

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 : Génie mécanique

Spécialité : Energétique et Énergies renouvelables

Thème

***Contribution à l'amélioration du stockage d'énergie
thermique par chaleur sensible dans un module plan***

Devant le jury composé de :

Présenté par :

Dr .ATIA abd Elmalek

Président

- DJEGHBALA Tawfiq

Mr.GHERBI Mohammed El Ttahr

Examineur

-ZEGHIDI Mohammed Ennadir

Mr.MEGDOUD Soufiane

Encadreur

2016-2017

Remerciements

*Nous remercions vivement et chaleureusement nos encadreur **Mr. Soufiane MEGDOUD**, pour nous avoir guidés et soutenus 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 **A.KACHKOCHE** et **A .BOUKHARI** et **A .ATIA** pour leurs patience et pour leurs conseils judicieux qui ont contribué à la réalisation et à l'accomplissement de ce travail 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 oncles et nos tantes.

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 Energétique et
énergie renouvelable 2016/2017*

Sommaire

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux	ii
Nomenclature	iii
Résumé	iv
Introduction générale.....	1
Recherche bibliographique.....	2

Chapitre I: Présentation générale de stockage thermique

I.1. Introduction	6
I.2. Présentation du gisement solaire	6
I.2.1. Le soleil	6
I.2.2. Présentation générale.....	6
I.2.3. Le gisement solaire en Algérie	7
I.3. Présentation de la région el-oued	8
I.3.1. Caractéristiques géographiques	8
I.3.2. Cadre géologique.....	9
I.4. Présentation des matériaux locaux existants	10
I.4.1. Caractérisation du matériau	10
Sable	10
Le plâtre (gypse)	11
Sel.....	12
I.5. L'importance du stockage thermique dans la région	13
Chauffe d'eau.....	13
Séchage	14
Chauffe de bâtiment	15
I.6. Conclusion.....	15

Chapitre II : Stockage de Chaleur technique et matériaux

II.1. Introduction	17
II.2. Stockage thermique de l'énergie	17
II.2.1. Classification d'un système de stockage thermique.....	18
II.3. Types de stockage de chaleur.....	18
II.3.1. Stockage par chaleur sensible.....	19
II.3.1.1. Matériaux liquides	19
L'eau	19
Les huiles organiques	20
II.3.1.2. Matériaux solides.....	21
II.3.2. Stockage par chaleur latente.....	22
II.3.2.1. Les avantages et Inconvénients du stockage par chaleur latente	23
II.3.2.2. Les matériaux à changement de phase.....	24
II.3.3. Stockage thermochimique	26
II.3.3.1. Principe de fonctionnement	27
II.4. Comparaison entre les différentes techniques de stockage thermique.....	28
II.5. Choix d'un matériau de stockage.....	28
II.6. Critères de choix et de conception d'un système de stockage	30
II.7. Conclusion.....	31

Chapitre III: Modélisation mathématique

III.1. Introduction.....	32
III.2. Position du problème	32
III.2.1. Hypothèses simplificatrices	33
III.3. Fonction de transfert d'un élément de stockage par chaleur sensible	33
III.3.1. Equations du système calcul des distributions de température en fonction de transfert.....	33
III.3.2. Equations du transfert de chaleur.....	33
III.3.3. Equations du system.....	34
III.3.4. Distributions de températures et fonction de transfert	35

III.3.5. Signification physique des paramètres β, γ, St^*, t^* .Qualitativement, on peut dire que	36
III.4. Bilan énergétique du système	37
III.4.1. Comportement du flux thermique en paroi	37
III.4.2. Calcul de l'énergie du stockage	38
III.5. Comportement de la fonction de stockage	40
III.6. Conclusion	40

Chapitre IV: Etude expérimentale

IV.1. Introduction.....	42
IV.2. Hypothèses.....	42
IV.3. Conception du système de stockage	42
IV.3.1. Description de la configuration étudiée	43
IV.4. Matérielle de mesure de température.....	44
IV.5. Les étapes de la fabrication en expérimentation avec la clarification	44
IV.5.1. Amélioration du capteur	44
IV.5.2. Fabrication d'unité de stockage	45
IV.6. Composant de l'unité de stockage module plan	46
IV.7. Nombres adimensionnels.....	46
IV.8. Essais expérimentaux.....	47
IV.9. Paramètre de l'unité de stockage	48
IV.10.Les résultats dans le cas de Stockage de chaleur dans le sable.....	48
IV.10.1. L'énergie stockée dans le sable	50
IV.10.2. Efficacité de stockage dans le sable	50
IV.10.3. Les résultats dans le cas de déstockage de chaleur dans le sable	51
IV.11.Les résultats dans le cas de Stockage de chaleur dans le Plâtre (Gypse)	52
IV.11.1. L'énergie stockée dans le gypse.....	53
IV.11.2. Efficacité de stockage dans le gypse	54
IV.11.3. Les résultats dans le cas de déstockage de chaleur dans le gypse	54

IV.12.Les résultats dans le cas de Stockage de chaleur dans le sel	56
IV.12.1. L'énergie stockée dans le sel.....	57
IV.12.2. Efficacité de stockage dans le sel	58
IV.12.3. Les résultats dans le cas de déstockage de chaleur dans le sel.....	58
IV.13.Les résultats dans le cas de stockage de chaleur dans le mélange du plâtre et du sel :.....	59
IV.13.1. L'énergie stockée dans le Plâtre + sel	60
IV.13.2. Efficacité de stockage dans le Plâtre + sel	61
IV.13.3. Les résultats dans le cas de déstockage de chaleur dans le Plâtre + sel	61
IV.14.Comparaison entre caractéristique du quatre matériaux	62
IV.14.1. Comparaison de température entre les quatre matières	62
IV.14.2. Comparaison d'énergie stockée entre les quatre matières.....	62
IV.14.3. Comparaison de rendement entre les quatre matières	63
IV.14.4. Comparaison dans le cas de déstockage la chaleur entre le quatre matières	63
IV.15.Estimation de l'efficacité globale des matériaux et du module plan	64
IV.16.Conclusion.....	65

Conclusion générale	66
----------------------------------	-----------

Références	
-------------------	--

Liste des figures

Figure. I.1 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel	7
Figure. I.2 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu	8
Figure. I.3 : Situation géographique de la région d'EL Oued	9
Figure. I.4 : Photographie du sable utilisé comme milieu de stockage	10
Figure. I.5 : Vue photographique de la distribution de la taille des grains dans Les échantillons de sable	10
Figure. I.6 : Photographie du plâtre utilisé comme milieu de stockage	11
Figure. I.7 : Photographie du sel utilisé comme milieu de stockage.....	12
Figure. I.8 : Schéma d'installation chauffe d'eau	14
Figure. I.9 : Schéma d'installation séchage	14
Figure. I.10 : Schéma d'installation chauffe de bâtiment	15
 Figure. II.1 : Classification d'un système de stockage thermique.	18
Figure. II.2 : Classification des MCP.	22
Figure. II.3: Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente (solide/liquide).....	23
Figure. II.4: Classification des MC	25
Figure. II.5: Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique.....	26
Figure. II.6: Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermochimique	27
 Figure. III.1: Circuit de stockage/déstockage.....	33
Figure. III.2: élément de stockage considéré dans l'étude	34
Figure. III.3: Transfert de chaleur par conduction à la surface d'un solide	34
Figure. III.4: Transfert de chaleur par convection à la surface d'un solide-fluide	35
Figure. III.5: évolution du flux total $Q(t)$ transmis aux plaques.....	39
 Figure. IV.1: Schéma simplifié de l'unité de stockage	42
Figure. IV.2 : Schéma de principe du système de stockage expérimental	43
Figure. IV.3 : Schéma de principe du système de stockage	44
Figure. IV.4 : Image thermomètre pour mesurer la température	44

Figure. IV.5 : Image thermocouples	45
Figure. IV.6: L'image montre une amélioration le capteur	45
Figure. IV.7 : l'image montre les étapes fabrication du la unité de stockage.....	45
Figure. IV.8 : Schéma du module plan de stockage : (a) les dimensions du module plan, (b) isolation, (c) photographie de module plan.	46
Figure. IV.9 : Configuration de l'échangeur de chaleur dans le module plan de stockage	47
Figure. IV.10 : dimensionnement de l'unité à l'intérieur	49
Figure. IV.11 : Evolution temporelle de la température moyenne stocké dans le sable et la température ambiante et température entré et sortie pendant le processus de Stockage	50
Figure. IV.12 : Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de sable	51
Figure. IV.13 : Evolution du rendement instantané dans le Module plan de sable	52
Figure. IV.14 : Profile de la température du Module plan de sable pendant un cycle complet	
Stockage / d'stockage.....	52
Figure. IV.15 : illustration simplifié de model plan de stockage expérimentale le gypse ..	53
Figure. IV.16 : Evolution temporelle de la température moyenne du plâtre et la température ambiante et température entré et sortie pendant le processus de Stockage	54
Figure. IV.17 : Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de gypse	54
Figure. IV.18 : Evolution du rendement instantané dans le Module plan de gypse	55
Figure. IV.19 : Profile de la température du Module plan de plâtre pendant un cycle complet stockage / déstockage	55
Figure. IV.20 : illustration simplifié de model plan de stockage expérimentale le sel	56
Figure. IV.21 : Evolution temporelle de la température moyenne du sel et la température ambiante et température entré et sortie pendant le processus de Stockage.....	57
Figure. IV.22 : Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de sel	57
Figure. IV.23 : Evolution du rendement instantané dans le Module plan de sel	58
Figure. IV.24 : Profile de la température du Module plan de sel pendant un cycle complet Stockage / déstockage	58
Figure. IV.25 : illustration simplifié de model plan de stockage expérimentale le (plâtre/sel) ...	59
Figure. IV.26 : Evolution temporelle de la température moyenne du gypse+sel et la température ambiante et température entré et sortie pendant le processus de Stockage.....	60
Figure. IV.27 : Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de (plâtre +sel)	60
Figure. IV.28 : Evolution du rendement instantané dans le Module plan de (plâtre +sel) .	61

Figure. IV.29 : Profile de la température du Module plan de (plâtre + sel) pendant un cycle complet Stockage / déstockage	61
Figure. IV.30 : Evolution temporelle de la température moyenne les quatre matières du pendant le processus de stockage	62
Figure. IV.31 : Evolution temporelle de la énergie stockée les quatre matières du pendant le processus de Stockage.	62
Figure. IV.32 : Evolution temporelle du rendement les quatre matières du pendant le processus de stockage	63
Figure. IV.33 : Évolution de la température moyenne du module plan en fonction de temps au cours d'un cycle complet stockage / déstockage	63
Figure. IV.34 : Efficacité globale du système de stockage.	64

Liste des tableaux

Tableau. I.1: Caractéristiques principales soleil	7
Tableau. I.2: Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques	8
Tableau. II.1: Techniques de stockage liquide	21
Tableau. II.2: Propriétés des matériaux solides utilisés dans le stockage thermique.....	21
Tableau. II.3: les caractéristiques des trois catégories de MCP	25
Tableau. II.4: Critères à respecter lors du choix d'un matériau à changement de phase.....	26
Tableau. II.5: Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur	28
Tableau. IV.1: Propriétés thermo physique de la matière	48
Tableau. IV.2: Paramètre de l'unité de stockage	48
Tableau. IV.3: degré de température dans les position de thermocouple dans le sable.....	49
Tableau. IV.4: Résultats de température instantanée (cas de stockage dans le sable).....	50
Tableau. IV.5: Résultats de température instantanée (cas de stockage dans le Gypse)	53
Tableau. IV.6: Résultats de température instantanée (cas de stockage dans le sel)	56
Tableau. IV.7: Résultats de température instantanée (cas de stockage dans le mélange).....	59

Nomenclature

a_s	diffusivité thermique du solide ;	$[m^2 s^{-1}]$
b	$\sqrt{(\lambda c \rho)_s}$, effusivité thermique du solide ;	$[w. m^{-2} s^{1/2}]$
Bi	$\frac{\alpha l}{\lambda_s}$ Nombre de Biot ;	
C_s	Chaleur massique du solide ;	$[J. kg^{-1} K^{-1}]$
C_f	chaleur massique du fluide ;	$[J. kg^{-1} K^{-1}]$
f_s	fonction de stockage ;	$[\frac{W_s}{H_m}]$
H_m	$T_0 \frac{\tau}{\pi} \dot{m} c_f$ enthalpie maximum d'entrée ;	$[J]$
i	$\sqrt{-1}$;	
l	épaisseur d'une demi-plaque ;	$[m]$
$2l'$	distance entre plaques ;	$[m]$
L	longueur des plaques ;	$[m]$
L_0	longueur des plaques ;	$[m]$
$\dot{m}$	débit-masse du fluide ;	$[kg s^{-1}]$
Nu	$\frac{4\alpha l'}{\lambda_s}$ Nombre de Nusselt ;	
Pr	nombre de Prandtl;	
q	densité de flux de chaleur à la paroi ;	$[w. m^{-2}]$
$Q(t)$	flux total instantané à la paroi ;	$[w]$
$\dot{Q}$	débit Volumétrique du fluide ;	$[m^3 s^{-1}]$
Re	$\frac{2\dot{Q}}{L_0 v} = \frac{4ul'}{v}$ nombre de Reynolds;	
S	surface totale d'échange ($2 L_0 L$);	$[m^2]$
St	$\frac{Nu}{Re Pr}$ nombre de Stanton;	
St^*	$St \frac{L}{l'} = \frac{\alpha S}{\dot{m} c_f}$	
t	temps;	$[s]$
T	température du fluide;	$[K]$
T_0	amplitude des fluctuations de température de fluide a l'entrée ;	$[K]$
u	vitesse de l'écoulement;	$[m.s^{-1}]$
W_m	pertes de charge;	$[J]$

W_s	énergie stockée;	[J]
x	coordonnée axiale ;	[m]
y	coordonnée transversale .	[m]

Symboles grecs

α	coefficient d'échange thermique;	$[\text{w.m}^{-2} \text{K}^{-1}]$
β	$l \sqrt{\frac{\pi}{a_s \tau}}$	
γ	$\frac{\alpha}{b} \sqrt{\left(\frac{\tau}{\pi}\right)} = \frac{Bi}{\beta}$	
ε	W_m / H_m : taux de pertes de charge ;	
ξ	déphasage du flux thermique local en paroi (par rapport a la température de mélange du fluide);	[rd]
θ	température du solide;	
λ_f	conductivité thermique du fluide;	$[\text{w.m}^{-1} \text{K}^{-1}]$
λ_s	conductivité thermique du solide;	$[\text{w.m}^{-1} \text{K}^{-1}]$
$e^{-\mu}$	fonction de transfer ($\mu = n + i\xi$);	
ν	viscosité cinématique;	$[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$
ξ	déphasage du fluide en sortie;	[rd]
ρ_f	masse volumique du fluide;	$[\text{Kg.m}^{-3}]$
ρ_s	masse volumique du solide;	$[\text{Kg.m}^{-3}]$
τ	période;	[s]
τ^*	$\frac{L}{\tau u}$;	
$\emptyset$	déphasage de flux thermique parietal (par rapport d la température d'entrée du fluide);	[rd]
x	e^{-n} fonction d'amortissement ;	
$\varphi_s(x, y)$	phase de la température du solide;	[rd]
$\varphi_f(x)$	phase de la température du fluide ;	[rd]
$(\varphi_f(L) = \xi)$		

Résumé :

Dans ce travail nous étudions le stockage d'énergie par chaleur sensible dans un système composé d'un assemblage 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, en faisant le nombre de Reynolds constant, la fréquence de la température d'entrée et la longueur de la conduite.

Mots clés : Stockage d'énergie thermique – chaleur sensible – matériaux du stockage – énergie solaire – conduite plan.

ملخص:

في هذا العمل نقوم بدراسة تخزين الطاقة بواسطة حرارة محسوسة في نظام يتألف من تجميع لوحات موازية. المائع الحامل للحرارة الذي يتدفق داخل الأنابيب الذي يخضع لحرارة دورية. يتم اختبار أربع مواد مختلفة لتخزين الحرارة. يتم تقييم الأداء الحراري لهذه المواد من خلال متوسط درجة حرارة المائع عند المخرج وكفاءة التخزين والطاقة الكلية المخزنة من خلال جعل عدد رينولدز ثابت وتواتر درجة الحرارة الدخول وطول القناة .

كلمات مفتاحية : تخزين الطاقة الحرارية - الحرارة الحساسة - مواد التخزين - الطاقة الشمسية - قناة مسطحة.

Abstract:

In this work we study the storage of energy by sensible heat in a system composed of an assembly of parallel plates. The heat transfer fluid circulating inside the pipes is subjected to a periodic inlet temperature. Four thermally different storage materials are tested. The thermal performance of these materials is evaluated in terms of the mean temperature of the outlet fluid, the storage efficiency and the total stored energy, making the Reynolds number constant, the input temperature frequency And the length of the pipe.

Keywords: Storage of thermal energy - sensitive heat - storage materials - solar energy - flat pipe.

Introduction générale

La nature intermittent de l'énergie solaire pose des problèmes de stockage. Il est nécessaire de développer des dispositifs de stockage permettant le transfert d'énergie des périodes excédentaires aux périodes déficitaires et adapter ainsi sa production à sa consommation. Ce stockage peut être sous forme de chaleur sensible ou de chaleur latente.

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.

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.

Un système de stockage thermique peut être classifié selon différents critères : le type de stockage, la durée de stockage et la température de stockage. Trois types de stockage existent : le stockage par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente et le stockage thermochimique. En outre, on trouve le stockage passif et actif :

Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse au stockage passif par chaleur sensible, à travers une investigation pratique des performances de stockage (température, temps de stockage/déstockage, efficacité, et énergie stockée).

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

Afin de trouver une nouvelle amélioration du stockage thermique, on va essayer de construire et tester un nouveau matériau local entre le plâtre et le sel.

Ce mémoire est divisé en quatre 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. Deuxième chapitre présente une revue de la littérature sur le stockage thermique, les techniques de stockage et les matériaux utilisés (sable, plâtre et sel). Le troisième chapitre est destiné à la modélisation mathématique du transfert de chaleur dans un milieu de stockage thermique dans les plaques parallèles. Enfin le quatrième chapitre présente les résultats de la réalisée étude expérimentale du stockage par chaleur sensible.

Recherche bibliographique

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. Il se trouve que l'énergie peut être stockée sous forme de chaleur sensible ou sous forme de chaleur latente. Dans ce chapitre, nous allons passer en revue certains des travaux publiés sur ce sujet, classés par ordre chronologique.

Le stockage d'énergie à chaleur latente et sensible ont différentes applications, à citer comme exemple le chauffage solaire, l'air conditionné, système hybride (solaire/électrique), chauffage passif (mur massif), l'eau chaude sanitaire, etc... . Pour une légère variation de température, on peut stocker une quantité d'énergie beaucoup plus importante en stockage à chaleur latente qu'en stockage à chaleur sensible, malheureusement les nombreuses transformations cycliques fusion-solidification du MCP causent une dégradation importante du matériau, ainsi que la non-homogénéité du MCP durant ces transformations persiste toujours comme problème. C'est pour ça que le stockage à chaleur sensible reste le plus utilisé dans les applications à haut débit et importantes températures.

B. Fourcher et C. Saint-Blanquet [1] 1980. Printed in Great Britain

ont filtré le signal thermique d'une puissance thermique périodique de type énergie solaire, jouant le rôle d'un 'volant d'inertie thermique'. Le module de stockage est constitué de plaques solides de forme rectangulaires, balayées par un fluide caloporteur circulant à sens unique, Grâce à une étude paramétrique une géométrie optimale est définie. Les résultats sont explicitement donnés pour deux couples fluide-matériau de stockage différents : air-alumine et air-brique réfractaire. Les solutions théoriques sont confirmées par une étude expérimentale

M. T. Acker et Fourcher [2] 1981 Printed in Great Britain

ont comparé la solution exacte avec une approche utilisant un coefficient d'échange constant et uniforme, pour un $Nu=12$. Ils ont comparé les performances des deux modules de stockage à régime turbulent avec l'air et à régime laminaire avec l'huile organique comme fluide caloporteur.

F. Tardy et Samuel M. Sami [3] (2009)

ont développé un modèle mathématique pour prédire le comportement thermique des caloducs avec stockage thermique au cours d'un cycle de refroidissement.

Le modèle de transfert de chaleur basé sur différents mécanismes de conduction, convection et la chaleur de fusion de la fonte des glaces est présenté. Le comportement thermique des caloducs a également été réalisé expérimentalement et analysé dans des conditions différentes. Les comparaisons ont été par rapport aux données expérimentales pour la validation du modèle prédictif.

Abdul Jabbar et al [4] (2009)

ont réalisé une étude numérique sur une zone chauffée d'un mur de stockage thermique. Trois matériaux de stockage différents sont examinés, à savoir le béton, le sel hydraté et la cire de paraffine (N-eicosane). Une épaisseur optimale de 8cm est défini pour un mur de sel hydraté est capable de maintenir la température de confort dans la zone de fluctuation de la température ambiante.

Dans l'étude de **D.L. Zhao et al [5] (2011)**, un système de chauffage solaire a été modélisé avec TRNSYS pour un bâtiment. Cinq différents modes opératoires ont été distingués: (1) le mode de stockage de chaleur, (2) le chauffage par capteur solaire, (3) le chauffage par le lit de stockage, (4) le chauffage de nuit et (5) le chauffage par une source auxiliaire. Le modèle TRNSYS a été vérifié. par les données de la littérature. Les résultats ont montré que le système solaire conçu peut répondre à 32,8% de la demande d'énergie thermique dans la saison de chauffage et de 84,6% de la consommation d'énergie en saison sans-chauffage, avec une fraction solaire annuelle moyenne de 53,04%.

Hakim CHEDDANI [6] (2011)

Dans le présent document, nous nous intéressons à l'étude d'une unité de stockage d'énergie à chaleur sensible, en régime thermique périodique, pour le cas de deux configurations géométriques. On résout le problème de couplage convection-conduction entre un fluide caloporteur en écoulement (laminaire/turbulent) dans une conduite et une paroi de stockage. Par suite nous étudions l'effet des différents paramètres (l'épaisseur du matériau, la surface d'échange, la période et l'écartement entre les plaques ou le diamètre du tube) sur la réponse du système pour différentes combinaisons Matériau-fluide

caloporteur, afin de déterminer la configuration optimale du dispositif de stockage.

