,5	315	315,5	315	315,2	312,5	317	319
14 :00	316	315,5	315,5	316	315,7	312	318	319,5
14 :30	315	314,5	314,5	314	314,5	311,5	316	318
15 :00	314,5	314	314	313,5	314	310,5	315	317
15 :30	313,5	313,5	313,5	313	313,3	310	314	315
16 :00	313	312,5	313,5	313	313	309	313,5	314,5

Tableau III.6 : Résultats de stockage de chaleur (cas du rose de sable) date 07 /05/2018.

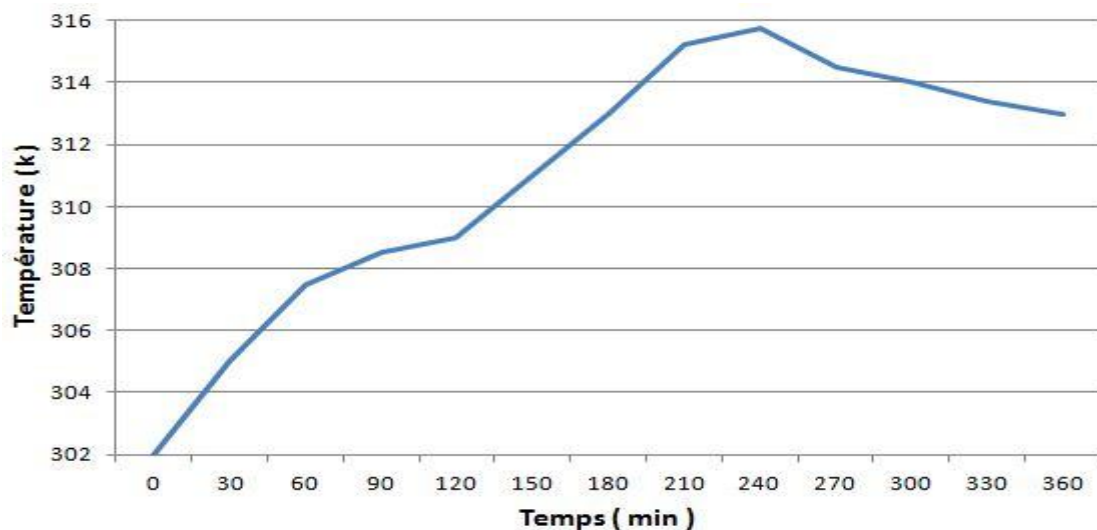


Figure III.29: Evolution temporelle de la température moyenne du rose de sable.

La chaleur stockée dans le rose de sable stabilisé à 42.7 C° a 14h00, Et puis nous voyons la température baisser progressivement jusqu'à atteindre 40 C° à 16h00. La température ambiante va entre 29 C ° et 39.5 C ° a toute au long de l'expérience, Et la

température de l'entrée et de la sortie est respectivement limitée entre (40.5 et 44) (41.5 et 46.5) C°. Nous avons pris les valeurs maximales de l'entrée et de la sortie car nous avons les valeurs de stockage les plus élevées (une relation positive).

11-1-L'énergie stockée dans le rose de sable:

$m=74[\text{Kg}]$, $T(t)=$ Température instantanée du rose de sable , $T(i)r =29$.

