REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie civil
Spécialité : Equipement de l'habitat

Analyse thermique d'un système de stockage de l'énergie solaire dans un immeuble résidentiel

---

Présenté par :

BENREKIA Maroua

Proposé et Dirigé par :

Dr Younes CHIBA

Mr Fouad TRIFI

Promotion 2021

Dédicace

Je dédie mon travail

A ma mère pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices

A mon père (paix à son âme), pour son soutien, son affection et la confiance qu'il m'a accordé

A mon mari pour ses encouragements, sa patience et son aide

A mon ange Ali

A tous les membres de ma famille et ma belle-famille surtout ma belle-mère

Remerciements

En premier lieu, je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience pour réaliser ce travail.

J'adresse mes remerciements à mon encadreur Dr. CHTIBA Younes, pour sa grande disponibilité, ses encouragements, ses critiques et ses conseils qui ont contribué grandement à la réalisation de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de mon profonde gratitude.

Je remercie respectueusement les membres du jury : Le président Dr. ZIRARI Mounir et L'examinateur Dr. LABBADLIA OMAR pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer mon projet.

Je tiens à exprimer mes remerciements aux enseignants de l'Université Yahia Farès, particulièrement le chef de département de génie mécanique.

Je remercie chaleureusement mes chers parents, mon mari, mon fils, toute ma famille et ma belle-famille.

A tous qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail trouvent ici l'expression de mes sincères gratitudes.

Table des matières

Dédicace ..... **i**

Remerciements ..... **ii**

Table des matières ..... **iii**

Liste des Figures ..... **v**

Liste des tableaux ..... **vii**

Nomenclature ..... **viii**

Lettres grecques ..... **viii**

Indices et exposants ..... **viii**

Résumé ..... **ix**

Introduction générale **1**

Chapitre 1 Généralités **4**

1.1 Etat de l'art 4

1.2 Matériaux à changement de phase (MCP) 6

1.2.1 Critères de sélection du MCP 7

1.2.2 Capacité apparente 8

1.3 Stockage thermique de l'énergie 9

1.4 Type de système de stockage thermique de l'énergie 10

1.4.1 Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible 10

1.4.2 Stockage thermique par chaleur Latente 11

1.4.3 Stockage thermochimique 14

1.5 L'importance du stockage thermique 14

1.6 Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique 15

1.7 Fluides de transfert de chaleur 16

1.8 Critères de choix et de conception de systèmes de stockage 17

Chapitre 2 Modélisation mathématique **19**

2.1 Introduction 19

2.2 Présentation du système physique 20

2.3 Mode de fonctionnement du système 20

2.4 Hypothèses simplificatrices de base 21

2.5 Bilan thermique 21

2.6 Méthode de résolution des équations 22
2.7 Conditions initiales et aux limites 22

Chapitre 3 Résultats et discussions 24

3.1 Introduction 24
3.2 Résultats et interprétations 24

Conclusion générale 31

Bibliographie 32

Liste des Figures

Figure 1-1 Transition à changement de phase MCP.....6
Figure 1-2 Résumé des avantages des MCP [17].....7
Figure 1-3 Fonction de C_p utilisée dans le modèle.....8
Figure 1-4 Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique.....9
Figure 1-5 Différents types de stockage thermique de l'énergie solaire [3].....10
Figure 1-6 Les concepts de stockage de la chaleur sensible à haute température.....11
Figure 1-7 Catégories généralisées de MCP (solide/liquide).....12
Figure 1-8 Les différentes étapes de stockage de la chaleur par un matériau en fonction de la température.....13
Figure 1-9 Différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance de stockage et du temps de décharge.....14
Figure 1-10 Critères de choix d'une technologie de stockage.....17
Figure 2-1 Echanges de chaleur au sein d'un matériau.....19
Figure 2-2 Schéma du réservoir de stockage.....20
Figure 3-1 Profil de la température du fluide en fonction du temps pour différents débit ($\dot{m}$).....24
Figure 3-2 Profil de la température du solide en fonction du temps pour différents débit ($\dot{m}$).....25
Figure 3-3 Profil de la température du fluide en fonction de la distance pour différents débits ($\dot{m}$).....26
Figure 3-4 Profil de la température du fluide en fonction du temps pour différents longueur (L).....26
Figure 3-5 Profil de la température du solide en fonction du temps pour différents longueur (L).....27
Figure 3-6 Profil de la température du fluide en fonction du temps pour différents surfaces de contact (A_c).....28
Figure 3-7 Profil de la température du solide en fonction du temps pour différentes surfaces de contact (A_c).....28
Figure 3-8 Profil de la température du fluide en fonction du temps pour différentes porosités (ε).....29
Figure 3-9 Profil de la température du solide en fonction du temps pour différentes porosités (ε).....29

Figure 3-10 Profil de la température du fluide en fonction du temps pour différents nœuds ($N_x ; N_t$).....30

Figure 3-11 Profil de la température du solide en fonction du temps pour différents nœuds ($N_x ; N_t$).....30

Liste des tableaux

Tableau 1-1 Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur [21] 15

Tableau 1-2 Comparaison de l'air avec le Therminol VP1 et l'huile végétale de colza 16

Nomenclature

A_c : Surface de contact (m^2)

a_p : Taux de surface d'échange (m^{-1})

C_p : Chaleur spécifique à pression constante ($KJ / Kg.°K$)

h : Coefficient d'échange par convection ($W / m^2.°K$)

L : Longueur de l'unité LHTES (m)

$\dot{m}$: Débit massique (Kg / s)

T : Température ($°K$)

t : Temps (s)

u : Vitesse découlement (m / s)

Lettres grecques

Δ : Variation

ε : Porosité

λ : Conductivité thermique ($W / m.°K$)

ρ : Masse volumique (Kg / m^3)

Indices et exposants

f : Fluide

s : Solide

Résumé

ملخص

في السياق الحالي لتنمية الطاقات المتجددة، يعمل تخزين الطاقة على تحسين الكفاءة الطاقوية وتعزيز تكامل الطاقات المتجددة المتغيرة. كما أنه يجلب الأمان والمرونة للشبكات الكهربائية والمباني. الهدف الرئيسي من دراستنا هو اقتراح نظام تخزين الطاقة الشمسية في مبنى سكني في مدينة المدية. لهذا الغرض ، استخدمنا معادلات الطاقة ونمذجتها باستخدام المخطط الضمني لطريقة الفروق المنتهية لدراسة انتقال الحرارة بين المائع ومادة التخزين وذالك بتطوير برنامج مطلب. النتائج المحصل عليها تحتوي على حقول درجات الحرارة تم تحليلها ومناقشتها.

الكلمات الرئيسية: التخزين الحراري، الفروق المنتهية، مواد تغيير الطور، دراسة عددية.

Résumé

Dans le contexte actuel de développement des énergies renouvelables, le stockage de l'énergie améliore l'efficacité énergétique et favorise l'insertion des énergies renouvelables variables. Elle apporte aussi la sécurité et la flexibilité aux réseaux électriques et les bâtiments. L'objectif principal de notre étude est de proposer un système de stockage de l'énergie solaire dans un immeuble résidentiel à Médéa. Pour ce faire, les équations de l'énergie sont considérées pour caractériser le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau de stockage. Les équations de l'énergie sont discrétiser par la méthode des différences finies schéma implicite. Un code de calcul a été développé en utilisant le logiciel du Matlab. Les résultats obtenus incluant les champs de température sont analysés et discutés.

Mots clés : Stockage thermique, Différences finies, Matériaux à changement de phase, Etude numérique.

Abstract

In the current context of the development of renewable energies, energy storage improves energy efficiency and promotes the integration of variable renewable energies. It also brings security and flexibility to electrical networks and building. The main objective of our study is to provide a solar energy storage system in a residential building in Médéa. For this purpose, the energy equations are considered in order to characterize the heat transfer between the carried fluid and the storage material. The energy equations are discretized by using the implicit scheme of finite difference method. A code source was developed using Matlab software. The results obtained, including the temperature fields are analyzed and discussed.

Keywords: Thermal storage, Finite difference, Phase change materials, Numerical study.

Introduction générale

Les recherches récentes et actuelles ont été axées sur l'accroissement de l'efficacité énergétique par la part des énergies renouvelables, gestion et réduction de la demande d'énergie pour le chauffage et le refroidissement. Cela a pour origine de l'augmentation remarquable de la demande d'énergie dans le monde entier en raison de la population et de l'économie mondiales, une croissance rapide qui à son tour, conduit à un impact environnemental sévère.

L'homme a toujours stocké l'énergie sous forme de chaleur par de simples gestes, en faisant chauffer une pierre au soleil et l'utiliser après pour le chauffage ou la cuisson.
Un problème restait sans solution, lié à l'originalité même de l'énergie solaire, son caractère intermittent et aléatoire qui conduisait à la nécessité absolue des importants stockages pour compenser les passages nuageux, les nuits et les journées sans soleil. L'énergie solaire ne peut réellement exister, de façon significative que lorsque le problème de son stockage sera résolu de façon technique et économique.

L'énergie solaire, tout comme l'énergie éolienne et la plupart des énergies nouvelles et renouvelables ne peut que, très rarement, être utilisée au moment où elle est produite .De cette simple constatation, il découle que l'énergie produite doit être stockée.
En revanche, la technologie de stockage thermique a atteint une maturité, qui la rend prête à être exploitée pour une utilisation efficace des énergies renouvelables. L'étude de ce mémoire s'est intéressée particulièrement au stockage thermique par chaleur latente, à travers une investigation numérique des performances de stockage (température et la durée de stockage).