BECHIRI Mohammed [7] (2014)

Nous traitons à travers ce travail le phénomène de stockage/déstockage de l'énergie thermique par chaleur sensible et/ou latente, dans un système à plaques parallèles et tube cylindrique. L'étude comprend trois parties essentielles : Dans la première partie, une solution exacte utilisant la technique de la Transformée Intégrale Généralisée est développée, pour étudier le stockage par chaleur sensible dans les conduites planes et cylindriques en régime laminaire et turbulent, Dans la deuxième partie, le stockage par chaleur latente dans les conduites cylindriques et planes est étudié en utilisant deux approches : analytique et numérique, La troisième partie, présente une étude sur l'effet de l'injection des nanoparticules, dans les matériaux à changement de phase, dans une unité de stockage cylindrique parcourue par un fluide caloporteur circulant en régime laminaire et turbulent. L'efficacité du stockage et l'énergie stockée sont étudiées en fonction des différents paramètres physiques et géométriques.

D. Lafri 1, A. Hamid 2, M. Belhamel 1 et D. Semmar 1 [8] (2001)

L'intérêt de ce travail est l'étude du comportement thermique d'une cuve de stockage dans une installation de chauffage solaire collectif. Elle permet de déterminer l'évolution du champs de températures dans une cuve de stockage. Pour cela, nous avons établi un modèle numérique qui décrit tous les modes de transferts thermiques impliqués. Les résultats théoriques obtenus du modèle sont comparés aux résultats expérimentaux. Cette confrontation a montré les limites du modèle théorique proposé.

N.MAHFOUDI et AB. MOUMMI [9] (2014)

Ce travail présente une analyse thermique basée sur une investigation numérique du comportement transitoire d'un système de stockage conçu pour stocker de la chaleur dans le but d'une application solaire. L'unité de stockage est de configuration cubique avec des tubes incorporés dans la structure où circule le fluide caloporteur. Le matériau de stockage utilisé est le sable du sud de l'Algérie. Pour analyser les caractéristiques de stockage (température du lit, énergie stockée, rendement) du système, un modèle en 2D basé sur la méthode des éléments finis a été développé avec le logiciel COMSOL Multiphysics

Chapitre 1

Présentation générale de stockage thermique

Dans ce chapitre, nous avons étudié générale et complète de plusieurs aspects du stockage thermique dans la région d'el-oued, la situation géographique de la région et des matériaux attribués disponible dans la nature et l'importance du stockage thermique pour cette région

Sommaire

I.1. Introduction.....	6
I.2. Présentation du gisement solaire	6
I.2.1. Le soleil	6
I.2.2. Présentation générale	6
I.2.3. Le gisement solaire en Algérie	7
I.3. Présentation de la région el-oued.....	8
I.3.1. Caractéristiques géographiques	8
I.3.2. Cadre géologique	9
I.4. Présentation des matériaux locaux existants	10
I.4.1. Caractérisation du matériau	10
I.5. L'importance du stockage thermique dans la région.....	13
I.6. Conclusion	15

Chapitre I

Présentation générale de stockage thermique

I.1. Introduction:

Le stockage thermique peut répondre à plusieurs besoins qui vont du logement d'un particulier aux usages industriels, en passant par le stockage massif associé aux énergies renouvelables.

Les systèmes de stockage thermique représentent une solution aux problèmes liés au caractère intermittent des énergies renouvelables. Dans les applications du solaire thermique, les systèmes de stockage thermique viennent pour corriger la différence entre l'énergie solaire reçue et celle demandée, donc l'intégration d'un système de stockage thermique dans une application solaire améliore à la fois le dispatching et la performance.

I.2. Présentation du gisement solaire:

I.2.1. Le soleil:

Le soleil est la seule étoile du système solaire [10] et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de Centaure située à 4.23 années lumières du soleil mais la grande distance qui nous sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre. Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques.

I.2.2. Présentation générale:

Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chauds qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus.

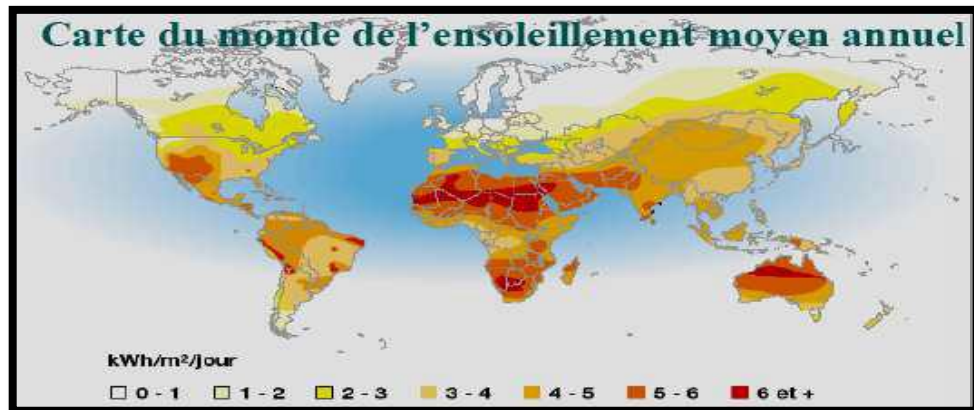
Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99.9% de la masse du système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil. Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau (I.1).

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil [16].

Diamètre (km)	1392000
Masse (kg)	2.10^{30}
Surface (km ²)	$6.09.10^{12}$
Volume (km ³)	$1.41.10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg /m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	$2.5.10^{17}$

I.2.3. Le gisement solaire en Algérie:

Le gisement solaire [17] est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure.

**Figure I.1 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel**

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.5 selon l'ensoleillement reçu annuellement.

Tableau. I. 2 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale.

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie figure (I.2).

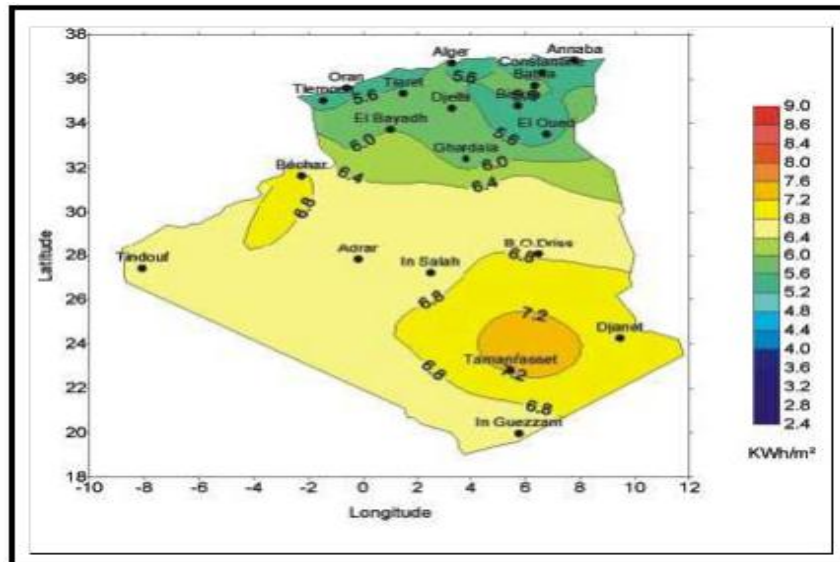


Figure I.2: Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu.

I.3. Présentation de la région el-oued:

I.3.1. Caractéristiques géographiques:

Situation Géographique [18] Le Souf vient du nom berbère désignant rivière ou 'Oued'. La vallée de Oued-Souf est une unité de ressources en eau située au Sud-est algérien au centre d'une grande cuvette synclinale, appelée aussi région du Bas-Sahara à cause de sa faible altitude (Figure 01). Elle occupe une superficie de 11738 km² et englobe un nombre de population de plus de 500.000 habitants (**recensement 2009**).

La vallée d'Oued-Souf s'étend sur 3000 km² dans une configuration géographique caractérisée par une topographie plane et sans exutoire (Rabah et al ,2009).El-Oued est connu par la municipalité de mille coupoles (le nom est donné en raison de la forme du toit des maisons), elle est également caractérisée par la production de dattes. Elle est limitée par les coordonnées Lambert suivantes :

- X = 275 200/322 000
- Y = 3665 000 /3743 000

La région d'El-Oued (33°12' N à 33°35'N et 6°50'E à 6°51'E) est située entre la limite sud-est des montagnes de l'Atlas Saharien et les frontières nord de l'Erg Oriental. Cette grande région de sable est entourée par de grandes zones humides du Sahara sur les trois côtés à savoir les grands lacs de sel" Chotts" de la région d'Oued Righ-à l'ouest, les chotts Merouane et Melrhir au nord et le Chott El Jerid a l'est.

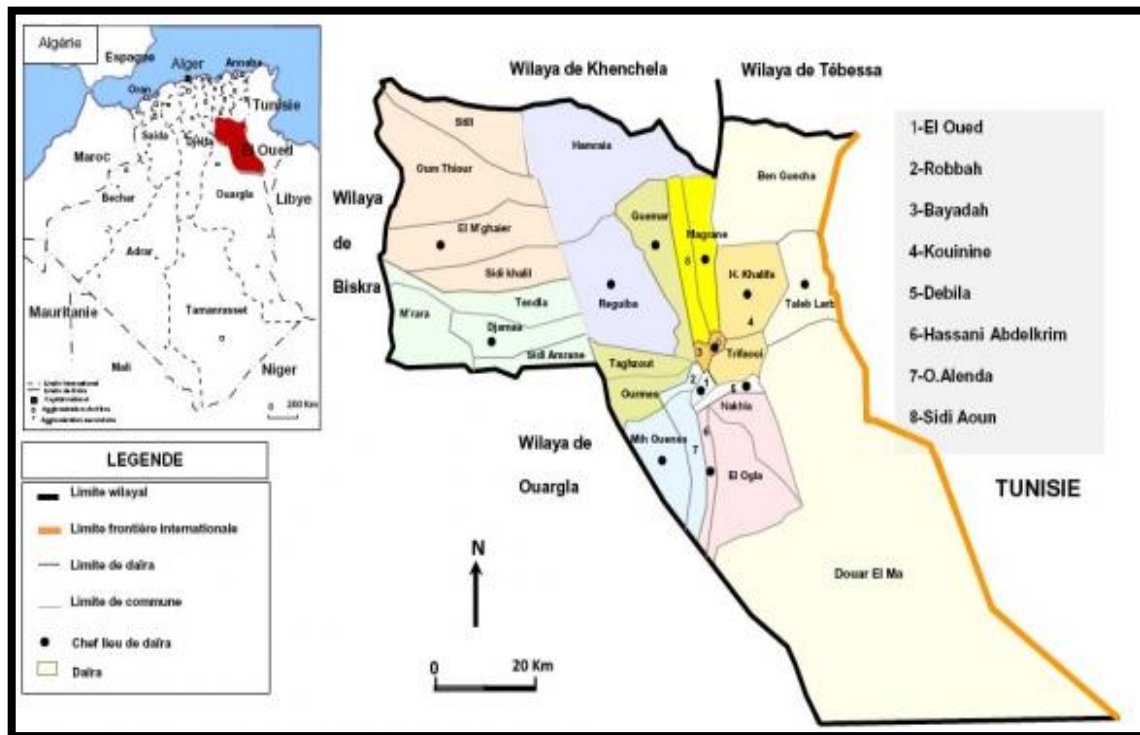


Figure I.3 : Situation géographique de la région d'EL Oued.

I.3.2. Cadre géologique:

D'un point de vue géologique, [18] la stratigraphie de la région est caractérisée par des séries sédimentaires allant du crétacé inférieur jusqu'aux dépôts quaternaires. Les formations du quaternaire récentes forment l'aquifère détritique de la nappe phréatique, qui est surtout

sableux à gréseux avec parfois du gypse et des argiles localisés particulièrement dans la partie Nord-est où il se termine par une croûte gypseuse. Son substratum est argileux imperméable parfois très peu sableux à son sommet ou alors gypsifère en totalité.

I.4. Présentation des matériaux locaux existants:

I.4.1. Caractérisation du matériau:

Il existe plusieurs matériaux disponibles dans la vallée du désert grand dans cette note, nous avons choisi les articles les plus courants dans cette région pour mener l'étude sur eux sont le **sable** et **plâtre** et le **sel**, et nous les avons introduits:

a) Sable:



Figure I.4 : Photographie du sable utilisé comme milieu de stockage

➤ Granulométrie:

Le sable des dunes d'Oued-souf [11] est composé de Fe_2O_3 , CaO_3 , Al_2O_3 , de quelques Impuretés et de métaux légers. Une des principales caractéristiques de ce type de sable est la finesse de ses grains. L'analyse granulométrique permettra de déterminer les différentes tailles de grains formant le sable de la région. Pour cela une analyse par microscope optique a été adoptée (Fig.5).

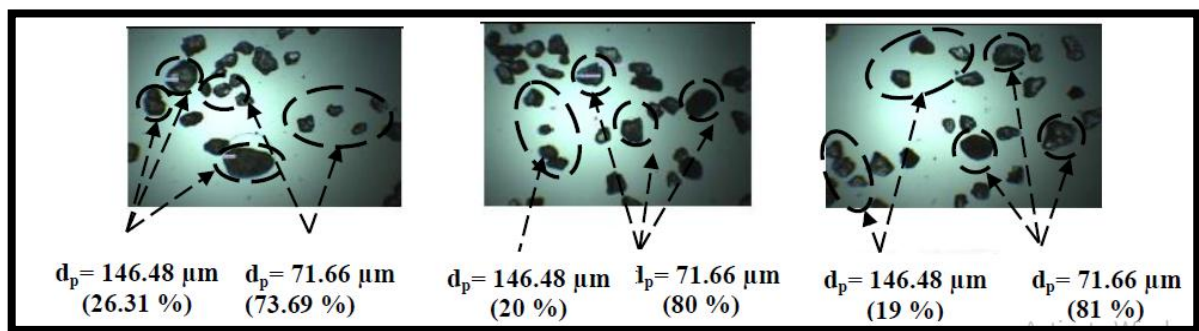


Figure I.5 : Vue photographique de la distribution de la taille des grains dans Les échantillons de sable.

Une particule présente trois dimensions principales qui ne sont pas exactement mutuellement perpendiculaires :

- ✓ Une plus grande dimension ou « longueur »;
- ✓ Une plus petite dimension ou « épaisseur », qu'on ne voit pas au microscope, parce qu'elle est perpendiculaire au plan de la lame, si la particule est en position de repos le plus stable,
- ✓ Une dimension intermédiaire, ou mésodiamètre, qui est la plus petite dimension visible au microscope.

En effet le microscope optique permet le dénombrement des différentes particules dans les échantillons en se référant à leur méso diamètre.

L'analyse granulométrique des échantillons de sable montre une répartition de la taille des grains de sable entre un méso diamètre $d = 146,48 \mu\text{m}$ (22%) et un méso diamètre $d = 71.66$ (78%) μm .

b) Le plâtre (gypse):



Figure I.6 : Photographie du Le plâtre utilisé comme milieu de stockage.

➤ Composition :

Le gypse est un roche très tendre, rayable à l'ongle, elle a été choisie comme référence pour le classement de dureté des minéraux (gypse = dureté 1, diamant =dureté 10), le gypse est un sulfate calcium hydraté de formule $(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$. Après extraction, le gypse est concassé, broyé et séché, soumis ensuite à une cuisson, il se déshydrate partiellement et donne naissance au plâtre. On peut écrire:



➤ **Déclinaisons :**

Blocs de plâtre [21]. Enduits de plâtre. Plaques de plâtre. Plâtre à coller. Plâtre à jointoiement. Plâtres à modeler. Plâtre à projeter. Plâtre au ciment. Plâtre de finition. Poudre de plâtre...

Entrer dans la composition du staff et du stuc.

➤ **Propriétés :**

Le plâtre est un liant hydraulique c'est-à-dire un matériau qui forme une pâte capable de sceller par durcissant (la prise du plâtre), lorsqu'on le mélange avec de l'eau.

Isolation thermique et phonique. Résistance au feu. Perméable à la vapeur d'eau, il régule le taux d'hygrométrie (par absorption et restitution de l'humidité) [21].

➤ **Avantage :**

Permet des applications de rénovation. Protection contre les incendies (forme un réel coupe-feu). Relativement bon marché.

➤ **Inconvénients :**

Est sujet aux moisissures, notamment dans des conditions favorisant la condensation. Produit beaucoup de poussières lors de sa manipulation et/ou lors de travaux ultérieurs (comme lorsqu'on souhaite forer un trou dans un mur de plâtre à la perceuse électrique). S'effrite facilement [21].

c) **Sel:**



Figure I.7 : Photographie du sel utilisé comme milieu de stockage.

Capacités n Avec une [20] production de plus de 100 000 tonnes de sel en 2005, El-Oued est l'une des premières régions du pays en matière de production de sel à usage alimentaire (sel de table) ou industriel.

La wilaya d'El-Oued a réalisé, l'année dernière, une production de plus de 100 000 tonnes de sel brut extrait notamment des chotts (lacs de sel) situés dans la zone Est du chef-lieu de

wilaya, notamment ceux de Melghigh et Merouane, qui s'étendent sur une superficie globale de 15 000 km².

➤ **Définition:**

Les sels sont en général [19] des cristaux solides à point de fusion relativement élevé. Cependant, il existe des sels qui sont liquides à température ambiante, ceux que l'on appelle liquides ioniques. Les sels minéraux ont d'habitude une faible dureté et une faible compressibilité, à l'instar du sel de table.

➤ **Sel naturel:**

Le sel naturel n'est pas raffiné [19] et contient encore tous ses minéraux naturels. Les sels naturels ont donc des propriétés gustatives et un aspect différent suivant la quantité de minéraux qu'ils contiennent. Ainsi, la fleur de sel ou le sel de mer récolté à la main ont une saveur unique qui change d'une région à une autre. La fleur de sel, le sel des marais salants ou le sel de gemme non raffinés rentrent dans cette catégorie. Le sel non raffiné de mer est plus riche en magnésium (sous forme de chlorure de magnésium) ainsi qu'en oligo-éléments.

➤ **Composition:**

Le sel se présente sous la forme d'un cristal cubique d'atome de sodium (Na) et de chlore (Cl).

I.5. L'importance du stockage thermique dans la région:

La plupart des systèmes de chauffage solaire caractérisés par le procédé utilisé la possibilité de stockage pendant quelques heures jusqu'à la valeur de la journée de l'énergie combinée. Il y a un nombre croissant d'installations qui utilisent le stockage saisonnier de l'énergie thermique, que nous pouvons stocker de l'énergie dans l'été (surtout) pour une utilisation dans le chauffage de la maison pendant l'hiver.

✓ **chauffe d'eau:**

Un ballon de stockage crée une capacité tampon d'énergie la plupart du temps d'eau chaude soit de chauffage soit d'eau chaude sanitaire. Dans le cas du chauffage, on trouvera des ballons de stockage permettant de gérer la production des panneaux solaires par rapport à la demande, le ballon créant un réservoir ou une capacité tampon. Pour l'eau chaude sanitaire, le principe est le même que ce soit un cumulus électrique ou un ballon additionnel associé à une chaudière murale par exemple, le ballon crée une capacité d'eau chaude répondant aux besoins instantanés (Fig. I.8).

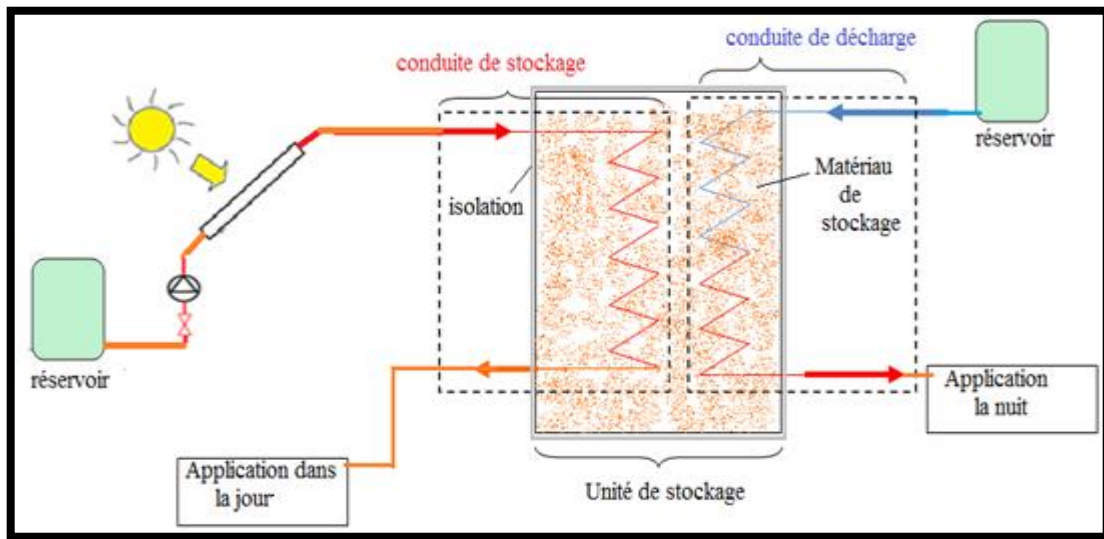


Figure I.8: Schéma de d'installation chauffe d'eau.

✓ **Séchage:**

Le séchage est un procédé qui sépare un liquide d'un solide, d'un semi-solide, voire d'un liquide par évaporation. Cette opération est endothermique et nécessite l'apport d'énergie thermique. (Fig. I.9).

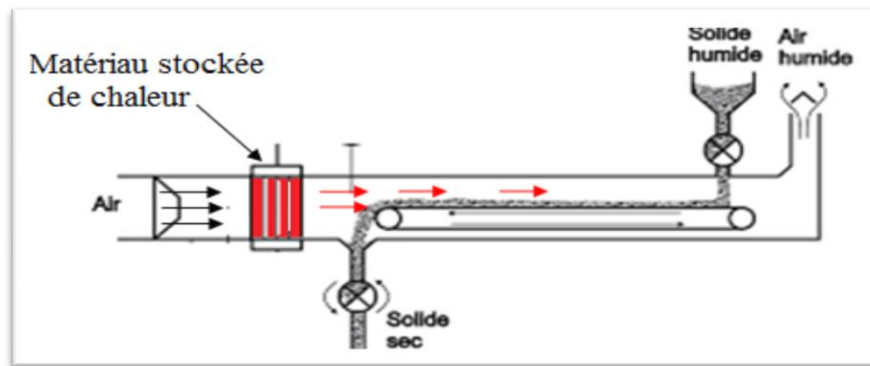


Figure I.9: Schéma de d'installation séchage.