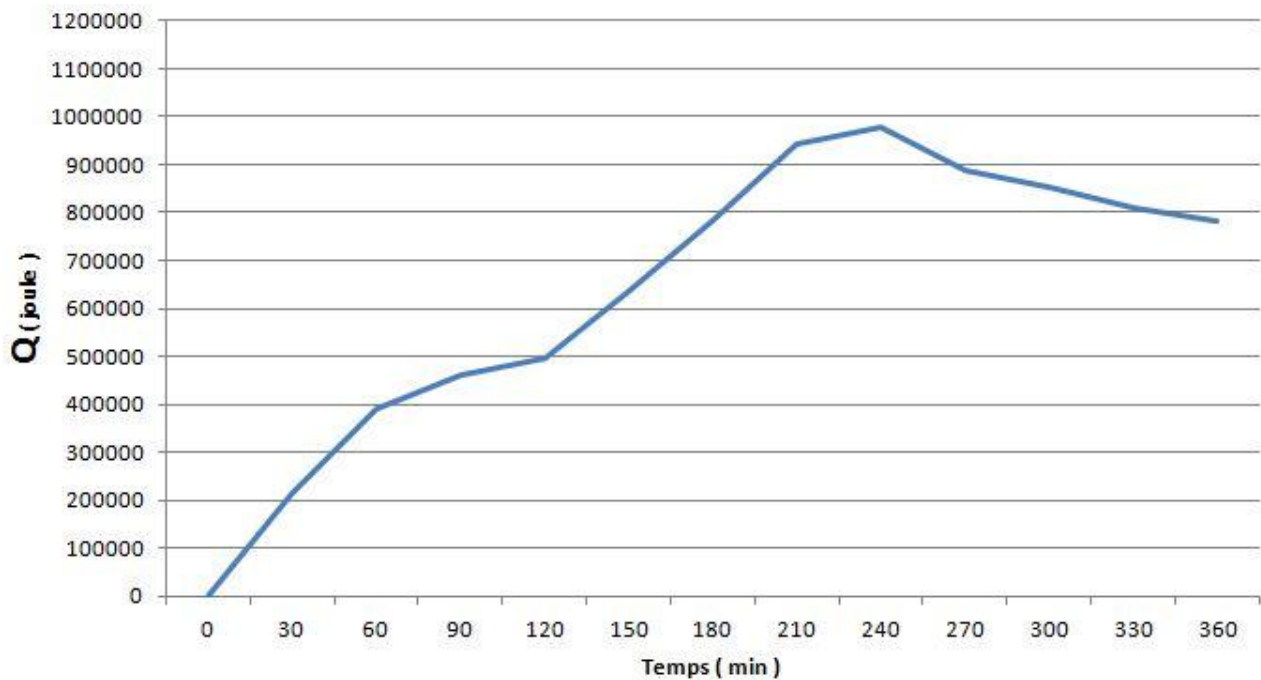
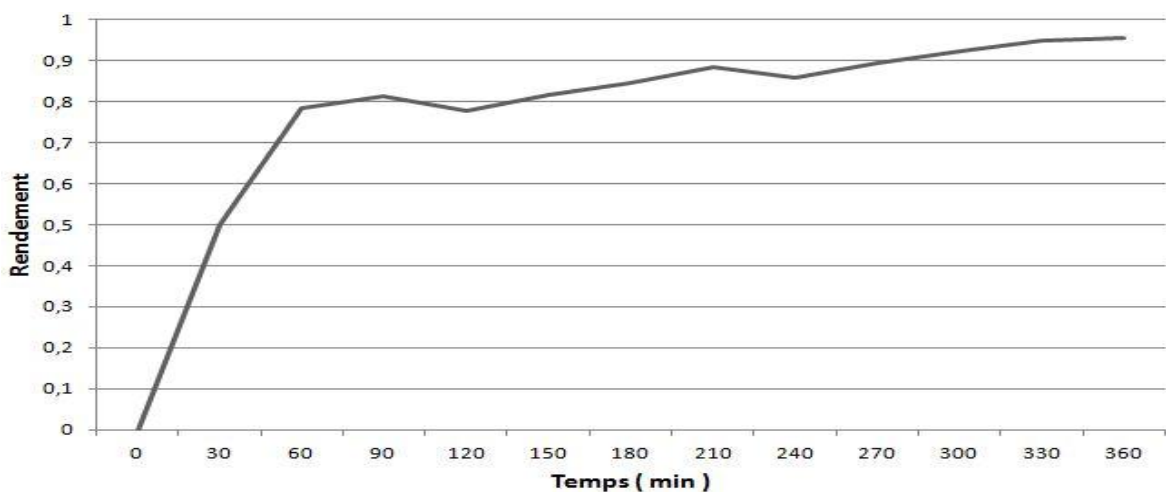


Figure III.30: Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de sable

Dans cette Figure on remarque que l'énergie stockée dans le module plan de sel augment progressivement jusqu'à s'atteindre à 976.8 (KJ) a 14h30, Et puis nous voyons la descente du graphique graduellement jusqu'à atteindre 781.4 kJ à 16h00.

