



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Option : CONVERSION THERMIQUE

Thème :

Étude numérique d'un stockage thermique par chaleur sensible dans les galets

Par :

Bouali Rahmouna

Soutenu le 11/10/2020 devant le jury compose de :

Merzouk Mustapha	Professeur	président
Chawchi.S	Docteur	examinatrice
Djamel Lafri	Docteur	promoteur

REMERCIEMENT

Mes respects s'adressent particulièrement à :

Mon promoteur Dr.Lafri Djamel, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer cette recherche, pour ses multiples conseils et pour toutes les heures qu'il a consacrées à diriger ce travail. J'ai été extrêmement sensible à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de mon parcours de recherche.

- Au Pr. M.MERZOUK

Pour avoir accepté de présider ce jury

- Au Dr S.Chaouchi

Pour avoir accepté de faire partie du jury et d'examiner ce travail avec attention

Dédicace

A ma chère maman qui m'accompagné durant tout ce parcours laborieux

A ma grand-mère à qui je souhaite une longue vie

À mes cousins et cousines

Sans oublier mes oncles et a tous mes tantes

Ainsi tous mes collègues et ce qui a partager avec moi cette période de la réalisation

surtout la famille Meziane et ont créé la joie et la bonne entente

Et toutes mes amies sans exception

Tables des matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Nomenclature

Remerciement

Dédicaces

Résumé01

Introduction général.....03

Chapitre I : Etude bibliographique

Introduction05

I .1 Intérêt de stockage thermique.....05

I.2 Etat de l'art07

I.2.1 Stockage thermique par chaleur sensible liquide07

I.2.1.1 Les études expérimentales.....08

I.2.1.2 Les études de modélisation numérique10

I.2.2 Stockage thermique par chaleur sensible solide11

I.2.2.1 Etudes expérimentales11

I.2.2.2 Les études numériques.....14

I .3 Les modes de stockage thermique15

I .3.1 Stockage thermique thermochimique.....16

I .3.2 Stockage thermique par chaleur latente17

I .3.2.1 Matériaux de stockage 18

I .3.3 Stockage thermique par chaleur sensible.....20

I .3.3.1 Les matériaux de stockage par chaleur sensible23

I .3.3.1.1 Métaux liquides23

I .3.3.1.2 L'eau.....23

I .3.3.1.3 Huiles.....24

I .3.3.1.4 Métaux solides.....	25
I .3.3.1.5 Roches, bétons et briques.....	26
I .3.3.1.6 Métaux.....	27
I .3.3.2 Quelques exemples de stockage de chaleur sensible.....	27
Conclusion	28
Chapitre II : modélisation mathématique	
Introduction	29
II.1 Présentation du système physique	29
II.2 Hypothèses simplificatrices de base	30
II.3 Le bilan thermique	31
II.4 Résolution des équations	34
II.5 Caractéristiques géométriques du dispositif de stockage.....	37
II.5.1 Diamètre de galet	37
II.5.2 Porosité.....	37
II.5.3 Longueur caractéristique	37
II.5.4 La surface d'échange	38
II.5.5 Taux de surface de contact.....	38
II.5.6 Coefficient d'échange (air-galet).....	38
Chapitre III : résultats et interprétation	
Introduction	40
III.1 Les résultats et interprétations	40
Conclusion.....	52
Conclusion générale.....	53
Référence.....	54

Liste des tableaux :

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

Tableau I.2: Chaleur spécifique et capacité thermique volumétrique pour différents matériaux (valeur moyenne sur la plage de température [4 °C – 100 °C]) (Mehling & Cabeza, 2008)

Tableaux I -3: Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °

Tableau I -4: Les Avantages et les inconvénients de l'eau comme stockeur de chaleur

Tableau I -5: Les avantages et les inconvénients de l'huile comme stockeur de chaleur

Tableau I -6: Les Avantages et les inconvénients des roches, bétons et briques

Tableau I -7: Les Avantages et les inconvénients des métaux comme stockeur de chaleur

Liste des figures :

Figure I -1: la consommation mondiale d'énergie

Figure I.2 : Schéma du système de chauffe-eau solaire

Figure I.3: Représentation de la température de l'eau au sein du réservoir à $t = 4$ min (Johannes et al.. 2005)

Figure I.4 : Échantillons de COFALIT® (a) verre, (b) céramique

Figure I.5 : Stockage dans le lit de galet à l'intérieur de la serre

Figure I.6 : Schéma du séchoir solaire direct avec intégration du milieu poreux

Figure I.7 : Evolution de la température du séchoir solaire : (a) sans, (b) avec intégration du milieu poreux pour 16h00 du soir.

Figure I.8 : Efficacité f_s et l'énergie du stockage dans les plaques pour différents fluides caloporteurs

Figure I. 9: Différents types de stockage thermique de l'énergie thermique

Figure I -10 : Les différentes étapes de stockage de la chaleur par un matériau en fonction de la température.

Figure I -11 : Classification des matériaux à changement de phase (MCP)

Figure I -12: Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état

Figure I .13 : Schéma de principe chauffe-eau solaire

Figure II.1 : schéma du réservoir de stockage

Figure II.3 : Elément de longueur du stock

Figure III.1 : profil de température de galet en fonction de temps pour quelques nœuds

Figure III.2 : profil de température de galet en fonction de X (la hauteur) pour différents temps

Figure III.3 : profil de température de galet en fonction de temps pour quelques nœuds

Figure III.4 : profil de température de galet en fonction de temps pour quelques nœuds

Figure III.5 : profil de température de galet en fonction de temps pour quelques nœuds

Figure III.6 : profil de température en fonction de temps pour des différentes vitesses de fluide

Figure III.7 : profil de température de galet en fonction de X (la hauteur) pour différents temps

Figure III.8 : profil de température de galet en fonction de X (la hauteur) pour différents temps

Figure III.9 : profil de température de galet en fonction de X (la hauteur) pour différents temps

Figure III.10 : représentation graphique de temps en fonction de la vitesse de fluide

Figure III.11 : profil de température en fonction de X pour le fluide l'air ($C_p = 1005 \text{ J K}^{-1}\text{Kg}^{-1}$ et $\rho_f = 1,2 \text{ Kg/m}^3$)

Figure III.12 : profil de température en fonction de X pour le fluide l'eau ($C_p = 4186 \text{ J K}^{-1}\text{Kg}^{-1}$ et $\rho_f = 997 \text{ Kg/m}^3$)

Figure III.13 : profil de température de galet en fonction de temps pour quelques nœuds (pour un diamètre égale 0.1 m)

Figure III.14 : profil de température de galet en fonction de temps pour quelques nœuds (pour un diamètre égale 0.4 m)

Nomenclature :

A_s : la surface des galets	(m^2)
a : taux de surface	(m^{-1})
C_{ps} : chaleur spécifique à pression constante de galets	$(Kj/Kg \text{ } ^\circ K)$
C_{pf} : chaleur spécifique à pression constante de fluide	$(Kj/Kg \text{ } ^\circ K)$
d : diamètre des galets	(m)
D : diamètre de la cuve de stockage	(m)
h_c : coefficient d'échange par convection	$(W/m^2 \text{ } ^\circ K)$
h_v : coefficient d'échange volumétrique	$(W/m^3 \text{ } ^\circ K)$
λ_f : Coefficient d'échange par conduction de fluide	$(W/m^2 \text{ } ^\circ K)$
m_f : masse de fluide	(kg)
m_s : masse de solide	(kg)
T_f : température de fluide	$(^\circ C)$
T_s : température des galets	$(^\circ C)$
t : temps	(s)
U : vitesse du fluide	(m/s)

Lettre grecque :

ε : Porosité	
ρ : La masse volumique	(Kg/m^3)

Résumé :

La technologie du stockage thermique de l'énergie solaire est explorée depuis les années 70. De nombreuses applications ont été réalisées. Les systèmes de stockage thermique peuvent remédier au problème de l'intermittence limitant l'utilisation des sources d'énergies renouvelable, telle que l'énergie solaire.

Dans ce travail, nous examinons le comportement thermique et la capacité de stockage d'un système par investigation numérique en 1D. Le système de stockage sensible consiste en une cuve de forme cylindrique contenant des galets comme milieux de stockage, dans lequel sont installés des tubes permettant la circulation du fluide caloporteur (air). Cette cuve est connectée à un capteur solaire à air en circuit fermé.

Les équations décrivant la physique du système sont, l'équation de la chaleur pour le milieu du stockage et le fluide caloporteur. La performance thermique du système est évaluée en termes de, température de stockage et temps de chargement.

Mots clés : le stockage thermique, la chaleur sensible, les galets, étude numérique

Abstract:

Solar thermal storage technology has been explored since the 1970s. Many applications have been carried out. Thermal storage systems can address the problem of intermittent limiting the use of renewable energy sources, such as solar energy.

In this work, we examine the thermal behaviour and storage capacity of a 1D digital investigation system. The sensitive storage system consists of a cylindrical tank containing pebbles as storage media, in which are installed tubes allowing the circulation of heat-carrying fluid (air). This tank is connected to a closed-circuit air solar sensor.

The equations describing the physics of the system are, the heat equation for the middle of storage and the heat-carrying fluid. The thermal performance of the system is assessed in terms of, storage temperature and loading time.

Keywords: thermal storage, sensitive heat, pebbles, digital study

الملخص:

تم استكشاف تكنولوجيا التخزين الحراري للطاقة الشمسية منذ السبعينات. وقد قدمت العديد من الطلبات. ويمكن لنظام التخزين الحراري أن تعالج مشكلة التسبب في حدوث حالات متقطعة للحد من استخدام مصادر الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية.

في هذا العمل، نقوم بفحص السلوك الحراري وسعة التخزين لنظام تحقيق رقمي أحادي الأبعاد. يتكون نظام التخزين الحساس من خزان أسطواني يحتوي على حصى كوسط تخزين، حيث يتم تركيب أنابيب تسمح بتداول السائل الحامل للحرارة (الهواء). هذا الخزان متصل بجهاز استشعار شمسي للهواء مغلق.

المعادلات التي تصف فيزياء النظام هي، المعادلة الحرارية لمنتصف التخزين والسوائل الحاملة للحرارة. يتم تقييم الأداء الحراري للنظام من حيث درجة حرارة التخزين ووقت التحميل.

الكلمات الرئيسية: التخزين الحراري، الحرارة الحساسة، الحصى، دراسة رقمية

Introduction générale :

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

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

Les besoins croissants en énergie et le coût grandissant de celle-ci font que les recherches sur l'économie énergétique ainsi que sur les énergies nouvelles et renouvelables sur d'actualité. Certaines recherches s'orientent vers les moyens d'économiser cette énergie en utilisant des moyens moins coûteux et facilement accessibles.

Dans les régions froides, le chauffage consomme une grande quantité d'énergie, ce qui oblige les distributeurs à augmenter leurs productions qui s'accompagnent en général du coût élevé. Dans les régions chaudes, le soleil est quasiment disponible à longueur de journée et d'année. Le stockage de cette énergie destinée à une utilisation ultérieure dans les divers métiers domestique permettrait d'alléger le coût de la facture d'électricité ou d'autres sources d'énergies. Le problème qui se pose est surtout de satisfaire la demande, surtout dans les cas où la demande d'énergie atteint des sommets, lesquels les producteurs ont de la difficulté à satisfaire. Il serait utile d'aplanir les sommets par la distribution de la charge des systèmes de production d'énergie, pendant les heures de faible demande, en appliquant le stockage de l'énergie. Ainsi on rentabiliserait et uniformiserait le travail des appareils de productions de l'énergie à longueur de journée.

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 (sensible, latente, thermochimique).

Le stockage thermique représente une solution prometteuse pour des applications liées à l'énergie solaire.

Cette étude s'est intéressée particulièrement au stockage thermique par chaleur sensible solide (galet), à travers une investigation numérique des performances de stockage (température, temps de stockage).

Le but de ce travail c'est l'étude le comportement thermique de stockage de chaleur sensible solide (galet).

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. Deuxième chapitre présente l'état de l'art de stockage thermique par chaleur sensible. Troisième chapitre est destiné à la modélisation mathématique de stockage thermique par chaleur sensible solide (galet).Le quatrième chapitre présente les résultats et interprétation. Enfin une conclusion générale.

Chapitre I :

Etude bibliographique

Introduction :

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

I.1 Intérêt de stockage thermique :

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

Le développement économique, aussi bien dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de développement est directement lié à l'énergie. Ainsi, la demande énergétique mondiale augmente constamment ce qui est dû à l'accroissement rapide de la population et l'augmentation du niveau de vie. La figure I-1 donne un aperçu de l'évolution de la consommation mondiale en énergie primaire pour des années entre 1971 et 2012. Entre 1973 et 2012, la consommation d'énergie dans le monde a presque doublé (+ 92%). Cette évolution est due à la consommation des pays anciennement industrialisés, représentés par le groupe des pays de l'OCDE, et des nouvelles économies qui sont en forte croissance [01].

La Chine, exemple des nouveaux pays industrialisés, a vu sa consommation d'énergie plus que tripler de 1990 à 2008. Sa part dans la consommation mondiale a doublé et elle est passée de 7,5% à 16,4 %. La consommation de l'Afrique a augmenté de 50% de 1990 à 2008, mais elle est restée marginale dans la consommation mondiale (environ 5,7% pour plus de 15% de la population mondiale) [02].

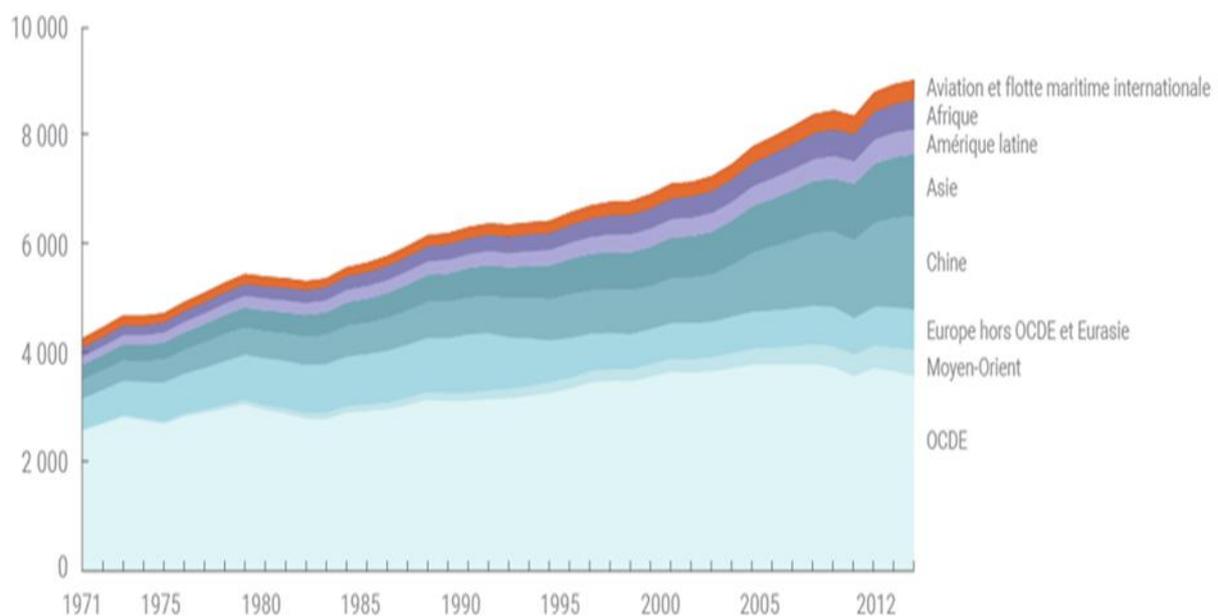


Figure I-1: la consommation mondiale d'énergie [03]

La solution de ces problèmes mentionnés ci-dessus est donc de stocker la chaleur produite par l'énergie solaire lorsque celle-ci est en excès. Le stockage thermique est reconnu comme facile à utiliser et combine de hauts rendements, de grandes capacités de stockage et des faibles coûts [04]. Il permet d'atteindre l'objectif de production à 100% en énergie issue du solaire et de rendre la production de la chaleur constante et indépendante de la disponibilité du rayonnement solaire. De plus, il constitue un aspect important des centrales solaires et permet de prolonger au maximum leur période de fonctionnement et augmenter leur facteur de capacité.

I.2 Etat de l'art :

Le stockage thermique intervient sous différentes formes : stockage sensible (variation de température), stockage latent (changement de phase) ou stockage thermochimique (réaction chimique) [05]. Il peut intervenir aussi sous combinaison entre la chaleur sensible et la chaleur latente [06]. Le mécanisme de transfert d'énergie a pour but de charger et décharger la chaleur du système de stockage de manière efficace.