✓ **chauffe de bâtiment:**

Un bâtiment est une construction destinée à servir d'abri ou d'habitat et à protéger des biens et des personnes des conditions météorologiques extérieures. A cet effet, le Génie Climatique dans le bâtiment regroupe l'ensemble des techniques destinées à assurer un traitement de l'air intérieur procurant une ambiance stable et confortable en rapport à la destination d'usage du bâtiment (Fig. I. 10).



Figure I.10 : *Schéma de d'installation chauffe de bâtiment*

I.6. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons discuté de la présentation générale du stockage thermique qui dépend de la principale source qui est le soleil. Le gisement solaire en Algérie dépend de l'importance du stockage thermique dans la région. Pour contribuer au processus d'amélioration du stockage thermique en exploitant les matériaux naturels locaux existants, nous concluons enfin que le stockage thermique est d'une grande importance dans notre vie, et largement utilisé et est à l'étude.

Chapitre 2

Stockage de chaleur, technique et matériaux

Stockage thermique peut répondre à de nombreux besoins, allant du logement à des usages industriels privés, par le stockage massif de l'énergie renouvelable liée à Le deuxième chapitre présente une revue de la littérature sur le stockage d'énergie thermique et les technologies de stockage et de matériaux

*En général, nous allons décrire les trois types de stockage thermique : Stockage par chaleur **sensible**, stockage chaleur **latente** et le stockage **thermochimique***

Sommaire

II.1. Introduction	17
II.2. Stockage thermique de l'énergie	17
II.2.1. Classification d'un système de stockage thermique	18
II.3. Types de stockage de chaleur	18
II.3.1. Stockage par chaleur sensible	19
II.3.2. Stockage par chaleur latente	22
II.3.3. Stockage thermochimique	26
II.4. Comparaison entre les différentes techniques de stockage thermique	28
II.5. Choix d'un matériau de stockage	28
II.6. Critères de choix et de conception d'un système de stockage	30
II.7. Conclusion.....	31

Chapitre II

Stockage de la Chaleur, techniques et matériaux

II.1. Introduction:

L'objet de ce chapitre est de présenter le contexte de l'étude et de sélectionner le matériau et la technique de stockage de l'énergie thermique mise en œuvre dans ce travail de thèse. Pour cela, quelques généralités sur les différents types de stockage de l'énergie thermique sont décrites et comparées. Ensuite, un état de l'art des procédés de stockage de l'énergie thermique par voie sensible est présenté. Cet état de l'art permettra de faire le point sur les technologies qui sont ou qui ont été étudiées et sur les matériaux appropriés à chaque technologie. Des critères de sélection seront présentés et confrontés aux matériaux afin de choisir le plus prometteur. A l'issue de ce chapitre, les techniques les mieux adaptées pour mettre en œuvre le matériau choisi seront sélectionnées. [11]

II.2. Stockage thermique de l'énergie:

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

Les technologies de stockage de l'énergie thermique peuvent être classifiées dans diverses catégories selon différents critères (figure.1). Si le critère est la plage de température, les systèmes de stockage sont divisés en « stockage de la chaleur » et « stockage du froid ».

Dans le cas où le critère est la durée de stockage deux classes sont considérées, « le stockage long terme » et le stockage « court terme ».

D'autre part, si le critère est l'état du matériau de stockage, il existe trois principaux types : « stockage par chaleur sensible », « stockage par chaleur latente », et « stockage par chaleur thermochimique ».

Les systèmes de stockage de l'énergie thermique peuvent aussi être classés en deux autres catégories : actifs ou passifs. Le terme de stockage actif est utilisé dans le cas où le matériau de stockage circule dans le système. À l'opposé, dans le cas d'un système de stockage d'énergie thermique passif (aussi appelé régénérateur), le matériau de stockage ne circule pas dans le procédé. L'énergie thermique est transportée via un fluide caloporteur, et est transférée vers le matériau de stockage à l'aide d'un échangeur. [11]

II.2.1. Classification d'un système de stockage thermique:

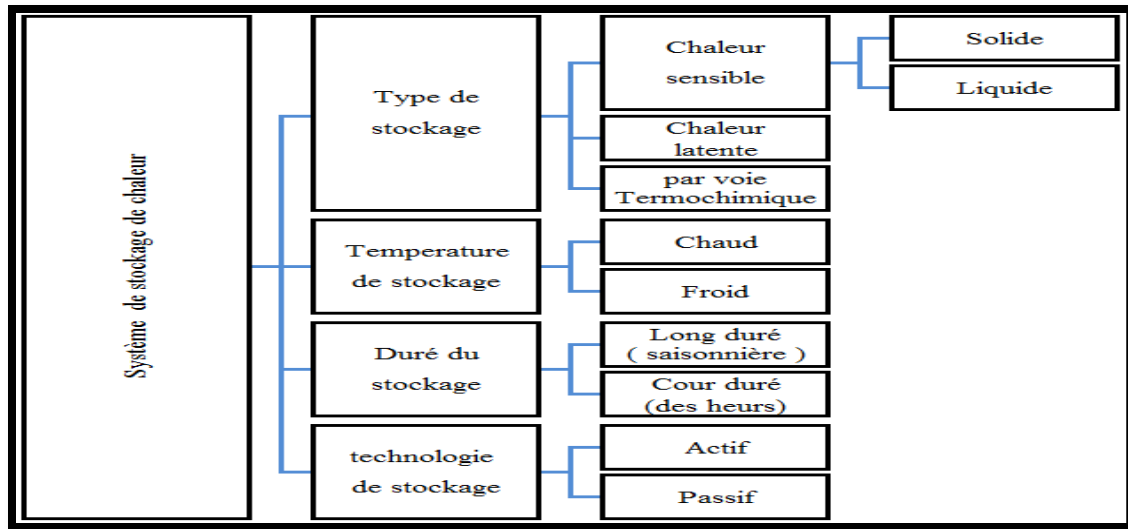


Figure II. 1. Classification d'un système de stockage thermique.

II.3. Types de stockage de chaleur:

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

II.3.1 Stockage par chaleur sensible :

Un système de stockage de chaleur par chaleur sensible [15] utilise la capacité thermique d'un matériau, c'est-à-dire sa chaleur spécifique, afin d'emmagasiner de l'énergie. L'énergie thermique est stockée par l'augmentation de la température du matériau suivant la relation.

$$E_{\text{sensible}} = \int_{T_1}^{T_2} mc_p(T).dT \quad (\text{II. 1})$$

En supposant la capacité calorifique indépendante de la température, cette relation devient :

$$E_{\text{sensible}} = m. c_p. (T_2 - T_1) \quad (\text{II. 2})$$

Où, E est la quantité d'énergie stockée (J), m est la masse du matériau de stockage (kg), C_p est la chaleur spécifique du matériau de stockage ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et dT est la variation de la température durant l'étape de charge (K).

De plus, aucun changement de phase n'apparaît en cours de fonctionnement.

Afin qu'un matériau soit reconnu comme potentiel utilisable comme médium de stockage de chaleur sous forme sensible, il doit répondre aux critères suivants :

- ❖ Chaleur spécifique élevée .

- ❖ Stabilité à long terme avec cycles thermiques .
- ❖ Compatibilité avec son contenant .
- ❖ Faible coût.

Avantages:

- ✓ Pallie au décalage entre la production de chaleur fatale (récupération d'énergie) et les besoins en chaleur sur le site (utilisation de l'énergie récupérée).

Inconvénient:

- ✓ Encombrement.
- ✓ Pertes d'énergie.

Les principaux matériaux utilisés se retrouvent sous forme liquide ou solide.

II.3.1.1. Matériaux liquides:

Les matériaux liquides sont [15] de bons candidats pour un système de stockage de chaleur sous forme sensible. En effet, leur état liquide permet généralement une meilleure intégration au système d'échange de chaleur. De plus, la vitesse de restitution de la chaleur est généralement plus élevée due aux effets convectifs qui se produisent à l'intérieur du liquide. Cette caractéristique spécifique aux matériaux liquides leur procure par contre une plus grande autodécharge, résultant en une plus faible autonomie pour une puissance donnée.

Les principaux liquides utilisés sont l'eau et les huiles thermiques et les sels fondus.

✓ -Le Stockage par l'eau :

L'eau est le meilleur milieu pour le stockage [10] aux faibles températures. Elle a la capacité thermique massique la plus grande par rapport aux autres corps (4 185 J/ kg à 20 °C). Ainsi, pour une variation de température de 60°C, l'eau peut stocker 250 kJ/kg.

De plus, l'eau n'est pas chère et facilement disponible. Cependant, à cause de sa grande pression de vapeur, pour les applications à haute température, elle demande une isolation coûteuse et un réservoir de stockage qui résiste aux fortes pressions. L'eau est utilisable non seulement comme milieu de stockage mais aussi comme milieu de transport de l'énergie. Actuellement, l'eau chaude est le vecteur le plus utilisé dans les systèmes d'applications de l'énergie solaire. Elle est utilisable dans un domaine de températures allant de 25 à 90°C.

Les différentes formes de stockage de l'eau sont : - Le réservoir:

Avantage:

- Haute efficacité.

- Chaleur spécifique élevée.
- Stratification thermique.
- Faible coût.
- Très disponible.
- Très documenté.
- Aucune détérioration.

Inconvénients:

- Pression de vapeur élevée.
- Corrosif à certains contenants.

✓ Les huiles organiques:

Les huiles sont les liquides les plus utilisés après l'eau, pour un système de stockage thermique sous forme sensible. La chaleur spécifique de certaines huiles est de 25 à 40 % plus élevée que celle de l'eau. Ils ont également une plus basse pression de vapeur ce qui permet de leur utilisation à température plus élevée. Les deux principales huiles qui ont retenu l'attention pour une application de stockage de chaleur sont le Therminol et la Caloria-HT.

Avantage:

- Chaleur spécifique élevée.
- Non-corrosif aux contenants.
- Disponible.
- Faible pression de vapeur.
- Température de fonctionnement élevée.

Inconvénients:

- Coût élevée.
- Toxique pour l'environnement.
- Inflammable.

Tableau II.1 : Techniques de stockage liquide.

Techniques de stockage	Thermocline	Bassin solaire	Eau + Gravier	Aquifère
Milieu de stockage	eau	Eau salée	Gravier-eau	Eau souterraine
Température	25-90	50-95	-	10-40
Capacité calorifique (kW h/ m ³)	60-80	-	30-50	30-40
Volume équivalent à 1m ³ d'eau	1	-	1.3-2	2-3

II.3.1.2. Matériaux solides:

Les matériaux solides [11] sont également de bons candidats pour une application de stockage thermique. Parmi les matériaux solide les plus utilisés, on a : les roches, le sable, les briques, les métaux ...

Le tableau suivant résume les caractéristiques de certains matériaux solides utilisés dans le stockage sensible.

Tableau II. 2 : Propriétés des matériaux solides utilisés dans le stockage thermique.

Matériaux	Densité (Kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Capacité thermique Volumétrique (J/m ³ K)
Argile	1458	879	1.28
Briques	1800	837	1.51
Grès	2200	712	1.57
bois	700	2390	1.67
Béton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
ferre	7900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68

En plus de leurs capacités calorifiques importantes, les matériaux solides ne présentent aucun problème dû à la pression de vapeur. Les métaux sont de bons candidats pour le stockage thermique. Cependant, ils restent coûteux en comparaison avec d'autres matériaux solides, notamment, la roche, le béton et la brique. Ayant des caractéristiques très rapprochées, les roches, le béton et les briques forment une catégorie à haut potentiel d'utilisation comme

matériaux dans un système de stockage thermique sous forme sensible. En effet, leur stabilité à long terme, leur disponibilité et leur prix abordable en font de bons candidats .

Par contre, leur faible conductivité thermique ainsi que leur faible chaleur spécifique font que d'autres matériaux leur soient souvent préférés.

II.3.2. Stockage thermique par chaleur Latente:

Pendant le changement de phase des matériaux [14], solide/liquide ou liquide/vapeur, l'énergie thermique peut être stockée de façon isotherme, dépendant ainsi de la chaleur latente, propriété intrinsèque du matériau et de la quantité de matériau utilisée. Ce type de stockage peut être efficace pour des différences de températures très faibles. Les matériaux utilisés dans ce cas sont appelés : Matériaux à Changement de Phase (MCP, PCM pour change phase matérielle). De nombreuses substances ont été étudiées comme des matériaux à changement de phase potentiels, mais seuls quelques-uns sont commercialisés en tant que tels. La Figure (II.2) représente une classification des MCP. Durant l'étape de charge, l'énergie thermique fournie au matériau permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. Cette énergie est ensuite stockée à la température de charge. Lors de l'étape de restitution de l'énergie stockée, le matériau de stockage change de nouveau de phase et reprend son état initial. La Figure (II.3) illustre les différentes étapes d'un tel système de stockage.

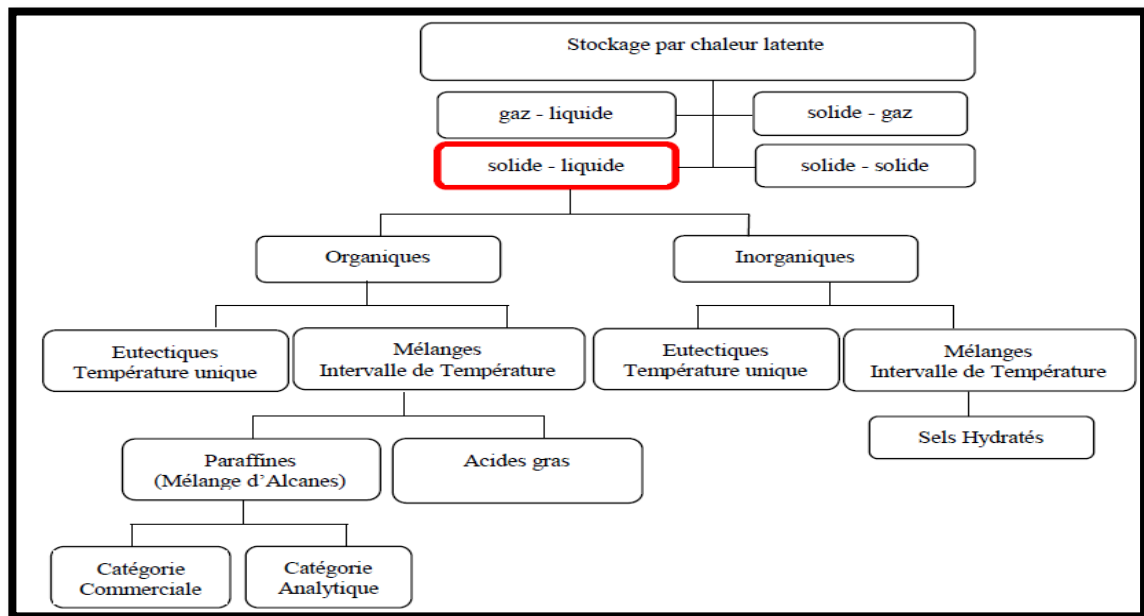


Figure II. 2. Classification des matériaux à changement de phase.

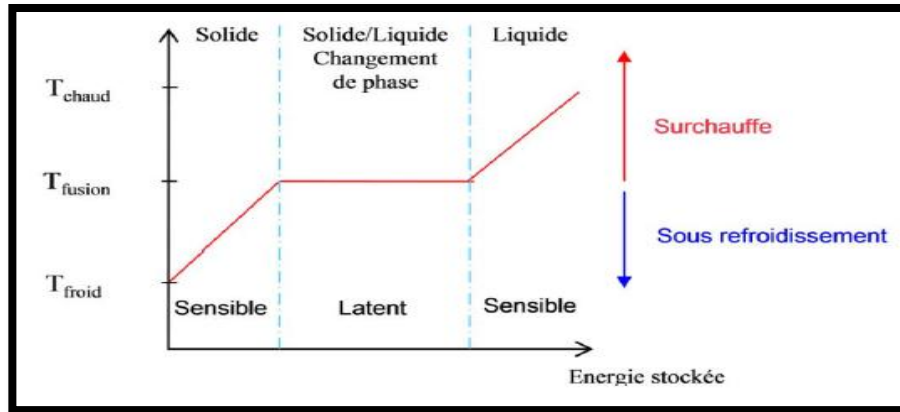


Figure II. 3. Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente (solide/liquide).

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

$$Q = \int_{T_{\text{froid}}}^{T_{\text{fusion}}} m \cdot C_{p,s} \cdot dT + m \cdot \Delta L + \int_{T_{\text{fusion}}}^{T_{\text{chaud}}} m \cdot C_{p,l} \cdot dT \quad (\text{II. 3})$$

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

II.3.2.1. Les avantages et Inconvénients du stockage par chaleur latente :

✓ Avantages:

Par rapport au stockage par chaleur sensible, les principaux avantages du stockage par chaleur latente peuvent être résumés ainsi: [15]

- La chaleur latente est beaucoup plus importante que la chaleur sensible (pour un écart de température pas trop important).
- Les MCP possèdent une plus grande compacité.
- Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures de confort en thermique du bâtiment (20 à 30°C), peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible.
- Quand la décharge d'énergie thermique a lieu, la température de la surface de MCP reste proche de la valeur de la température de changement d'état. On a donc un contrôle passif de la température de la surface. La quantité d'énergie de la décharge ne

dépend donc que de la température de l'environnement.

- Le stockage par chaleur latente ne pose pas de problème de surchauffe saisonnière grâce à sa faible masse.
- ✓ **Inconvénients:**
 - une consommation d'électricité la nuit pour profiter de tarifs spéciaux pour le stockage et une utilisation du déstockage à des périodes où l'électricité est chère ;
 - un investissement pour un groupe frigorifique qui fonctionnera régulièrement à une puissance correspondant à la production réduite du jour ou du stockage la nuit et non pour satisfaire la puissance maximale sur une courte période. Plus généralement, il y aura un écrêtage des demandes de puissance évitant les fonctionnements intempestifs pas toujours recommandés pour les groupes frigorifiques.

II.3.2.2. Les matériaux à changement de phase:

On nomme [13] Matériau à Changement de Phase - ou MCP - tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Cette plage est grossièrement localisée entre 10 et 80 degrés. Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omniprésentes dans notre vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire...).

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

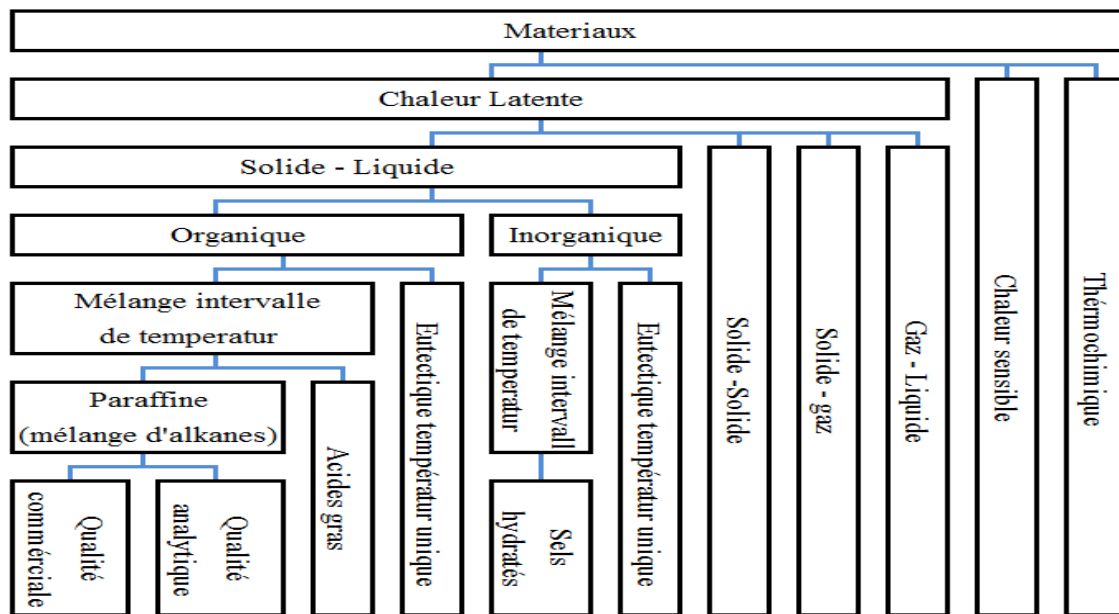


Figure II.4. Classification des MCP.

Les MCP peuvent être regroupés en trois principales catégories :

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

Tableau II.3: résume les caractéristiques des trois catégories de MCP.

Caractéristiques	Solide-solide	Solide-liquide	Liquide-gaz
Température de fusion	Hors application	Grande plage	Élevée
Changement de volume	Négligeable	Léger	Très Élevé
Matériaux disponibles	Peu de matériaux identifiés	Oui	Oui
Technologie à point	Non	Oui	Plus ou moins

Lors du choix d'un matériau à changement de phase, plusieurs critères doivent être pris en compte, notamment la température de fusion qui doit être en adéquation avec l'utilisation qui va en être faite. Les critères de choix sont répertoriés dans le Tableau (II.4).