11-2- Efficacité de stockage dans le rose de sable



:

Figure III.31: Evolution du rendement instantané dans le Module plan du rose de sable.

De cette courbe nous notons que le rendement augmente au cours du processus du rose de sable, matériau de stockage de chaleur est à croissance rapide, Il montre un bon effort de 95% et a été limité en ce moment.

12- Estimation de l'efficacité globale des matériaux et du module plan :

Dans ce partir on va présenter l'efficacité de tout les cycles de notre système :

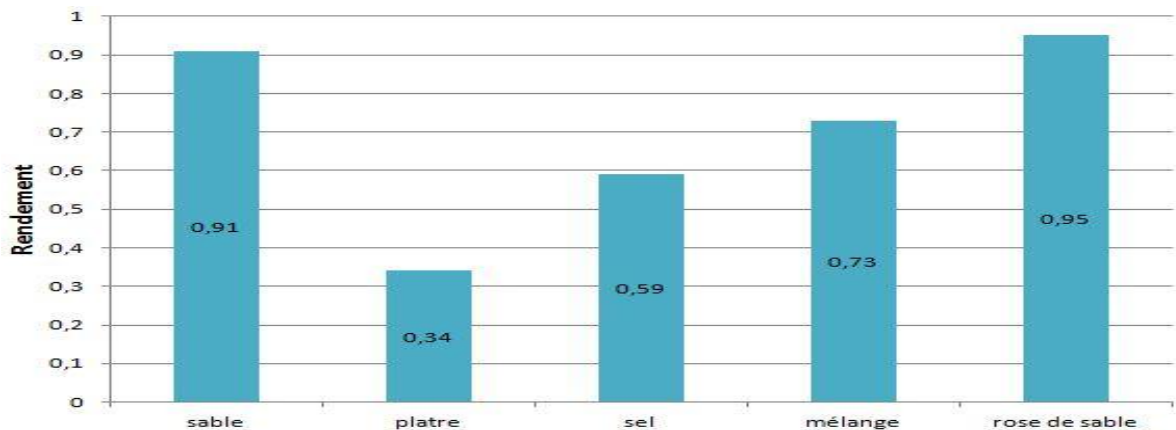


Figure III.32: Efficacité globale du système de stockage

❖ Comparaison numérique :

Nous avons comparé certains des résultats des notes précédentes comme suit :