Ce mémoire est divisé en trois chapitres. Tout d'abord, nous avons commencé avec une introduction générale de stockage thermique qui dépend de la principale source qui est le soleil.
Le premier chapitre est réservé à l'état de l'art de stockage thermique par chaleur latente après il donne un aperçu sur les matériaux à changement de phase, le fluide de transfert de chaleur et les différents types de système de stockage thermique avec une comparaison entre ces derniers.

Le deuxième chapitre est destiné à la modélisation mathématique de stockage thermique par chaleur latente.

Le troisième chapitre présente les résultats et interprétation et enfin une conclusion générale présente les objectifs réalisés et les perspectives.

Chapitre 1

Généralités

Chapitre 1 Généralités

1.1 Etat de l'art

L'évaluation des performances des matériaux à changement de phase pour le confort thermique dans une région à climat chaud est l'objet de plusieurs recherches [23]

- Lei et al ont mené une étude paramétrique sur l'enveloppe de la construction dans les régions tropicales de Singapour.

Les résultats ont démontré que les performances de l'application du MCP à température de fusion de 28 ℃ permettent un gain d'énergie allant de 21 à 32%.
De plus, ils ont souligné qu'un point de fusion approprié pour un MCP peut réguler l'économie d'énergie.

- Soares et al ont mené une étude d'optimisation multidimensionnelle pour sept climats européens, étudiant les panneaux intérieurs de gypse contenant du MCP.

Les résultats ont démontré que les économies d'énergie peuvent aller de 10 à 62% selon les conditions climatiques.
De plus, ils ont montré qu'une température de fusion optimale existe en fonction des conditions ambiantes.

- Mathieu-Potvin et Gosselin ont construit un modèle numérique pour évaluer la performance thermique d'une enveloppe de bâtiment contenant des couches de MCP et soumise aux conditions météorologiques (conditions de la ville de Québec au Canada).

Les auteurs ont remarqué que le MCP est plus avantageux lorsque les températures intérieure et extérieure sont proche l'une de l'autre.

- Tunçbilek et al ont étudié la performance thermique d'un mur en MCP.

En conséquence, les performances évoluent en fonction de plusieurs variables telles que : la température de fusion, l'épaisseur de la couche et l'emplacement.
Les résultats ont montré que l'emplacement optimal du MCP doit être plus proche de la surface intérieure de mur.

- Saaty a appliqué la méthode AHP (Processus d'Hiérarchie Analytique) à un choix multicritères de MCP pour faciliter le passage d'une évaluation partielle des choix à une évaluation globale.

La méthode AHP est appliquée en deux niveaux : la structure hiérarchique et l'évaluation.

- Farid et al ont examiné les propriétés thermiques du MCP et leurs applications. Ils ont découvert que le point de fusion du MCP est le critère le plus important pour le sélectionner en fonction de son application.
- Sarbu et al ont rapporté que la température de fusion, la chaleur latente de fusion et les problèmes thermo-physiques du MCP sont trois facteurs de base qui influencent le choix des MCP pour toute application.

Des paramètres supplémentaires comme la densité, la conductivité thermique et la capacité thermique spécifique sont considérés comme des facteurs primaires et des critères clés susceptibles d'influencer les performances globales d'un MCP.

- Afin de vérifier l'efficacité de la méthode AHP Saaty a choisi cinq types de MCP aux propriétés différentes. Comme il a décidé de choisir cinq alternatives comme valeurs conservatrices. Ensuite, les étapes suivantes ont été appliquées pour trouver la meilleure sélection d'une alternative parmi de nombreuses alternatives.

➢ **Etape 1 :** l'objectif est de sélectionner le MCP approprié pour maintenir le confort thermique dans le bâtiment.

Le problème se décompose en une structure, dont :

_ Le but d'analyse est défini au plus haut niveau.
_ Les critères sont définis au niveau intermédiaire.

_ L’alternative représente les divers matériaux à changement de phase au niveau inférieur.

- **Etape 2 :** consiste à formuler la matrice de comparaison pour chaque paire de critères.

Cette matrice est normalisée selon le degré d’importance attribué à chaque critère sélectionné.

1.2 Matériaux à changement de phase (MCP)

Le stockage de l'énergie consiste à en préserver une quantité pour une utilisation ultérieure. Par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie, donc le matériau de stockage. Cette filière continue à faire l'objet de travaux de recherches, que se soit pour des applications de stockage sensible, latent, ou thermochimique, toujours à la recherche de matériaux prometteurs, ayant à la fois des critères écologiques, économiques et une bonne conductivité thermique [10].

Les matériaux à changement de phase sont des matériaux de stockage de chaleur « latente » qui subissent une transition de phase entre le liquide et le solide qui se produit de manière isotherme lors de la fusion (stockage de la chaleur) ou de la solidification (récupération de la cristallisation). Pendant la phase transition du solide au liquide, les MCP stockent l'énergie thermique sous forme de chaleur latente par un processus endothermique qui dissout les liaisons chimiques du MCP, et les libère de manière exothermique lorsqu'elles sont refroidies pour récupérer leur état solide [33, 31, 21]. On dit alors que le MCP agit comme un stockage thermique [26]. La transition de phase correspondante du MCP est illustrée à la Figure (1-1) :

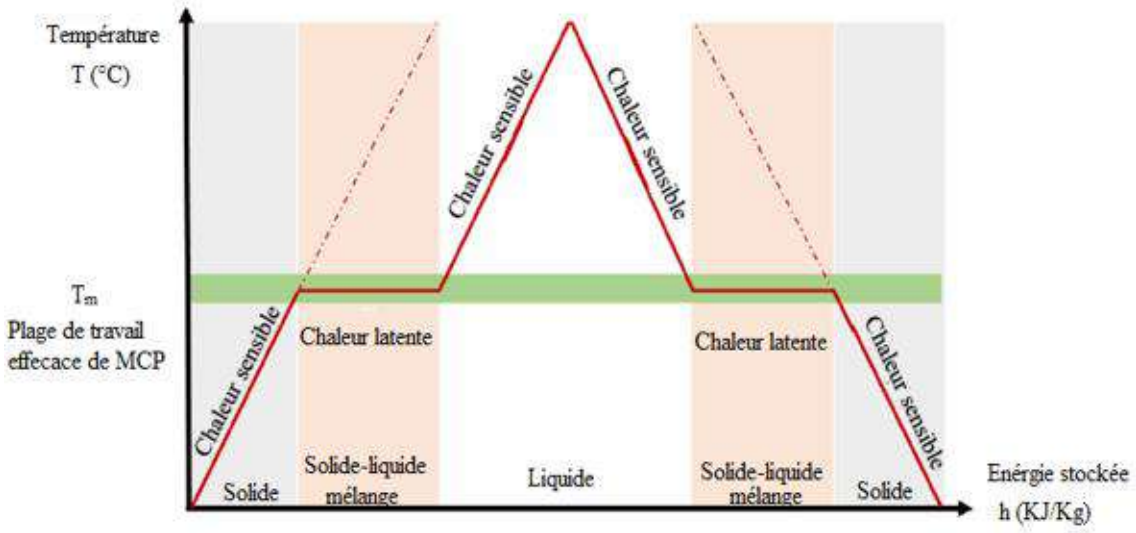


Figure 1-1 Transition à changement de phase MCP

Malgré les problèmes attendus dans les applications de construction tels que : problèmes de transfert de chaleur, retardement du feu, sous-refroidissement, séparation de phases et stabilité à long terme [15] ainsi que des problèmes de fusion, de coagulation et de fuite ; avec ses avantages significatifs, illustrés à la Figure (1-2), l'utilisation du MCP comme technologie

LHTES est devenue l'une des techniques les plus efficaces pour stocker et libérer l'énergie thermique [2].

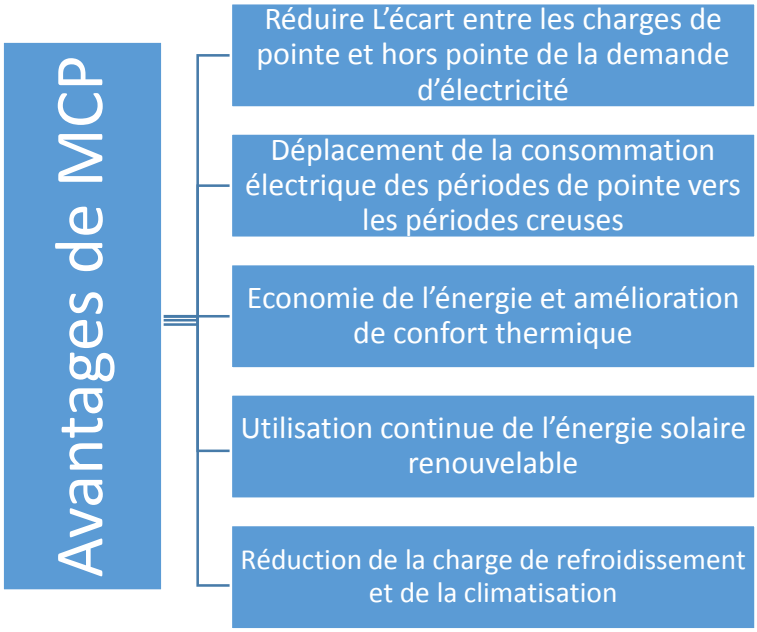


Figure 1-2 Résumé des avantages des MCP [17]

1.2.1 Critères de sélection du MCP

Il est très critique pour la sélection du MCP, à utiliser comme matériaux LHTES dans les bâtiments, de prendre en compte certaines considérations importantes qui doivent être étudiées. La méthodologie de sélection du MCP approprié dépend de plusieurs directives.