Tableau II.4 : Critères à respecter lors du choix d'un matériau à changement de phase. [12]

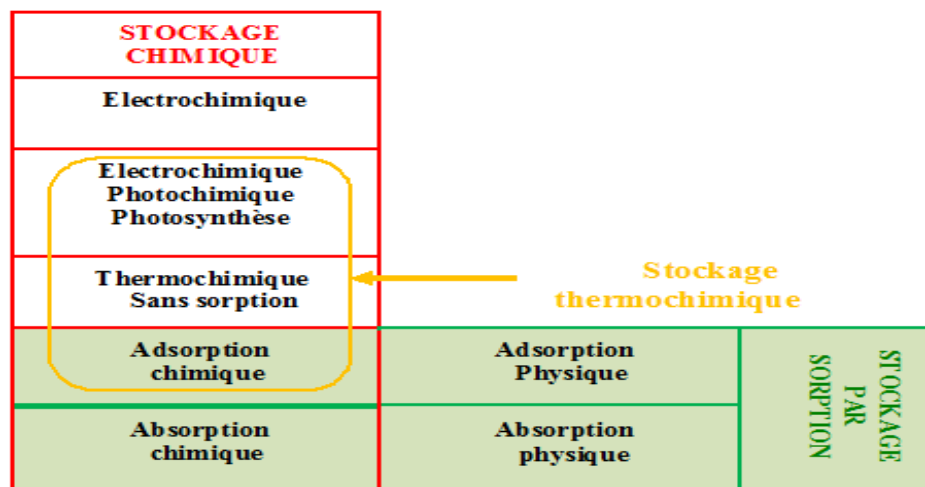
Thermiques	• Température de changement de phase adéquate • Enthalpie de changement de phase élevée • Conductivité thermique élevée
Physiques	✓ Masse volumique élevée ✓ Faible variation de volume au changement de phase ✓ Faible pression partielle de vapeur
Cinétiques	• Pas de surfusion (i.e. pas de cristallisation à une température inférieure à la température de fusion) • Taux suffisant de cristallisation
Chimiques	✓ Stabilité à long terme à la température de travail ✓ Compatibilité avec les matériaux de construction ✓ Non toxicité ✓ Non inflammabilité
Économiques	• Abondance du matériau • Disponibilité • Coût du matériau

II.3.3. Stockage thermochimique:

Le terme de stockage thermochimique [12] recouvre deux phénomènes : la sorption et la réaction chimique.

Le stockage de chaleur par sorption est intéressant pour le stockage basse température ($T \approx 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$) tandis que pour des applications de type solaire concentré ($T \approx 200 \text{ à } 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$), ce sont les réactions de synthèse chimique qui semblent être les plus adaptées.

La Figure (II.5) présente la classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique.

**Figure II.5 :** Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique.

II.3.3.1. Principe de fonctionnement:

La voie thermochimique exploite [12] la réversibilité des réactions chimiques pour stocker l'énergie. De façon générale, les réactions sont de la forme :



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



Pour ce type de stockage, la réaction mise en jeu doit être totalement réversible afin que le procédé ne perde pas sa capacité de stockage au cours des cycles. Le schéma de principe du stockage de chaleur par voie thermochimique est présenté sur la Figure(II.6).

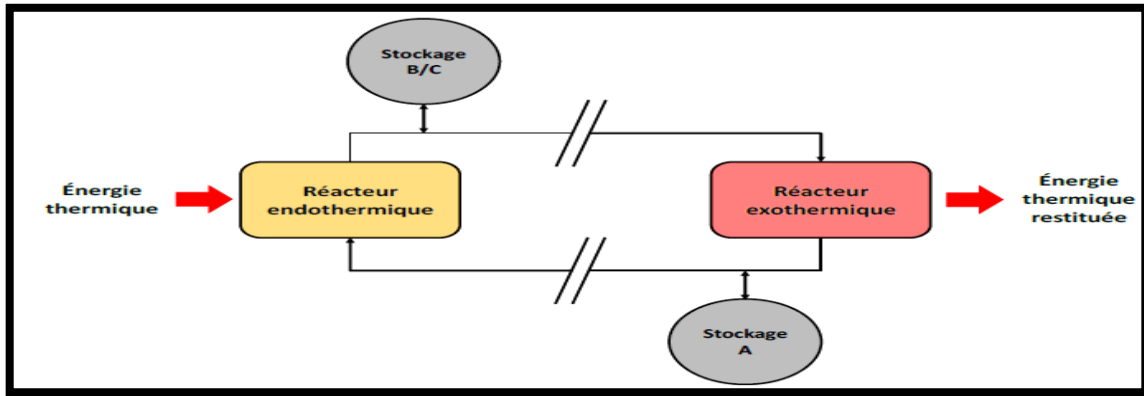


Figure II.6 : Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermochimique.

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

La quantité d'énergie qui peut être stockée dans une réaction chimique de type $A + \Delta H_r \longleftrightarrow B + C$ est la somme des énergies sensibles des matériaux et de la chaleur de réaction.

La quantité d'énergie stockée est exprimée selon la relation:

$$E = \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_f} m_i \cdot C_{Pi} \cdot dT + n_A \times \Delta H_r \quad (\text{II.6})$$

Où, E est la quantité d'énergie stockée (J), est le nombre de moles du produit A (mol), est l'enthalpie de la réaction ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$).

II.4. Comparaison entre les différentes techniques de stockage thermique:

Le Tableau 1.5 répertorie les caractéristiques des trois systèmes [12] de stockage d'énergie thermique présentés. Six paramètres fondamentaux ont été choisis : la densité énergétique, la température de stockage, la durée de stockage, le transport de l'énergie, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre du système.

Dans le cadre de ce travail, le choix s'est fixé sur le stockage par chaleur sensible, vu que cette technologie a atteint une maturité qui la rend simple à exploiter.

Tableau II. 5 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.

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

II.5. Choix d'un matériau de stockage:

Afin de pouvoir sélectionner un matériau de stockage [15] parmi la variété des matériaux qui existe, des critères de choix s'imposent: efficacité, coût, capacité calorifique, autodécharge, autonomie, encombrement, sécurité et impacts sur l'environnement. Pour cela, une description exhaustive de chacun de ces critères est faite .

✓ Efficacité:

L'efficacité est le rapport entre l'énergie délivrée et celle emmagasinée. L'efficacité doit donc être basée sur un ou plusieurs cycles réalistes relativement à l'application.

De plus, l'efficacité varie en fonction du point de fonctionnement et de l'état de charge. La conductivité thermique sera le critère le plus important dans l'évaluation de l'efficacité, plus un matériau est conducteur, plus son efficacité en sera affectée.

✓ Coût:

Lors d'un investissement, le plus intéressant pour est que la somme des gains soit supérieure à la somme des coûts. Pour ce faire, il faut que le coût global sur le cycle de vie soit le plus bas possible. Ceci ne signifie pas nécessairement que le moins coûteux à l'investissement ait le plus bas prix à long terme. Puisque l'on considère que tous les matériaux proposés ont une durée de vie supérieure à celle du système.

✓ Capacité calorifique:

La capacité calorifique représente la quantité d'énergie pouvant être disponible dans le matériau une fois chargé. Pour les matériaux à stockage sous forme sensible, on l'évalue en comparant les chaleurs spécifiques. Un matériau ayant une bonne capacité calorifique a une chaleur spécifique élevée. Pour les MCP, on compare les chaleurs de fusion, qui représentent la quantité d'énergie pouvant être emmagasinée durant le changement de phase.

✓ Autodécharge:

L'autodécharge est la proportion des pertes dissipées en un temps donné sans utilisation par rapport à l'énergie totale contenue dans le stockeur. Le premier point à vérifier sera la conductivité thermique. Cette caractéristique est déterminante dans la comparaison des matériaux. En effet, plus un matériau n'a une affinité à conduire la chaleur, plus il aura tendance à la dissiper en dehors du temps de fonctionnement. Le deuxième point est relatif à l'état du matériau, solide ou liquide. On sait que les transferts thermiques par convection sont plus grands que les transferts thermiques par conduction. Ainsi, un matériau liquide aura une plus forte tendance à l'autodécharge qu'un matériau solide.

✓ Vitesse de restitution:

La vitesse de restitution est la capacité à fournir une grande puissance lors de la phase de décharge du système. Bien que la géométrie ait un très grand effet sur la vitesse de restitution, elle n'est pas intrinsèque aux matériaux. Pour cette raison, la conductivité thermique sera la caractéristique déterminante d'un matériau quant à sa rapidité potentielle de restitution de l'énergie emmagasinée.

✓ Encombrement:

L'encombrement est défini par le volume (parfois la masse) occupé par un matériau pour stocker une certaine quantité d'énergie. Les matériaux à stockage de chaleur sous forme sensible seront évalués en fonction de leur capacité calorifique volumique, donc de la quantité d'énergie pouvant être stockée dans un volume unitaire pour chaque degré Kelvin de

variation de température. Pour les MCP, ce critère sera évalué en comparant les volumes relatifs des matériaux par rapport à la glace pour stocker une quantité fixe d'énergie.

✓ **Sécurité et impacts sur l'environnement:**

Ce critère, bien que n'apportant rien au fonctionnement du système de stockage, doit absolument être considéré dans une application à vocation écologique. La toxicité du matériau, son impact sur l'environnement et la possibilité de recyclage après la vie utile seront sur quoi les matériaux seront évalués.

II.6. Critères de choix et de conception d'un système de stockage:

Les critères de conception d'un système de stockage [12] sont nombreux et leur importance relative est directement liée à la technologie de la centrale et au mode de fonctionnement souhaité. Si la capacité thermique, i.e. la quantité d'énergie stockée et restituée, est un point clé, d'autres critères doivent être pris en compte, qu'ils soient économiques :

- coût du matériau de stockage .
- coût de l'échangeur de chaleur.
- coûts d'investissement liés à l'encombrement du système de stockage.

Ou bien techniques :

- densité énergétique élevée (par unité de masse ou de volume).
- conductivité thermique élevée.
- transferts de chaleur efficaces entre le fluide caloporteur/de travail et le matériau de stockage.
- stabilité mécanique et chimique du matériau de stockage.
- compatibilité chimique entre le fluide caloporteur/de travail, l'échangeur de chaleur et/ou le matériau de stockage .
- réversibilité du matériau de stockage pour un nombre élevé de cycles de charge et de décharge.

Tous ces points doivent être pris en compte lors de la conception et du dimensionnement de l'unité de stockage. Plusieurs solutions technologiques répondant à tout ou partie à ces critères ont été étudiées.

II.7. Conclusion

L'étude [11] ainsi réalisée a permis d'établir un état de l'art 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. Outre l'examen des différents matériaux utilisés et procédés existants, la comparaison des différents types 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.

La majorité des études réalisées sur le stockage sensible solide ont été répertoriées. Ceci nous a orientés vers la valorisation des matériaux à la fois écologique et économique, qui sont le sable, plâtre et sel. Ce dernier sera utilisé comme matériau de stockage, dans le cadre de cette thèse. Par ailleurs, les procédés de stockage sont utilisés pour la mise en œuvre du stockage dans le sable plâtre et sel, dans un module plan.

Chapitre 3

Modélisation mathématique

Ce chapitre traite de l'application de l'énergie est stockée dans l'unité est composée d'un ensemble de plaques identiques en parallèle entre les flux de fluide de refroidissement dans le système laminaire .Lorsque nous expliquons les équations qui régissent ce phénomène où le côté extérieur isolé sans aucune perte de chaleur

Sommaire

III.1. Introduction.....	33
III.2. Position du problème	33
III.2.1. Hypothèses simplificatrices	34
III.3. Fonction de transfert d'un élément de stockage par chaleur sensible.....	34
III.3.1. Equations du système calcul des distributions de température en fonction de transfert.....	34
III.3.2. Equations du transfert de chaleur.....	34
III.3.3. Equations du system	35
III.3.4. Distributions de températures et fonction de transfert	36
III.3.5. Signification physique des paramètres β, γ, St^*, t^* .Qualitativement, on peut dire que	37
III.4. Bilan énergétique du système	38
III.4.1. Comportement du flux thermique en paroi	38
III.4.2. Calcul de l'énergie stockage	38
III.5. Comportement de la fonction de stockage.....	40
III.6. Conclusion	40

Chapitre III

Modélisation mathématique

III.1. Introduction :

Nous étudions dans le présent chapitre le stockage d'énergie par chaleur sensible dans un système composé d'un assemblage de plaques parallèles au stocker l'énergie solaire, en utilisant un matériau économique et écologique.

Cette étude de faisabilité a été entreprise à travers une analyse du comportement thermique d'un matériau, et cela via une étude expérimentale. Le système de stockage étudié est schématisé dans la figure (III.1) Il est constitué d'un ensemble de plaques parallèles.

Vu la symétrie géométrique du dispositif, nous nous proposons d'étudier le système constitué de deux demi-plaques parcouru par le fluide caloporteur, Afin de simplifier la résolution mathématique du problème.

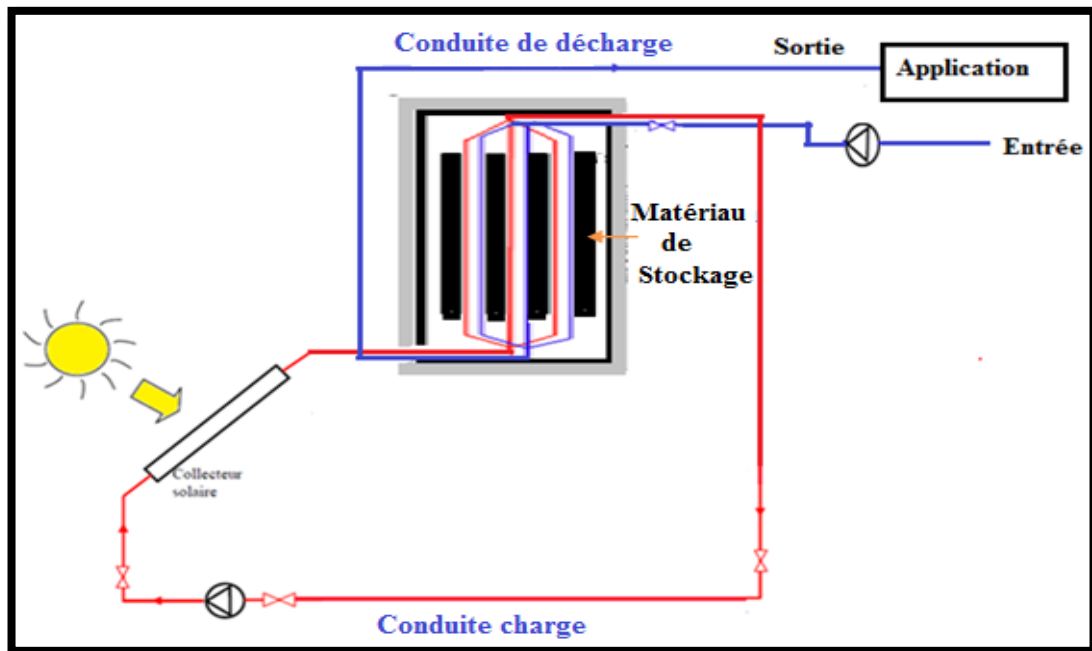


Figure III.1: *Circuit de Stockage/déstockage .*

III.2. Position du problème :

Le fluide caloporteur en écoulement laminaire entre deux plaques épaisses (parois de stockage) est soumis à une température sinusoïdale à l'entrée du canal. Le profil de vitesse développé est supposé parabolique. Dans le but d'annuler toute perte de chaleur, une isolation des plaques est nécessaire.

III.2.1. Hypotheses simplificatrices :

Pour faciliter la résolution du problème, des hypothèses simplificatrices sont présent en considération :

- Le fluide utilisé est compressible et l'écoulement monophasique.
- Les propriétés thermo-physiques du fluide et du solide sont constantes.
- Le terme de conduction axiale dans le fluide est négligeable dans l'équation d'énergie.
- Le milieu de stockage solide est considéré homogène et isotrope.

III.3. Fonction de transfert d'un élément de stockage par chaleur sensible :

III.3.1. Equations du système calcul des distributions de température en fonction de transfert :

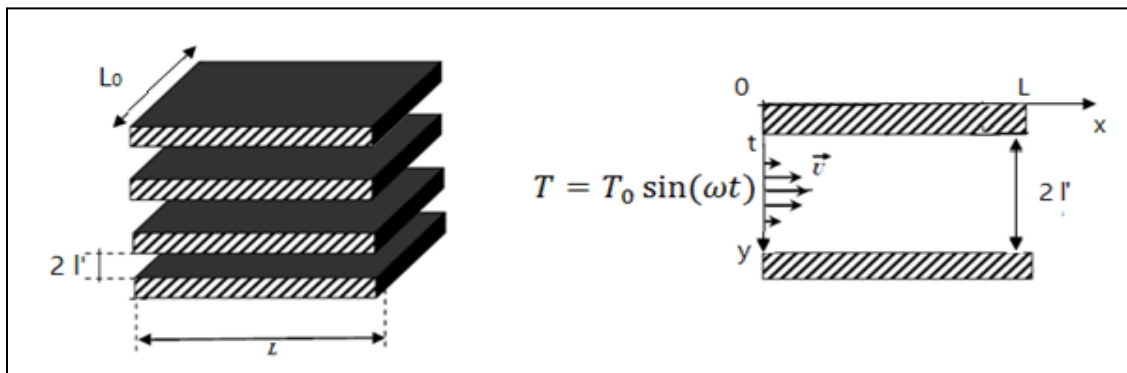


Figure III.2 : élément de stockage considère dans l'étude

III.3.2. Equations du transfert de chaleur :

➤ Conduction thermique :

Est le mode de transfert [23] de chaleur provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu ou entre deux milieux en contact sans déplacement appréciable de matière.

$$q_{\text{cond}} = -K \frac{dT}{dx} \quad (\text{III. a})$$

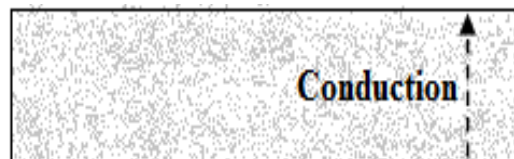


Figure III.3. Transfert de chaleur par conduction à la surface d'un solide

➤ **Convection thermique :**

Convection désigne l'ensemble [23] des mouvements internes (verticaux ou horizontaux) qui animent un fluide et qui impliquent le transport des propriétés des parcelles de ce fluide au cours de son déplacement.

$$q_{\text{conv}} = h(T_s - T_f) \quad (\text{III.b})$$

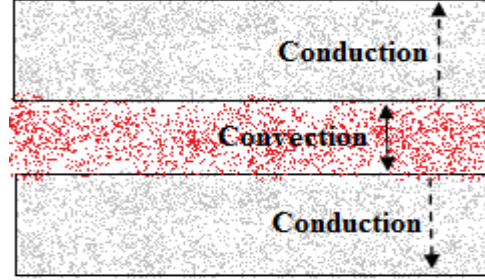


Figure III.4. Transfert de chaleur par convection à la surface d'un solide-fluide

III.3.3. Equations du system :

En régime périodique établi [1], le seul que nous traitons ici, l'ensemble du système plaques-fluide oscille autour du niveau moyen T_1 qui n'intervient pas du fait de la linéarité des équations.

Les distributions de température dans le solide et dans le fluide sont alors respectivement de la forme:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \theta(x, y) \sin\{\omega t + \varphi_s(x, y)\} \\ T = T(x) \sin\{\omega t + \varphi_f(x)\} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \end{array} \quad (\text{I})$$

θ et T Sont solutions du système couple (II) suivant :

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = \frac{1}{a_s} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3) \\ (C p)_f l' \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \alpha (\theta_{y=l} - T) \quad (4) \\ \text{en } y = 0 \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \quad (5) \\ \text{en } y = l \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\alpha}{\lambda_s} (T - \theta_{y=l}) \quad (6) \\ \text{à l'entrée } (x = 0), T = T_0 \sin(\omega t) \quad (7) \end{array} \right\} \quad (\text{II})$$

Pour faciliter les calculs nous introduisons les températures complexes

$$\tilde{T}(x)e^{i\omega t} \text{ et } \tilde{\theta}(x, y)e^{i\omega t}$$

On aura;

$$\left. \begin{aligned} T(x) &= |\tilde{T}(x)| \text{ et } \varphi_f(x) = \text{Arg } \tilde{T}(x) \\ \theta(x, y) &= |\tilde{\theta}(x, y)| \\ \text{et} \\ \varphi_s(x, y) &= \text{Arg } \tilde{\theta}(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (\text{III})$$

Le système (II) prend alors la forme

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \tilde{\theta}}{\partial y^2} - \frac{i\omega}{a_s} \tilde{\theta} &= 0 & (3') \\ (\text{Cp})_f l' \left(i\omega \tilde{T} + u \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} \right) &= \alpha (\tilde{\theta}_{y=1} - \tilde{T}) & (4') \\ \text{en } y = 0 \quad \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial y} &= 0 & (5') \\ \text{en } y = 1 \quad \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial y} &= \frac{\alpha}{\lambda_s} (\tilde{T} - \tilde{\theta}_{y=1}) & (6') \\ \text{en } x = 0, \tilde{T} &= T_0 & (7') \end{aligned} \right\} \quad (\text{II}')$$

III.3.4 Distributions de températures et fonction de transfert :

La résolution de (II') conduit aux expressions.

$$\tilde{\theta}(x, y) = \tilde{T}(x) \frac{\gamma \text{ch} \beta (1 + i) y^*}{(1 + i) \text{sh} \beta (1 + i) + \gamma \text{ch} \beta (1 + i)} \quad (8)$$

$$\tilde{T}(x) = T_0 e^{-\mu x^*} \quad (9)$$

Avec

$$\mu = 2i\pi\tau^* + st^* \times \frac{(1 + i) \text{sh} \beta (1 + i)}{(1 + i) \text{sh} \beta (1 + i) + \gamma \text{ch} \beta (1 + i)} \quad (10)$$

Les paramètres adimensionnels introduits sont les suivants :

$$\left. \begin{aligned} x^* &= x/L ; \quad y^* = y/l \\ \beta &= l \sqrt{\left(\frac{\pi}{a_s \tau} \right)} ; \quad \gamma = \alpha \sqrt{\left(\frac{\tau}{\pi (\text{Cp})_s} \right)} = \frac{\text{Bi}}{\beta} \\ St^* &= St \frac{L}{l'} = \frac{\alpha S}{\dot{m} C_f} \\ \tau^* &= \frac{L/u}{\tau} \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV})$$

$e^{-\mu}$ Représente la fonction de transfert du système. C'est une grandeur complexe. La fonction μ caractérisant la température de sortie du fluide peut s'écrire sous la forme:

$$\mu = n + i\xi \quad (11)$$

d'où;

$$\tilde{T}(x) = T_0 e^{-nx^*} e^{-i\xi x^*} \quad (12)$$

La température du fluide subit donc un amortissement d'amplitude exponentiel en x et un déphasage proportionnel à x .

La fonction d'amortissement $x = e^{-\mu}$ dépend des trois paramètres adimensionnels β, γ, St^* .

La fonction ε représente le retard de phase de la température du fluide en sortie.