Un nombre important d'études concernant les technologies de stockage thermique sont disponibles dans la littérature.

En 1998, Hasnain [07] a examiné plusieurs technologies de stockage thermique et comparé le stockage par chaleur sensible et le stockage par chaleur latente. En 1999, Ismail et Stuginsky [18][08] ont comparé différents modèles numériques pour le stockage thermique sensible et latent. En 2010, Gil et al [09] ont examiné et classé les différents concepts de stockage thermique et ont donné une revue des matériaux utilisés dans les applications de stockage à haute température. Un examen approfondi des divers systèmes et technologies de stockage thermique applicables aux centrales solaires CSP a été publiés par Kuravi et al. [10]. Zanganeh et al. ont proposé la combinaison de stockage thermique par chaleur sensible et par chaleur latente pour stabiliser la température de l'air sortant d'un lit emballé de roches pendant la décharge. La même approche a été utilisée récemment par Geissbuhler et al. [11]. Cot-Gores et al. [12] ont fait une revue des études expérimentales sur le stockage thermochimique. Ils ont souligné que le faible rendement thermodynamique est parmi les inconvénients des réactions chimiques solide-gaz.

I.2.1 Stockage thermique par chaleur sensible liquide :

La chaleur spécifique et la capacité thermique volumétrique, pour un certain nombre de matériaux, sont données dans le Tableau I.1.

Tableau I.1: Chaleur spécifique et capacité thermique volumétrique pour différents matériaux (valeur moyenne sur la plage de température [4 °C – 100 °C]) (Mehling & Cabeza, 2008)

Matériau	Cp	Capacité thermique volumétrique
Eau	4.2	4.2
Fer	0.5	3.6
Cuivre	0.4	3.5
Paraffine	2.9	2.6
Aluminium	0.9	2.5
Or	0.1	2.5
Verre	0.8	2.2
Béton	0.8	2.1
Granit	0.8	2.1
Huile	2.0	2.0
Sable	0.8	1.2
Brique	0.8	1.2

D'après ce tableau, on remarque que l'eau a les valeurs les plus élevées, par rapport aux autres matériaux. En outre, l'eau est sans danger, disponible en abondance, relativement peu coûteuse et facile à manipuler et à stocker dans l'intervalle de température allant de 4 °C jusqu'à son point d'ébullition autour de 100 °C. De même, l'eau, en fluide secondaire, est parmi les plus utilisés aujourd'hui dans de nombreux systèmes d'énergie fonctionnant dans l'intervalle de température allant de 4 °C à 100 °C. Par conséquent, son choix en tant que milieu de stockage thermique est justifié.

I.2.1.1 Les études expérimentales :

Depuis que (Brumleve, 1974) a confirmé la faisabilité d'utiliser une thermocline naturelle pour maintenir la séparation entre l'eau chaude et l'eau froide d'un même réservoir, la stratification

thermique dans les réservoirs de stockage d'eau a fait l'objet de diverses études théoriques et expérimentales (Kandari, 1990) (Al-Najem et al., 1993) (Shin et al., 2004). Il a

été démontré que la stratification thermique est affectée par un certain nombre de facteurs tels que la configuration du réservoir, le mélange dû aux courants d'entrée et de sortie et les pertes de chaleur dans l'environnement (Kusyi & Dalibard, 2007) (Kenjo et al., 2007) (Zurigat et al., 1998) (Zurigat et al., 1991) (Berkel, 1996) (Al-Najem & El-Refae, 1997) (Hezagy & Diab, 2002) (Gupta & Jaluria, 1982). Au niveau de la configuration du réservoir, son rapport de forme (hauteur/diamètre) est un facteur qui a une influence sur la stratification (Haller et al., 2009). Pour le même volume de stockage, les réservoirs de grands rapports de forme maintiennent une meilleure stratification que les petits. En effet, pour la même épaisseur de thermocline, un réservoir de grand rapport de forme utilise moins de fluide pour cette région de transition entre le chaud et le froid. Cependant, il existe une limite car les pertes thermiques vers l'ambiance augmentent lorsque le rapport de forme du ballon devient trop grand (pour un volume équivalent) ; ceci obligeant à augmenter le coût de l'isolation. Ainsi, (Lavan & Thompson, 1977) ont souligné qu'un rapport de forme compris entre 3 et 4 constituait un compromis raisonnable entre performances et coût. Dans leurs expériences avec les réservoirs des rapports de forme variant de 2 à 3,5, (Nelson et al., 1999) ont trouvé que l'augmentation des performances est négligeable pour un rapport de forme supérieur à 3. Des études analytiques ont montré qu'une petite augmentation de la stratification était obtenue pour des rapports de forme supérieure à 3,3 (Al-Najem et al., 1993), et 4,0 (Ismail et al., 1997) (Hahne & Chen, 1998). Dans une étude sur quatre réservoirs avec des rapports de forme de 1,56 ; 2,06 ; 3,54 et 4, (Hariharan et al., 1991) ont observé que les valeurs de rapport de forme entre 3 et 4 étaient optimaux. L'étude d' (Al-Kandari et al., 2004) sur cinq réservoirs de stockage thermique avec des rapports de forme de 1, 2, 3, 4 et 5 a confirmé cela. De façon générale, les expériences menées sur les réservoirs de stockage d'eau ont montré qu'une meilleure efficacité thermique est obtenue en augmentant le rapport de forme. Cet effet était surtout remarquable sur les rapports de forme qui étaient inférieurs ou égaux à 3 (Cotter & Charles, 1993) (Matrawy et al., 1996) (Ismail et al., 1997) (Eames & Norton, 1998) (Bouhdjar & Harhad, 2002).

I.2.1.2 Les études de modélisation numérique :

Un modèle de simulation du système de chauffage solaire (Figure II.1) a été développé par (Klein et al., 1976) par l'interconnexion des modèles mathématiques de chacun des composants du système dont un modèle idéalement brassé pour le réservoir de stockage

d'eau. Le modèle de simulation permettait de fournir une estimation à long terme (une année ou plus) de la performance du système beaucoup plus rapidement et à moindre coût que ce qui était possible avec les démarches expérimentales.

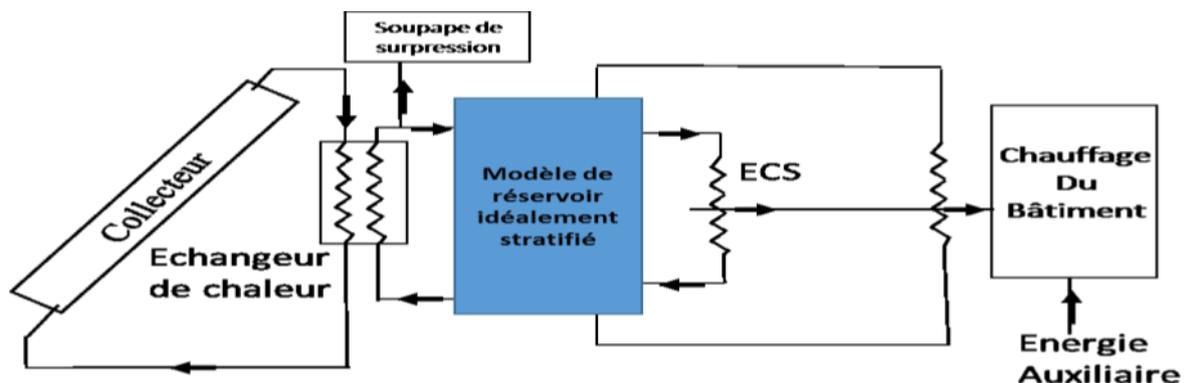


Figure I.2 : Schéma du système de chauffe-eau solaire

(Altunop et al., 2005) ont étudié numériquement l'effet des obstacles sur la stratification thermique dans le réservoir de stockage d'eau. Ils ont constaté que les obstacles ayant des ouvertures en leur centre semblent fournir une meilleure stratification thermique que ceux ayant des ouvertures périphériques à proximité des parois du réservoir. (Johannes, et al., 2005) ont développé un modèle de réservoir CFD à l'aide de FLUENT. Le modèle a permis de décrire le mouvement du fluide à l'intérieur du réservoir et de conclure que la température d'une couche d'eau n'est pas uniforme au cours du fonctionnement dynamique du réservoir (Figure II.2).

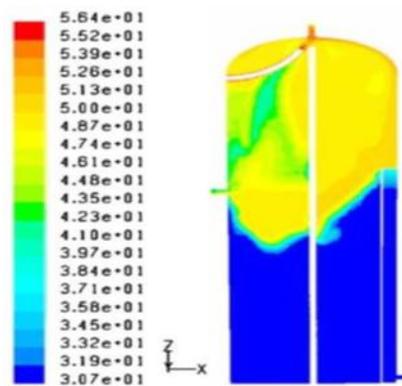


Figure I.3: Représentation de la température de l'eau au sein du réservoir à $t = 4$ min
(Johannes et al.. 2005)

I.2.2 Stockage thermique par chaleur sensible solide :

I.2.2.1 Etudes expérimentales :

En 2014 Nicolas CALVET, Emmanuel GUILLOT et al ont présenté le travail qui s'agit d'étudier le comportement thermique et mécanique d'un matériau issu de la vitrification industrielle de déchets amiantés(COFALIT) et de valider son utilisation comme matériau de stockage par chaleur sensible pour les centrales électro-solaires haute température de nouvelle génération (800-1000°C).

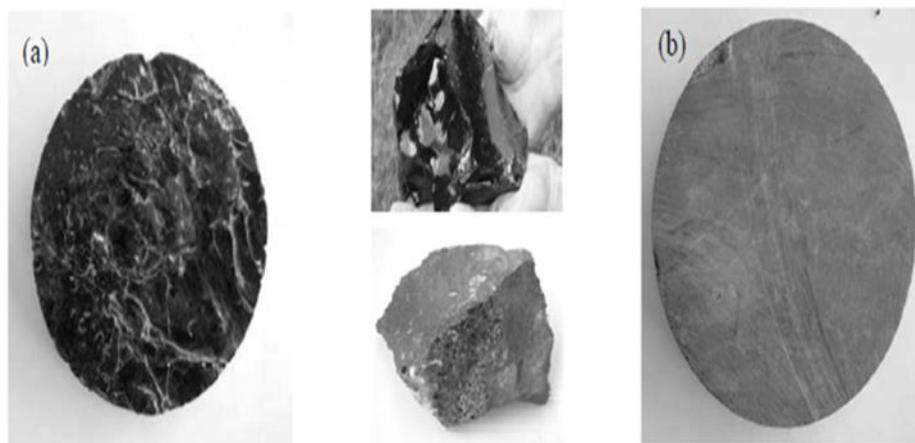


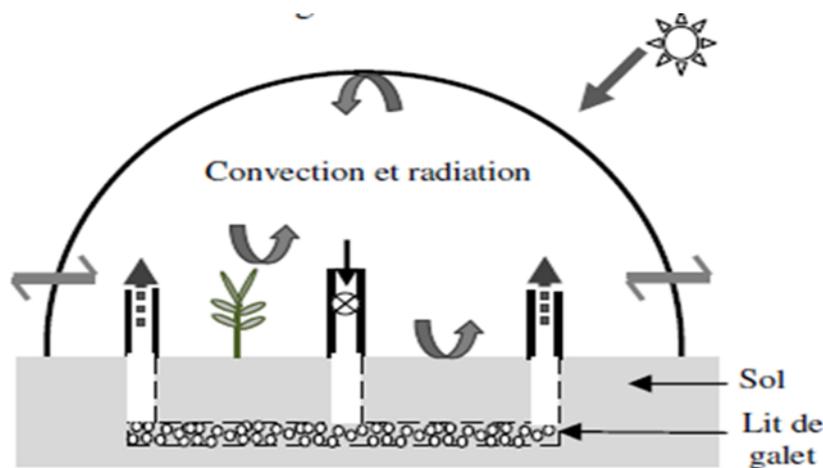
Figure I.4 : Échantillons de COFALIT® (a) verre, (b) céramique.

D'après cette étude ils concluent :

- Aptitude de COFALIT à stocker et déstocker de la chaleur sensible sur un large intervalle de température et de puissance de l'ambiante à 1000°C.
- Un seul et même matériau peut donc être utilisé pour toute application solaire qu'elle que soit la température de travail.
- Un prototype de stockage/déstockage de chaleur sur COFALIT à plus grande échelle est en cours de finalisation.

En 2015, bechiri.m Ce travail traiter le phénomène de stockage/déstockage de l'énergie thermique par chaleur sensible et/ou latente, dans un système à plaques parallèles et tube cylindrique. Cependant, l'efficacité du stockage et l'énergie stockée sont étudiées en fonction des différents paramètres physiques et géométriques.

En 2016 à centre de recherche CDER, Salah BEZARI et al ont présenté un travail qui consiste une investigation sur l'emplacement, la superficie au sol, matériaux de couverture et les performances des serres couplés avec les différentes technologies de stockage thermique tel que le lit de galet.



FigureI.5 : Stockage dans le lit de galet à l'intérieur de la serre

Ils ont obtenues comme résultat :

Qu'il faut améliorer les paramètres les plus influant qui favorisent un développement régulier des plantes à l'aide de système de stockage (lit de galets). Néanmoins, l'efficacité du stockage peut être améliorée par l'augmentation de la chaleur intérieure de la serre.

En 2017, Djabalah b : Dans ce travail l'étude se fait autour de stockage d'énergie par chaleur sensible dans un système composé d'une unité de stockage sous forme de plaques parallèles. Le fluide caloporteur qui circule à l'intérieur des conduites est soumis à une température d'entrée périodique. Quatre matériaux de stockage thermiquement différents sont testés. Les performances thermiques de ces matériaux sont évaluées en termes de la température moyenne du fluide à la sortie, de l'efficacité de stockage et de l'énergie totale stockée.

En 2018 à Ouargla, Messaoud Sandali et al ont présenté un travail qui s'agit des résultats d'une étude numérique des performances thermiques d'un séchoir solaire direct avec intégration d'un lit de gravier simulé comme milieu poreux non consolidé. [13]

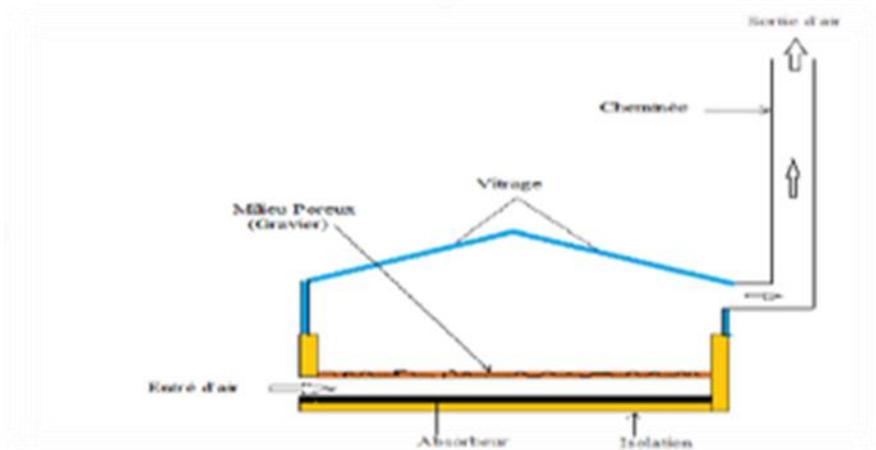


Figure I.6 : Schéma du séchoir solaire direct avec intégration du milieu poreux

D'après cette étude les résultats obtenus:

- Cette étude a prouvé la faisabilité de stockage de chaleur sensible en lit de roches pour les applications de séchage solaire.
- Le milieu poreux se comporte comme une source de chaleur après le coucher de soleil.
- Avec l'intégration du milieu poreux, la température de l'air asséchant augmente par 2°C après le coucher de soleil.

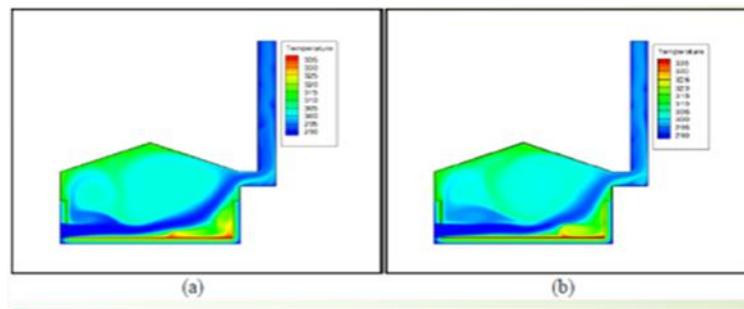


Figure I.7 : Evolution de la température du séchoir solaire : (a) sans, (b) avec intégration du milieu poreux pour 16h00 du soir.