Décider quelle température de fusion à utiliser est le début initial où il est recommandé que la plage de température de fusion soit comprise entre $15-30℃$ [2] ou $20-32℃$ [33] pour les applications de construction, qui sont la gamme de confort thermique. Cependant, les MCP doivent posséder certaines propriétés thermo-physiques, cinétiques, chimiques, caractéristiques techniques et économiques qui sont énumérées comme suit : [8, 6, 29,4 ,36]

- Propriétés thermo-physiques : en plus d'avoir la plage de température souhaitée mentionnée précédemment, les MCP doivent avoir une chaleur latente de fusion élevée, une chaleur spécifique élevée, une conductivité élevée, une densité élevée, de petit changement de volume de transition de phase, une stabilité de cycle, une faible pression de vapeur à température de fonctionnement et fusion congruente.

- Propriétés cinétiques : elles sont au nombre de deux : taux de nucléation élevé (donc la surfusion en phase liquide est évitée) et taux élevé de croissance cristalline (réalisation optimale du système de stockage).
- Propriétés chimiques : Cycle réversible complet, chimiquement stable sans dégradation après un grand nombre de cycles de congélation/fusion, chimiquement compatible avec les matériaux de construction/encapsulation, pas de corrosivité, non toxique, non explosif et anti-inflammable.
- Propriétés économiques : rentable et disponible dans le commerce pour une pratique à grande échelle.
- Propriétés environnementales : Faible impact environnemental, non polluant tout au long de la durée de vie et ayant un recyclage potentiel.

1.2.2 Capacité apparente

La variation de C_p est linéaire en fonction de la température comme représente la Figure (1-3).

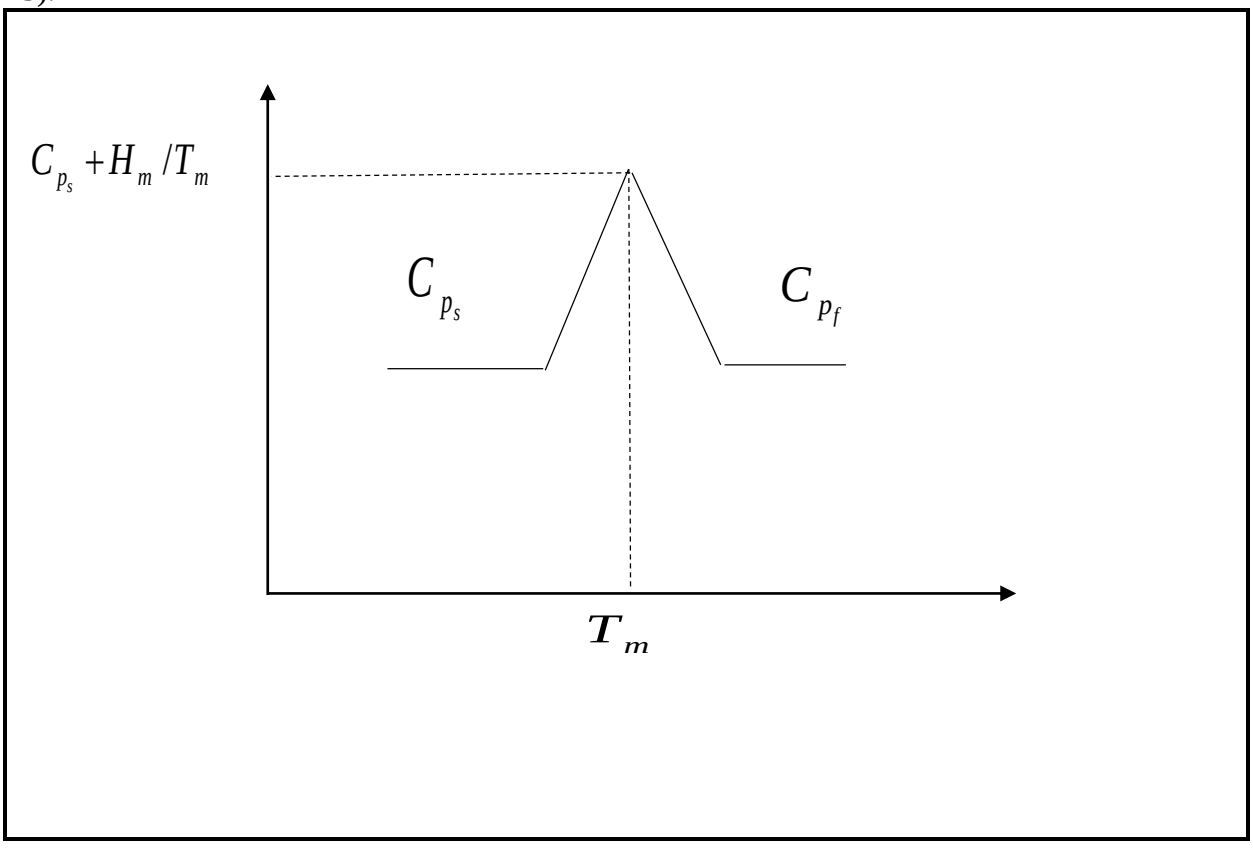


Figure 1-3 Fonction de C_p utilisée dans le modèle

1.3 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 (1-4). Si le critère est la plage de température, les systèmes de stockage sont divisés en « stockage de la chaleur » et « stockage du froid » [13, 14] .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 » [19]. Les systèmes de stockage de l'énergie thermique peuvent aussi être classés en deux autres catégories : actifs ou passifs [11]. 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 transférée vers le matériau de stockage à l'aide d'un échangeur. La structure de l'échangeur de chaleur est installée au sein du matériau de stockage.

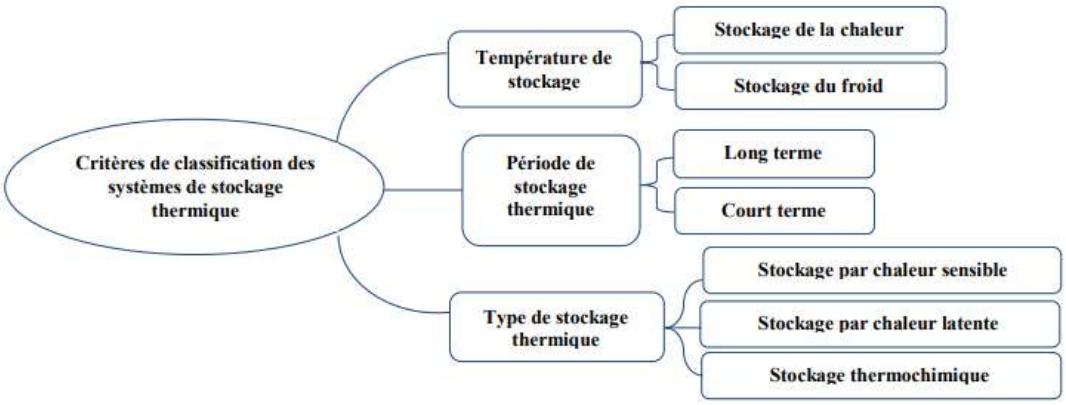


Figure 1-4 Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous concentrons sur la classification selon le type de stockage.

Pour stocker l'énergie sous forme de chaleur, il existe trois principes élémentaires : le stockage par chaleur sensible (variation de température), par chaleur latente (changement de phase) et le stockage thermochimique (réaction chimique). [19]

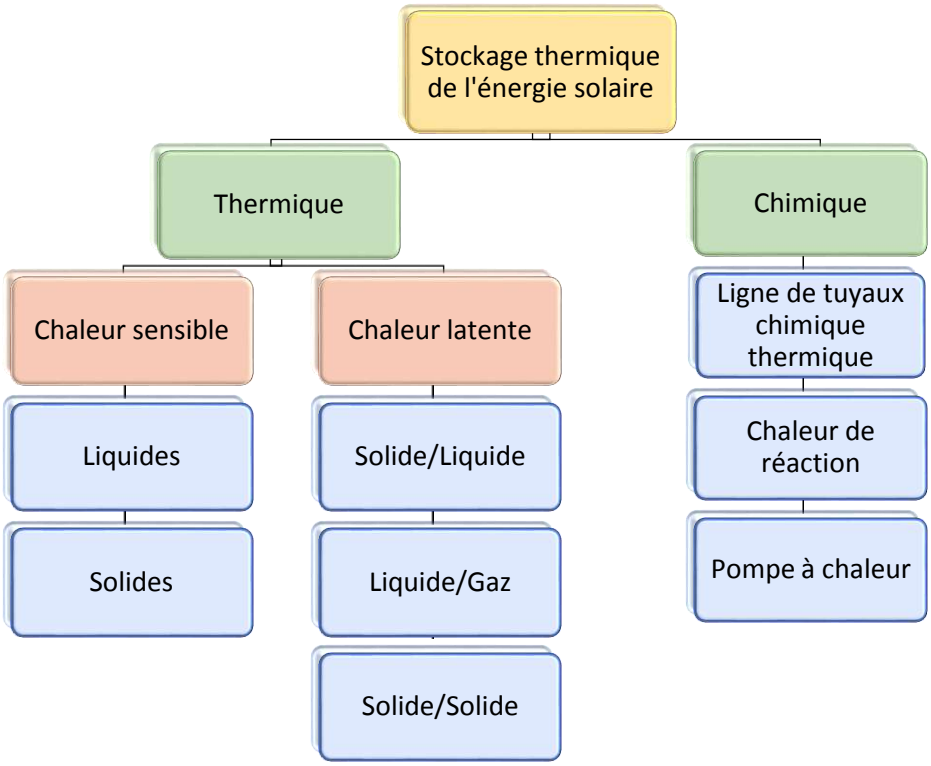


Figure 1-5 Différents types de stockage thermique de l'énergie solaire [3]