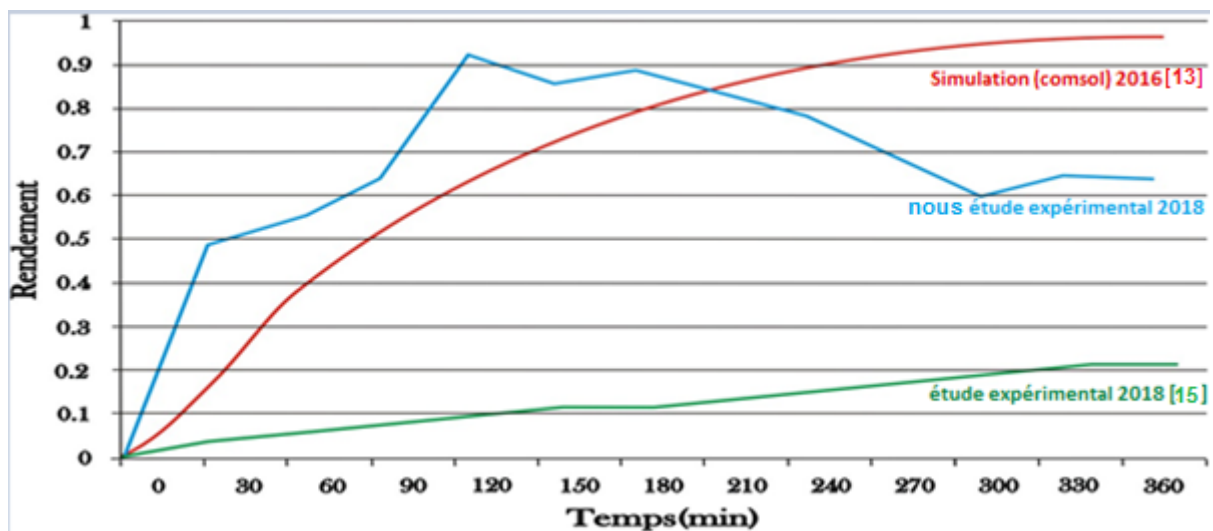


Figure III.33: Comparaison du rendement de stockage thermique du sable à partir de différentes études expérimental et simulation.

Interprétation :

En comparant les résultats de la chaleur et du rendement de notre mémoire et des notes précédentes dans le type d'échangeur de chaleur (tubulaire et à plaque), nous avons conclu que la forme tubulaire offrait le plus gros rendement et la plus grande quantité de chaleur pour le

même matériau de stockage. D'autre côté, La comparaison du rendement du sable de nos résultats avec les résultats de la simulation COMSOL donne un bon accord entre eux.

Conclusion général

Conclusion générale

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible est une forme d'énergie renouvelable, il est en cours de développement si on observe le nombre élevé de publications dans ce domaine. L'ensemble de ces travaux montre une claire préférence pour les approches expérimentales par rapport aux approches numériques.

Dans ce travail nous avons fait une étude expérimentale du test des matériaux locaux basée sur le principe de chaleur sensible, l'objectif de ce test est d'identifier le meilleur matériau caractérisé par très grande puissance de stockage thermique. Ensuite on va utiliser ces matériaux dans un échangeur de chaleur pour améliorer leur efficacité de stockage de chaleur.

Pour cela, nous avons réalisé une unité de stockage thermique composée par ensemble des tubes cylindriques uniformes, et remplis par différents matériaux locaux au milieu de l'unité. En plus, un fluide caloporteur « air chaud » traverse côté intérieur des tubes cylindriques qui revient d'un panneau solaire chargé par les calories à température élevée.

Les matériaux locaux qu'on va tester présentés par du sable, sel, gypse (plâtre), mélange (sel avec gypse) et en fin roche de désert « rose de sable » existants dans la région d'E-Oued.

Cette étude expérimentale nous a permis d'écrire les points suivants :

Dans le cas de stockage, Les résultats montrent que le rose de sable est le meilleur matériau par un grand pourcentage (95%) caractérisé par une grande puissance de stockage puis le sable (91%) et le mélange (73%) respectivement.

La comparaison des résultats du rendement de notre travail et les travaux précédents dans le type d'échangeur de chaleur (tubulaire et à plaque), conclut que la forme tubulaire offre le plus grand rendement et la plus grande quantité de chaleur pour le même matériau de stockage.

Le test qui concerne matériau composé de sel avec gypse 'plâtre' confirme et approuve les résultats obtenus en [15]

D'autre côté, La comparaison du rendement du sable de nos résultats avec les résultats de la simulation COMSOL [13] donne un bon accord entre eux.

Finalement, Cette étude est une étude expérimentale simple dans le domaine énergie renouvelable, nous donne une visualisation plus loin et point de départ pour développer et améliorer l'une des technologies de stockage d'énergie sous type : stockage thermique par chaleur sensible.