Elle fait apparaître un paramètre supplémentaire t^* qui est négligeable si l'on suppose.

$(\partial T / \partial t) \ll u (\partial T / \partial x)$ dans (4). C'est le cas usuel.

Dans (III) on obtient $\varphi_f(x) = -\xi x^*$

III.3.5 Signification physique des paramètres β, γ, St^*, t^* . Qualitativement, on peut dire que :

β fixe la profondeur de pénétration du signal thermique dans l'épaisseur de la plaque.

Plus il est faible et meilleure est l'iso thermicité d'une section droite de la plaque.

Lorsque β est élevé, seule la couche superficielle du matériau est concernée par le stockage $\gamma = Bi/\beta$ Caractérise la qualité de l'interaction fluide /solide. Celle-ci est d'autant meilleure que γ est élevé

$St^* = \alpha S / \dot{m} c_f$ s'interprète aisément si dans l'expression (10) on suppose γ très grand.

En effet.

$$(\lim_{n \rightarrow 0} \mu) = 2i\pi\tau^* + \frac{Sb}{\dot{m}c_f} \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^{1/2} (1+i) \operatorname{th} \beta (1+i) \quad (13)$$

Le facteur d'amortissement (n) est donc directement proportionnel $Sb/\dot{m}c_f$ et même dans le cas d'un change parfait (γ infini), un effet notable suppose obligatoirement une valeur suffisante de la grandeur $S/\dot{m}c_f$. Avec un caloporteur liquide ($\dot{m}c_f$ grand),

La Surface d'échange (S) devra être très importante. Si St^* est trop faible, il n'y a pas d'amortissement possible.

$\tau^* = (L/u)/\tau$ Représente simplement le temps de passage du fluide dans la conduite, rapporté à la période du phénomène. Il n'a d'influence que sur le déphasage ε et peut être considéré comme tout à fait négligeable dans tous les cas d'intérêt pratique.

III.4. Bilan énergétique du système :

III.4.1. Comportement du flux thermique en paroi :

En un point d'abscisse x donne ri la surface de la plaque, le stockage s'effectue pendant une demi-période lorsque le flux thermique est positif (fluide $\longrightarrow$ paroi).

Pendant la demi-période suivante, c'est le phénomène inverse; la température de surface de plaque est supérieure I celle du fluide et on obtient un déstockage.

La densité de flux thermique en paroi s'écrit :

$$q = q(x) \sin[\omega t + \phi(x)] \quad (14)$$

Soit, en utilisant la notation complexe

$$\tilde{q}(x) = \lambda_s \left(\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial y} \right)_{y=1} = \alpha \tilde{T}(x) \tilde{F}(\beta, y) \quad (15)$$

Avec

$$\tilde{F}(\beta, Y) = \frac{(1+i) \operatorname{sh} \beta (1+i)}{(1+i) \operatorname{sh} \beta (1+i) + \gamma \operatorname{ch} \beta (1+i)} \quad (16)$$

Posant par ailleurs

$$\xi(\beta, \gamma) = \operatorname{Arg} \tilde{F}(\beta, y) \quad (17)$$

$$\text{On obtient} \quad \phi(x) = \operatorname{Arg} \tilde{T}(x) + \operatorname{Arg} \tilde{F}(\beta, y) \quad (18)$$

$$\text{Soit :} \quad \begin{cases} \phi(x) = -\xi x^* + \xi(\beta, y) \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{On a aussi :} \quad \begin{cases} q(x) = |\tilde{q}(x)| = \alpha T_0 e^{-nx^*} |\tilde{F}(y, \beta)| \end{cases} \quad (20)$$

Le flux thermique pariétal décroît donc en amplitude comme $T(x)$, c'est-à-dire exponentiellement, et l'instant où débute le stockage évolue linéairement en x , q . Présentant un déphasage constant $\xi(\beta, y)$ par rapport au fluide. Physiquement, cela signifie que l'on peut avoir stockage en un point donné de la paroi et, simultanément, déstockage en un autre point.

III.4.2. Calcul de l'énergie stockage :

Le flux total instantané $Q(t)$ transmis aux deux demi-plaques s'obtient simplement par intégration de (14).

Soit:

$$Q(t) = 2L_0 \int_0^L q dx = \frac{dE_{is}}{dt} \quad (21)$$

E_{is} étant l'énergie interne l'instant t dans l'ensemble des deux demi-plaques, c'est-h-dire

$$E_{is}(t) = L_0 \iint 2(Cp)_s \theta(x,y,t) dx dy \quad (22)$$

Le système (II) fournit le bilan suivant:

$$Q(t) = \frac{dE_{is}}{dt} = \dot{m}c_f(T_e - T_s) - \frac{dE_{if}}{dt} \quad (23)$$

T_e et T_s étant respectivement les températures d'entrée et de sortie instantanées du fluide, et, E_{if} énergie interne du fluide contenu entre les deux plaques.

Soit:

$$E_{if} = \int_0^L 2(Cp)_f l' L_0 T dx \quad (24)$$

Les fonctions $Q(t)$, $E_{is}(t)$ et $E_{if}(t)$ sont évidemment périodiques.

Nous appellerons W_s , énergie stockée dans les deux demi-plaques, la quantité de chaleur accumulée par ces plaques quand $Q(t) \geq 0$ (Fig. 3) soit:

$$W_s = \int Q(t) dt \quad (25)$$

L'intégration étant faite sur une demi-période quand $Q(t) \geq 0$.

Cette grandeur W_s , correspond à la variation.

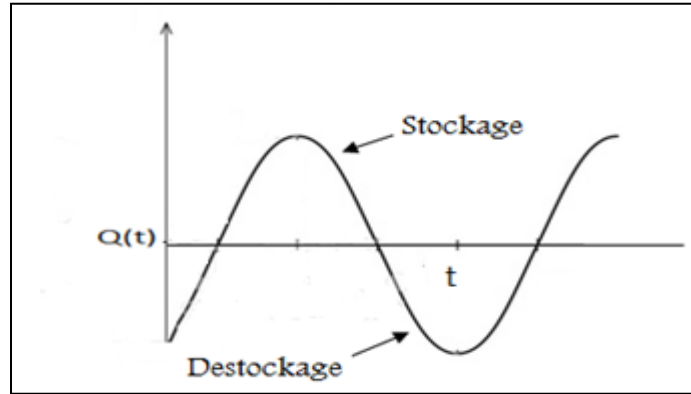


Fig. III.5 : évolution du flux total $Q(t)$ transmis aux plaques.

maximum de l'énergie interne E_{is} , c'est-à dire au double de son amplitude. Là encore, l'utilisation des grandeurs complexes facilite grandement les calculs.

On obtient:

$$W_s = 2E_{is}$$

Avec;

$$\tilde{E}_{is} = \iint 2(Cp)_s \tilde{\theta}(x,y) L_0 dx dy$$

Soit:

$$W_s = \frac{\tau}{\pi} T_0 \dot{m} c_f |1 - e^{-\mu}| \left| 1 - \frac{2i\pi\tau^*}{\mu} \right| \quad (26)$$

On peut écrire aussi:

$$W_s = T_0 \text{Sb}(\tau)^{1/2} f(\gamma, \beta) \left| \frac{1 - e^{-\mu}}{\mu} \right| \quad (27)$$

Avec;

$$f(\gamma, \beta) = \frac{\gamma}{\sqrt{\pi}} |\mathcal{F}(\gamma, \beta)| \quad (28)$$

Cette fonction $f(\gamma, \beta)$ a fait l'objet d'une étude détaillée en (9, 10). Lorsque μ est très petit on obtient.

$$\lim_{\mu \rightarrow 0} (W_s) = T_0 \text{Sb} \sqrt{\tau f(\gamma, \beta)} \quad (29)$$

C'est l'énergie que l'on stocke lorsqu'on suppose la température du fluide uniforme dans l'écoulement.

III.5. Comportement de la fonction de stockage :

On se rapportant à la quantité $H_m = \frac{\tau}{\pi} \dot{m} c_f$, l'énergie maximale transportée par le fluide à l'entrée du canal pendant une demi-période. Nous appellerons fonction du stockage la quantité :

$$f_s = \frac{W_s}{H_m} = |1 - e^{-\mu}| \left| 1 - \frac{2i\pi\tau^*}{\mu} \right| \quad (30)$$

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, l'énergie par stockage raisonnable passe entre deux chaleur plaques en parallèles en régime laminaire, 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 4

Etude expérimentale

Ce chapitre noté tous les résultats sont le fruit de nos efforts pendant plusieurs semaines de ce que nous avons fait la description (module plan) avec les outils et les matériaux les plus importants de stockage des résultats de mesure (sable, plâtre et sel)

Sommaire

IV.1. Introduction.....	42
IV.2. Hypothèses.....	42
IV.3. Conception du système de stockage	43
IV.4. Matérielle le mesure de température.....	44
IV.5. Les étapes de la fabrication le expérience avec la clarifiées	45
IV.6. Composant l'unité de stockage module plan	46
IV.7. Nombres adimensionnels	47
IV.8. Essais expérimentaux.....	47
IV.9. Paramètre de l'unité de stockage	48
IV.10. Les résultats dans le cas de Stockage de chaleur dans le sable	49
IV.11. Les résultats dans le cas de Stockage de chaleur dans le Plâtre (Gypse)	53
IV.12. Les résultats dans le cas de Stockage de chaleur dans le sel	56
IV.13. Les résultats dans le cas de stockage de chaleur dans le Plâtre + sel	59
IV.14. Comparaison entre caractéristique du quatre matériaux	62
IV.15. Estimation de l'efficacité globale des matériaux et du module plan	64
IV.16. Conclusion.....	65

Chapitre IV

Etude expérimentale

IV.1. Introduction:

Dans ce chapitre on va présenter notre étude expérimentale à travers la description de chaque partie concernant la fabrication de l'unité de stockage et les appareils de mesures aussi la méthode de travail pratique. Les matériaux proposés dans cette étude sont des matériaux naturels et sont disponibles dans la région d'el-oued (sable / plâtre /sel). par le choix de ce système (appelé module plan), on étudie ces matériaux sous forme de plaques 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.

IV.2. Hypothèses:

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

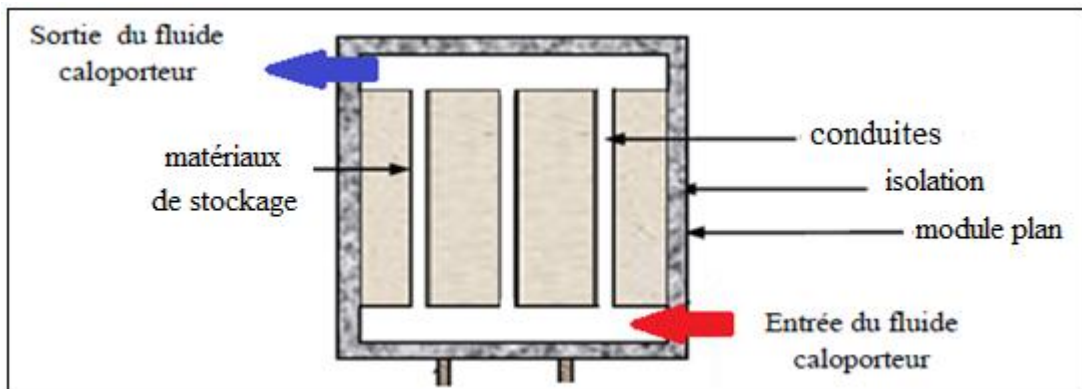


Figure IV.1: Schéma simplifié de l'unité de stockage.

Le modèle étudié est basé sur les hypothèses suivantes:

- ✓ La module plan de stockage est parfaitement isolée.
- ✓ l'influence de la paroi sur les plaque (fabriqué en fer) est négligeable.
- ✓ La chute de pression dans les conduites est négligeable.
- ✓ la conduction et la convection 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.

IV.3. 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 et d'une plaque de stockage reliée par un échangeur de chaleur a été conçu (Figure IV.2).

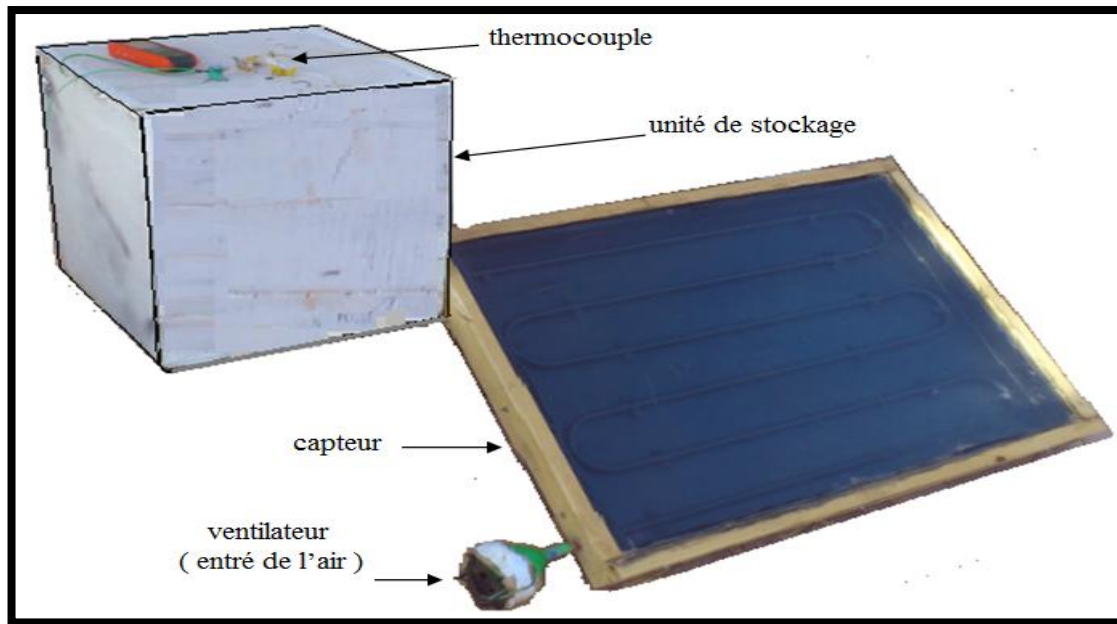


Figure IV.2: Schéma de principe du système de stockage expérimental.

IV .3.1. Description de la configuration étudiée :

La figure IV.3 représente le schéma physique du système étudié. Il s'agit d'une cuve cubique de côtés (45cm), formant un module plan contenant les matériaux de stockage (sable / plâtre / Sel) à l'intérieur duquel, sont installés des conduites de diamètre (22 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.

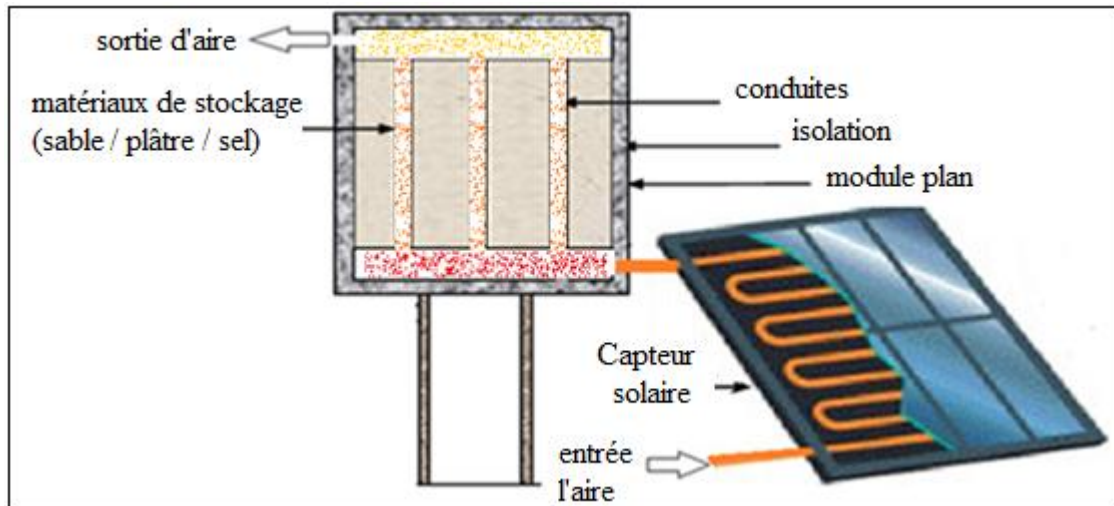


Figure IV.3 : Schéma de principe du système de stockage.

IV.4. Matérielle le mesure de température :

➤ 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 IV.4: Image thermomètre pour mesurer la température.

➤ Thermocouple :

Les thermocouples, ou couples thermoélectriques (CTE), 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 °C.



Figure IV.5: *Image thermocouples.*

IV.5. Les étapes de la fabrication en expérimentation avec la clarification:

IV.5.1. Améliorer le capteur :

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



Figure IV.6: *schéma de module panneau solaire*

IV.5.2. Fabrication du l'unité de stockage :



Figure IV.7: *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.
- ✓ La couleur blanche a été choisie pour la peinture afin de ne pas absorber les rayons du soleil et à donner des réels résultats sans l'influence des facteurs externes.
- ✓ Nous avons installé une plaque 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).

IV.6. Composant l'unité de stockage (module plan) :

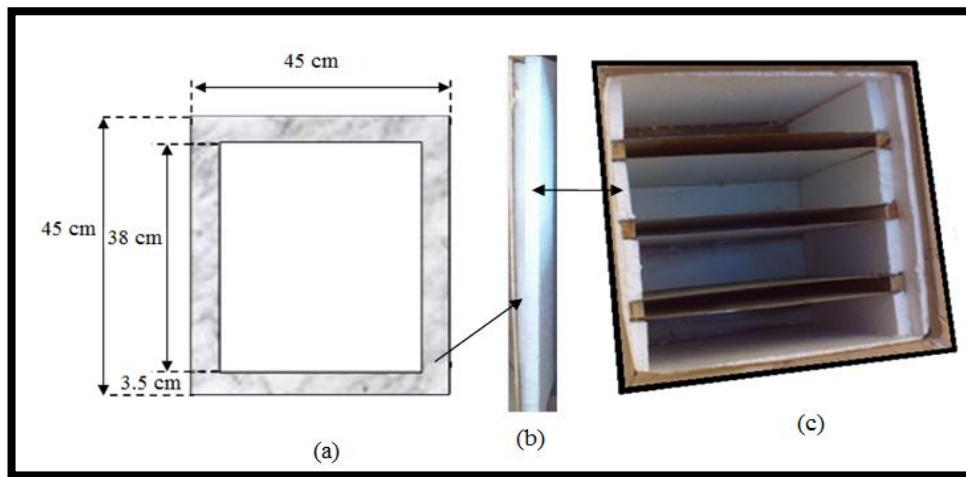


Figure IV.8: Schéma du module plan de stockage : (a) les dimensions du module plan, (b) isolation, (c) photographie de module plan.

Le transfert de chaleur vers les matériaux est assuré par un échangeur de chaleur constitué de conduite plan de 25 mm d'épaisseur extérieur et de 35 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:

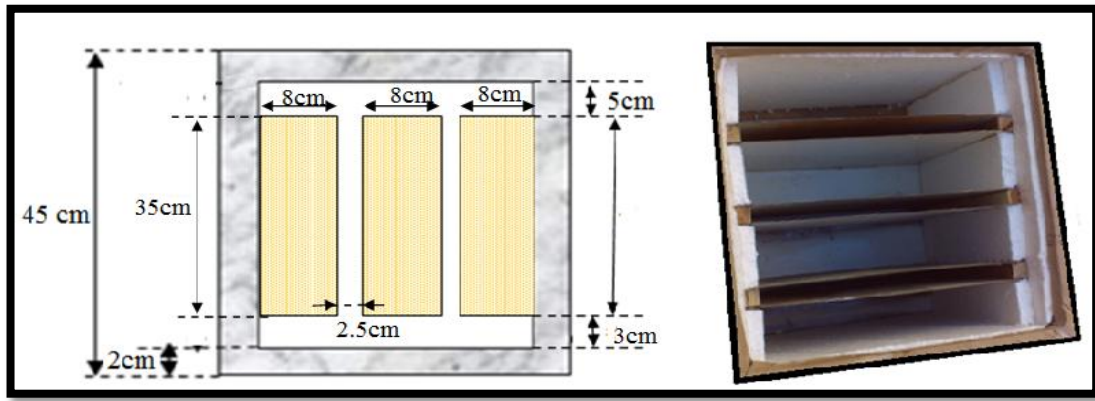


Figure IV.9: dimensionnement de l'unité à l'intérieur.

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).

IV.7. 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 plans. récapitule les nombres adimensionnels utilisés :

➤ Nombre de Reynolds :

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

$$Re = \frac{F^I}{F^v} = \frac{\rho U^2 L^2}{\mu U L} = \frac{\rho U L}{\mu} = \frac{U L}{\nu} \quad (IV. 1)$$

$$Re = \frac{U D_h}{\nu} = \frac{4Q}{\pi D_h \nu} \quad (IV. 2)$$

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

- $Re < 2000$: régime **laminaire**.
- $2000 < Re < 100000$: régime **transitoire**.
- $Re > 100000$: régime **turbulent**.

IV.8. Essais expérimentaux :

Pour tous les tests expérimentaux, et la masse de sable utilisé et le plâtre est de 40KG. Principe expérimental: la chaleur est installée dans le centre des plaques 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.

Le temps est de 10h à 16h dans l'après-midi. De 16h à 10h circuit pour obtenir des fluides L'opération de transfert de chaleur au volume de et pour éviter un processus inverse (Décharge de module plan).