1.4 Type de système de stockage thermique de l'énergie

1.4.1 Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible

Il s'agit du type de stockage le plus basique, l'énergie est emmagasinée sous forme d'augmentation de température du matériau. La quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle au volume, à l'élévation de température et à la capacité calorifique 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. La variation de la quantité d'énergie Q stockée ou récupérée par le matériau est quantifiée par l'équation suivante :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m.C_p.dT$$

Q 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 ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$) et dT est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K).

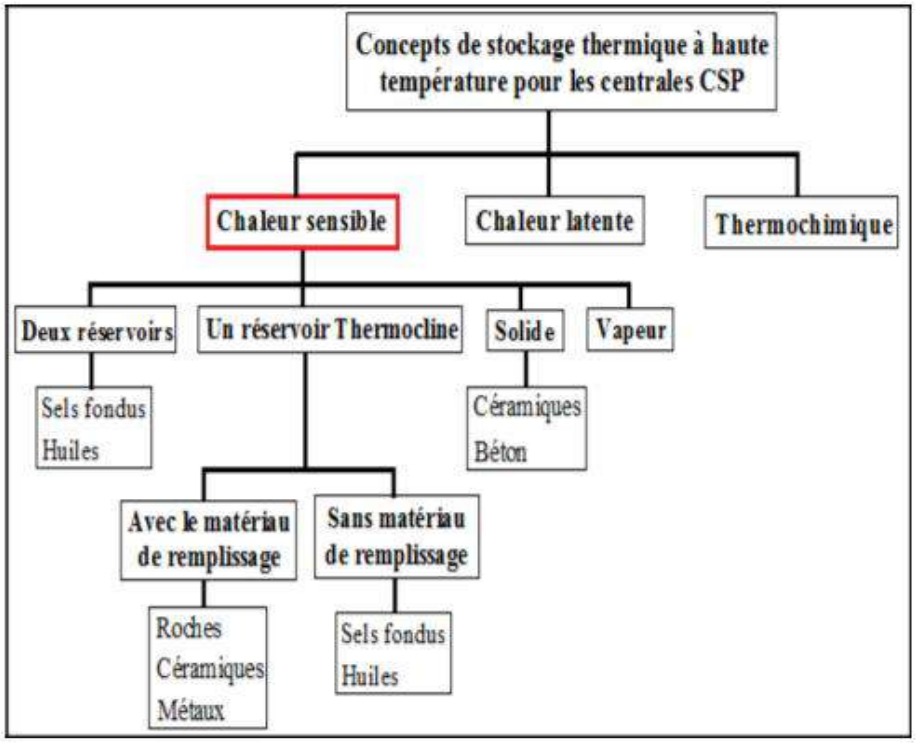


Figure 1-6 Les concepts de stockage de la chaleur sensible à haute température

La Figure (1-6), résume les concepts de stockage de la chaleur sensible à haute température appliqués pour les centrales solaires à concentration [7, 24].

1.4.2 Stockage thermique par chaleur Latente

Pendant le changement de phase des matériaux, 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). 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 (1-7), représente une classification des matériaux à changement de phase qui subissent un changement de phase entre liquide et solide [27].



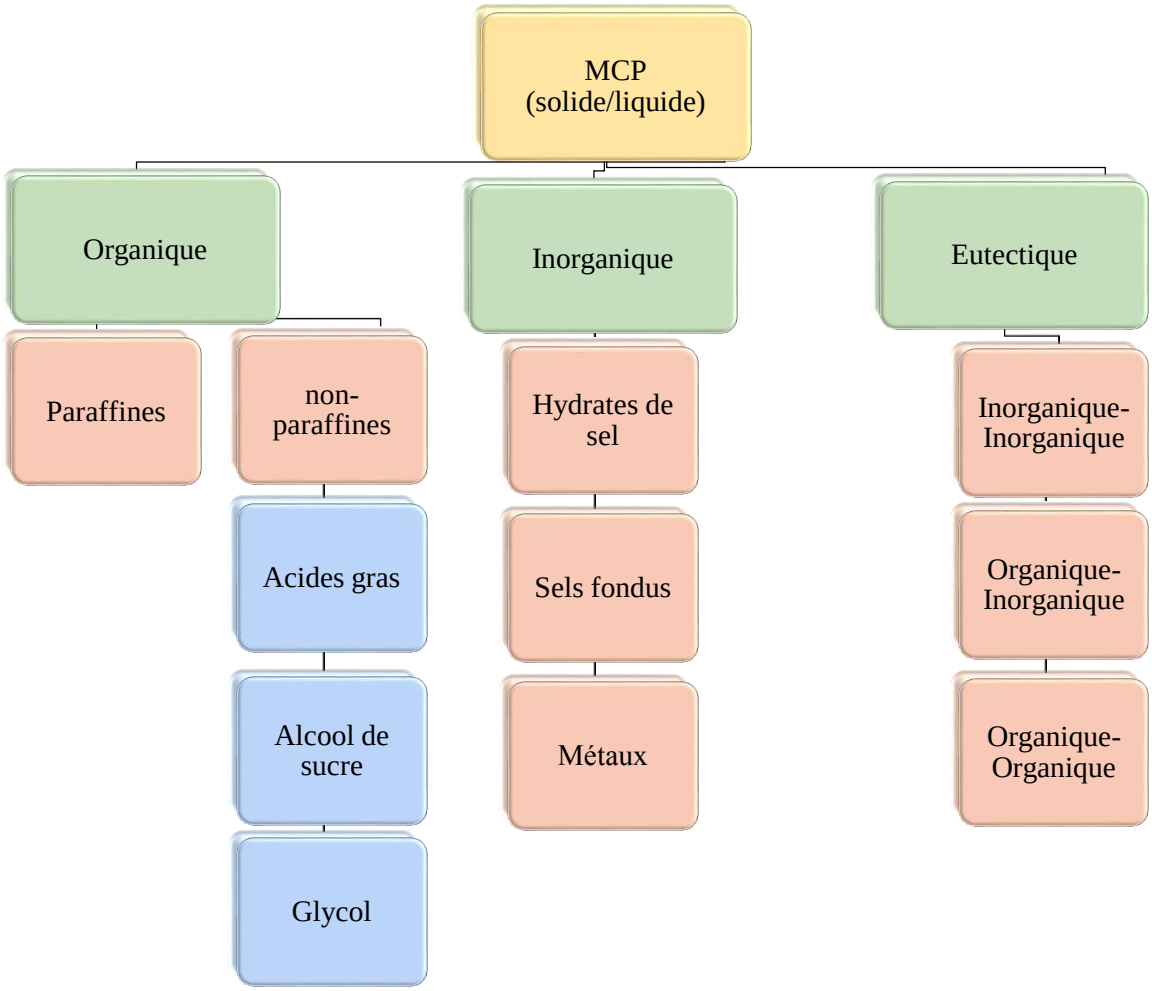


Figure 1-7 Catégories généralisées de MCP (solide/liquide)

Le stockage thermique de l'énergie fonctionne par cycle dans lequel nous pouvons observer trois phases :

- La charge : Cette phase correspond au moment où la source produit de l'énergie et que le milieu de stockage n'est pas encore saturé.

L'énergie thermique fournie au matériau permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. 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.

- Le stockage : Cette phase correspond au moment où le dispositif de stockage ne reçoit plus d'énergie venant de la source (soit car la source n'émet plus, soit car le système de stockage est plein) et que le bâtiment ne demande pas d'énergie du système de stockage. . Cette énergie est stockée à la température de charge.

- La décharge : Cette phase correspond au moment où, afin de satisfaire ses besoins en énergie, le bâtiment puise dans le système de stockage. Ce dernier change à nouveau de phase à la même température durant le processus de charge et reprend son état initial.

La Figure (1-8) illustre les différentes étapes d'un système de stockage par chaleur latente [20, 9].