I.2.2.2 Les études numériques :

En 2013 Mohammed BECHIRI et Kacem MANSOURI ont présenté un travail qui examine les performances de système de stockage d'énergie thermique sensible qui consiste en plaques-parallèles et conduites cylindriques. Le fluide caloporteur qui circule à l'intérieur des conduites est soumis à une température d'entrée périodique. Quatre matériaux du stockage, thermiquement différents à savoir le Silicium-carburé, l'Acier-inoxydable, la brique-réfractaire et l'alumine sont testés. La Technique de transformée Intégrale Généralisée (GIT) est utilisée pour étudier la réponse transitoire d'une unité de stockage sur convection forcée laminaire.

Les résultats obtenus peuvent être résumés brièvement comme suit :

- la meilleure efficacité de stockage est obtenue si on utilise l'air comme fluide caloporteur, mais ça ne signifie pas que la quantité d'énergie stockée sera aussi meilleure.
- L'efficacité du stockage fs augmente plus rapidement pour l'Acier-inoxydable que pour le Silicium-carburé jusqu'à une valeur limite où ce comportement devient insensible à l'épaisseur de la paroi du conduit.
- Le fluide caloporteur détermine le taux d'énergie transféré par unité de masse. Les fluides avec grandes capacités thermiques sont capables de transférer grands quantité d'énergie stockée dans la paroi. La température moyenne à la sortie augmente avec la diminution de la période d'entrée τ^+ .

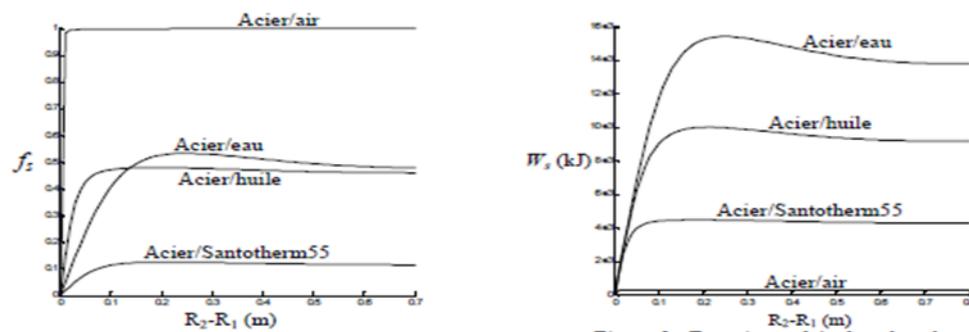


Figure I.8 : Efficacité f_s et l'énergie du stockage dans les plaques pour différents fluides caloporteurs

En 2014 à Biskra NADJIBA MAHFOUDI, ABDELHAFID MOUMMI et al ont présenté un travail qui s'agit d'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. Dans le cadre de cette étude, matériau de stockage utilisé est sable.

D'après les résultats obtenus:

Le temps nécessaire pour le chargement du lit de sable est de 5 heures. Montrent l'intérêt de l'utilisation de sable comme milieu de stockage surtout pour les régions où ce matériau est disponible de façon abondante.

En 2016, Bekkari z et Messaoud Mohamed meftah dans ce travail, il mené une étude théorique et numérique en vue de quantifier les performances d'une unité de stockage en utilisant le sable comme milieu de stockage. Dans le but d'analyser l'effet de la géométrie de l'échangeur de chaleur qui fait circuler le fluide caloporteur sur les performances de stockage, différentes configurations ont été testées.

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

I.3 Les modes de stockage thermique :

Le stockage de l'énergie thermique ou de chaleur est réalisé en exploitant des phénomènes induits au sein du matériau de stockage. Le phénomène correspond à l'augmentation ou à la diminution de l'énergie interne d'une substance par chauffage ou refroidissement. L'énergie thermique est stockée dans les matériaux qui sont classés selon la

méthode par laquelle ils stockent l'énergie. Les différentes méthodes de stockage de l'énergie thermique sont le stockage par chaleur sensible, latente ou thermochimique.

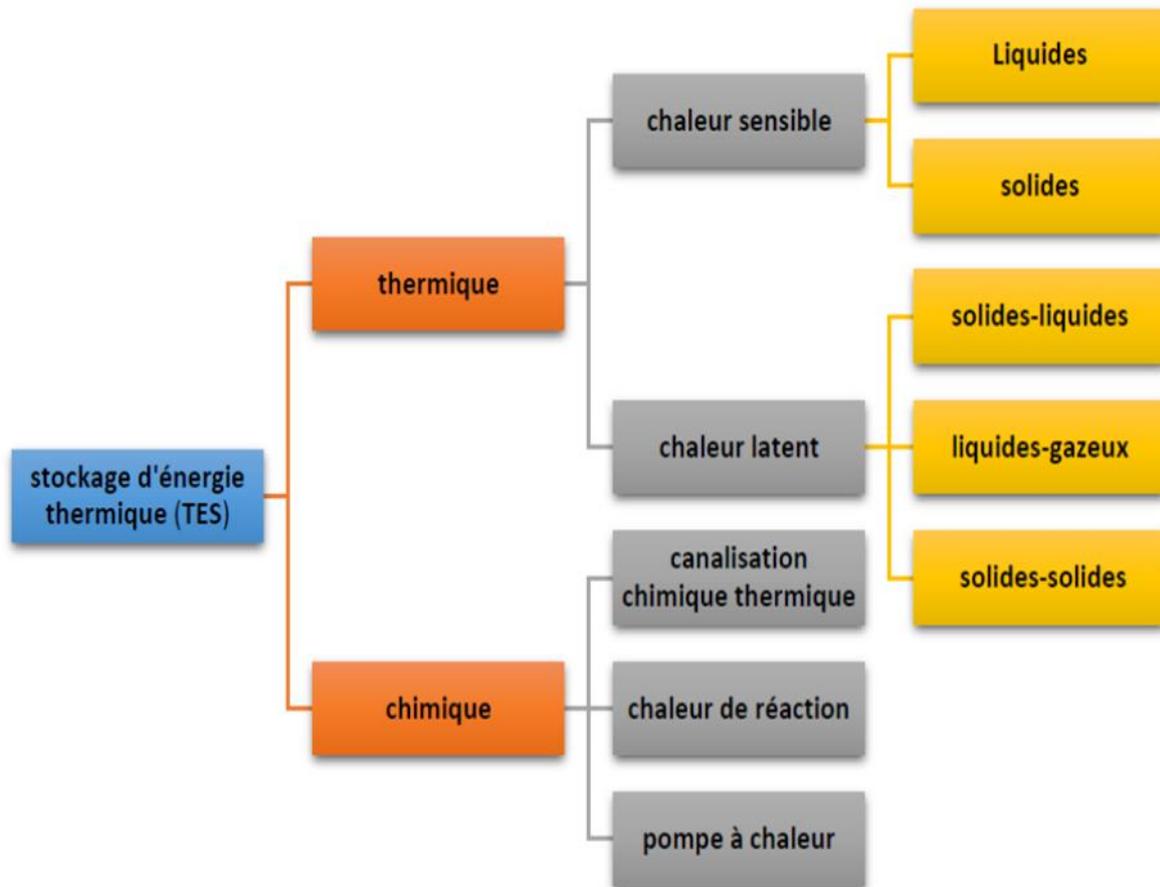


Figure I-9 : Différents types de stockage thermique de l'énergie thermique [14]

I.3.1 Stockage thermique thermochimique :

Les systèmes de stockage par voie thermochimique sont basés sur une réaction thermochimique réversible du matériau de stockage avec un fluide. La réaction thermochimique consomme ou libère de la chaleur par dissociation ou combinaison de deux réactifs. Les réactions solide-gaz sont particulièrement adaptées pour pouvoir facilement séparer et stocker les réactifs, sans pertes, pour de longues durées. Plus délicat à maîtriser, les systèmes de stockage thermochimique peuvent atteindre en théorie des densités de stockage intrinsèques supérieures à celles des systèmes par chaleur sensible ou latente. De

plus, ils permettent d'ajuster la température de réaction en régulant la pression de gaz réactif. Suivant le choix du réactif, ces systèmes de stockage peuvent être utilisés dans de nombreuses applications de stockage ayant des gammes de température différentes [15].

I.3.2 Stockage thermique par chaleur latente :

La chaleur latente est l'énergie associée à un changement d'état. Lors du processus de stockage, une grande quantité d'énergie peut être emmagasinée autour de la température de changement d'état [16].

Les matériaux utilisés sont appelés matériaux à changement de phase (MCP). La plupart des systèmes de stockage par chaleur latente sont des solides, ce qui fait que l'énergie est stockée sous forme de chaleur latente de fusion L_f est définie d'après la relation (I-1) comme suit : [04]

$$L_{\text{FUSION}}(T_{\text{FUSION}}) = h_L(T_{\text{FUSION}}) - h_S(T_{\text{FUSION}})$$

Où $h_L(T_{\text{fusion}})$ et $h_S(T_{\text{fusion}})$ sont les enthalpies massiques du liquide et du solide à la température de fusion. Pendant le changement de phase des matériaux, la chaleur peut être stockée de façon isotherme, dépendant ainsi de la chaleur latente du matériau et de la quantité de matériau utilisée. Durant l'étape de charge, l'énergie thermique fournie au matériau permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. Ce changement d'état se fait à température constante et l'énergie apportée par l'extérieur sert alors à rompre les liaisons existantes dans le solide. Une fois que la matière est entièrement transformée de l'état solide à l'état liquide et si le système continue à recevoir de l'énergie, alors celle-ci sera de nouveau cumulée par le matériau sous forme de chaleur sensible. Lors de l'étape de décharge, le matériau change de nouveau la phase à la même température durant le processus de charge et reprend son état initial en libérant la chaleur. La figure I-3 illustre les différentes étapes d'un système de stockage par chaleur latente [17].

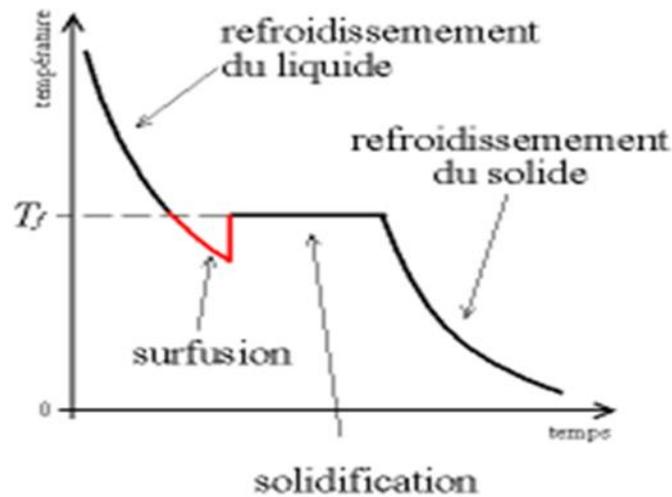


Figure I-10 : Les différentes étapes de stockage de la chaleur par un matériau en fonction de la température.

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

$$Q = \int_{T_{froide}}^{T_{fusion}} m C_p dT + m L_f + \int_{T_{fusion}}^{T_{chaud}} m C_p dT$$

Où, Q 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 ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), L_f est l'enthalpie de changement de phase ($J \cdot kg^{-1}$) ou la chaleur latente et dT est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K).

I.3.2.1 Matériaux de stockage :

De nombreuses substances ont été étudiées comme matériaux à changement de phase (MCP), mais seuls quelques-uns sont commercialisés en tant que tels. Zalba et al. [18] ont donné une revue des systèmes de stockage thermique basés sur les matériaux à changement de phase (MCP) et Kenisarin et al. ont donné une revue complète des matériaux de stockage latent à haute température. La figure I-4 représente une classification des MCP [09].

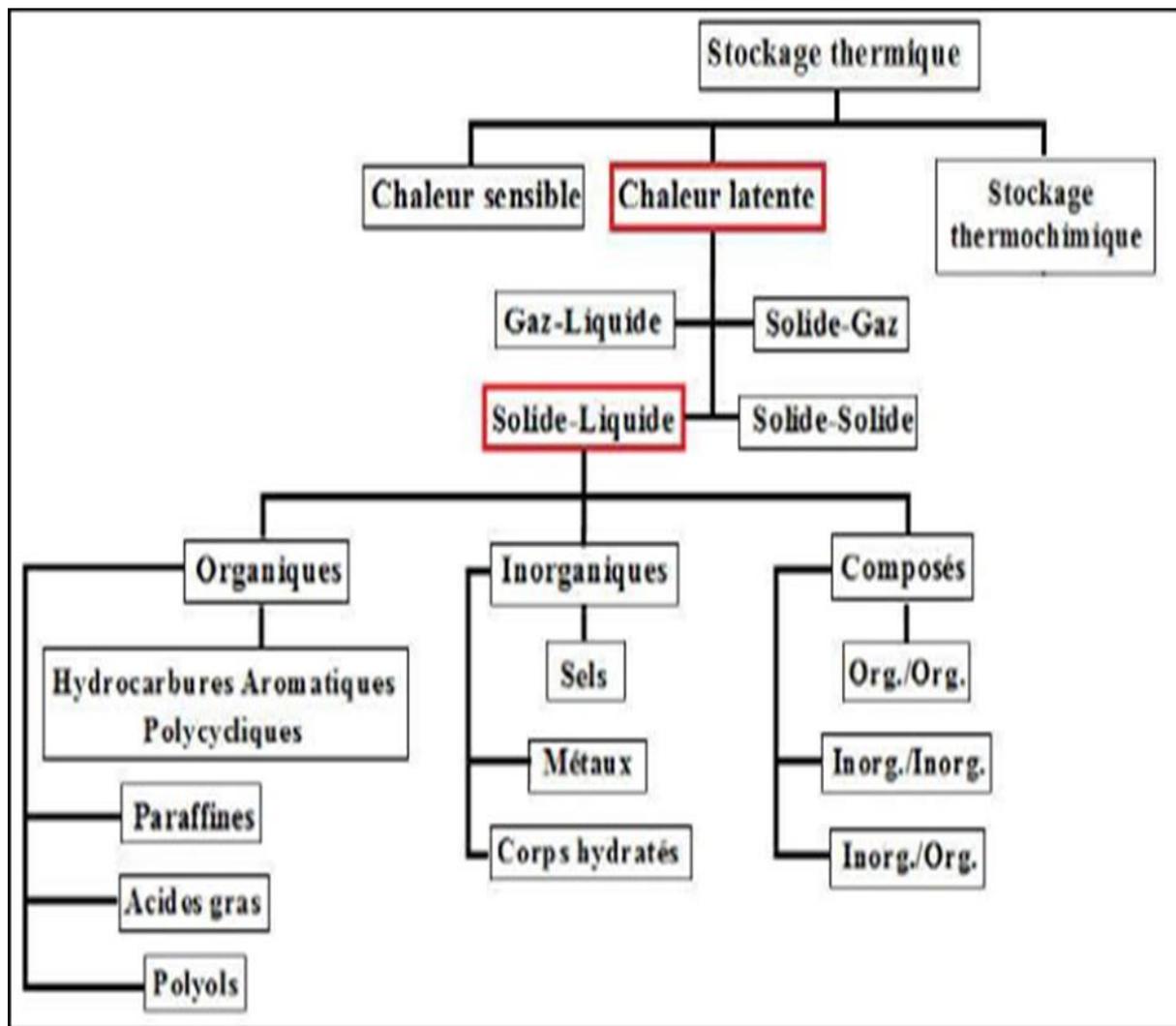


Figure I-11 : Classification des matériaux à changement de phase (MCP)

Les MCP peuvent être classés en trois catégories: les MCP organiques, les MCP inorganiques et les MCP composés (eutectiques). Chacune de ces classes peut être subdivisée en familles de matériaux. On peut classer également les MCP en fonction de la gamme de température de travail tel qu'il est montré dans le tableau I-2. Ce critère est fondamental pour toute application et permet de limiter l'étude de choix préliminaire de MCP pour une application visée [19].

Tableau I -2 : Classification des MCP en fonction de la gamme de température de travail

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

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

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

I.3.3 Stockage thermique par chaleur sensible :

Dans le cas du stockage par chaleur sensible, l'énergie est emmagasinée via l'augmentation de température du matériau. Ce mode de stockage est le moyen le plus ancien, le plus simple

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

$$Q=\Delta H = \int \rho \cdot V \cdot C_p \cdot (T) dt$$

Où Q est la quantité d'énergie stockée (J), ρ est la masse volumique du matériau de stockage (kg), V est le volume de matériau (m^3), C_p est la chaleur spécifique du matériau de stockage ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) et dT est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K). En supposant la capacité calorifique indépendante de la température, la relation (I-3) devient :

$$Q = \rho v C_p (T_f - T_i)$$

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

D'autres propriétés sont importantes, telles que la conductivité thermique, la diffusivité thermique, le coefficient de dilatation thermique, la stabilité cyclique, l'abondance, le coût et l'empreinte environnementale [19]. Il indique aussi que ce type de stockage est efficace dans le cas de systèmes fonctionnant dans de larges intervalles de température.