Tableau IV.1 : *Propriétés thermo physique de la matière.*

Matière de stockage thermique	C_p [J/kg. K]	ρ [kg/m ³]	K [W/m. K]
Sable	920	2700	1
plâtre	1000	1500	0.56
sel	864.13	2163	-
Air	1006	1.17	0.026

IV.9. Paramètre de l'unité de stockage :

Tableau IV.2: *Paramètre de l'unité de stockage.*

nombre de Reynolds	1607.35<2000 laminaire
masse de Utilisé dans le stockage	40 [Kg]
épaisseur de la plaque	0.025 [m]
Surface de la plaque	0.122 [m ²]
épaisseur de la matière	0.08 [m]
Surface de la matière	0.122 [m ²]

IV.10. Les résultats dans le cas de Stockage de chaleur dans le sable :

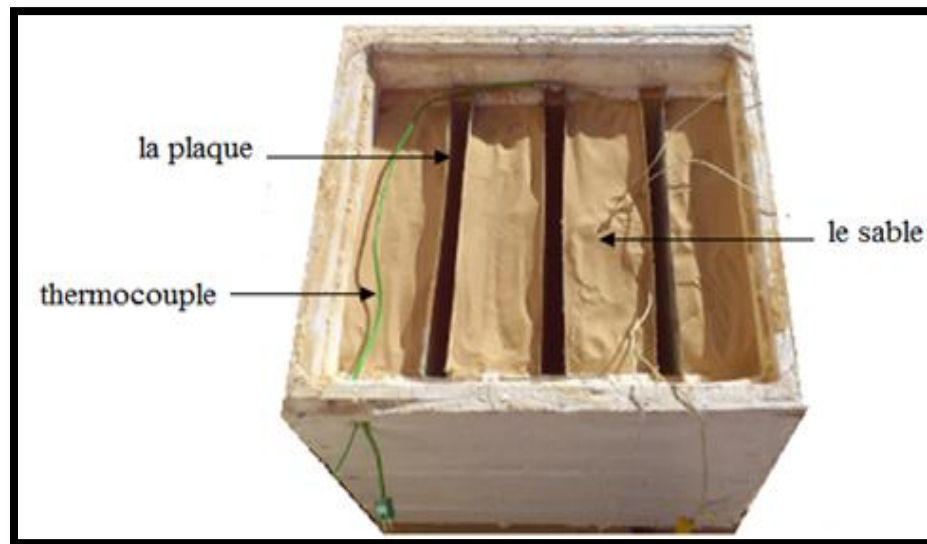


Figure IV.10: illustration simplifiée de model plan de stockage thermique dans sable.

Tableau IV.3 : degré de température la position de thermocouple dans le sable date 09 /03 /2017.

Temps(h)	T(thermocouple) ₁ Température du zone inférieure (K)	T(thermocouple) ₂ Température du zone centre-droit (K)	T(thermocouple) ₃ Température du zone supérieure (K)	T(thermocouple) ₄ Température du zone centre- gauche (K)	T (moy) _{stocké} Température de stockage (K)
10:00	295.2	295.2	295.2	295.2	295.2
10:30	297.0	296.5	298.0	296.5	297.0
11:00	298.0	297.5	298.5	297.5	298.0
11:30	299.0	298.5	299.0	299.0	299.0
12:00	300.0	299.5	299.5	299.5	300.0
12:30	300.5	300.5	301.5	300.5	301.0
13:00	301.0	301.5	301.0	300.5	301.0
13:30	303.0	302.0	302.0	301.5	302.0
14:00	304.0	303.0	303.0	303.0	303.0
14:30	305.0	304.0	303.5	303.5	304.0
15:00	305.0	304.5	305.0	305.5	305.0
15:30	306.0	306.0	306.0	305.5	306.0
16:00	306.0	306.0	306.0	306.0	306.0

Tableau IV.4: Résultats de température instantanée (cas de stockage dans le sable) date 09 /03 /2017.

Temps(h)	T (amb) température ambiante(K)	T(e) Entrée de la température(K)	T(s) Sortie de la température(K)	T(moy) _{stocké} Température de stockage (K)
10:00	294.0	294.0	294.0	295.2
10:30	300.0	351.5	302.9	297.0
11:00	302.0	356.5	303.4	298.0
11:30	303.0	356.7	304.0	299.0
12:00	304.0	358.9	305.6	300.0
12:30	304.0	361.9	305.2	301.0
13:00	305.0	358.3	306.8	301.0
13:30	306.0	356.7	306.0	302.0
14:00	301.0	354.0	308.3	303.0
14:30	303.0	351.0	307.2	304.0
15:00	304.0	343.8	307.0	305.0
15:30	303.0	336.5	305.4	306.0
16:00	303.0	329.0	306.5	306.0

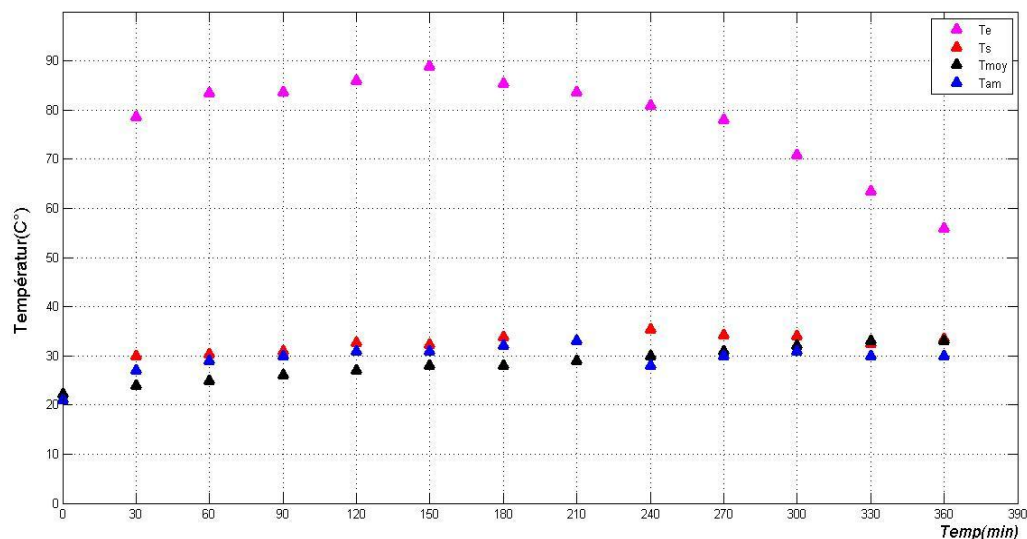


Figure IV.11: Evolution temporelle de la température moyenne stocké dans le sable et la température ambiante et température d'entrée et de sortie pendant le processus de stockage.

Il ressort clairement de la figure (IV.11) l'évolution de degré la température unité de stockage pendant six heures (10:00 ; 16:00) et la température d'entrée en haut à 90 C ° degrés et

diminue à 55C ° pendant 16:00 heures, La chaleur stockée dans le sable stabilisé à 33C° et la même chose avec la sortie. La température ambiante va entre 21 C ° et 30 C ° a toute la journée

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

$$W_{\text{stocké}} = (m \cdot C_p)_{\text{sable}} \cdot (T(t) - T_{\text{ini}}) \quad (\text{IV. 3})$$

$m=40[\text{Kg}]$, $C_p=920[\text{J/kg. K}]$; $T(t)=\text{Température instantanée du sable}$, $T(i)_{\text{sable}}=22.2$.

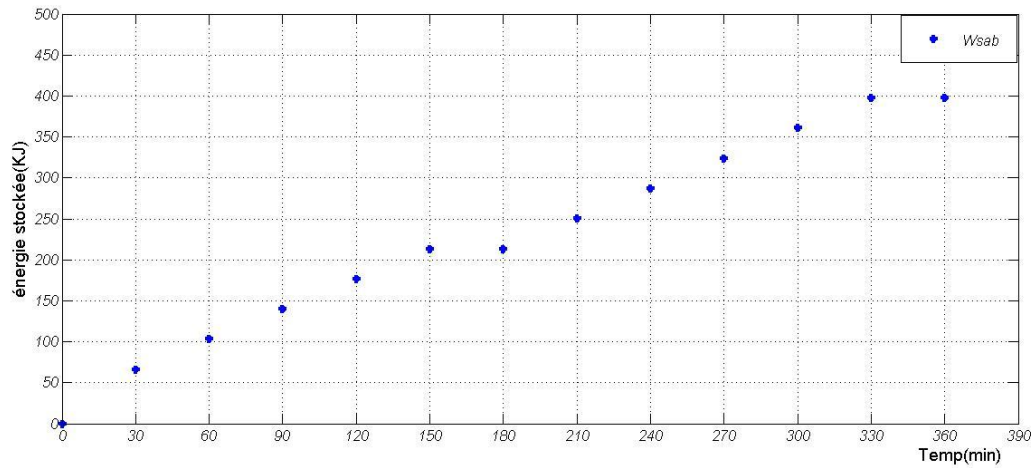


Figure IV.12: Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de sable.

Dans cette Figure on remarque que l'énergie stockée dans le module plan de sable augment progressivement jusqu'à s'atteindre à 400 (KJ) puis stabilisé dans cette valeur.

IV.10.2. 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 basés 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)

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

Où $T(t)$ est la température moyenne instantanée du module de stockage en fonction du temps, T_{init} et T_{ent} sont respectivement la température initiale du module de stockage et la température d'entrée du fluide caloporteur.

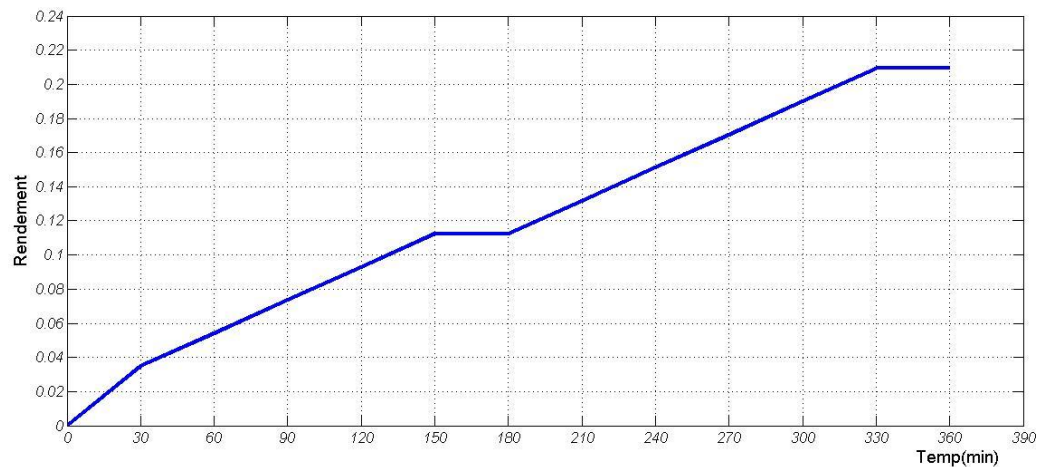


Figure IV.13: Evolution du rendement instantané dans le module plan de sable

De cette courbe nous notons que le rendement augmente au cours du processus de sable, matériau de stockage de chaleur est à croissance lente, où il montre une très faible qui ne dépasse pas 21%.

IV.10.3 Les résultats dans le cas de déstockage de chaleur dans le sable :

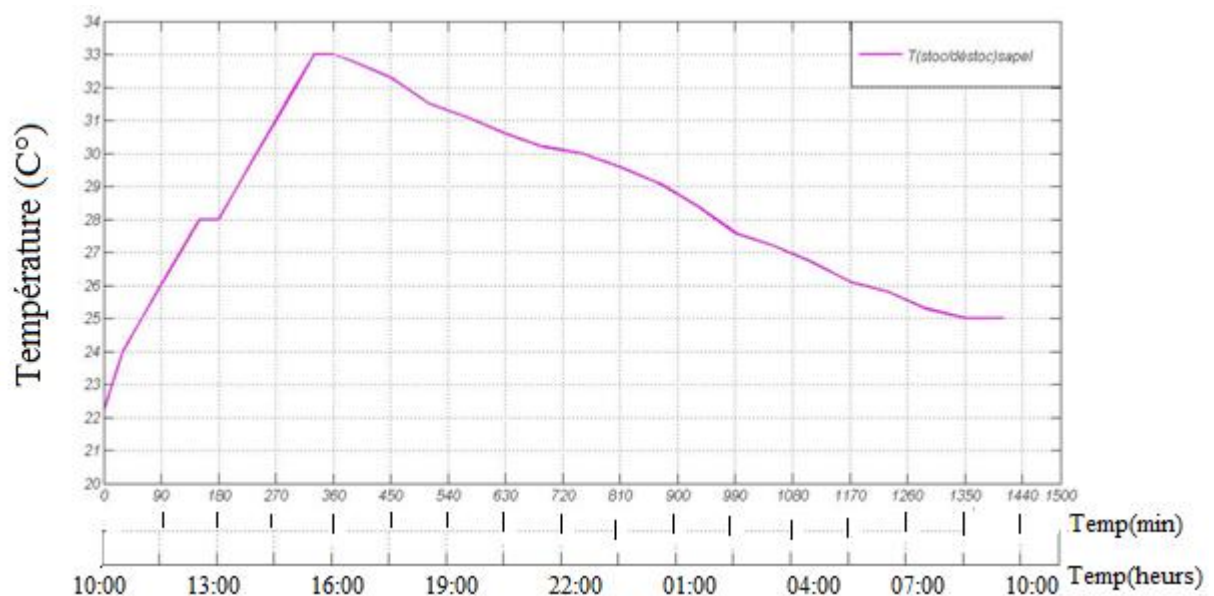


Figure IV.14: Profile de la température du module plan de sable pendant un cycle complet
Stockage / déstockage

De cette courbe nous notons que le stockage et de déstockage de la chaleur de processus dans le sable et montre que la valeur principale du degré de la température de sable 22C ° au début de l'expérience, et augmentation de la valeur a même atteint 33C ° appelé stockage.

Dans le processus de déstockage a commencé à diminuer pour atteindre 35C ° pendant une période de temps de 18 heures.

IV.11. Les résultats dans le cas de stockage de chaleur dans le plâtre (Gypse)

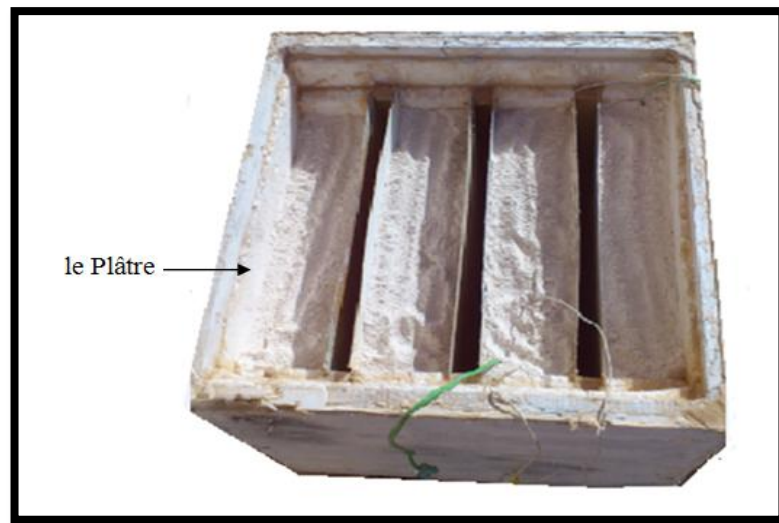


Figure IV.15: illustration simplifiée de model plan de stockage thermique dans le gypse

Tableau IV.5 Résultats de température instantanée (cas de stockage dans le sel) date
14 /03/2017.

Temps(h)	T (amb) _{ambiante} température ambiante(K)	T(e) _{entrée} Entrée de la température(K)	T(s) _{sortie} Sortie de la température(K)	T (moy) _{stocké} Température de stockage (K)
10:00	297.5	297.5	297.5	299.0
10:30	300.8	315.0	303.0	303.8
11:00	300.0	318.0	305.5	306.6
11:30	302.0	342.0	306.3	308.3
12:00	303.0	343.0	305.4	309.7
12:30	304.0	344.0	307.3	310.7
13:00	303.5	344.0	306.0	310.9
13:30	303.0	343.0	306.0	311.8
14:00	304.0	337.0	306.8	312.2
14:30	304.6	335.0	306.6	311.6
15:00	306.0	331.0	306.8	310.2
15:30	303.0	326.0	306.4	310.0
16:00	303.0	323.0	306.0	310.0

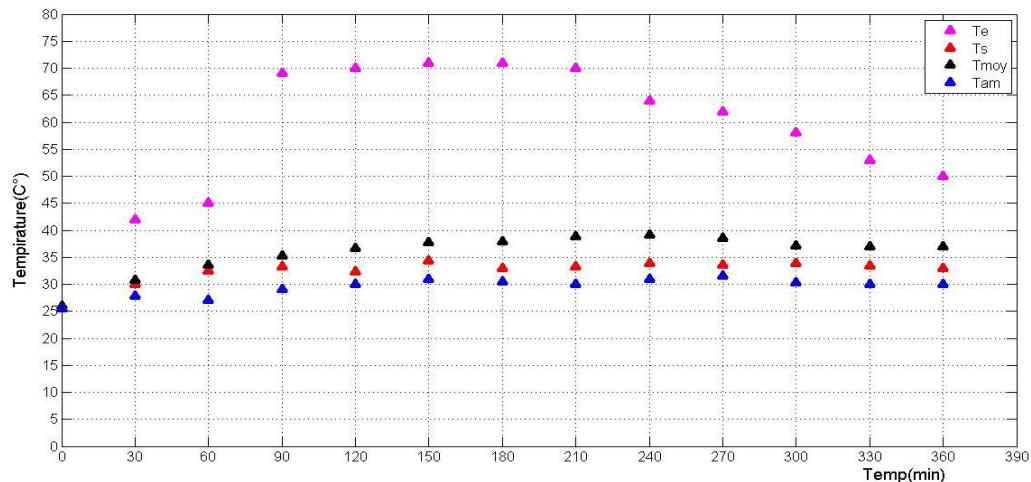


Figure IV.16: Evolution temporelle de la température moyenne du plâtre et la température ambiante et température entrée et sortie pendant le processus de stockage.

Il ressort clairement de la figure (IV.16) l'évolution du degré la température, unité de stockage pendant six heures (10:00 ; 16:00) et la température d'entrée en haut à 72 C ° degrés et diminue à 50C ° à l'époque 16:00 heures, la chaleur stockée dans le plâtre stabilisé à 37C° et la même chose avec le sortie stabilisée à 34C°. La température ambiante allant entre 21C ° et 30 C° durant toute la journée.

IV.11.1. L'énergie stockée dans le gypse :

$$W_{\text{stocké}} = (m \cdot C_p)_{\text{plâtre}} \cdot (T(t) - T_{\text{ini}}) \quad (\text{IV.5})$$

$m=40[\text{Kg}]$, $C=1000 [\text{J/kg. K}]$; $T(t)=$ Température instantanée du gypse , $T(i)p=26$.

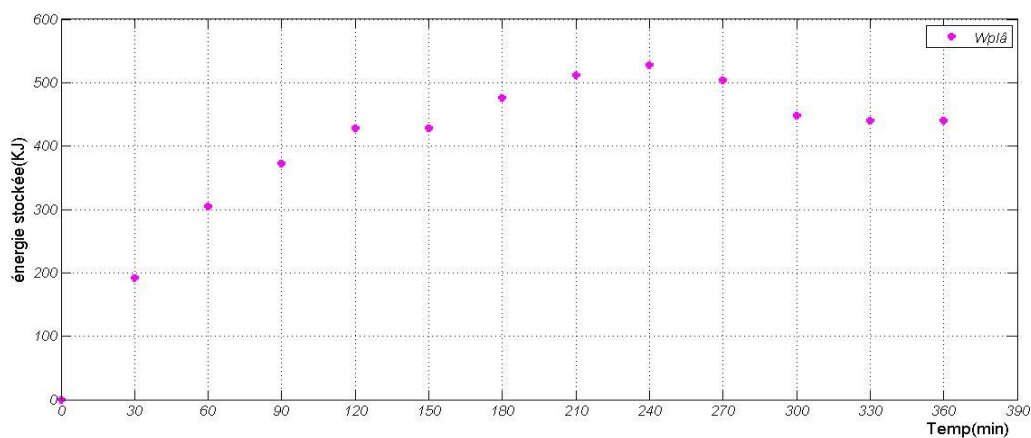


Figure IV.17: Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de gypse.

Dans cette Figure on remarque que l'énergie stockée dans le module plan de gypse augmente progressivement jusqu'à atteindre 530 (KJ) puis stabilisé dans cette valeur.

IV.11.2. Efficacité de stockage dans le gypse :

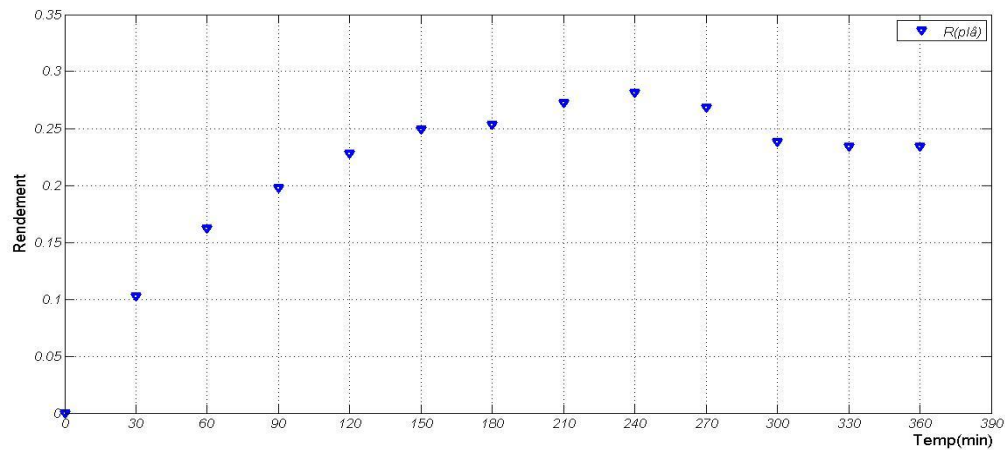


Figure IV.18: Evolution du rendement instantané dans le module plan de gypse.

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 moyen ne dépasse pas 45%.