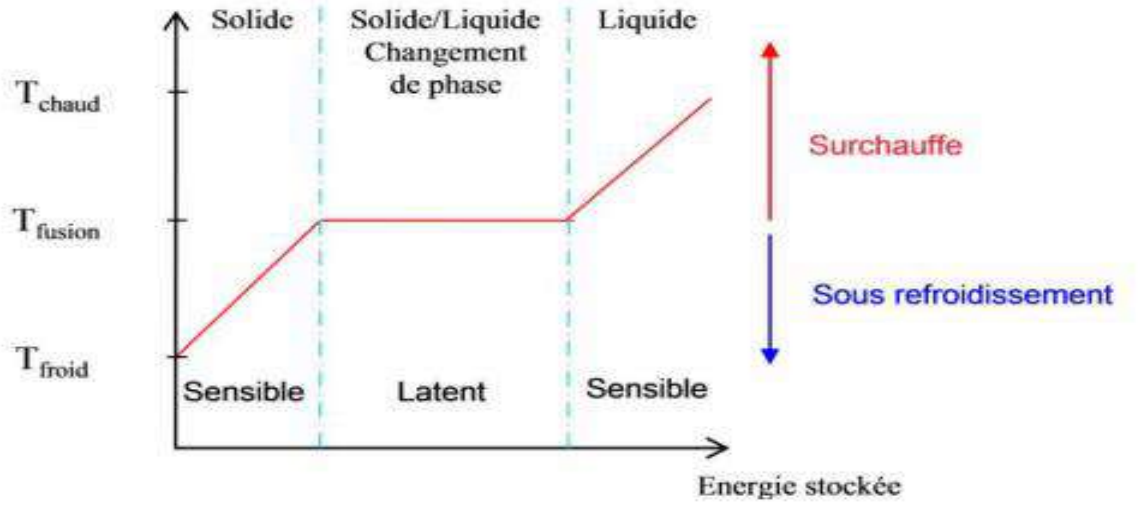


Figure 1-8 Les différentes étapes de stockage de la chaleur par un matériau en fonction de la température

La quantité d'énergie stockée dans le matériau à changement de phase est la somme de l'énergie sensible et de l'énergie latente suivant la relation suivante. La majeure partie de l'énergie stockée est comprise dans l'enthalpie de changement de phase du matériau.

$$Q = \int_{T_{froid}}^{T_{fusion}} m.C_{p,s}.dT + m.\Delta L + \int_{T_{ffusion}}^{T_{chaud}} m.C_{p,l}.dT$$

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 ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$), ΔL est l'enthalpie infinitésimale de changement de phase ($J.Kg^{-1}$) et dT est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K).

L'utilisation du stockage par chaleur latente permet de réduire les volumes de stockage par rapport au stockage par chaleur sensible et d'avoir des températures de travail isothermes, en charge et en décharge.

a) **Avantages :**

- Pallie le décalage entre la production de chaleur fatale (récupération d'énergie) et les besoins en chaleur sur le site (utilisation de l'énergie récupérée)
- Température de décharge stable
- Densité énergétique importante par rapport au stockage sensible
- Chimiquement stable
- Non toxique

b) **Inconvénients :**

- Faible conductivité thermique ($\lambda \ll 0.5W.m^{-1}.K^{-1}$) limitant les vitesses de charge et de décharge et imposant de grandes surfaces d'échange
- Durée de stockage limitée (pertes thermiques)
- Température de fusion limitée

- Coûts relativement importants comparés au stockage sensible

1.4.3 Stockage thermochimique

Les systèmes de stockage par voie thermochimique sont basés sur une réaction thermochimique renversable 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 maitriser, 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 [1].

a) Avantages :

- Vaste gamme de température de stockage : allant du froid jusqu'à 250°C
- Densité énergétique élevée par rapport aux autres systèmes de stockage
- Possibilité de transporter la chaleur ou le froid stocké
- Non toxique et non néfaste pour la santé et l'environnement
- Faible chute d'efficacité au cours du temps

b) inconvénients :

- Complexité de la technologie et complexité d'intégration entre source et puits de chaleur
- Temps de charge long, limité par le transfert de masse dans le système

1.5 L'importance du stockage thermique

L'importance du stockage thermique par rapport aux autres technologies existantes, est illustrée dans la Figure (1-9) [16]. Elle montre que le stockage thermique permet la gestion de fortes puissances sur des périodes de longues durées.

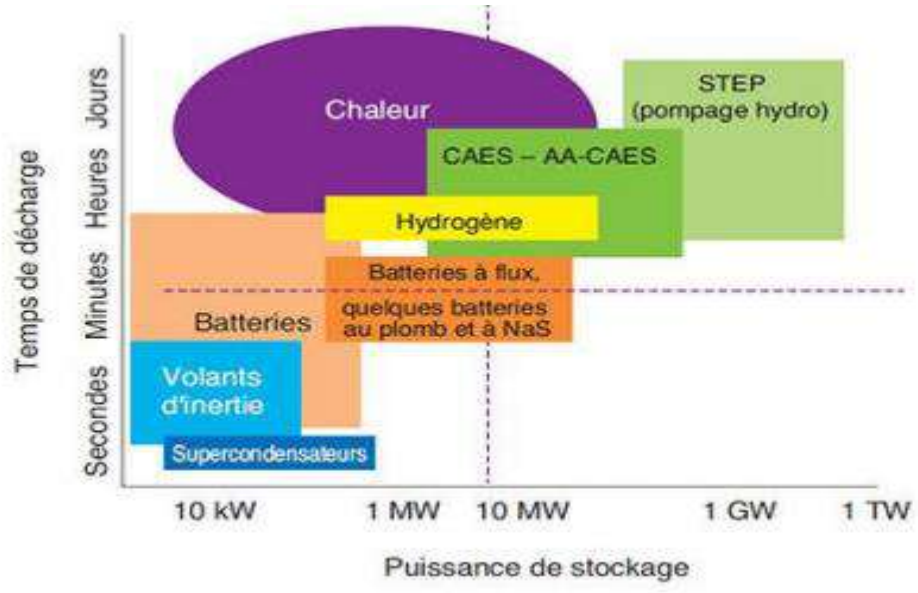


Figure 1-9 Différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance de stockage et du temps de décharge

1.6 Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique

Le Tableau (1-1) répertorie les caractéristiques des trois types de stockage d'énergie thermique présentés. Six paramètres fondamentaux ont été choisis : la densité énergétique, la température de stockage, la durée de stockage, le transport de l'énergie, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre du système. Actuellement le stockage de chaleur par voie sensible est le procédé de stockage thermique le plus mature.

Tableau 1-1 Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur [21]

		Stockage sensible	**Stockage latent**	**Stockage thermochimique**
Densité énergétique	Volumique	Faible $\sim 15-60 KWh.m^{-3}$	Moyenne $\sim 50-100 KWh.m^{-3}$	Elevée $\sim 100-500 KWh.m^{-3}$
	Massique	Faible $\sim 0.02-0.03 KWh.Kg^{-1}$	Moyenne $\sim 0.05-0.1 KWh.Kg^{-1}$	Haute $\sim 0.5-1 KWh.Kg^{-1}$
Température de stockage		Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge ou température ambiante
Durée de stockage		Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes thermiques)	Théoriquement Illimitée
Transport de l'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance théoriquement illimitée [39]
Maturité		Echelle industrielle ($20 MWe$)	Echelle pilote ($100 KWth$)	Echelle laboratoire ($1-5 KWth$)
Technologie		Simple	Moyenne	Complexe
Avantages du matériau de stockage		Bon marché, simple à contrôler	Densité énergétique élevée, température isotherme	Densité énergétique élevée

Inconvénients		Grand volume, faible densité énergétique	Cristallisation, matériaux chères, corrosion	Mauvais transfert de chaleur à sorption

1.7 Fluides de transfert de chaleur

Un fluide caloporteur également appelé le fluide de transfert de chaleur (FTC) est un fluide qui permet le transport de chaleur d'un endroit à un autre. Il permet de faire le lien entre le récepteur solaire et le groupe de puissance en transférant la chaleur du premier au second.

Le FTC doit avoir les propriétés suivantes : un point de solidification au voisinage de la température ambiante, des propriétés thermiques et thermo- physiques élevées pour favoriser les transferts de chaleur dans le récepteur solaire et pour participer pleinement au processus de stockage. Une viscosité plus faible possible pour limiter la puissance de la pompe, une corrosivité négligeable avec les matériaux de contact (tube et réservoir) et les matériaux de stockage, une faible toxicité, inflammabilité et explosivité pour éviter tout incident malencontreux durant l'utilisation, un respect à l'environnement, et une disponibilité en grande quantité pour ne pas être un frein au développement des centrales solaires.

Le Tableau (1-2) compare les différentes caractéristiques de l'air avec celles du fluide synthétique et végétal.