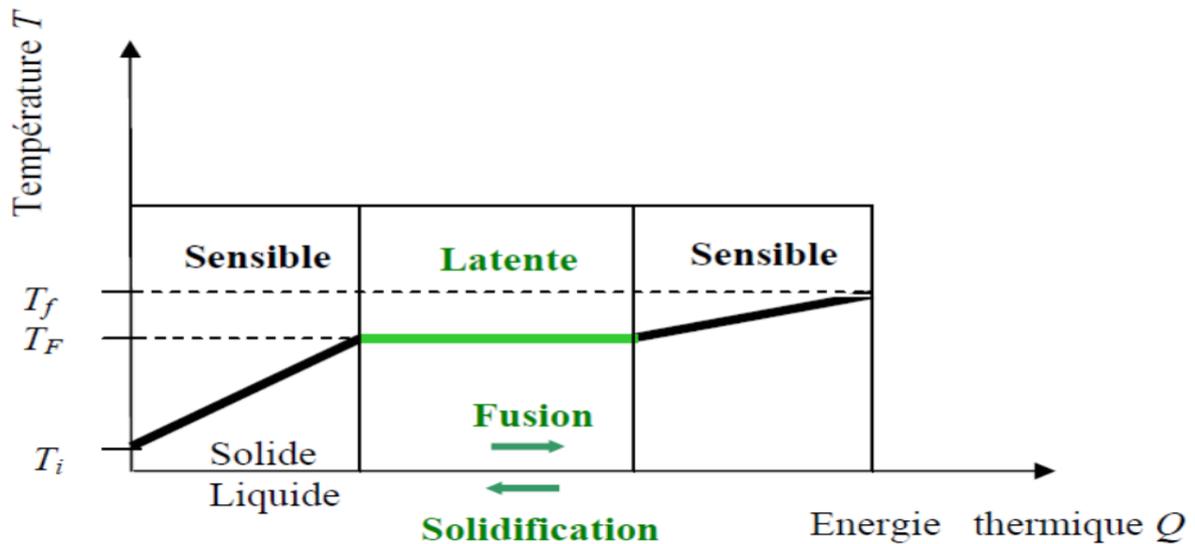


Figure I-12 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état [20]

Le classement du type de stockage par chaleur sensible dépend du milieu de stockage, en particulier de son état physique. On définira ainsi :

- ❖ Le stockage par un fluide (l'eau, l'huile, des sels fondus).
- ❖ Le stockage par un solide (pierre, métaux,.....).

Certaines propriétés des substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible sont données dans le tableau I-3 . [20]

Tableaux I -3: Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °

Matériaux	Densité(kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg K)	Capacité thermique volumétrique (J/m ³ K)
Argile	1458	879	1.28
Brique	1800	837	1.51
Grés	2200	712	1.57
Bois	700	2390	1.67

Béton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
Acier	7840	465	3.57
Eau	988	4182	4.17

I.3.3.1 Les matériaux de stockage par chaleur sensible :

Quelques exemples des matériaux de stockage de chaleur sous forme liquide :

I.3.3.1.1 Métaux liquides :

Les métaux liquides sont 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'intérieure 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.[21]

I.3.3.1.2 L'eau :

Etant un des matériaux les plus accessibles et abondant au monde, l'eau a vite été considéré pour une utilisation de stockage thermique sous forme sensible. L'essai a été concluant pour certaines situations, car son utilisation comporte de nombreux avantages. Par contre, certains inconvénients font que d'autres matériaux peuvent y être préférés dans certains systèmes.

Le tableau I-4 suivant résume les avantages et les inconvénients de l'utilisation de l'eau dans un système de stockage de chaleur sous forme sensible[21]

Tableau I -4: Les Avantages et les inconvénients de l'eau comme stockeur de chaleur [21]

Avantages	Inconvénients
Haute efficacité	Autodécharge élevée
Chaleur spécifique élevée	pression de vapeur élevée
Faible cout	Corrosif à certains contenants
Très disponible	
Très documenté	
Aucune détérioration	

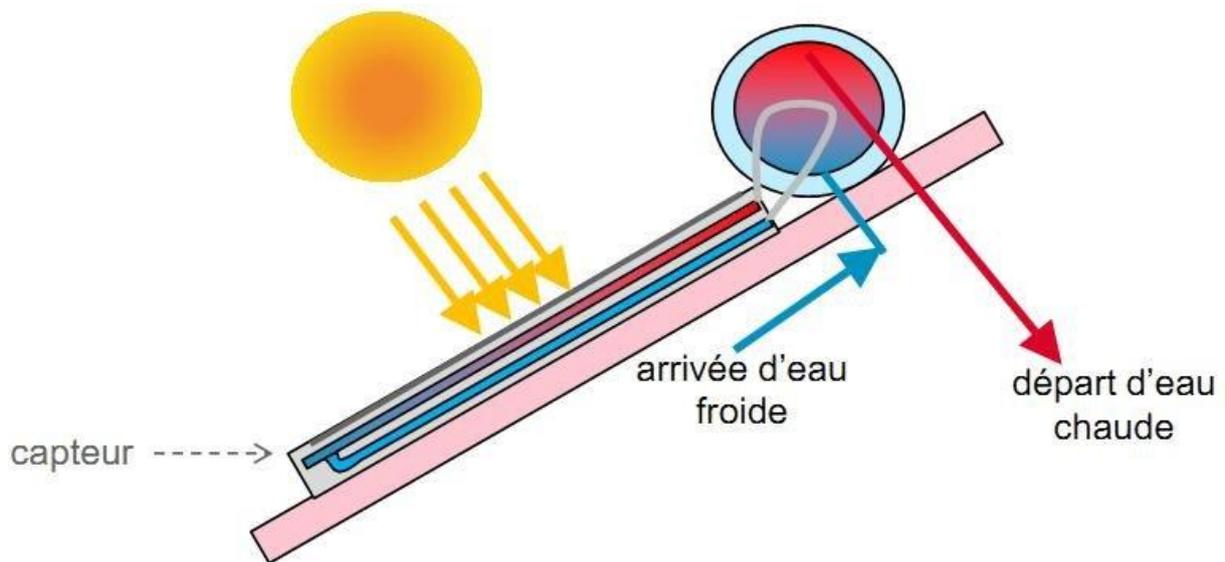


Figure I.13 : Schéma de principe chauffe-eau solaire

I.3.3.1.3 Huiles :

Les plus communs des matériaux liquides, 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 l'eau. Ils ont également une plus basse pression de vapeur ce qui permet de les utiliser à une température de fonctionnement plus élevée. Les deux principales huiles qui

ont retenu l'attention pour une application de stockage de chaleur sont le therninol et la caloria-HT. Le tableau I-5 suivant résume les avantages et les inconvénients des huiles. [21]

Tableau I -5: Les avantages et les inconvénients de l'huile comme stockeur de chaleur [21]

Avantages	Inconvénients
Chaleur spécifique élevée	Très dispendieux
Non-corrosif aux contenants	Toxique pour l'environnement
disponible	Inflammable
Faible pression de vapeur	
Température de fonctionnement élevée	

Quelques exemples des matériaux de stockage de chaleur sous forme solide :

I.3.3.1.4 Métaux solides :

Les métaux solides sont bons candidats pour application de stockage thermique. On note notamment la roche, le conglomerat, le sable, les briques, les métaux, etc. L'énergie est emmagasinée à basse température. De plus aucune fuite en cas de bris du contenant ne peut arriver et ils n'ont aucun problème du à la pression de vapeur comme c'est le cas avec l'eau. Le meilleur candidat de matériaux solide pour le stockage thermique est la fonte, sa densité d'énergie est plus élevée que l'eau. Cependant, la fonte est très dispendieuse et d'autres matériaux sont généralement préférés pour leur cout inférieur. Un autre candidat de premier

choix est la roche. Utilisé sous forme de lit de pierre, l'énergie peut y être emmagasinée en lissant le fluide caloporteur circules directement entre les pierres ou par le biais d'un échangeur thermique.

Un dernier type de matériaux à considérer est les métaux. Ils ont d'avantage d'avoir une excellente conductivité thermique et peuvent résister à de très hautes températures. Leur utilisation est considérée généralement dans des applications nécessitant une conductivité thermique élevée. Les résidus industriels de cuivre, de fer, de fonte et d'aluminium sont de bons exemples de métaux potentiels.[21]

I.3.3.1.5 Roches, bétons et briques :

Ayant des caractéristiques très approchées. Les roches, le béton et les briques forment une catégorie à haute 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 adorable 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. Le tableau I-6 suivant résume leurs avantages et inconvénients.[21]

Tableau I-6: Les Avantages et les inconvénients des roches, bétons et briques

Avantages	Inconvénients
Excellente stabilité cyclique	Faible chaleur spécifique
Chimiquement stable	Faible conductivité thermique
Disponible	
Adorable	

I.3.3.1.6 Métaux :

La principale caractéristique qui fait que les métaux être intéressants pour un système de stockage de chaleur sous forme sensible est leur grande capacité thermique. Celle-ci leur permet une absorption rapide de la chaleur, mais également une dissipation rapide, ce qui implique une grande autodécharge, une faible autonomie et une efficacité réduite. Pour ces raisons, ils seront principalement utilisés dans des applications de courte durée.[21] Le tableau I-7 suivant résume leurs avantages et inconvénients

Tableau I-7:Les Avantages et les inconvénients des métaux comme stockeur de chaleur [21]

Avantages	Inconvénients
Conductivité thermique élevée	Très dispendieux
Chimiquement stable	
Disponible	
Recyclable	

I.3.3.2 Quelques exemples de stockage de chaleur sensible :

De nombreuses applications de ce type de stockage existent dans le secteur du bâtiment. Les matériaux entrant en jeu dans le stockage par chaleur sensible sont stockés dans des réservoirs de natures différentes comme des cuves de petites ou grandes tailles (notamment des ballons d'eau chaude), dans des systèmes de stockage souterrain, en aquifère artificiel, ou encore dans des matériaux spéciaux : matériau utilisé pour fabriquer des briques réfractaires à haut pouvoir d'accumulation) [22].

Conclusion :

Le principe du stockage de la chaleur repose sur trois voies : la chaleur latente, la chaleur sensible et la réaction chimique. Le choix étant en fonction des besoins économiques et techniques ainsi que la durée du stockage désirée. La comparaison des différents types et matériaux de stockage thermique a permis de montrer les avantages de l'utilisation du stockage sensible solide, notamment la maturité de la technologie, la simplicité, et la stabilité. Ceci nous a encore orientés vers la valorisation des galets qui sont à la fois écologiques et économiques.

Chapitre II :

Modélisation mathématique

Introduction :

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

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

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

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

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

III.1 Présentation du système physique :

Le système physique est représenté très schématiquement par la figure .Le stockage thermique que nous souhaitons modéliser peut être représenté comme un cylindre verticale (la cuve de stockage), rempli de galets, où l'on peut souffler mécaniquement de l'air chaud (fluide caloporteur) dans une direction. Le fluide caloporteur circule dans le stock en contact avec les particules (les galets).

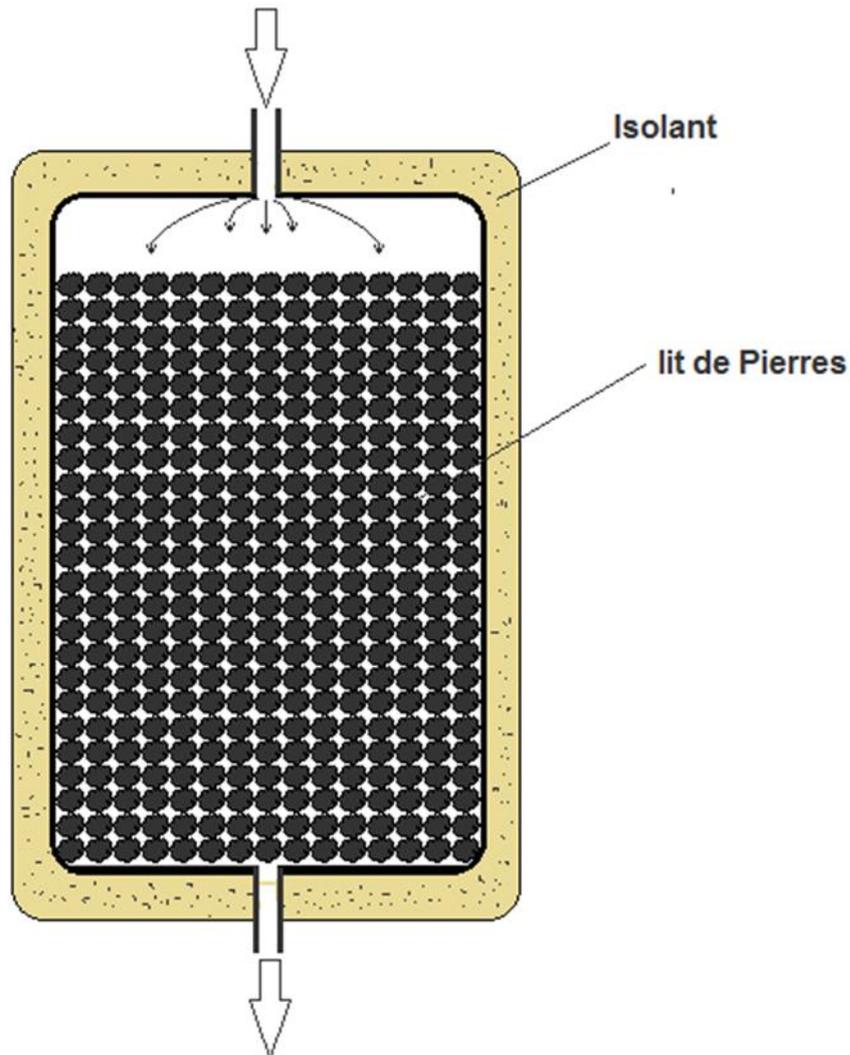


Figure II.1 : schéma du réservoir de stockage

III.2 Hypothèses simplificatrices de base :

- Les parois de la cuve sont adiabatiques.
- Les solides (les galets) sont considérés comme des particules sphériques identiques de même diamètre.
- L'influence de la paroi du cylindre est négligée.
- Le phénomène est monodimensionnel.
- La vitesse moyenne de l'écoulement du fluide est constante dans tout le stock.
- La conduction entre les particules sphériques est ignorée.

- Les gradients de températures sont faibles à l'intérieur des particules.
- Les échanges thermique entre solide et fluide sont proportionnels aux écarts de températures (c a d qu'on néglige les effets de rayonnements).
- les caractéristiques thermochimiques sont constantes.
- Le coefficient d'échange par convection entre le solide et le fluide supposé constant et indépendant de la température.
- la porosité est uniforme.
- On néglige les pertes thermique entre l'extérieure et le fluide.

Les hypothèses précédentes conduisent donc à un modèle mathématique unidimensionnel (axe des x vertical) et avec seulement deux températures a chaque niveau horizontal (température du fluide (air) $T(x, t)$ et température des particules $T_c(x, t)$).

III.3 Le bilan thermique :

Dans une cuve cylindrique de section A prenons un élément de longueur dx compris entre les plans horizontaux d'abscisse x et $x+dx$ comme montre la figure :

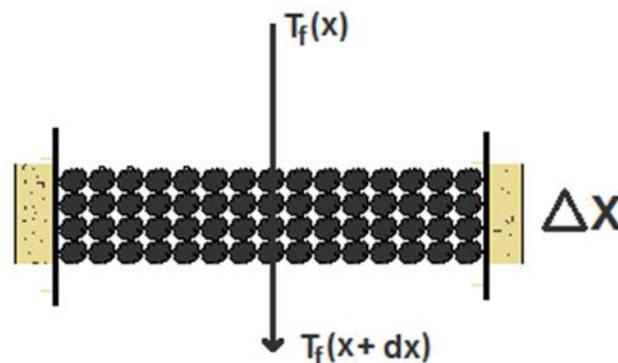


Figure II.3 : Elément de longueur du stock

Nous nous intéressons à l'évolution en fonction du temps des températures moyennes de l'air et des galets dans la section d'entrée (l'abscisse x) de cet élément pendant le temps dt , un élément de fluide de longueur dx s'échauffe de dt .