IV.11.3 Les résultats dans le cas de déstockage de chaleur dans le gypse :

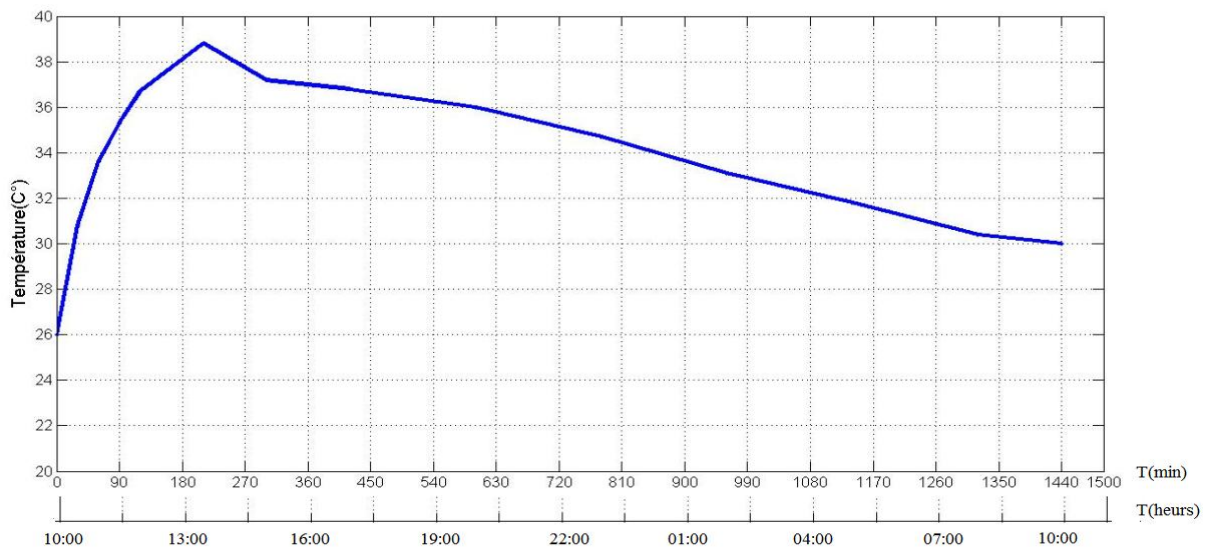


Figure IV.19: Profile de la température du Module plan de plâtre pendant un cycle complet Stockage / déstockage.

De cette courbe nous notons que le stockage et de déstockage de la chaleur de processus dans le plâtre et montre que la valeur principale du degré de la température de plâtre est de 26C ° au début de l'expérience, et augmentation de la valeur a même atteint 39C ° appelé stockage

Dans le processus de déstockage a commencé à diminuer pour atteindre 30C ° pendant une période de 18 heures.

IV.12. Les résultats dans le cas de stockage de chaleur dans le sel :

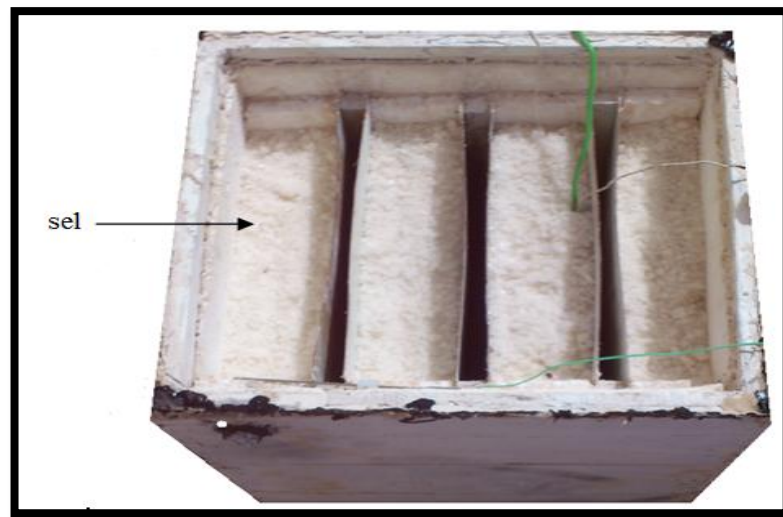


Figure IV.20: illustration simplifié de model plan de stockage thermique dans le sel.

Tableau IV.6 : Résultats de température instantanée (cas de stockage dans le sel) date 25 /04/2017.

Temps(h)	T(amb) temperature ambiante(K)	T(e) Entrée de la température(K)	T(s) Sortie de la température(K)	T (moy) _{stocké} Température de stockage (K)
10 :00	299.0	299.0	299.0	300.0
10 :30	304.0	347.0	307.0	305.5
11 :00	305.0	351.0	308.0	308.2
11 :30	306.0	348.0	308.4	308.8
12 :00	307.0	350.0	308.0	309.0
12 :30	309.0	350.0	308.7	309.4
13 :00	309.0	349.0	309.0	310.4
13 :30	309.0	345.0	309.3	310.9
14 :00	309.0	342.0	310.0	311.3
14 :30	309.5	337.6	308.5	312.1
15 :00	309.5	338.5	310.5	313.6
15 :30	310.4	333.8	310.5	313.5
16 :00	307.0	329.0	310.0	312.6

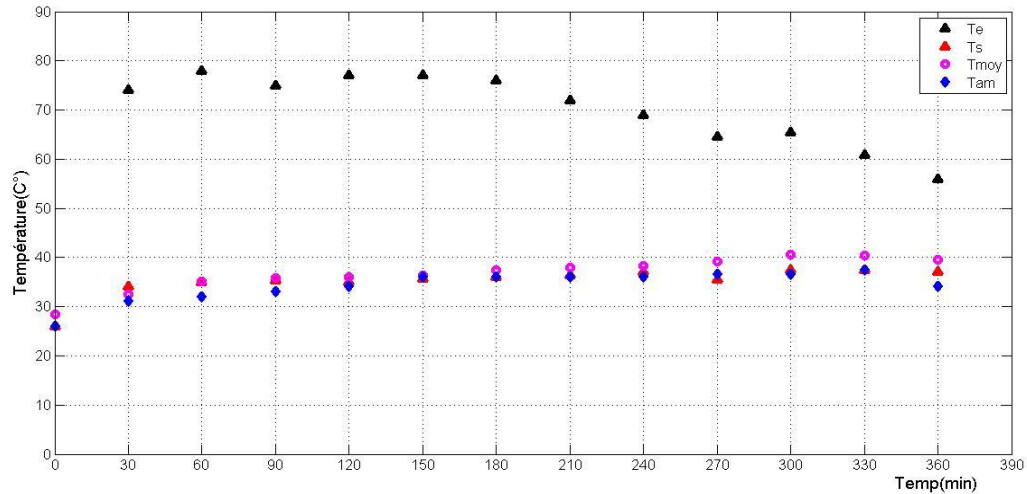


Figure IV.21: Evolution temporelle de la température moyenne du sel et la température ambiante et température d'entrée et de sortie pendant le processus de stockage.

Il ressort clairement de la Figure (IV.11) l'évolution de degré la température unité de stockage pendant six heures (10:00 ; 16:00) et la température d'entrée en haut de 79 C ° et diminue à 55C ° à 16:00 heures, la chaleur stockée dans le sel stabilisé à 40C° et la même chose avec le sortie stabilisée à 37C°. La température ambiante allant entre 26 C ° et 36 C ° pendant toute la journée.

IV.12.1. L'énergie stockée dans le sel :

$$W_{\text{stocké}} = (m \cdot C_p)_{\text{sel}} \cdot (T(t) - T_{\text{ini}}) \quad (\text{IV. 6})$$

$m=40[\text{Kg}]$, $C=864.13 [\text{J/kg. K}]$, $T(t)=$ Température instantanée du sel, $T(i)_{\text{sel}}=27$.

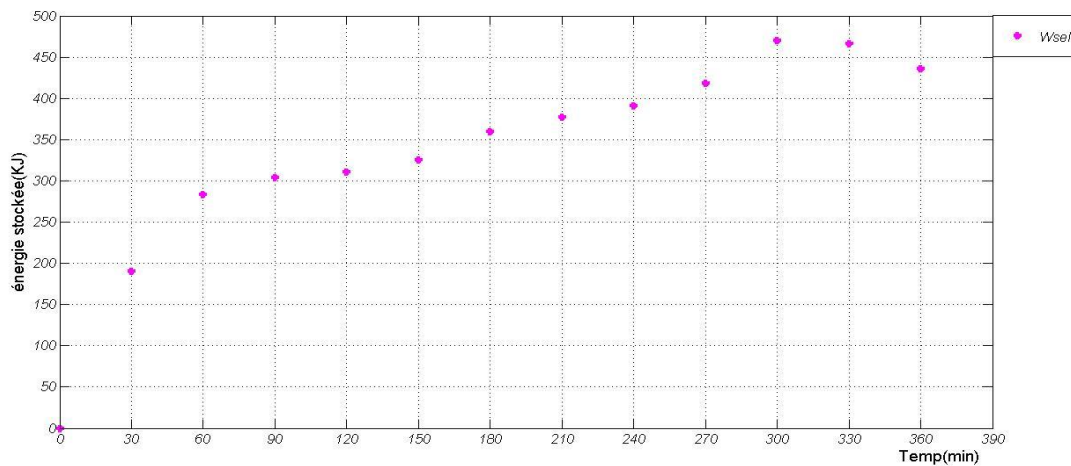


Figure IV.22: Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de sel.

Dans cette figure on remarque que l'énergie stockée dans le module plan de sel augmente progressivement jusqu'à s'atteindre à 470 (KJ) puis stabilisé dans cette valeur.

IV.12.2. Efficacité de stockage dans le sel :

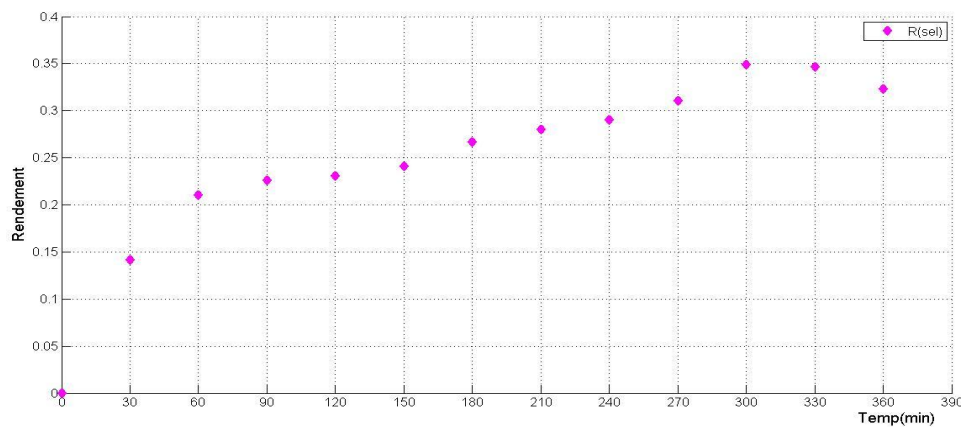


Figure IV.23: Evolution du rendement instantané dans le module plan de sel

De cette courbe nous notons que le rendement augmente au cours du processus de sel matériau de stockage de chaleur est à croissance lente, lorsqu'il apparaît que le rendement faible ne dépasse pas 35%.

IV.12.3. Les résultats dans le cas de d'stockage de chaleur dans le sel :

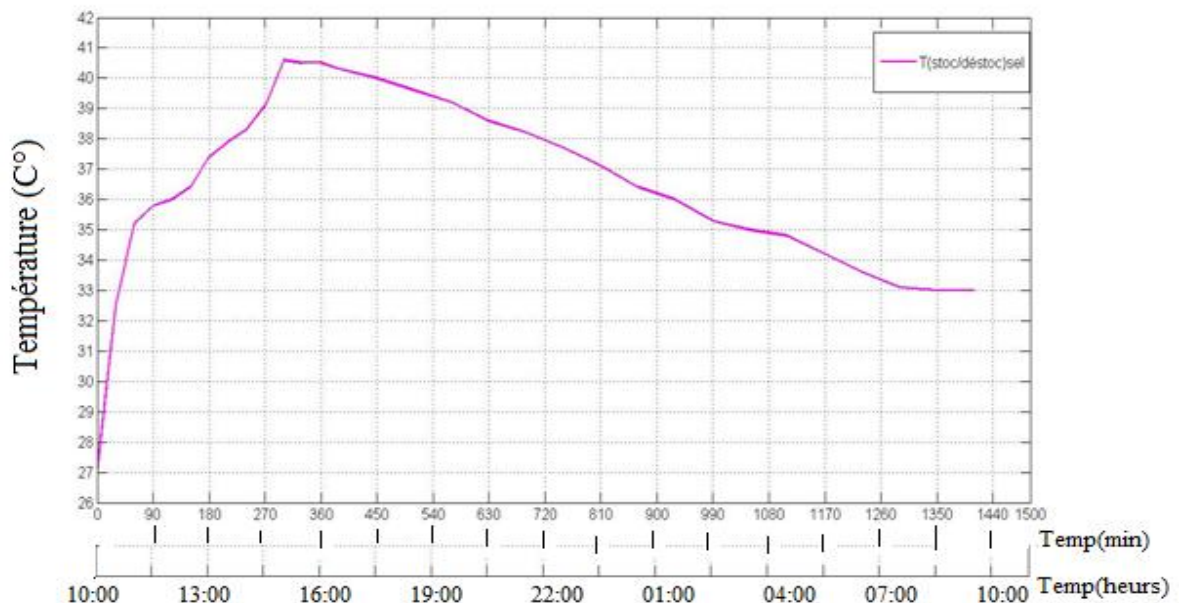


Figure IV.24: Profile de la température du module plan de sel pendant un cycle complet stockage / déstockage.

De cette courbe nous notons que le stockage et de déstockage de la chaleur de processus dans le sel et montre que la valeur principale du degré de la température de sel est de 27C ° au début de l'expérience, et augmente a même atteint 40.5C ° appelé stockage.

Dans le processus de déstockage à commence à diminuer pour atteindre 33C ° pendant une période de temps de 18 heures.

IV.13. Les résultats dans le cas de stockage de chaleur dans le mélange du plâtre et du sel :

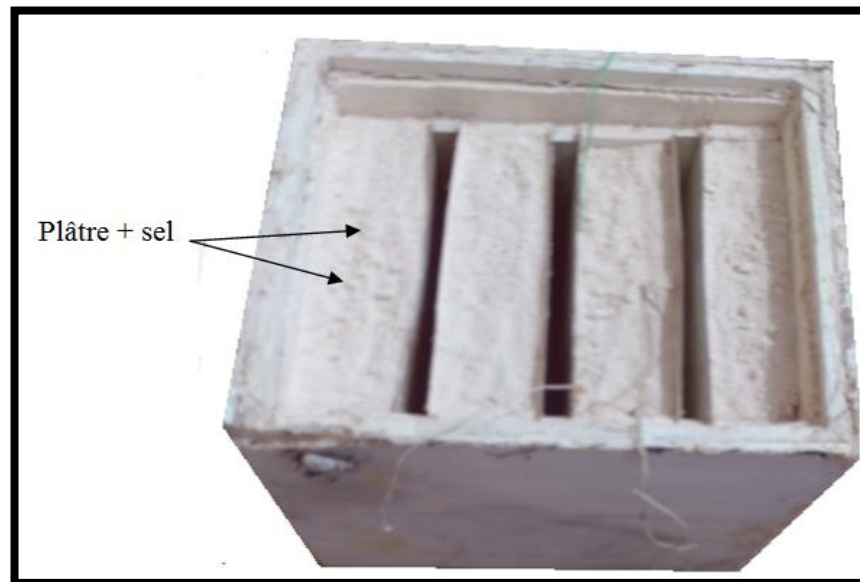


Figure IV.25: illustration simplifié de model plan de stockage thermique dans le (plâtre + sel).

Tableau IV.7 : Résultats de température instantanée (cas de stockage dans le plâtre+sel) date 27 /04/2017.

Temps(h)	T(amb) temperature ambiante(K)	T(e) Entrée de la température(K)	T(s) Sortie de la température(K)	T(moy) _{stocké} Température de stockage (K)
10 :00	298.7	298.7	298.7	301.0
10 :30	299.5	347.5	308.9	308.1
11 :00	300.2	350.1	310.2	311.0
11 :30	301.3	350.5	310.2	311.3
12 :00	301.3	350.6	310.0	311.3
12 :30	302.8	353.1	311.0	311.7
13 :00	303.5	354.0	311.1	312.0
13 :30	304.0	351.5	312.9	312.3
14 :00	304.0	348.0	312.5	312.7
14 :30	305.1	344.5	312.0	312.8
15 :00	304.5	341.0	313.0	313.0
15 :30	306.0	333.0	311.0	313.2
16 :00	305.0	331.5	312.5	313.2

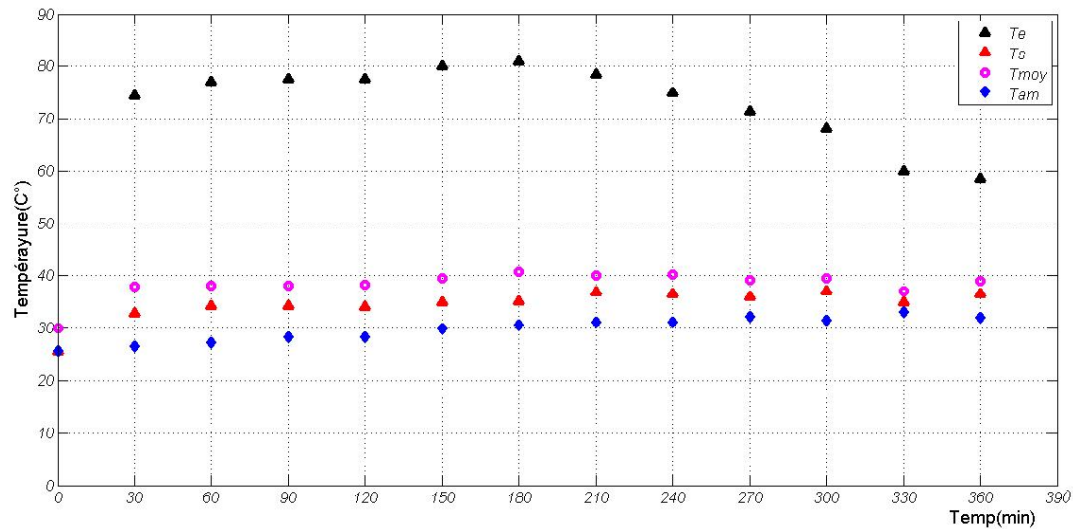


Figure IV.26: Evolution temporelle de la température moyenne du (gypse+sel) et la température ambiante et température d'entrée et de sortie pendant le processus de stockage.

Il ressort clairement de la Figure (IV.11) l'évolution de degré la température unité de stockage pendant six heures (10:00 ; 16:00) et la température d'entrée en haut de 81 C° et diminue à 59C° à 16:00 heures, la chaleur stockée dans le gypse+sel se stabilise à 40C° et la même chose avec la sortie stabilisée à 37C°. La température ambiante va entre 26 C° et 31 C° durant toute la journée.

IV.13.1. L'énergie stockée dans le(Plâtre + sel):

$$C_{p(\text{Plâtre} + \text{sel})} = \frac{C_{p\text{sel}} + C_{p\text{plâtre}}}{2} = 932.07 \text{ [J/kg. K]} \quad (\text{IV. 7})$$

$m=40[\text{Kg}]$, $T(t)$ = Température instantanée du (Plâtre + sel) , $T(i)p=28$.

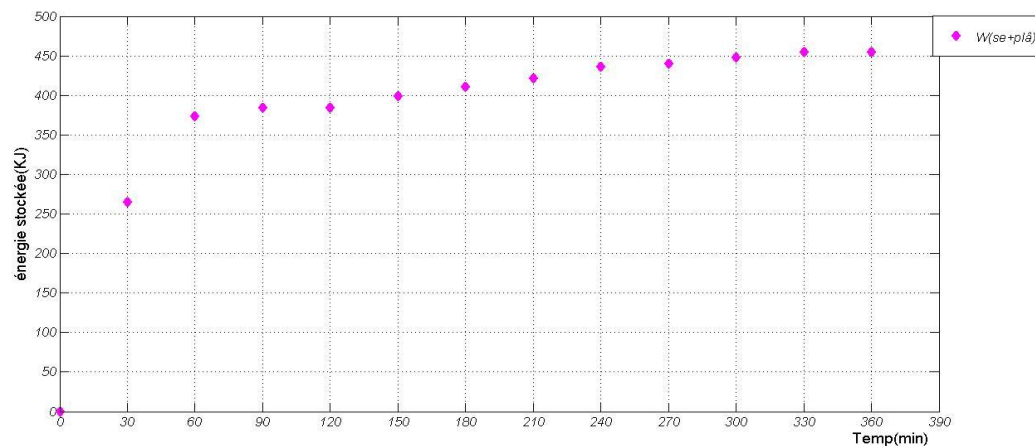


Figure IV.27: Evolution de l'énergie stockée dans le module plan de (plâtre + sel).

Dans cette figure on remarque que l'énergie stockée dans le module plan de matière du mélange plâtre et sel augmente progressivement jusqu'à atteindre 460 (KJ) puis stabilisé dans cette valeur.

IV.13.2. Efficacité de stockage dans le(plâtre +sel):

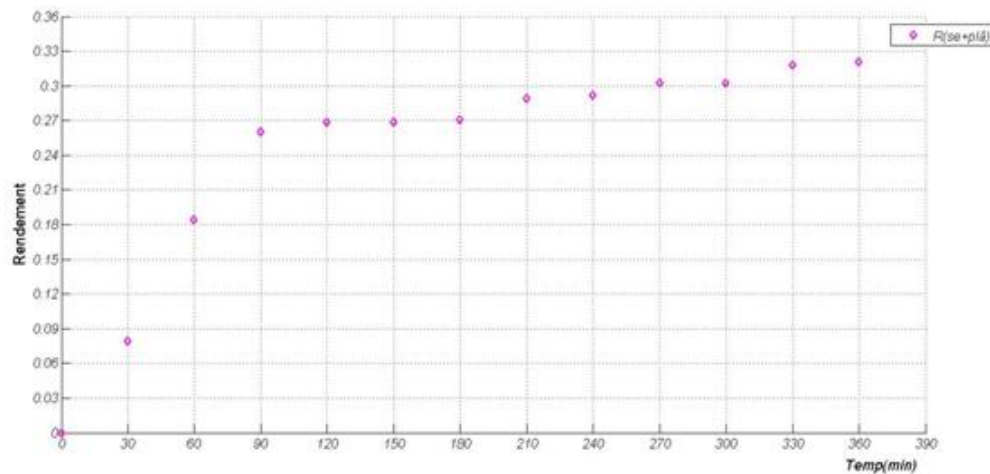


Figure IV.28: Evolution du rendement instantané dans le Module plan de (plâtre + sel).