Tableau 1-2 Comparaison de l'air avec le Therminol VP1 et l'huile végétale de colza

Fluide caloporteur	Therminol VP1	Huile de Colza	Air
Composition	73.5% oxyde de diphényle et 26.5 % de biphényle	Acides gras	$21\%O_2$ $78\%N_2$ 1% d'autres gaz
Température de solidification	12^oC	-21^oC	-
Température maximale d'utilisation	400^oC	250^oC	Très élevée
Pression de vapeur	$10.9 bars$ à 400^oC	$0 bar$ à 300^oC	$1.01 bars$ à 100^oC
Capacité de stockage thermique (250^oC)	1.89 MJ / m^3.K	2.02 MJ / $m^3.k$	0.70 MJ / $m^3.k$
Conductivité thermique (250^oC)	0.106 W / $m.K$	0.139 W / m.K	0.042 W / m.K
Viscosité dynamique (250^oC)	0.29 mPa.s	2.5 mPa.s	2.26 10^{-5} kg.$m^{-1}.s^{-1}$
Compatibilité chimique	-	bonne	Très bonne
Coût d'investissement	5.7 €.kg^{-1}	0.8 €.kg^{-1}	Nul
Disponibilité	Faible	Elevée	Partout

GES (Gaz à effet de serre)	$3kg\ eq\ CO_2 / m^2.an$	$2kg\ eq$ $CO_2 / m^2.an$	Nul
Dangerosité	Elevée	Faible	Nulle

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

a) 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)

b) Inconvénients :

- Encombrement
- Pertes d'énergie

1.8 Critères de choix et de conception de systèmes de stockage

Si la capacité thermique, qui est la quantité d'énergie stockée et restituée, est un point clé dans la conception d'un système de stockage, le choix de la technologie de stockage est crucial. Les critères de choix d'une technologie de stockage dépendent du besoin, auquel on associe un cahier de charges, des contraintes de réglementation, de coût et d'environnement... Figure (1-10)

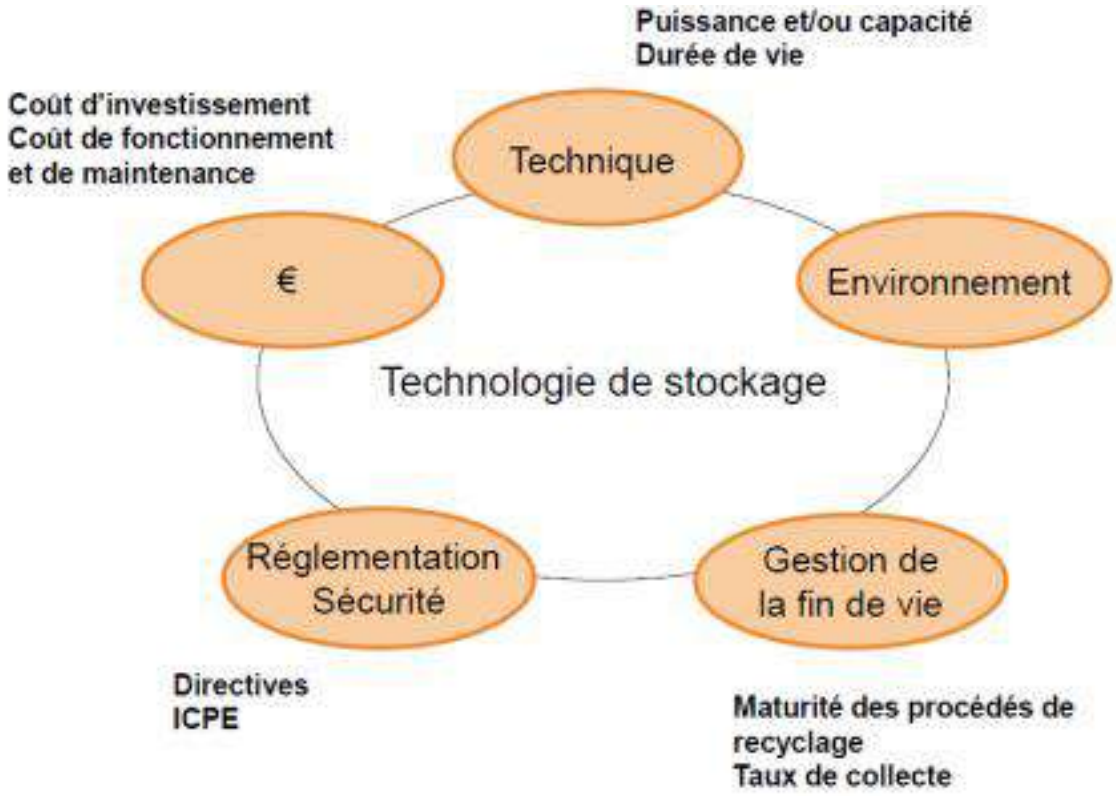


Figure 1-10 Critères de choix d'une technologie de stockage

Chapitre 2

Modélisation mathématique

Chapitre 2 Modélisation mathématique

2.1 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 [5], 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 [12], le transfert par conduction, convection et rayonnement Figure (2-1). 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. La convection intervient entre une surface et un fluide [18]. Enfin, la conduction se fait par propagation de chaleur au sein du corps concerné.

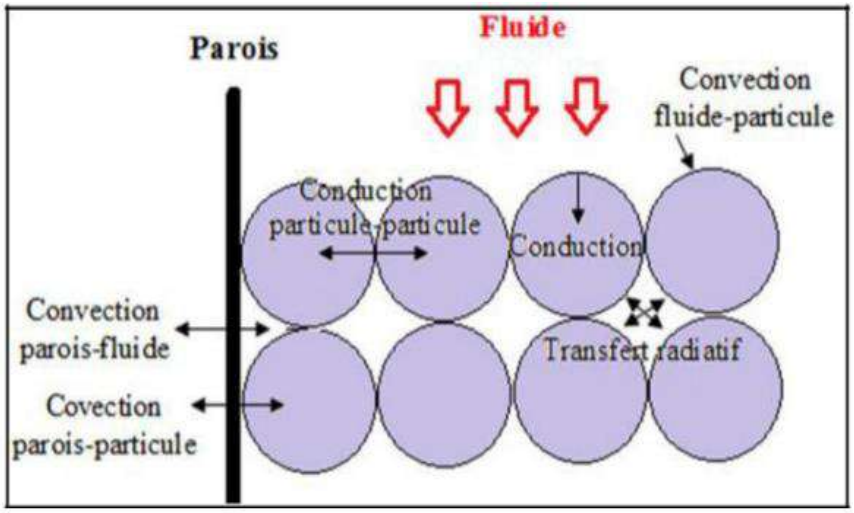


Figure 2-1 Echanges de chaleur au sein d'un matériau

2.2 Présentation du système physique

Le système physique de stockage thermique que nous souhaitons modéliser est représenté schématiquement par la Figure (2-2) [32]. Le concept du système étudié consiste en un capteur solaire à air, l'unité de stockage thermique de l'énergie par chaleur latente (LHTES), un ventilateur et les conduits.

.

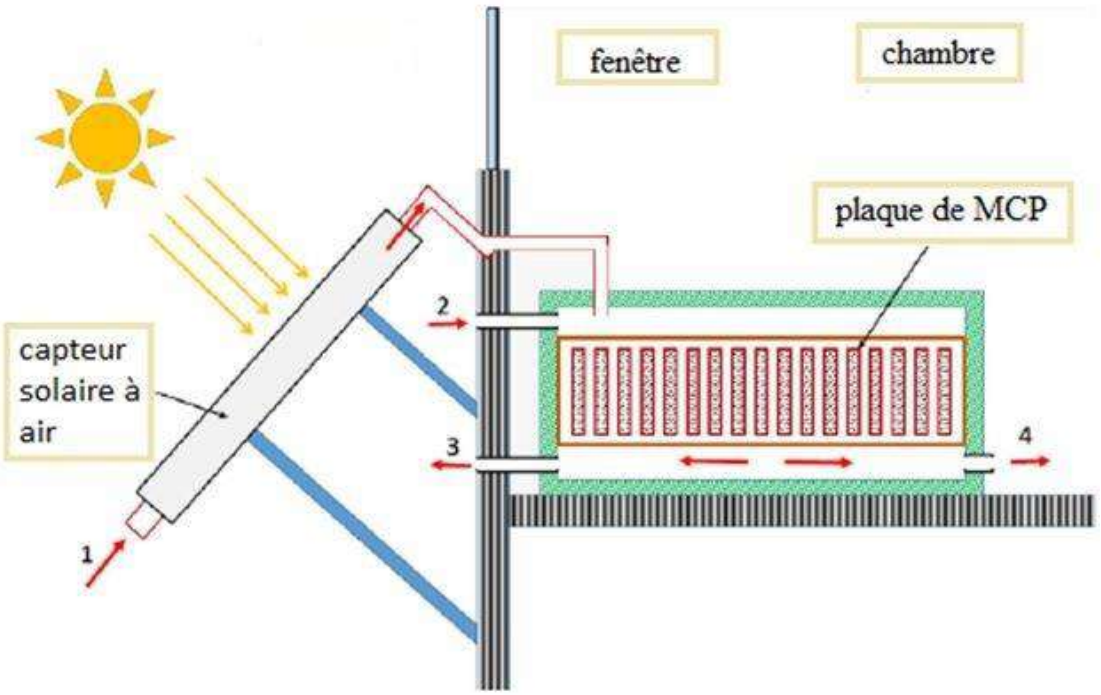


Figure 2-2 Schéma du réservoir de stockage

2.3 Mode de fonctionnement du système

Le système a deux modes de fonctionnement de base ; le mode chauffage (saison de chauffage) et le mode de refroidissement (saison de refroidissement).

En mode chauffage, le stockage thermique est chargé pendant la journée. L'air extérieur entre dans le capteur solaire au (point 1) et s'écoule vers l'unité LHTES pour chauffer le fluide caloporteur (eau) .Ce dernier dégage de la chaleur et fait fondre le MCP. Du coucher au lever du soleil, ou lorsque l'intensité du rayonnement solaire est insuffisante, la chaleur stockée dans l'unité LHTES peut être utilisée pour chauffer l'air, le MCP se solidifie et dégage sa chaleur. Cette chaleur est ensuite fournie à l'air de la pièce à la température qui réduit le risque d'inconfort thermique (point 4).