Le bilan thermique au niveau de fluide s'écrit :

$$m_f \cdot C_{p_f} \frac{dT_f}{dt} = h_c A_s (T_s - T_f) + \lambda_f \frac{\partial^2 T_f(x,t)}{\partial x^2} \quad (\text{II.1})$$

Le bilan thermique au niveau de solide s'écrit :

Les solides sphériques, lorsqu'il est traversé par le fluide chaud à une température supérieure à la température de fusion il se produit un échange de chaleur entre le fluide et le solide (hc le coefficient de transfert de chaleur par convection)

$$m_s \cdot C_{p_s} \frac{dT_s}{dt} = h_c A_s (T_f - T_s) \quad (\text{II.2})$$

On a :

$$m_f = \rho_f \cdot V_f \quad (\text{II.3})$$

$$m_s = \rho_s \cdot V_s$$

Avec :

$$V_T = V_f + V_s \quad (\text{II.4})$$

On suppose que :

$$\varepsilon = \frac{V_f}{V_T} \quad \text{la porosité} \quad (\text{II.5})$$

Donc :

$$V_f = \varepsilon \cdot V_T \quad (\text{II.6})$$

$$V_s = (1-\varepsilon) V_T \quad (\text{II.7})$$

$$\frac{V_s}{V_T} = 1-\varepsilon \quad (\text{II.8})$$

$$\frac{dT_f}{dt} = \frac{\partial T_f}{\partial t} + \frac{\partial X}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II.9})$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = U \text{ la vitesse de fluide.} \quad (\text{II.10})$$

$$\rho_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \rho_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + U \frac{\partial y}{\partial x} \quad (\text{II.11})$$

On remplace:

L'équation d'énergie pour le fluide devient :

$$\rho_f \cdot \varepsilon \cdot V_T \cdot C_{p_f} \left(\frac{\partial T_f}{\partial x} + U \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = h_c A_s (T_s - T_f) + \lambda_f \cdot \frac{\partial^2 T_f(x,t)}{\partial x^2} \quad (\text{II.12})$$

$$\varepsilon \cdot \rho_f \cdot C_{p_f} \cdot \frac{\partial T_f(x,t)}{\partial t} + \varepsilon \cdot U \cdot \rho_f \cdot C_{p_f} \cdot \frac{\partial T_f(x,t)}{\partial x} = \lambda_f \cdot \frac{\partial^2 T_f(x,t)}{\partial x^2} + h_c \cdot a \cdot (T_s(x,t) - T_f(x,t)) \quad (\text{II.13})$$

Et l'équation d'énergie pour le solide devient :

$$(1-\varepsilon) \cdot \rho_s \cdot C_{p_s} \cdot \frac{\partial T_s(x,t)}{\partial t} = h_c \cdot a \cdot (T_f(x,t) - T_s(x,t)) \quad (\text{II.14})$$

Conditions initiales et aux limites :

À $t=0$:

$$T_f(x, t=0) = T_s(x, t=0) = T_0 \quad (\text{II.15})$$

À $x=0$:

$$T_f(x=0, t) = T_s(x=0, t) = T_{in} \quad (\text{II.16})$$

A la sortie de la cuve, on suppose que le système est adiabatique

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} (x = L, t) = \frac{\partial T_s(x=L,t)}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.17})$$

III.4 Résolution des équations :

Les équations (3.13) et (3.14) devient :

$$\frac{\partial T_f(x,t)}{\partial t} + U \frac{\partial T_f(x,t)}{\partial x} = \frac{\lambda_f}{\varepsilon \cdot \rho_f \cdot Cp_f} \cdot \frac{\partial^2 T_f(x,t)}{\partial x^2} + \frac{hc \cdot a}{\varepsilon \cdot \rho_f \cdot Cp_f} (T_s(x, t) - T_f(x, t)) \quad (II.18)$$

Et

$$\frac{\partial T_s(x,t)}{\partial t} = \frac{h_c \cdot a}{(1-\varepsilon) \cdot \rho_s \cdot Cp_s} (T_f(x,t) - T_s(x,t)) \quad (II.19)$$

La discrétisation des équations à partir d'un maillage spatial et temporel des pas respectivement égaux Δx et Δt permet d'écrire en utilisant le schéma purement implicite des différences finies nous obtenons les équations suivantes :

Pour le fluide:

$$T_{fi}^{t+1} - T_{fi}^t + \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta x} (T_{fi}^{t+1} - T_{fi-1}^{t+1}) = \frac{\lambda_f \cdot \Delta t}{\rho_f \cdot Cp_f \cdot \varepsilon \cdot \Delta x \cdot \Delta x} (T_{fi-1}^{t+1} - 2 \cdot T_{fi}^{t+1} + T_{fi+1}^{t+1}) + \frac{h_c \cdot a}{\rho_f \cdot Cp_f \cdot \varepsilon} (T_{si}^{t+1} - T_{fi}^{t+1}) \quad (II.20)$$

Pour le solide (galet):

$$T_{si}^{t+1} - T_{si}^t = \frac{h_c \cdot a \cdot \Delta t}{\rho_s \cdot Cp_s \cdot (1-\varepsilon)} (T_{fi}^{t+1} - T_{si}^{t+1}) \quad (II.21)$$

Si on pose:

$$A = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad B = \frac{\lambda_f \cdot \Delta t}{\rho_f \cdot Cp_f \cdot \varepsilon \cdot \Delta x \cdot \Delta x} \quad C = \frac{h_c \cdot a \cdot \Delta t}{\rho_f \cdot \varepsilon \cdot Cp_f} \quad D = \frac{h_c \cdot a \cdot \Delta t}{\rho_s \cdot Cp_s \cdot (1-\varepsilon)}$$

$$T_{fi-1}^{t+1}(-A-B) + T_{fi}^{t+1}(1+A+2B+C) + T_{fi+1}^{t+1}(-B) = T_{fi}^t + T_{si}^{t+1} \quad (II.22)$$

$$T_{s1}^{t+1} = T_{si}^t + D (T_{fi}^{t+1} - T_{si}^{t+1}) \quad (II.23)$$

$$T_{si}^{t+1} = \frac{D \cdot T_{fi}^{t+1} + T_{si}^t}{1+D} \quad (II.24)$$

En substituent l'équation (II.24) dans (II.22) nous aurons :

$$T_{fi-1}^{t+1}(-A-B) + T_{fi}^{t+1}(1+A+2B+C) + T_{fi+1}^{t+1}(-B) = T_{fi}^t + \frac{C}{1+D} (D \cdot T_{fi}^{t+1} + T_{si}^t) \quad (II.25)$$

$$T_{f_{i-1}}^{t+1}(-A-B) + T_{f_i}^{t+1}(1+A+2B+C \frac{C.D}{1+D}) + T_{f_{i+1}}^{t+1}(-B) = T_{f_i}^t + \frac{C}{1+D} T_{s_i}^t \quad (II.26)$$

Les équations des différents nœuds $0 \leq i \leq N$

Nous obtenons alors le système d'équations suivant :

$$\text{Pour } i=1 \quad T_{f_0}^{t+1}(-A-B) + T_{f_1}^{t+1}(1+A+2B+C \frac{C.D}{1+D}) + T_{f_2}^{t+1}(-B) = T_{f_1}^t + \frac{C}{1+D} T_{s_1}^t$$

$$\text{Pour } i=2 \quad T_{f_1}^{t+1}(-A-B) + T_{f_2}^{t+1}(1+A+2B+C \frac{C.D}{1+D}) + T_{f_3}^{t+1}(-B) = T_{f_2}^t + \frac{C}{1+D} T_{s_2}^t$$

$$\text{Pour } i=3 \quad T_{f_2}^{t+1}(-A-B) + T_{f_3}^{t+1}(1+A+2B+C \frac{C.D}{1+D}) + T_{f_4}^{t+1}(-B) = T_{f_3}^t + \frac{C}{1+D} T_{s_3}^t$$

.

$$\text{Pour } i=N \quad T_{f_{N-1}}^{t+1}(-A-B) + T_{f_N}^{t+1}(1+A+2B+C \frac{C.D}{1+D}) + T_{f_{N+1}}^{t+1}(-B) = T_{f_N}^t + \frac{C}{1+D} T_{s_N}^t$$

Si on pose :

$$AA = (-A-B)$$

$$BB = (1+A+2B+C \frac{C.D}{1+D})$$

$$CC = -B \quad \text{et} \quad DD = \frac{C}{1+D}$$

Et que $T_{f_0}^{t+1} = T_{in}$

III.5 Caractéristiques géométriques du dispositif de stockage :

III.5.1 Diamètre de galet : [24]

Les galets sont identiques, donc on peut les caractériser par le diamètre d défini par :

$$d = \frac{6}{\pi} \frac{\text{Volume des galets}}{\text{nombre des galet}} \quad (\text{II.27})$$

III.5.2 Porosité:[25]

Par définition, la porosité est le rapport du volume occupé par le fluide sur le volume total (air/galets). sa valeur varie de 0.36 à 0.44.

La porosité est donnée en fonction des rapports entre le diamètre du stock et le diamètre des galets (solide) par l'expression suivante:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0.4272 - 4.1515 \cdot 10^{-3} (D/d) + 7.881 \cdot 10^{-5} (D/d)^2 && \text{si } (D/d) < 28 \\ \varepsilon &= 0.3625 && \text{si } (D/d) > 28 \end{aligned} \quad (\text{II.28})$$

D : étant le diamètre du stock.

III.5.3 Longueur caractéristique : [26]

La longueur caractéristique est le rapport du volume d'un galet et sa surface

$$\xi = \frac{V_{\text{galet}}}{S_{\text{galet}}} \quad (\text{II.29})$$

III.5.4 La surface d'échange :[27]

La surface d'échange (fluide galet) d'un milieu poreux de volume V_s et de porosité ε est égale à :

$$A_c = n_{\text{galet}} \cdot A_{\text{galet}} \quad (\text{II.30})$$

III.5.5 Taux de surface de contact : [30]

Taux de surface de contact a (air, galet) d'un milieu poreux de volume V et de porosité ε est égale a :

$$a = \frac{A_c}{V_s} \quad (\text{II.31})$$

Pour des galets identique :

$$a = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d} \quad (\text{II.32})$$

III.5.6 Coefficient d'échange (air-galet):[31]

La détermination du flux convectif échangé entre galet et le fluide caloporteur (air) nécessite la connaissance du coefficient de transfert thermique volumique. Ce dernier est donné par la relation d'Alanis et Rovetta :

$$h_v = 824 \left[\frac{\rho_f U}{d} \right]^{0.92} \quad (\text{II.33})$$

Le coefficient thermique surfacique est alors déduit simplement en utilisant la relation suivante :

$$h_c = \frac{h_v d}{6 \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (\text{II.34})$$

Chapitre III :

Résultats et interprétation

Introduction :

Dans ce travail nous avons fait une étude numérique basée sur le principe de chaleur sensible dans les galets. Cette étude a été réalisée à l'aide du code de calcul Matlab, l'objectif de ce travail est d'étudier le comportement thermique de stockage de chaleur dans les galets.

Les résultats présents dans ce chapitre sont relatifs à la phase de stockage.

IV.1 Les résultats et interprétations :

L'étude numérique a été faite sur une cuve cylindrique placée verticalement de 2 m de long, rempli des galets identiques de 0.1 m de diamètre et traversé par un air chaud chauffé et maintenu à une température d'entrée constante de 70°C.

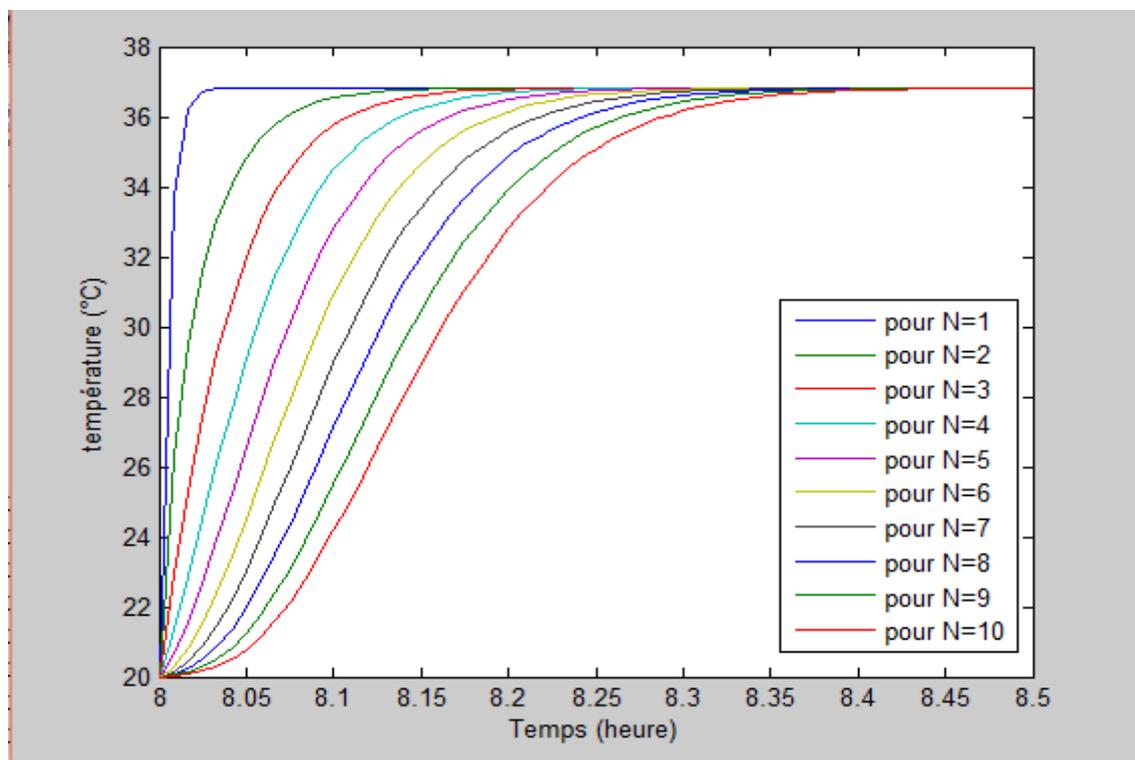


Figure III.1 : profil de température des galets en fonction de temps pour quelques nœuds pour une vitesse de fluide $U=6$ m/s

Sur la figure III.1 nous avons présenté les résultats théoriques obtenus pour une porosité uniforme de 0,4 à l'intérieur de la cuve de stockage.

On remarque que les évolutions des températures des nœuds sont identiques et que les premiers nœuds ont des augmentations des températures est rapides par rapport aux derniers nœuds.

La charge totale due à $t=8h\ 50\ min.$

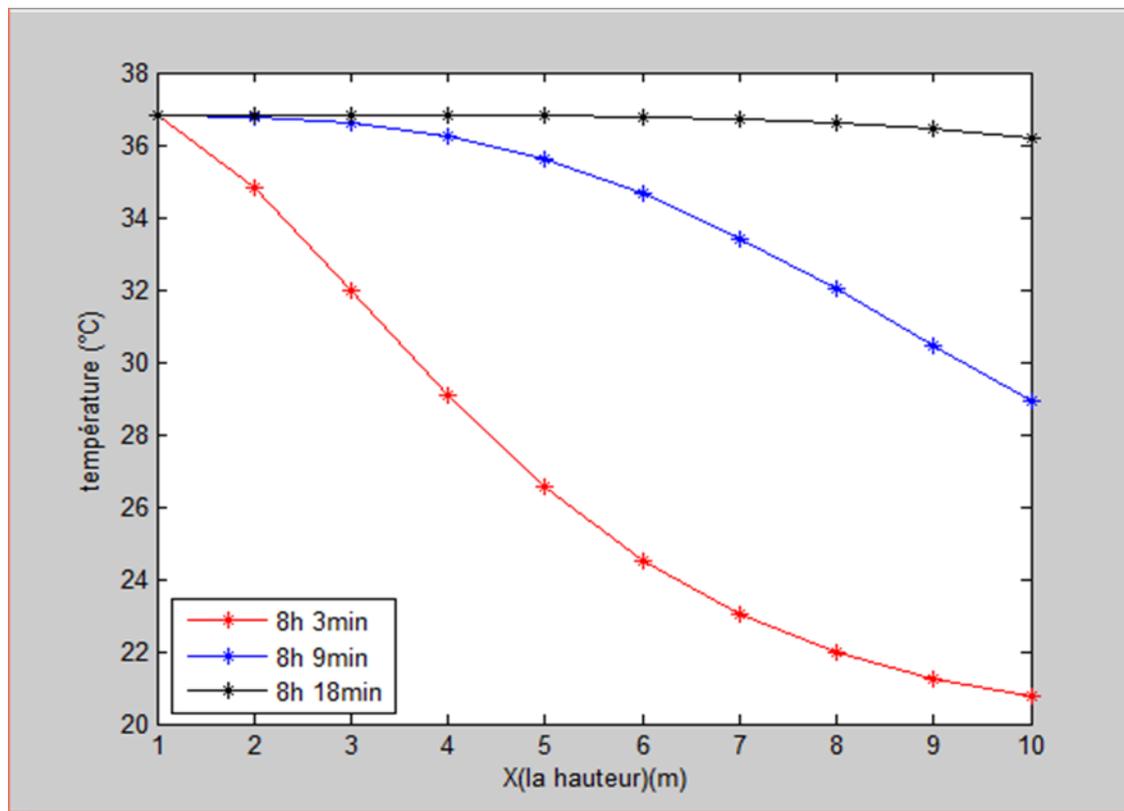


Figure III.2 : profil de température de galet en fonction de X (la hauteur) pour différents temps

La figure III.2 représente l'évolution de la température à différents temps en fonction de X (la hauteur). On remarque qu'à partir les températures des différents nœuds presque égaux c'est-à-dire que la charge est complète.