Bibliographies

Bibliographies

- [1] X. Py, Y. Azoumah, and R. Olives, "Concentrated solar power: Current technologies, major innovative issues and applicability to West African countries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 306–315 (2013).
- [2] Dumas, J.P., « Stockage du froid par chaleur latente », *Techniques de l'ingénieur-traité génie énergétique*, PP BE 9 775:1-22, (2002).
- [3] Flueckiger SM, Iverson BD, Garimella SV, Pacheco JE. System level simulation of a solar power tower plant with thermocline thermal energy storage. *Appl Energy* 2014; 113; 86–96.
- [4] M.E. Navarro, M. Martinez, A. Gil, A.I. Fernandez, L.F. Cabeza, R. Olives, X. Py, Selection and characterization of recycled materials for sensible thermal energy storage, *Sol. Energy Mat. Sol. Cells*, 107 (2012) 131–135.
- [5] combined use of phase change material and rock particles for high temperature (350 °C) heat storage, *Energy Convers. Manag.* 79 (2014) 1-8.
- [6] S. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques," *Energy Conversion and Management*, vol. 39, pp. 1127-1138, 1998.
- [7] K.A.R. Ismail, R. Stuginsky Jr., A parametric study on possible fixed bed models for pcm and sensible heat storage, *Appl. Therm. Eng.* 19 (1999) 757-788.
- [8] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Luzaro, P. Dolado, B. Zalba, L.F. Cabeza, State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization, *Renew. Sust. Energy Rev.* 14 (2010) 31–55.
- [9] S. Kuravi, J. Trahan, D.Y. Goswami, M.M. Rahman, E.K. Stefanakos, Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants, *Prog. Energy Combust. Sci.* 39 (2013) 285– 319.
- [10] L. Geissbuhler, M. Kolman, G. Zanganeh, A. Haselbacher, A. Steinfeld, Analysis of industrial-scale high-temperature combined sensible/latent thermal energy storage, *Appl. Therm. Eng.* 101 (2016) 657–668.
- [11] J. Cot-Gores, A. Castell, L.F. Cabeza, Thermochemical energy storage and conversion: A-state-of-the-art review of the experimental research under practical conditions, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 5207–5224.

Bibliographie

- [12] bechiri.m . optimisation du stockage par chaleur sensible et latente dans un module plan et cylindrique en régime instationnaire (doctoral dissertation. université m'hamed bougara – boumerdes-2015).
- [13] bekkari. z.al. effet de la géométrie de l' échangeur de chaleur sur les performances d' un réservoir de stockage thermique solide (master .université hamma lekhdhar el-oued-2016).
- [14] Mahfoudi, N. Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider de Biskra).
- [15] djallah b. étude expérimentale de géométrie d'échangeur de chaleur pour améliorer l'efficacité de réservoir de stockage thermique (Master. université hamma lekhdhar el-oued-2017).
- [16] Lomonaco, A. M. G. (2015). Stockage d'énergie thermique par matériaux à changements de phase adapté aux centrales solaires thermodynamiques (Doctoral dissertation, Pau).
- [17] « Solar Spectral Irradiance », NREL.gov. [En ligne]. Disponible sur: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>.
- [18] Connaissance des énergies, <http://www.connaissancedesenergies.org/>,
- [19] X. Py, Y. Azoumah, and R. Olives, "Concentrated solar power: Current technologies, major innovative issues and applicability to West African countries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 306–315 (2013).
- [20] A. Laghzaoui, D. Peerhossaini. Stockage de chaleur : énergie solaire et autres applications : écoles des mines de douai.
- [21] tiskatine.r Valorisation énergétique des matériaux locaux pour des applications dans les centrales CSP et dans le domaine des bâtiments (Doctoral. . UNIVERSITE-ibn zohr).
- [22] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, et H. Mehling, « Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no 3, p. 251–283, 2003.
- [23] Dumas, J.P., « Stockage du froid par chaleur latente », *Techniques de*