Le fonctionnement du système en mode refroidissement se compose de deux cycles consécutifs. Lors du premier cycle, le rejet de la chaleur de l'unité LHTES est réalisé la nuit. L'air frai extérieur est fourni à l'unité LHTES par l'ouverture de la façade (point 2) pour évacuer la chaleur du MCP qui se solidifie et stocke ainsi le froid. L'air peut ensuite être

fourni à la pièce pour le refroidissement nocturne (point 4) ou redirigé vers l'extérieur (point 3). Le deuxième cycle est utilisé pendant la journée lorsque la chaleur extérieure pénètre dans l'unité LHTES et la demande de refroidissement se produit. L'air extérieur est refroidi dans l'unité LHTES avant d'entrer dans la pièce au (point 4).

2.4 Hypothèses simplificatrices de base

La modélisation numérique du système est basé sur les hypothèses suivantes :

- Les parois de l'unité sont adiabatiques.
- L'influence de la paroi de la cuve est négligée.
- Le phénomène et monodimensionnel.
- La vitesse moyenne de l'écoulement du fluide est constante dans tout le stock.
- L'échange par rayonnement est négligé.
- Le coefficient d'échange par convection entre le solide et le fluide supposé constant et indépendant de la température.
- Les gradients de températures sont faibles à l'intérieur des plaques.
- les caractéristiques thermo-physiques du fluide et des plaques sont constantes dans tout le stock.
- les caractéristiques thermochimiques sont constantes.
- la porosité est uniforme.

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

2.5 Bilan thermique

Nous nous intéressons à l'évolution en fonction du temps des températures moyennes de l'air et des plaques pendant le temps dt .

Le bilan thermique au niveau de fluide s'écrit :

$$\varepsilon\rho_f C_{p_f}\frac{\partial T_f(x,t)}{\partial t}+\varepsilon u_f\rho_f C_{p_f}\frac{\partial T_f(x,t)}{\partial x}=\varepsilon\lambda_f\frac{\partial^2 T_f(x,t)}{\partial x^2}+ah(T_s(x,t)-T_f(x,t)) \quad (1)$$

Le bilan thermique au niveau de solide s'écrit :

Les modules de stockage compact, lorsqu'ils sont traversés 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 (h le coefficient de transfert de chaleur par convection)

$$(1-\varepsilon)\rho_s C_{p_s}\frac{\partial T_s(x,t)}{\partial t}=(1-\varepsilon)\lambda_s\frac{\partial^2 T_s(x,t)}{\partial x^2}+ah(T_f(x,t)-T_s(x,t)) \quad (2)$$

2.6 Méthode de résolution des équations

La discrétisation des équations (1) et (2) à partir d'un maillage spatial et temporel se fait en utilisant un schéma purement implicite des différences finies.

Soulignons les discrétisations spatiales de la fonction $T(x_i, t_n)$ de premier et deuxième ordre, qui sont données respectivement par :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_i^{n+1} = \frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{\Delta x}$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_i^{n+1} = \frac{T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2}$$

La discrétisation temporelle peut s'écrire, selon le schéma implicite comme suit :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i^{n+1} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^{n}}{\Delta t}$$

L'intervalle $[0, L]$ est discrétisé en $N+1$ nœuds. Notons T_i^n la température au nœud $x_i = i\,\Delta x$ et à l'instant $t_n = n\Delta t$.

(i variant de 0 à N et n variant de 0 à M) régulièrement espacés. Notons $\Delta x = \frac{L}{N}$ le pas d'espace et $\Delta t = \frac{T}{M}$ le pas de temps.

Le système des équations d'énergie discrétisées s'écrit :

$$\begin{cases} \varepsilon\rho_f C_{p_f}\left[\frac{T_{f_i}^{n+1} - T_{f_i}^{n}}{\Delta t}\right] + \varepsilon u_f \rho_f C_{p_f}\left[\frac{T_{f_i}^{n+1} - T_{f_{i-1}}^{n+1}}{\Delta x}\right] = \varepsilon\lambda_f\left[\frac{T_{f_{i+1}}^{n+1} - 2T_{f_i}^{n+1} + T_{f_{i-1}}^{n+1}}{\Delta x^2}\right] + ah(T_{s_i}^{n+1} - T_{f_i}^{n+1}) \\ (1-\varepsilon)\rho_s C_{p_s}\left[\frac{T_{s_i}^{n+1} - T_{s_i}^{n}}{\Delta t}\right] = (1-\varepsilon)\lambda_s\left[\frac{T_{s_{i+1}}^{n+1} - 2T_{s_i}^{n+1} + T_{s_{i-1}}^{n+1}}{\Delta x^2}\right] + ah(T_{f_i}^{n+1} - T_{s_i}^{n+1}) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} T_{f_i}^{n+1}\left[\frac{A_c\rho_f C_{p_f} L}{N_x \Delta t} + A_c\rho_f C_{p_f}^2 \dot{m} + \frac{A_c ahL}{N_x \varepsilon} + \frac{2A_c\lambda_f N_x}{L}\right] = T_{f_i}^{n}\left[\frac{A_c\rho_f C_{p_f} L}{N_x \Delta t}\right] + T_{f_{i-1}}^{n+1}\left[A_c\rho_f C_{p_f}^2 \dot{m} + \frac{A_c\lambda_f N_x}{L}\right] + T_{f_{i+1}}^{n+1}\left[\frac{A_c\lambda_f N_x}{L}\right] + T_{s_i}^{n+1}\left[\frac{A_c ahL}{N_x \varepsilon}\right] \\ T_{s_i}^{n+1}\left[\frac{(1-\varepsilon)A_c\rho_s C_{p_s} L}{N_x \Delta t} + \frac{2(1-\varepsilon)A_c\lambda_s N_x}{L} + \frac{A_c ahL}{N_x}\right] = T_{s_i}^{n}\left[\frac{(1-\varepsilon)A_c\rho_s C_{p_s} L}{N_x \Delta t}\right] + T_{s_{i-1}}^{n+1}\left[\frac{(1-\varepsilon)A_c\lambda_s N_x}{L}\right] + T_{s_{i+1}}^{n+1}\left[\frac{(1-\varepsilon)A_c\lambda_s N_x}{L}\right] + T_{f_i}^{n+1}\left[\frac{A_c ahL}{N_x}\right] \end{cases}$$

2.7 Conditions initiales et aux limites

à $t = 0$, $\quad T_f(x, t=0) = T_s(x, t=0) = T_0$

à $x = 0$, $\quad T_f(x=0, t) = T_s(x=0, t) = T_{in}$

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

$$\frac{\partial T_f}{\partial x}(x = L, t) = \frac{\partial T_s}{\partial x}(x = L, t) = 0$$

La résolution de système des équations de bilan thermique est effectuée par l'algorithme de Thomas TDMA (The Tridiagonal Matrix Algorithm).

Chapitre 3

Résultats et discussions

Chapitre 3 Résultats et discussions

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les principaux résultats issus des équations de l'énergie qui sont considérées pour caractériser le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau de stockage. Les équations de l'énergie sont discrétiser par la méthode des différences finies schéma implicite. Un code de calcul a été développé en utilisant le logiciel du Matlab. Les résultats obtenus incluant les champs de température sont analysés et discutés

L'objectif principal de notre étude est d'évaluer la performance thermique du système à travers la variation des champs de température en régime transitoire suivant les hypothèses simplificatrices mets dans le chapitre précédent.

3.2 Résultats et interprétations

Les Figures (3-1) et (3-2) montrent respectivement les profils de la température du fluide et du solide en fonction du temps obtenus à différentes valeurs de débit.

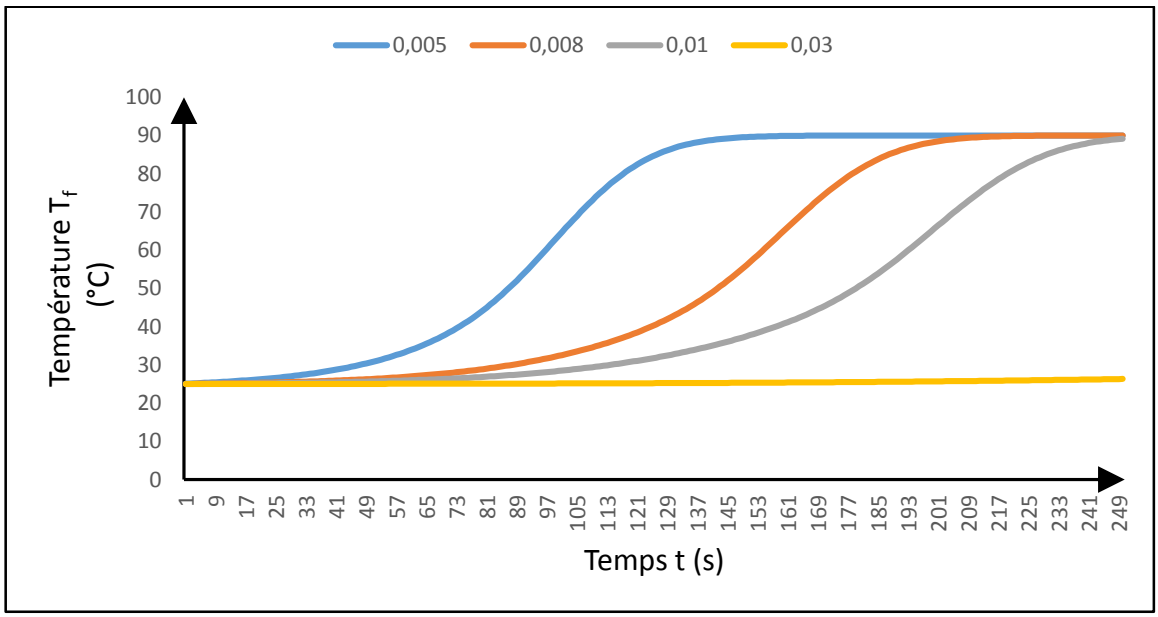


Figure 3-1 Profil de la température du fluide en fonction du temps pour différents débit ($\dot{m}$)