Étude paramétrique :**❖ Influence de changement de vitesse du fluide :**

- Pour $U = 7 \text{ m/s}$:

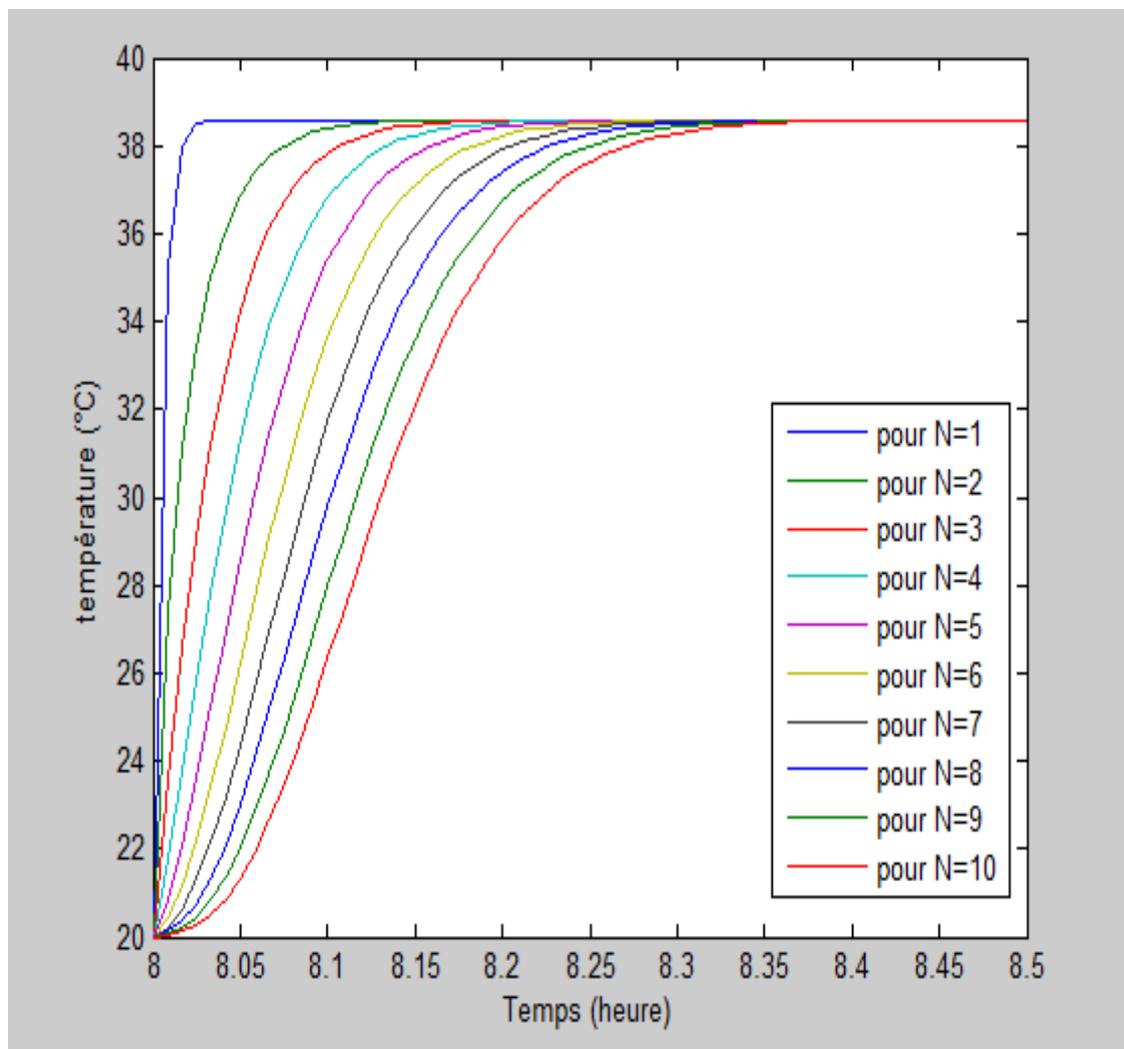


Figure III.3 : profil de température de galet en fonction de temps pour quelques nœuds

- Pour $U= 8 \text{ m/s}$:

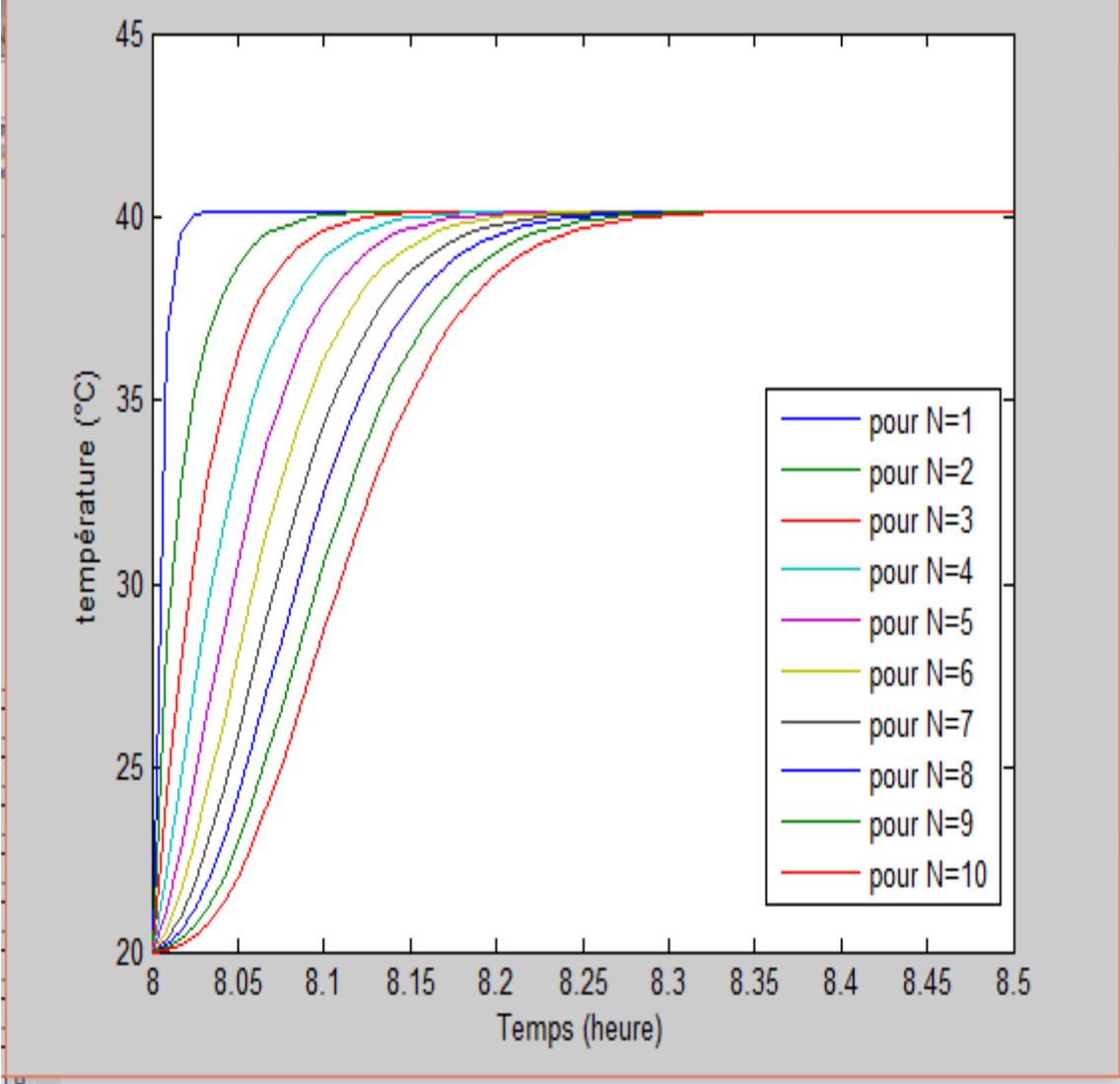


Figure III.4 : profil de température de galet en fonction de temps pour quelques nœuds

- Pour $U= 4 \text{ m/s}$:

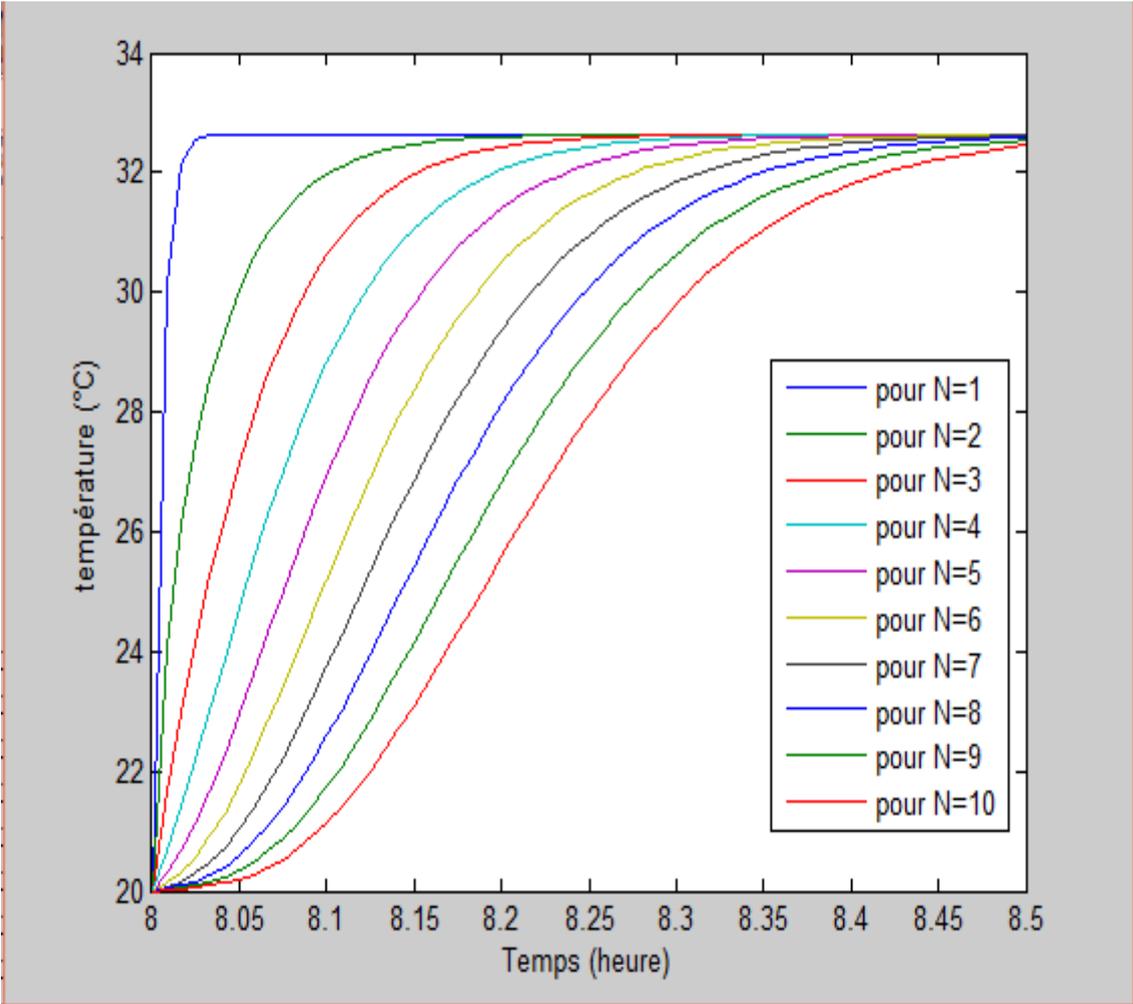


Figure III.5 : profil de température de galet en fonction de temps pour quelques nœuds

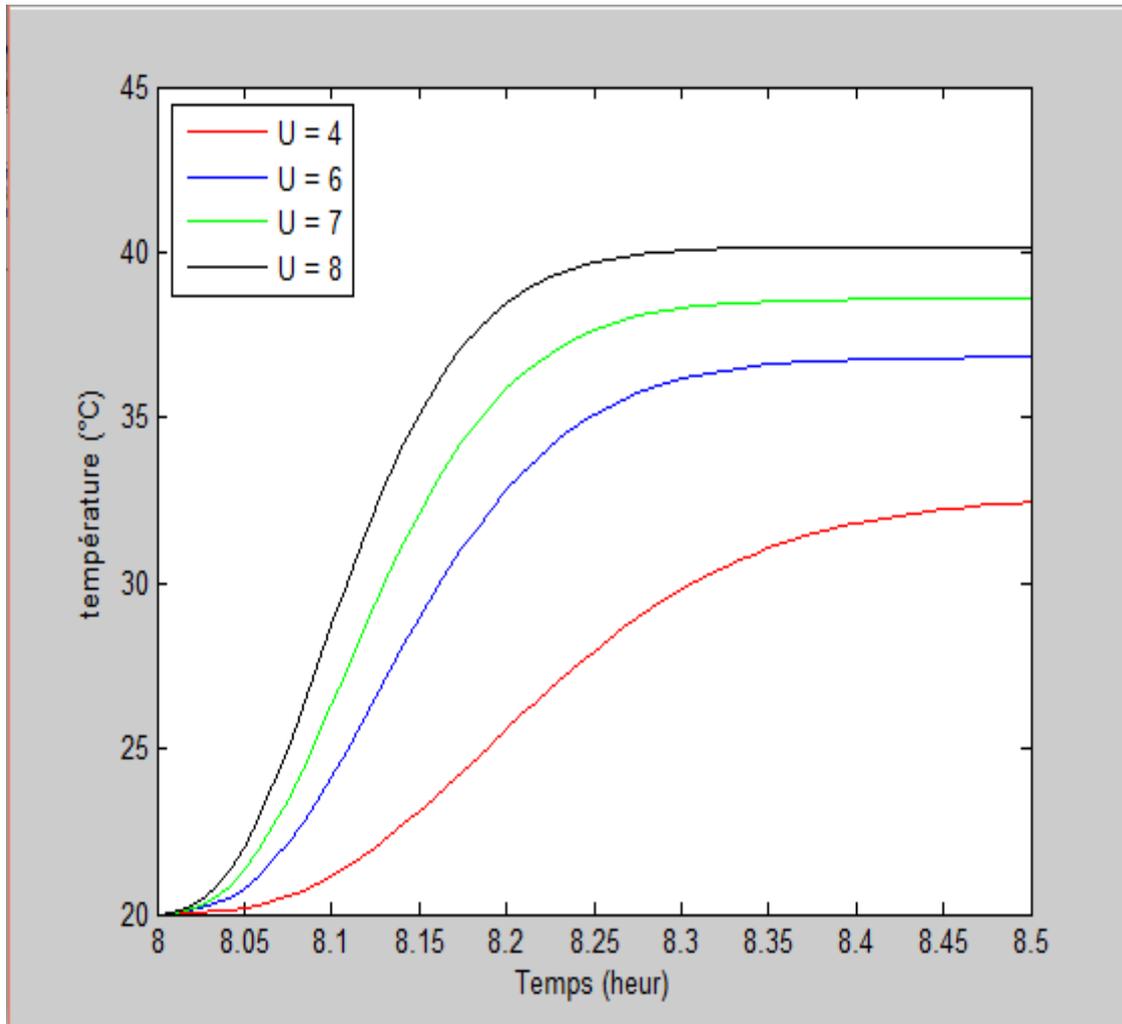


Figure III.6 : profil de température en fonction de temps pour des différentes vitesses de fluide

D'après la figure III.6 on constate pour chaque fois la vitesse du fluide augmente la température des galets augmente, à $t=8\text{h } 50\text{ min}$ la température est de $32,5\text{ °C}$ pour $U= 4\text{ m/s}$ alors pour la vitesse de fluide $U= 8\text{ m/s}$ passe à 40 °C .