De cette courbe nous notons que le rendement augmente au cours du processus de mélange(plâtre +sel) des matériaux de stockage de chaleur est qui est en croissance lente, lorsqu'il apparaît que le rendement faible il ne dépasse pas 33%.

IV.13.3 Les résultats dans le cas de déstockage de chaleur dans le (plâtre+sel):

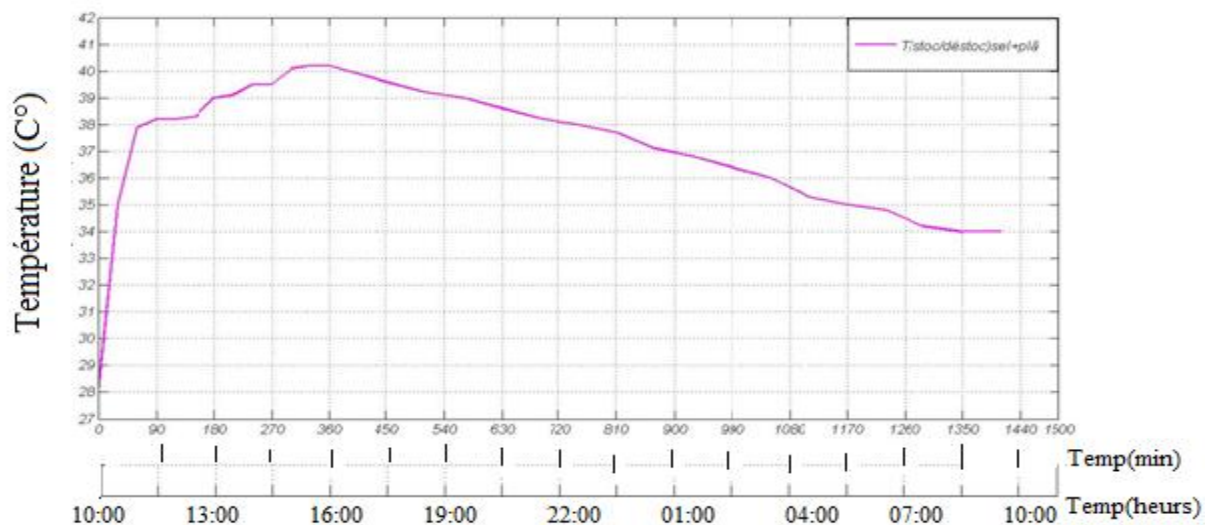


Figure IV.29: Profile de la température du module plan de (plâtre + sel) pendant un cycle complet stockage / déstockage.

De cette courbe nous notons que le stockage et de déstockage de la chaleur de processus dans le mélange (plâtre + sel) et montre que la valeur principale du degré de la température de mélange(plâtre + sel) est de 28C ° au début de l'expérience, et augmentation de la valeur a même atteint 40.5C ° appelé stockage.

Dans le processus de déstockage a commencé à diminuer pour atteindre 34C ° pendant une période de temps de 18 heures.

IV.14. Comparaison entre caractéristique du quatre matériaux:

IV.14.1. Comparaison la capacité de stockage température entre le quatre matières:

T instantanée du sable ; T instantanée du plâtre ; T instantanée du sel ; T instantanée du (plâtre+sel).

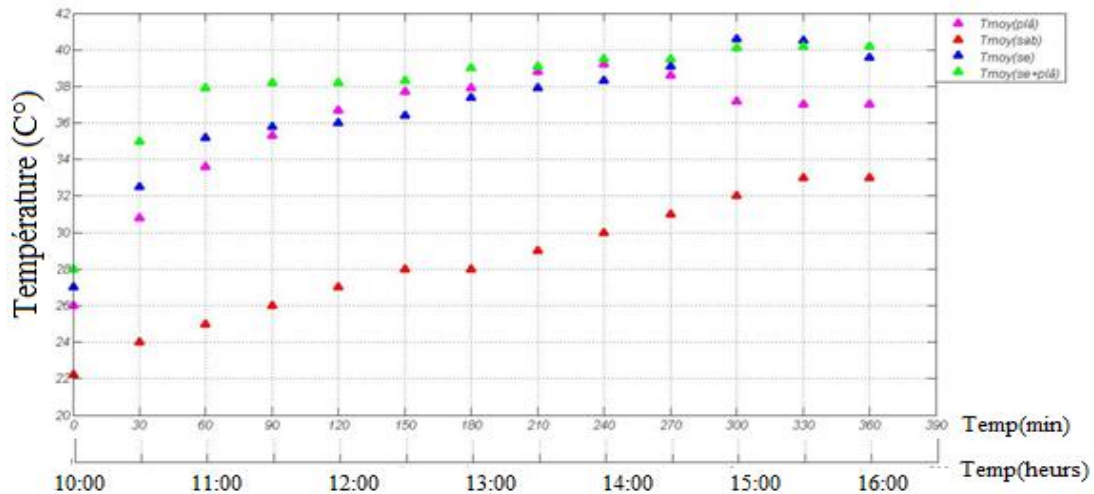


Figure IV.30: Evolution temporelle de la température instantanée des quatre matières pendant le processus de stockage.

De cette courbe nous notons que la différence de la température de ces matériaux où l'on trouve le sable est faible ne dépasse pas 31°C et la meilleure température est le sel qui atteint une valeur 41°C et le suivi par (plâtre + sel) et la valeur 40°C et le plâtre était au milieu d'une valeur de 37°C .

IV.14.2. Comparaison d'énergie stockée entre les quatre matières :

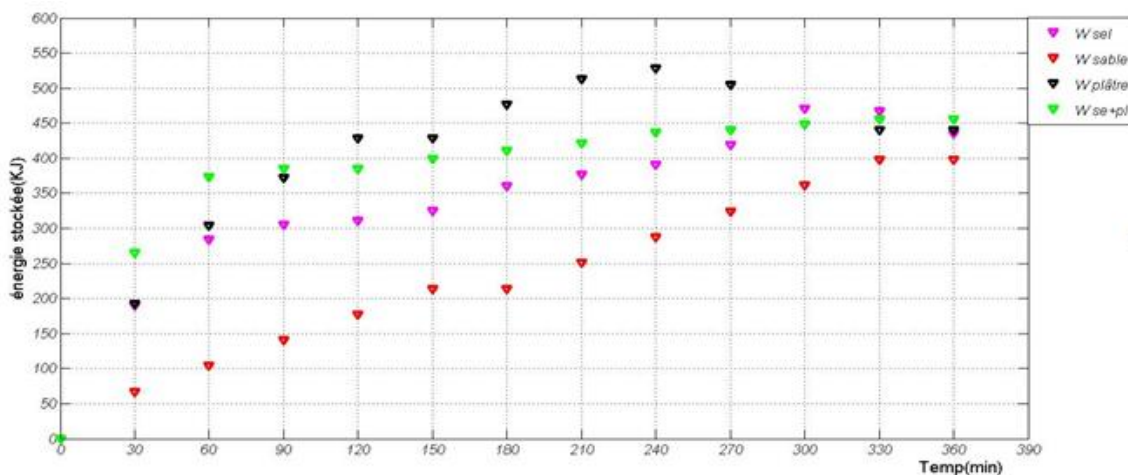


Figure IV.31: Evolution temporelle de l'énergie stockée par les quatre matières pendant le processus de stockage.

De cette courbe nous notons que la différence de l'énergie stockée de ces matériaux où l'on trouve que le sable est faible et ne dépasse pas 400 [KJ]. Et le meilleure température est celui du

plâtre qui atteint une valeur 530 [KJ] et est suivi par sel avec une valeur 470 [KJ] et enfin la matière mélangée (plâtre + sel) avec une valeur de 460 [KJ].

IV.14.3. Comparaison de rendement entre les quatre matières :

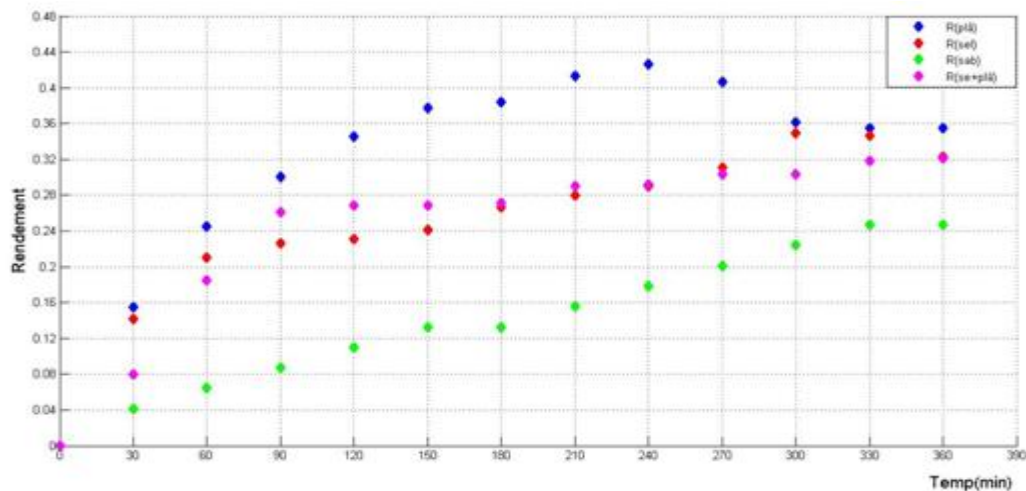


Figure IV.32: Evolution temporelle du rendement des quatre matières pendant le processus de stockage.

De cette courbe nous notons la différence du rendement de ces matériaux où l'on trouve le rendement du sable est très faible et ne dépasse pas 25% et le meilleur rendement est du plâtre et atteint une valeur 43% et est suivi par le sel avec une valeur 35% et la valeur du mélange des matériaux (gypse + sel) est de 32% rendement de stockage thermique ne dépassant pas le gypse et le sel.

IV.14.4. Comparaison cas de déstockage la chaleur entre le quatre matières

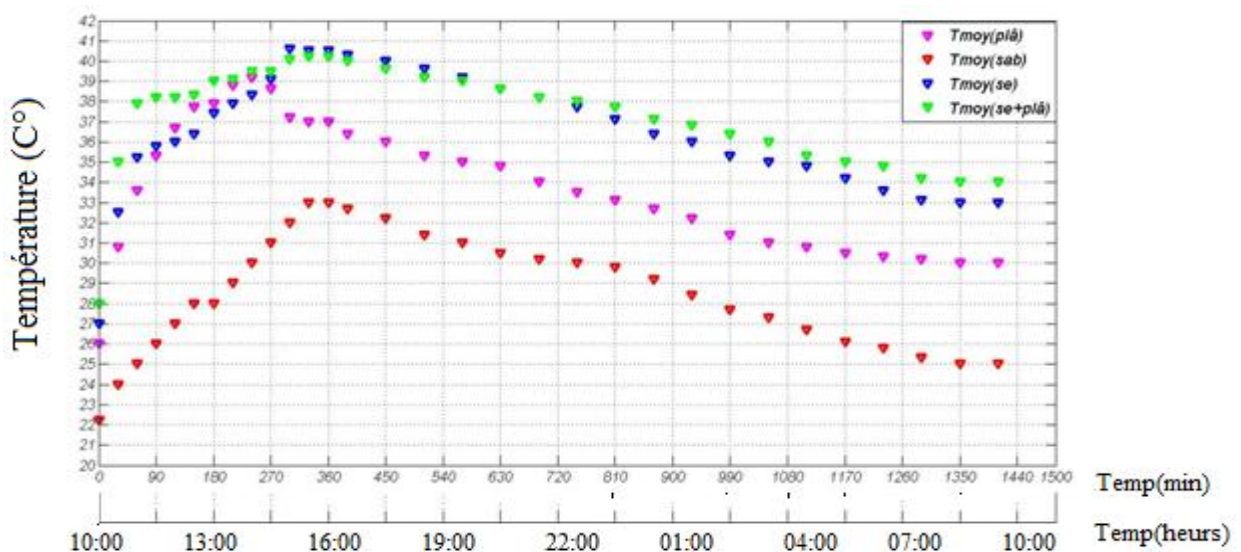


Figure IV.33: Évolution de la température moyenne du module plan en fonction de temps au cours d'un cycle complet stockage / déstockage.

La figure (IV.33) représente les courbes de stockage et de déstockage du chaleur thermique qu'on a étudié dans les quatre matières (sable, gypse, sel et gypse+sel), il nous montre à travers ces courbes que le meilleur de ces matériaux constitution de stocks est le mélange (gypse+sel) dans les deux modes stockage/déstockage, Alors qu'il dans le cas de stockage la température arrive à 40.5C° et pour ce qui est dans le cas inverse (déstockage) ces dernière atteindre 34C° il nous a donné une différence de température de 6C° qui a suivi matériaux sel, Alors qu'il dans le cas de stockage la température arrive à 41C° et pour ce qui est dans le cas inverse (déstockage) ces dernière atteindre 33C° il nous a donné une différence de température de 8C° qui a suivi matériaux gypse, Alors qu'il dans le cas de stockage la température arrive à 39C° et pour ce qui est dans le cas inverse (déstockage) ces dernière atteindre 30C° il nous a donné une différence de température de 9C° qui a suivi matériaux le sable, Alors qu'il dans le cas de stockage la température arrive à 33C° et pour ce qui est dans le cas inverse (déstockage) ces dernière atteindre 25C° il nous a donné une différence de température de 8C°.

VI.15. Estimation de l'efficacité globale des matériaux et du module plan :

Dans ce partir on va présenter l'efficacité de tous le cycle de notre système c-à-d (stockage/déstockage), les valeurs de diagramme IV. 33 nous a permis de calculé l'efficacité qui est donné par la relation suivante :

$$\text{effecacite} = \frac{\text{stockage} - \text{déstockage}}{\text{stockage}} \times 100 = (\%)$$

T'elle que :

Stockage : la quantité de chaleur reçu et emmagasiné dans le module.

Déstockage : la quantité de chaleur perdu en d'hors du module.

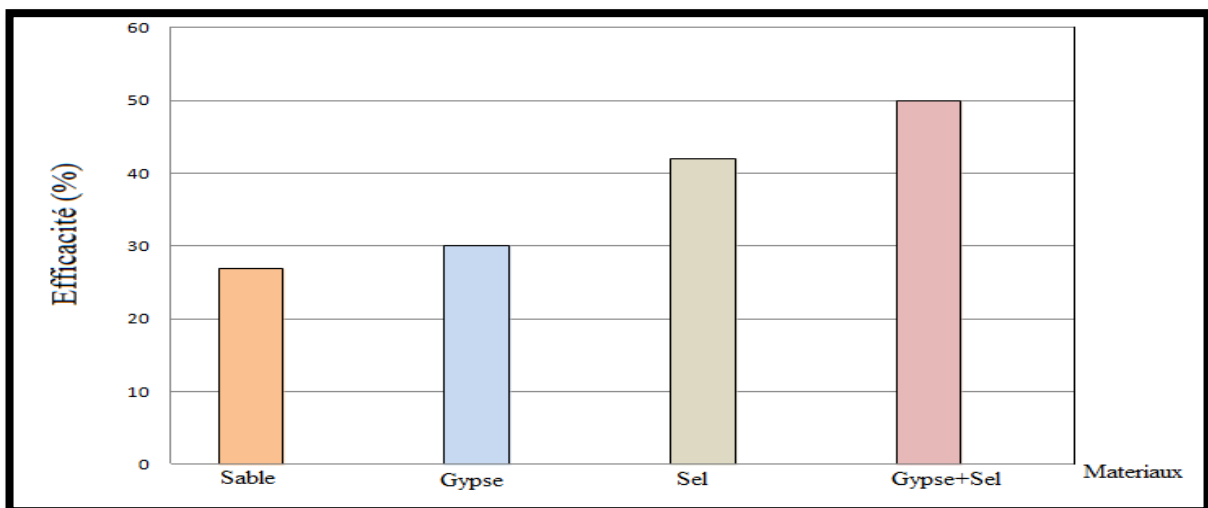


Figure IV.34: Efficacité globale du système de stockage.

IV.16. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un module plan de stockage la chaleur, en utilisant les quatre matières comme milieu de stockage, ces différentes matière on été testées afin de montré leur effet sur les performances de stockage (température maximale, temps de stockage, quantité d'énergie stockée et efficacité).

Selon les résultats obtenus, nous concluons que la matière plus favorable dans le cas de stockage retenir la chaleur c'est le gypse puis la matière de sel et le sable et pour améliorer cette rétention de stockage thermique on a essaye de mélanger les deux matières le sel et le gypse , le résultat optimiste est positive pour la rétention et le mélange est plus favorable que le sable, le diagramme de l'efficacité globale du système de stockage jugé et éprouvé notre résultats car le mélange gypse+sel donne 50% d'efficacité, le sel donne 42%, le gypse 30% et le sable 27% .

Conclusion générale

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible est un sujet très important, si on observe le nombre important de publications présentées dans cette partie. L'ensemble de ces travaux montre une claire préférence pour les approches expérimentales par apport aux approches numérique.

Ce travail expérimental a porté sur une contribution à l'amélioration de stockage d'énergie thermique solaire à basses températures par chaleur sensible dans un module plan rempli des plaques parallèles uniformes contenant chacune un matériau local traversé par un flux d'air chaud revient d'une panneau solaire. .

Un modèle expérimentale présenté par unité de stockage est appliqué pour les deux modes (stockage/déstockage) et rempli par différents matériaux locaux du sable, sel et gypse (plâtre) existants dans la région d'E-Oued.

Cette étude expérimentale nous a permis de :

- tester chaque matériau à travers de prendre les différents valeurs de température (T d'entrée, T de sortie, T à l'intérieur du module) pour voir leur efficacité de stockage/déstockage d'énergie thermique.
- Aussi nous a permis mettre en évidence l'influence des paramètres thermiques de l'air chaud à l'entrée du module plan.
- Dans le cas de stockage, Les résultats montrent que le gypse est le meilleur matériau caractérisé par une grande puissance de stockage puis le sel et le sable respectivement.
- Par Allure, dans le cas de déstockage, le nouveau matériau (mélange de sel avec le gypse) avaient une influence notable sur le processus de déstockage.
- Dans le cas globale (les deux cycles stockage/déstockage), le mélange de sel avec le gypse nous donne aussi une résultat important très positive (efficacité jusqu'à 50%).

De plus il a permis prédire les performances qui caractérisent un tel système de stockage tel que la durée du stockage et l'efficacité du notre module plan.

Donc, notre contribution est venue compenser cette amélioration.

-
- [1]. **B. FOURCHER et C. SAINT-BLANQUET**, Fonction de transfert d'un élément de stockage par chaleur sensible fonctionnant en régime périodique. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 23, No 7. pp 1251-1262. (1980)
- [2]. **M. T. ACKER et B. FOURCHER**, Analyse en régime thermique périodique du couplage conduction-convection entre un fluide en écoulement laminaire et une paroi de stockage. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 24, No 7. pp 1201-1210. (1981)
- [3]. **F. Tardy, Samuel M. Sami**, Thermal analysis of heat pipes during thermal storage. *Applied Thermal Engineering* Vol. 29, pp. 329–333. (2009)
- [4]. **Abdul Jabbar N. Khalifa et Ehsan F. Abbas**, A comparative performance study of some thermal storage materials used for solar space heating. *Energy and Buildings* Vol. 41, pp 407–415. (2009)
- [5]. **D.L. Zhao, Y. Li, Y.J. Dai et R.Z. Wang**, Optimal study of a solar air heating system with pebble bed energy storage *Energy Conversion and Management* Vol 52, pp 2392–2400. (2011)
- [6]. **Hakim CHEDDANI**, Simulation des performances du stockage de chaleur en géométrie plane et cylindrique. (2011)
- [7]. **BECHIRI Mohammed**, Optimisation du stockage par chaleur sensible et latente dans un module plan et cylindrique en régime in stationnaire. (2014)
- [8]. **D. Lafri 1, A. Hamid 2**, Etude du Comportement Thermique d'une Cuve de Stockage Solaire à Echangeur de Chaleur. *Rev. Energ. Ren. : Journées de Thermique* (2001) 127-132
- [9]. **N.MAHFOUDI et AB. MOUMMI**, ANALYSE THERMIQUE DU COMPORTEMENT TRANSITOIRE DU SABLE UTILISÉ COMME UN MILIEU DE STOCKAGE DE LA CHALEUR POUR UNE APPLICATION SOLAIRE 30 Oct 2014
- [10]. **SAADI SOUAD** EFFET DES PARAMETRES OPERATIONNELS SUR LES PERFORMANCES D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN (2010)
- [11]. **MAHFOUDI Nadjiba**, Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide. Université Mohamed Khider – Biskra .(2016)
- [12]. **M. PIERRE PARDO**. (2013) DEVELOPPEMENT D'UN PROCEDE DE STOCKAGE D'ENERGIE THERMIQUE HAUTE TEMPERATURE PAR VOIE THERMOCHIMIQUE. DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE
- [13]. **Amine akrouche**, etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase (2011)
-

- [14]. **ALI ABOU HASSAN** , Modélisation et caractérisation de modules de Stockage de chaleur comprenant des matériaux à changement de phase (2012)
 - [15]. **MESSAOUDI et BEKKARI**, Effet de la géométrie de l'échangeur de chaleur sur les performances d'un réservoir de stockage thermique solide (2016)
 - [16]. **J, Bernard**. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
 - [17]. **M, Capderou**. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (1985).
 - [18]. **Serraye Aicha**. La problématique de gestion des excédents hydriques dans la ville d'El-Oued, Impacts environnementaux et recommandations (2014)
 - [19]. <http://www.syfab.fr/ActiviteDetails.aspx?act=123&lid=5&rid=267>
 - [20]. <http://www.djazairess.com/fr/infosoir/51927>
 - [21]. <http://www.bricoleurdudimanche.com/fiches-materiaux/verres-carrelages-et-ceramiques/le-platre.html>
 - [22]. **A. Benmansour¹ et M.A. Hamdan²**. Simulation du Stockage de l'Energie Thermique dans un Lit Fixe de Sphères Contenant un Matériau à Changement de Phase . Rev. Energ. Ren. Vol.4 (2001) 125-134
 - [23]. **Mohamed GACEM**. Comparaison Entre l'Isolation Thermique Extérieure et Intérieure d'une pièce D'un Habitat Situé Dans Le Site De Ghardaïa (2011)
L'UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCEN Faculté des Sciences
-