Bibliographies

- l'ingénieur-traité génie énergétique, PP BE 9 775:1-22, (2002).
- [24] Mehling H, Cabeza LF. Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications. Springer; 2008.
- [25] Jian Y, Falcoz Q, Neveu P, Bai F, Wang Y, Wang Z. Design and optimization of solid thermal energy storage modules for solar thermal power plant applications. Appl Energy 2015; 139;30–42
- [26] Barreneche C, Fernández A I, Cabeza L F, Cuypers R. Thermophysical characterization and thermal cycling stability of two TCM: CaCl₂ and zeolite. Appl Energy 2015;726–730.
- [27] C. Chaussin, G. Hilly, Chaleur et thermodynamique : Ecole nationale d'ingénieurs arts et métiers, écoles d'ingénieurs, Edition Dunod, 4ème Ed., Paris, 1962.
- [28] M. Orfeuil, A. Robin, Electrothermie industrielle: Fours et équipements thermiques électriques industriels, Editions Dunod, 1981, 150 p.
- [29] Ana-Maria Bianchi et al, Transferts thermiques, presses polytechniques et universitaire Romandes, Lausanne, 1ère édition, (2004).
- [30] A.Haji-Sheikh, J. V. Beck, Temperature solution in multi-dimensional multi-layer bodies, Int. J. Heat Mass Transfer 45, 1865-1877, (2002).
- [31] F.P. Incropera, D.P. De Witt, Fundamentals of heat and mass transfer. 5th ed. New York:
- [32] D. J. Matyas, T. Ohji, X. Liu, et al., "Advances in Materials Science for Environmental and Energy Technologies II," Lab.Oak Ridge National (ORNL), Tech. Rep., 2013.
- [33] B. Eyglunent, Manuel de thermique théorie et pratique, 2 ème édition, HERMES, 1997,374 p.
- [34] C. C. Furnas, "Heat Transfer from a Gas Stream to a Bed of Broken Solids-II," Industrial & Engineering Chemistry, vol. 22, pp. 721-731, 1930.

المخلص:

يتم إحياء الاهتمام الحالي بتطوير تكنولوجيات إنتاج الطاقة النظيفة من قبل الحكومة بالنظر إلى سياق الطاقة والبيئة الحالي (أسعار النفط ، والتلوث ، وتأثيرات الاحتباس الحراري ، وما إلى ذلك). يمثل استغلال الطاقة الشمسية حلاً ضرورياً

في هذا العمل من المذكرة ، سوف نقوم بإعداد دراسة تجريبية لتحديد أداء وحدة التخزين باستخدام مواد محلية مختلفة في منطقة الوادي كوسط تخزين والمتمثلة في (الرمل ، الجبس ، الملح ، الخليط ، وردة الرمال (الصخر)).

الغرض من تحليل تأثير هندسة المبادل الحراري الذي يوزع المائع الساخن (الهواء) على أداء التخزين ، تكوينات مختلفة سنقوم باختبارها.

سيكون التحليل الحراري الذي سيتم تحقيقه في نظام التخزين من خلال قياس فوري بواسطة أجهزة قياس محددة

الكلمات المفتاحية: التخزين الحراري - المبادل الحراري - نقل الحرارة - مواد التخزين

Résumé :

L'intérêt actuel du développement des technologies de production d'énergies propres est relancé par le gouvernement vu le contexte énergétique et environnemental actuel (prix du pétrole, pollution, effet de serre, etc.). L'exploitation de l'énergie solaire représente une solution d'exigence.

Dans ce travail de mémoire, on va préparer une étude expérimentale en vue de quantifier les performances d'une unité de stockage en utilisant différents matériaux locaux de la région d'el-oued comme milieu de stockage . Représenté en (Sable, gypse, sel, mélange et rose des sables)

Le but d'analyser l'effet de la géométrie de l'échangeur de chaleur qui fait circuler le fluide caloporteur sur les performances de stockage, différentes configurations on va tester.
L'analyse thermique qu'on va réaliser au système de stockage ça sera à travers une mesure instantanée par des appareils de mesures spécifiques.

Mots clés : Stockage thermique – échangeur de chaleur – transfert thermique – matériaux de stockage.

Abstract

The current interest in the development of clean energy production technologies is revived by the government given the current energy and environmental context (oil prices, pollution, greenhouse effect, etc.). The exploitation of solar energy represents a solution of exigency.

In this work of memory, we will prepare an experimental study to quantify the performance of a storage unit using different local materials of the region of el-oued as storage medium. Represented in (sand, gypsum, salt, mix and rose of the sands).

The purpose of analyzing the effect of the geometry of the heat exchanger which circulates the coolant on the storage performance, different configurations we will test.

The thermal analysis that will be realized in the storage system will be through an instantaneous measurement by specific measuring devices.

Key words: Thermal storage - heat exchanger - heat transfer - storage materials