Pour les profils de température en fonction de X (hauteur) :

- Pour $U = 7 \text{ m/s}$:

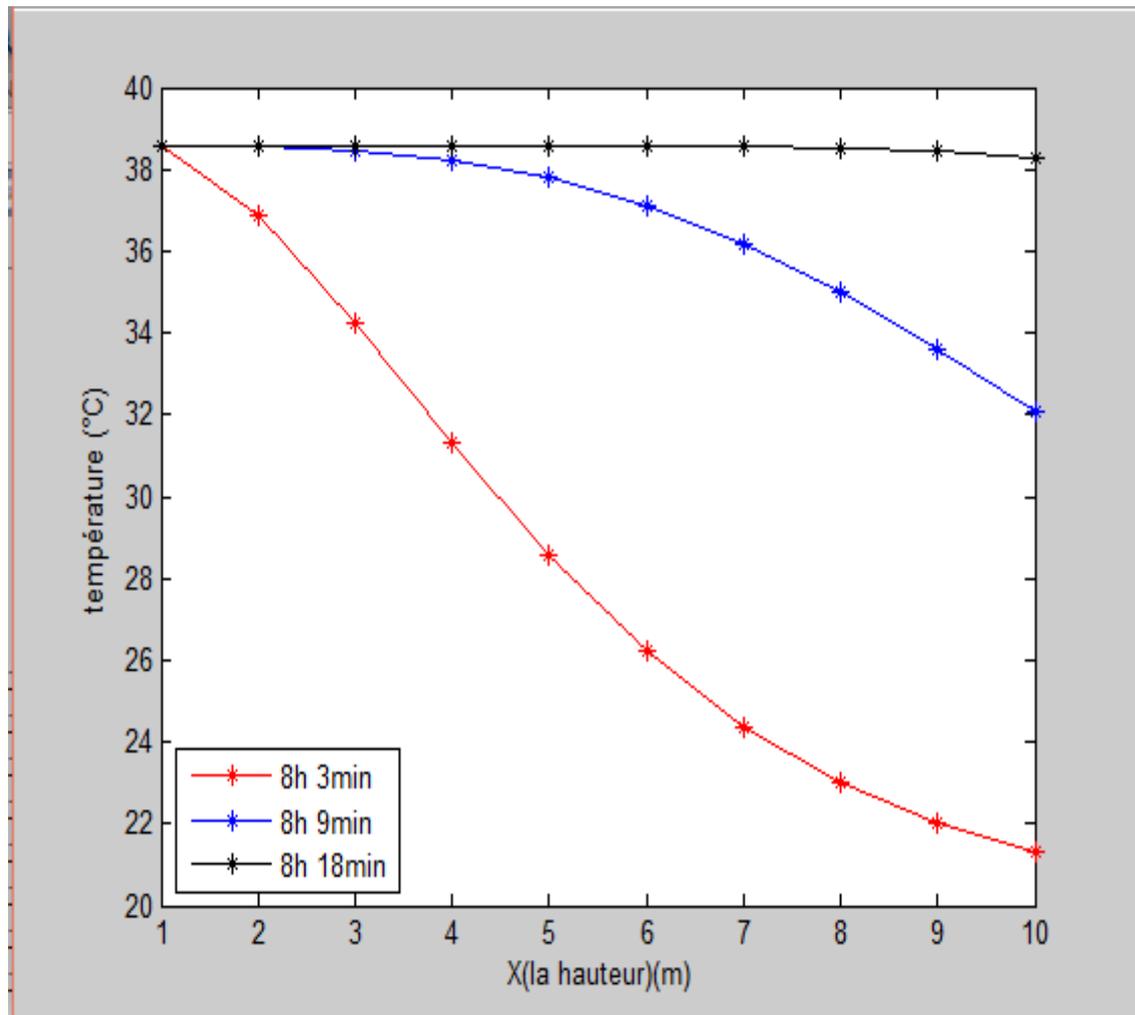


Figure III.7 : profil de température de galet en fonction de X (la hauteur) pour différents temps

- Pour $U= 8 \text{ m/s}$:

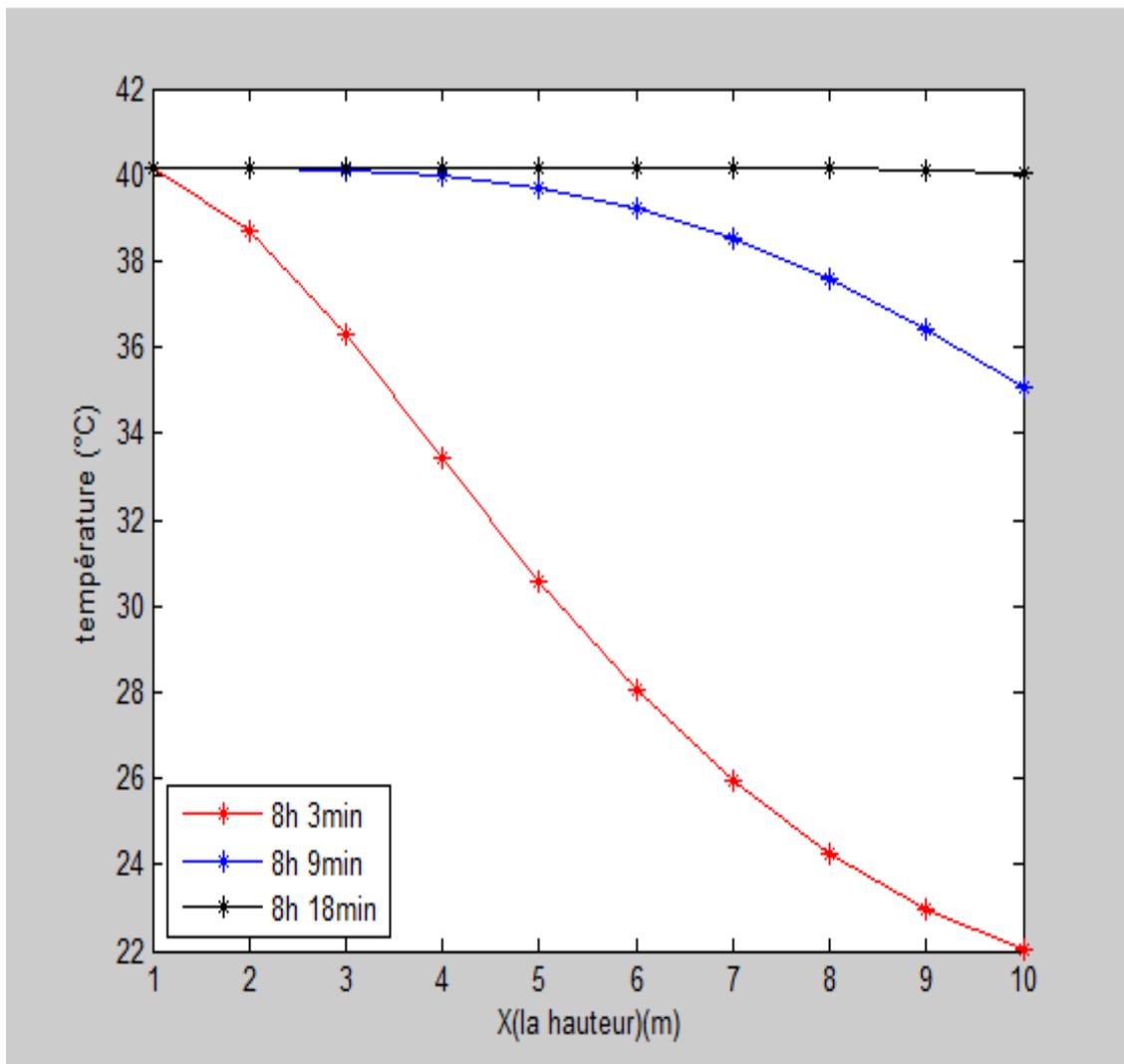


Figure III.8 : profil de température de galet en fonction de X (la hauteur) pour différents temps

- Pour $U = 4 \text{ m/s}$:

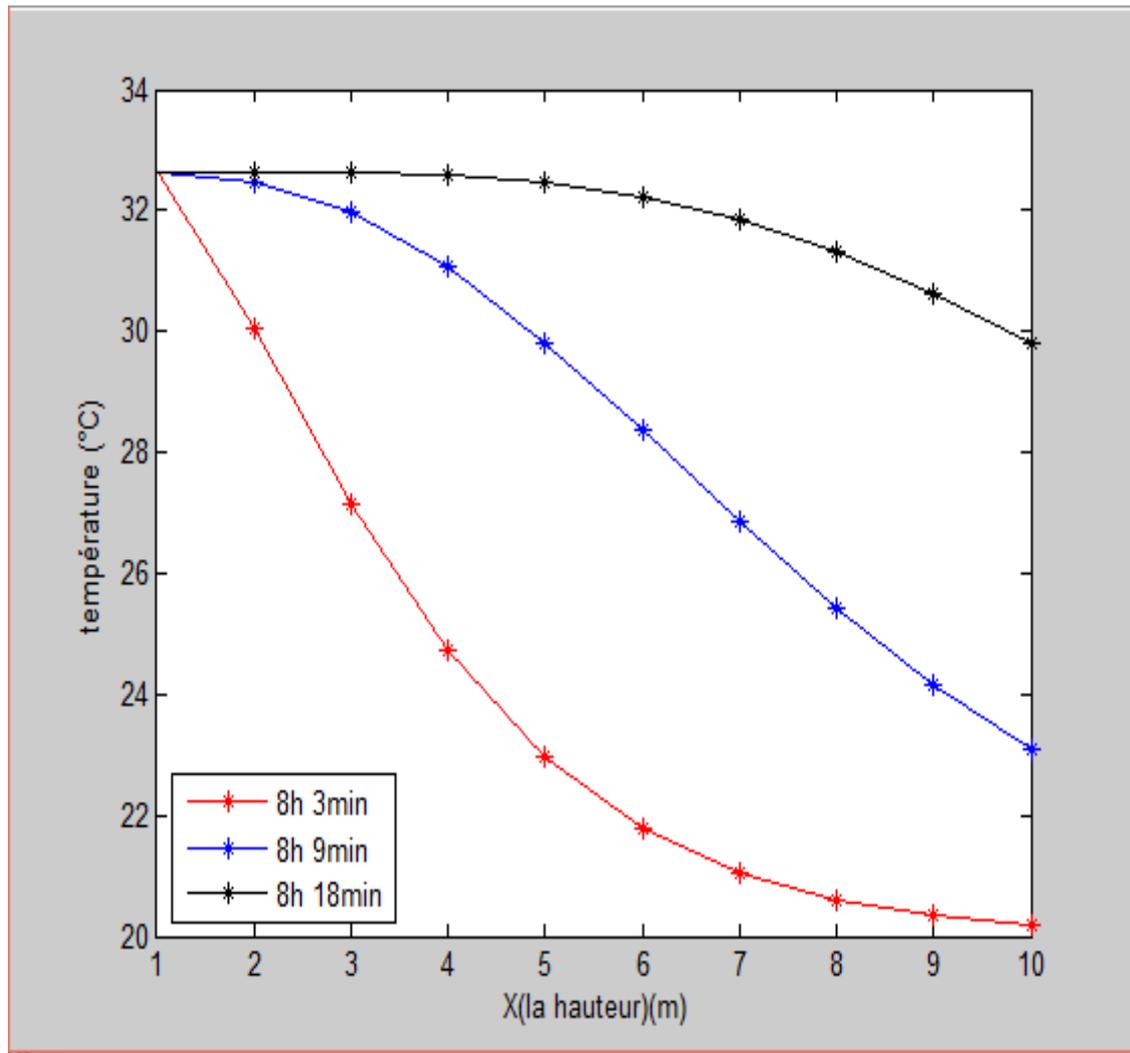


Figure III.9 : profil de température de galet en fonction de X (la hauteur) pour différents temps

D'après les figures III.7, III.8 et III.9 on constate pour chaque fois la vitesse du fluide augmente la température des galets augmente.

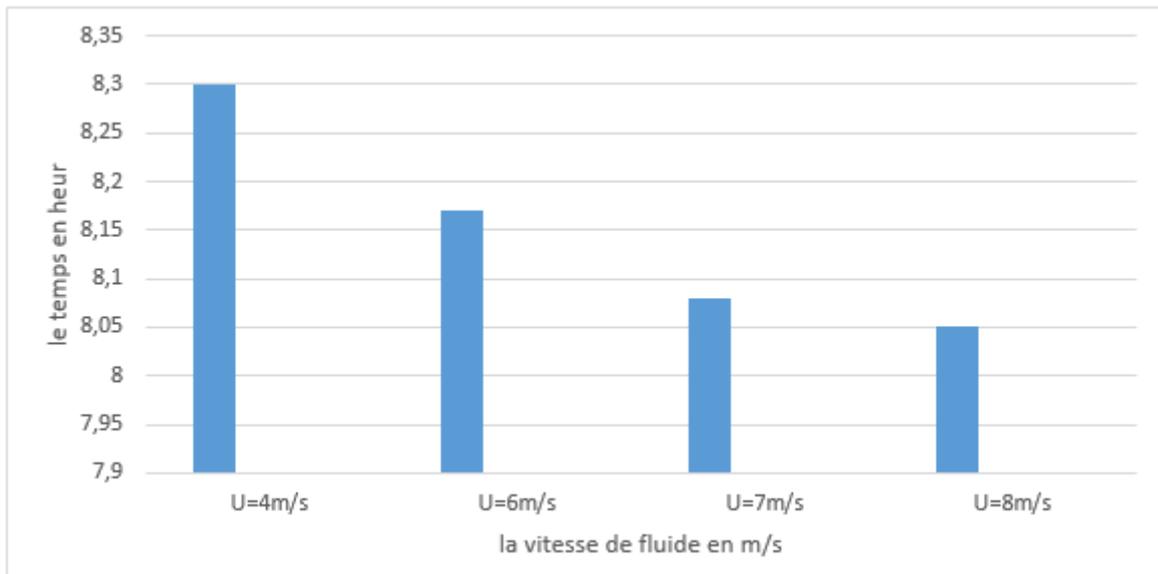


Figure III.10 : représentation graphique de temps en fonction de la vitesse de fluide

D'après les figures III.10 on remarque que à chaque fois la vitesse du fluide augmente le temps de la charge diminue.

❖ Influence de changement de la nature du fluide :

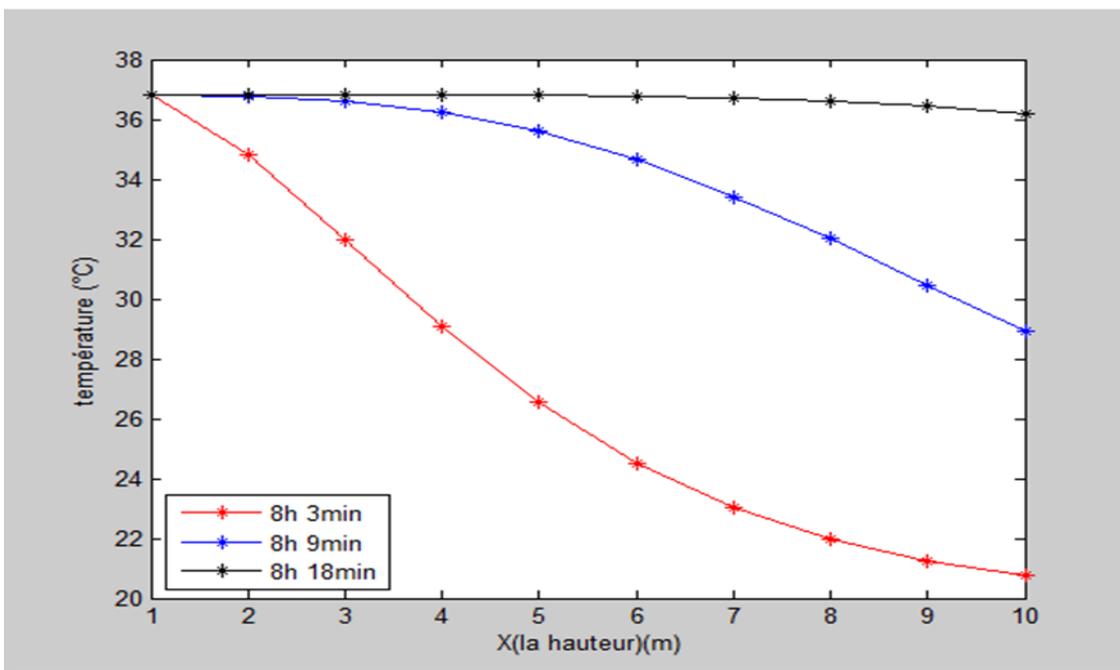


Figure III.11 : profil de température en fonction de X pour le fluide l'air ($C_p = 1005 \text{ J K}^{-1}\text{Kg}^{-1}$ et $\rho_f = 1,2 \text{ Kg/m}^3$)

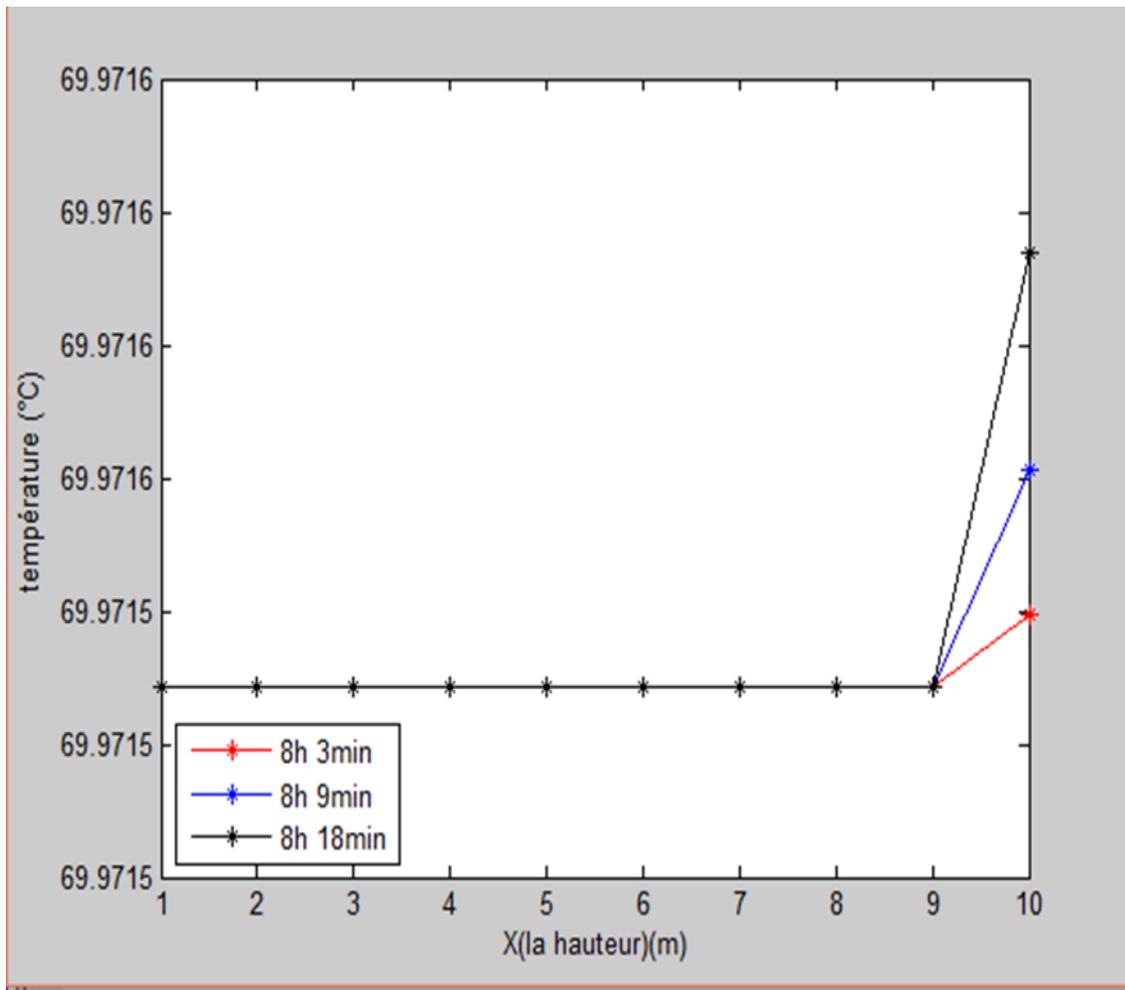


Figure III.12 : profil de température en fonction de X pour le fluide l'eau (Cp = 4186 J K⁻¹Kg⁻¹ et ρ_f= 997 Kg/m³)

D'après les figures (III.11etIII.12) on remarque que les courbes presque linéaires et l'échange est rapide. Donc le coefficient d'échange par convection de l'eau est plus grand que le coefficient d'échange par convection de l'air.

❖ Influence de changement de diamètre des galets :

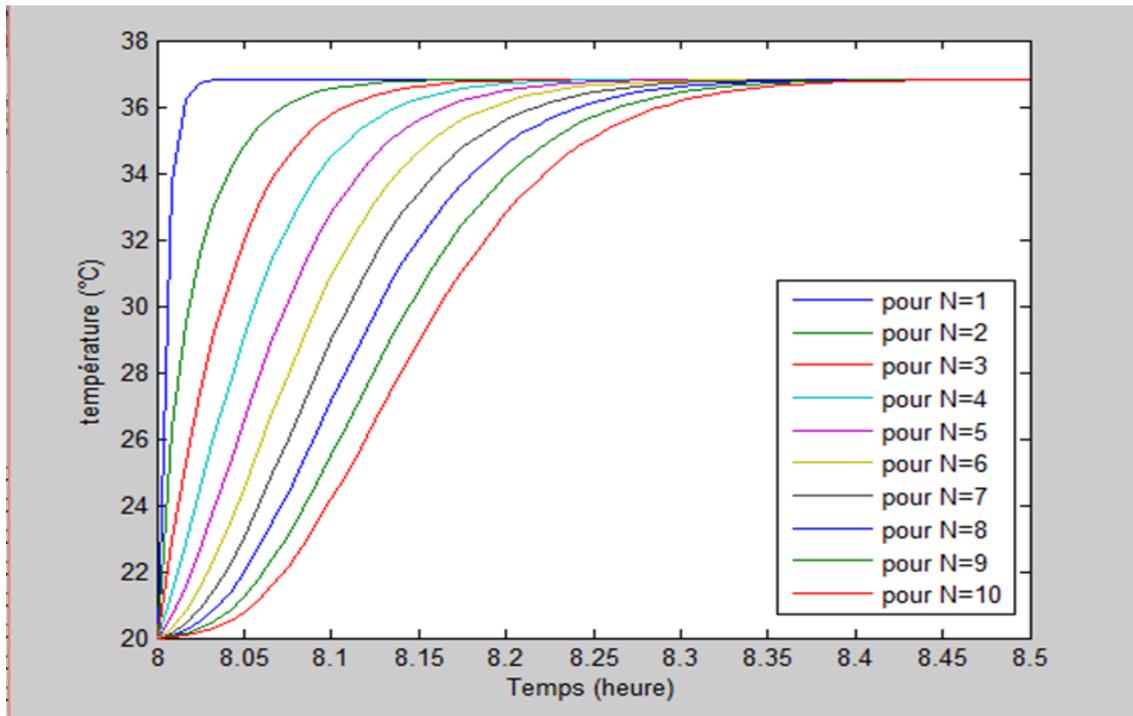


Figure III.13 : profil de température de galet en fonction de temps pour quelques nœuds (pour un diamètre égale 0.1 m)

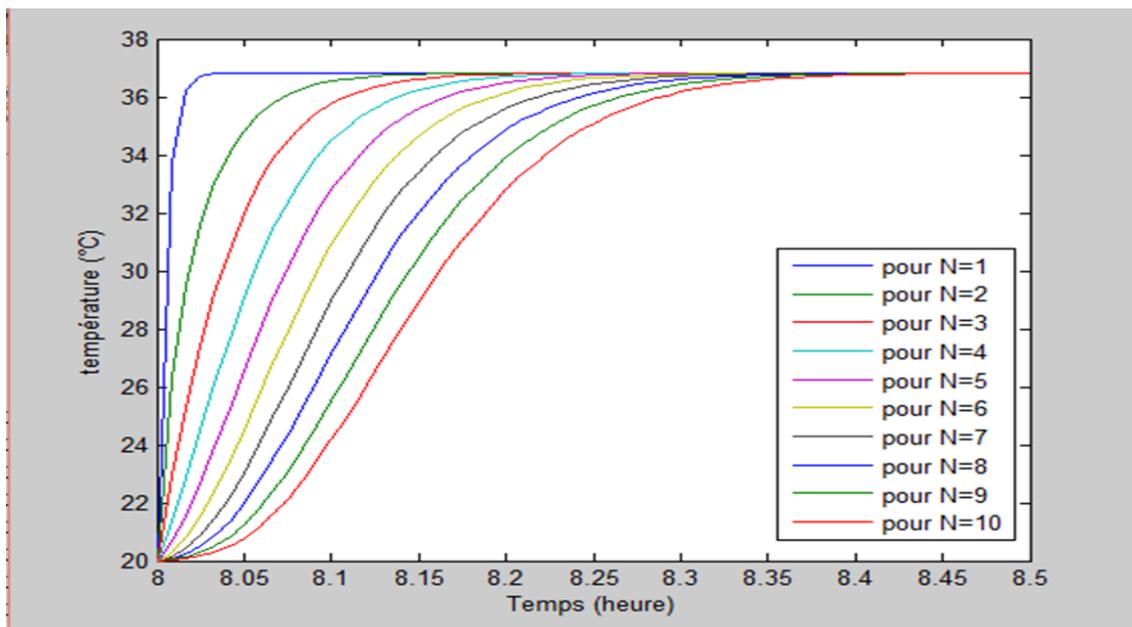


Figure III.14 : profil de température de galet en fonction de temps pour quelques nœuds (pour un diamètre égale 0.4 m)

D'après les figures (III.13 et III.14) on remarque qu'il y a aucun changement de température.

Conclusion :

D'après les résultats précédents, on conclut que l'étude paramétrique à montrer que la vitesse et la nature du fluide influent beaucoup sur la température des gales et le temps de charge par contre le diamètre n'a aucune influence.

Conclusion générale

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

Dans ce travail nous avons fait une étude numérique basée sur le principe de chaleur sensible dans les galets. Cette étude a été réalisée à l'aide du code de calcul **Matlab**, l'objectif de ce travail est d'étudier le comportement thermique de stockage de chaleur dans les galets.

Nous avons procédé à une analyse du stockage thermique dans un réservoir contenant des galets. Un modèle monodimensionnel a été élaboré. Ce dernier nous permettra de mettre en évidence certains paramètres qui influent sur le comportement thermique du stockage.

Les conclusions tirées à partir des résultats obtenus peuvent être résumées par les points suivants :

- La vitesse de fluide caloporteur influe sur la température des galets, augmentation de la vitesse de fluide provoque une augmentation de température des galets.
- La nature de fluide caloporteur influe sur le temps de la charge c'est-à-dire le coefficient de transfert de chaleur par convection de l'eau est plus grand que le coefficient de transfert de chaleur par convection de l'air, donc le stockage de chaleur avec l'eau est plus rapide que l'air.
- Aucune influence de diamètre de galet sur le stockage de chaleur.

Les références :

- [01]: Connaissance des énergies, <http://www.connaissancedesenergies.org/>, [02] : Mahfoudi, N. Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider de Biskra).
- [03] : X. Py, Y. Azoumah, and R. Olives, "Concentrated solar power: Current technologies, major innovative issues and applicability to West African countries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 306–315 (2013).
- [04]: A. Laghzaoui, D. Peerhossaini. Stockage de chaleur : énergie solaire et autres applications écoles des mines de douai.
- [05] : Flueckiger SM, Iverson BD, Garimella SV, Pacheco JE. System level simulation of a solar power tower plant with thermocline thermal energy storage. *Appl Energy* 2014; 113; 86–96.
- [06]:M.E. Navarro, M. Martinez, A. Gil, A.I. Fernandez, L.F. Cabeza, R. Olives, X. Py, Selection and characterization of recycled materials for sensible thermal energy storage, *Sol. Energy Mat. Sol. Cells*, 107 (2012) 131–135.
- [07] :Combined use of phase change material and rock particles for high temperature (350 °C) heat storage, *Energy Convers. Manag.* 79 (2014) 1-8.
- [08]: S. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques," *Energy Conversion and Management*, vol. 39, pp. 1127-1138, 1998.
- [09]: K.A.R. Ismail, R. Stuginsky Jr., A parametric study on possible fixed bed models for pcm and sensible heat storage, *Appl. Therm. Eng.* 19 (1999) 757-788.
- [10]: A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Luzaro, P. Dolado, B. Zalba, L.F. Cabeza, State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization, *Renew. Sust. Energy Rev.* 14 (2010) 31–55.
- [11]: S. Kuravi, J. Trahan, D.Y. Goswami, M.M. Rahman, E.K. Stefanakos, Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants, *Prog. Energy Combust. Sci.* 39 (2013) 285– 319.
- [12]:L. Geissbuhler, M. Kolman, G. Zanganeh, A. Haselbacher, A. Steinfeld, Analysis of industrial-scale high-temperature combined sensible/latent thermal energy storage, *Appl. Therm. Eng.* 101 (2016) 657–668.
- [13]: J. Cot-Gores, A. Castell, L.F. Cabeza, Thermochemical energy storage and conversion: A-state-of-the-art review of the experimental research under practical conditions, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 5207–5224.
- [14] : Souad BABAY et al, REVIEW ON THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS, *Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur*, Vol. 1 N° 4/2009.

- [15]: A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Luzaro, P. Dolado, B. Zalba, L.F. Cabeza, State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization, *Renew. Sust. Energy Rev.* 14 (2010) 31–55.
- [16]: A. Laghzaoui, D. Peerhossaini. Stockage de chaleur : énergie solaire et autres applications écoles des mines de douai.
- [17]: tiskatine.r Valorisation énergétique des matériaux locaux pour des applications dans le centrales CSP et dans le domaine des bâtiments (Doctoral. . UNIVERSITE-ibn zohr).
- [18]: B.Zalba, J. M. Mar n, L. F. Cabeza, et H. Mehling, « Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no 3, p. 251–283,2003.
- [19]:Dumas, J.P., « Stockage du froid par chaleur latente », *Techniques del'ingénieur-traité génie énergétique*, PP BE 9 775:1-22, (2002).
- [20]: Mehling H, Cabeza LF. Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications. Springer; 2008.
- [21]: Flory-Celini « Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiels existant» Thèse de Doctorat: Génie Civil, Université de Lyon 1 Claude Bernard, 2008.
- [22]: L. Vasiliev, V.S. Burak, A.G. Kulakov, D.A. Mishkinis et P.V. Bohan «Latent heat storage modules for preheating internal combustion engines: application to a bus petrol engine» *A pplied Ther ma l Engineering*, Vol. 20, pp. 913-923, 2000.
- [23]: Marie DUQUESNE « résolution et réduction d'un modèle non linéaire de stockage d'énergie par adsorption sur des zéolithes » l'université de bordeaux 2013.
- [24] :Messaoud Sandali ,Abdelghani Boubekri. 2Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des sciences appliquées, Département de génie mécanique, Ouargla30000, Algeria Etude du comportement thermique d'un séchoir solaire direct influencé par l'intégration d'un milieu poreux non consolidé
- [25] : C.dang Vu et B. delclambre. Etude expérimentale et modélisation d'un stockage thermique de longue durée en lit de cailloux enterré coulé à des capteurs solaires à air. *Revue de physique appliqué* 22 (1987) 487-503.
- [26]: E.F. sowell and R.L. curry.A convolution model of reck bed thermal storage units. *Solar energy* vol 24 (1980) 441-449
- [27]: Alanis,E. Sarava and L Rovetta . Measurement of rock pile heat transfer coefficient . *solar energy* Vol 19 (1978) 517-527.
- [28]: H. Torab and D.E . Beasley . optimisation of packed bed thermal energy storage units solar *Engineering* (1985).

[29] : M.Berdja. modélisation et simulation numérique d'un matériau à changement de phase dans une cavité rectangulaire. Mémoire de magistère département de mécanique université de blida juillet 2007

[30]: E.M sparrow T.A MYrum incliation induced direct contact melting in a circular tube . ASME J Heat Mass Transfer 1985: 107 533-540

[31]: T.Hirata , Y. Makino, Y. Kaneko. Analyse of close-contact melting for octadecane and inside isothermally heated horizontal rectangular capsule. International journal Heat and mass transfer 1991:34, 3097-3106