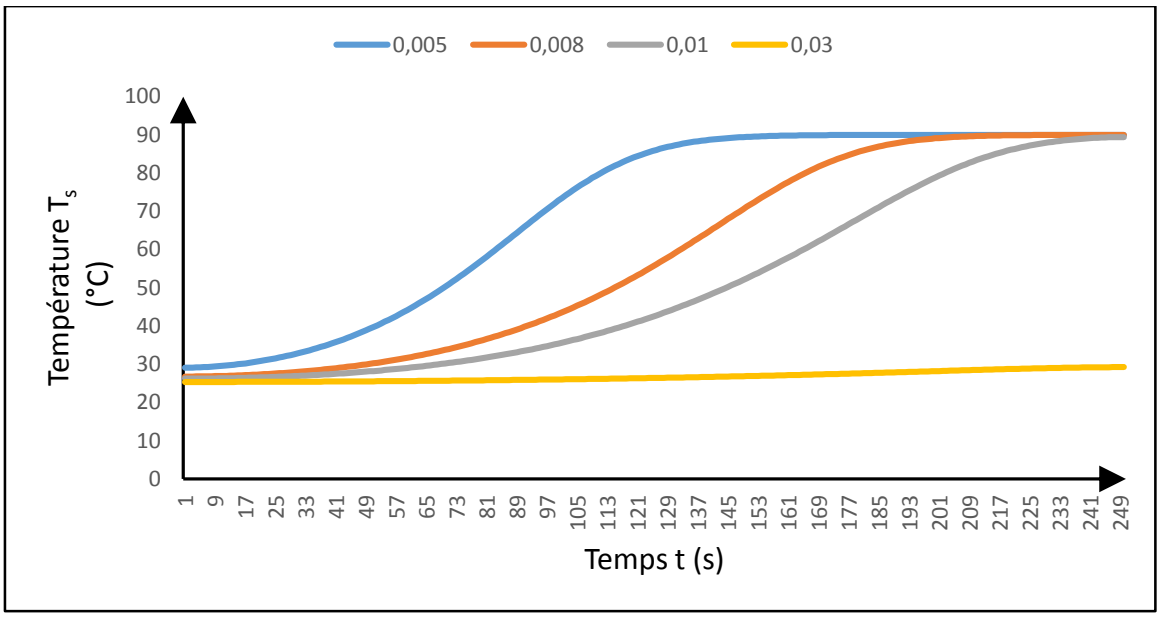


Figure 3-2 Profil de la température du solide en fonction du temps pour différents débit ($\dot{m}$)

On remarque que la température du fluide augmente initialement d'une façon lente après elle devient plus rapide à chaque fois que le débit diminue et elle se stabilise à une température de $90^{\circ}C$.

D'autre part, pour le grand débit, T_f évolue légèrement d'une façon inremarquable (elle reste presque constante).

Après que le fluide atteint la température correspondante à l'échauffement de MCP, la température de ce dernier commence aussi à augmenter de la même façon que l'évolution de T_f (début d'échauffement (charge)) jusqu'à la fusion complète de MCP (stockage de la chaleur). Pour les plus grands débits, le fluide ne s'échauffe pas et donc le MCP reste à son état solide.

La Figure (3-3.) montre l'évolution de T_f en fonction de la distance x pour déférents débits.

Pour l'évolution de T_s en fonction de x (ainsi en changeant le débit), on obtient la même allure, ce qui signifie que la distance x joue le même rôle que le temps.

Dans ce qui suit, l'allure de profil de température du fluide ou solide en fonction de x reste la même qu'en fonction de temps.

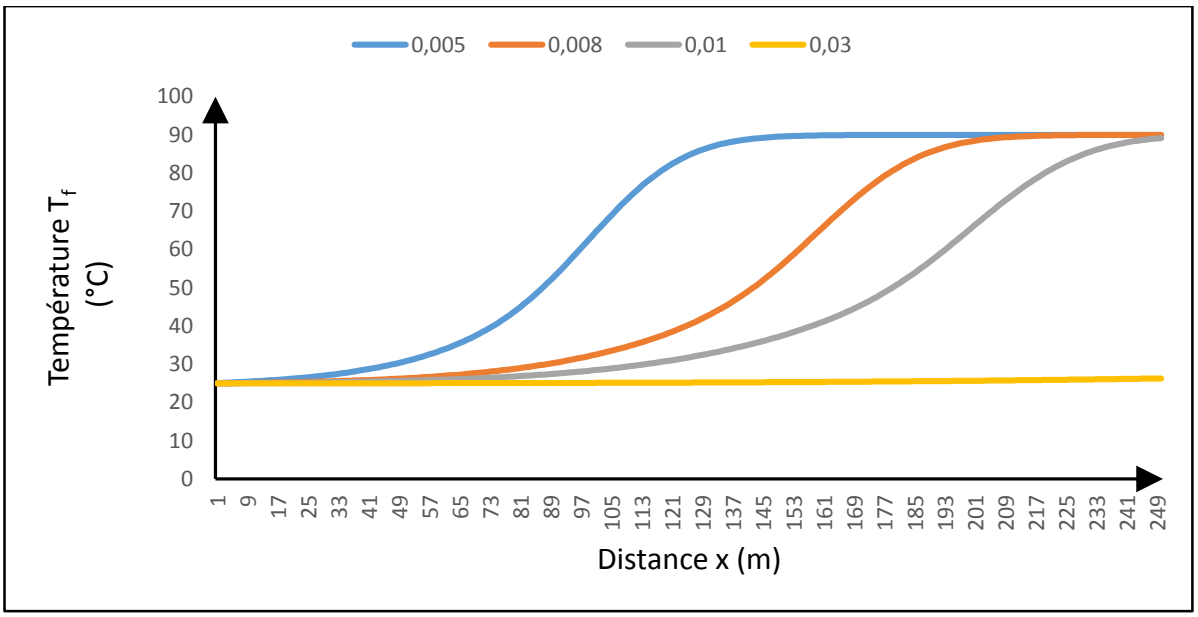


Figure 3-3 Profil de la température du fluide en fonction de la distance pour différents débits ($\dot{m}$)

Les Figures (3-4) et (3-5) montrent respectivement les profils de la température du fluide et du solide en fonction du temps obtenus à différentes valeurs de longueur.

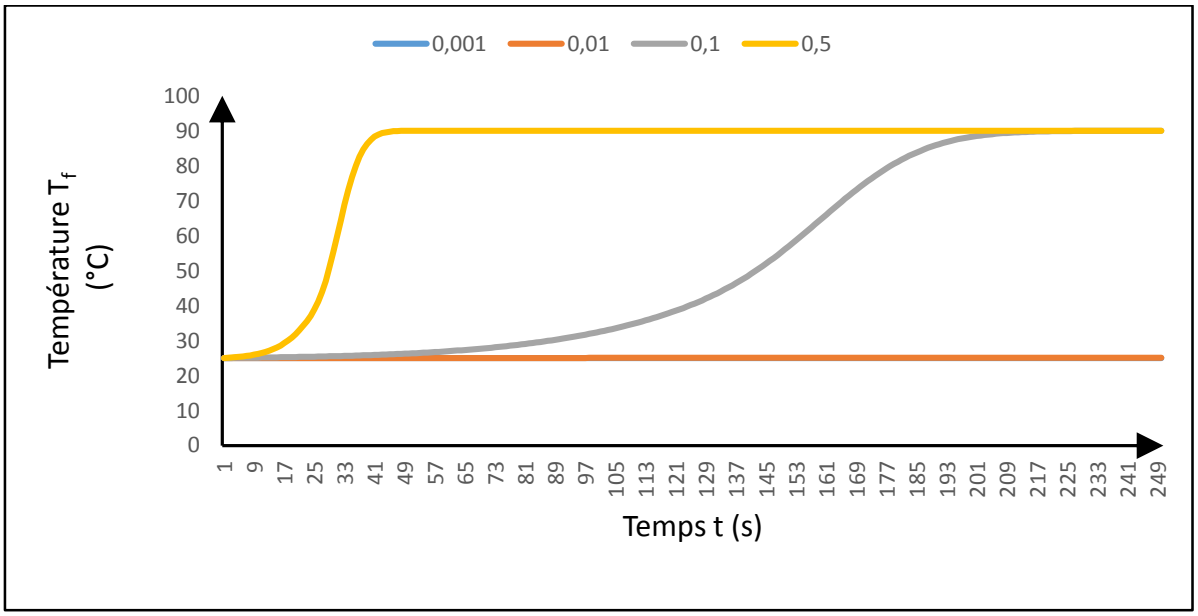


Figure 3-4 Profil de la température du fluide en fonction du temps pour différents longueur (L)

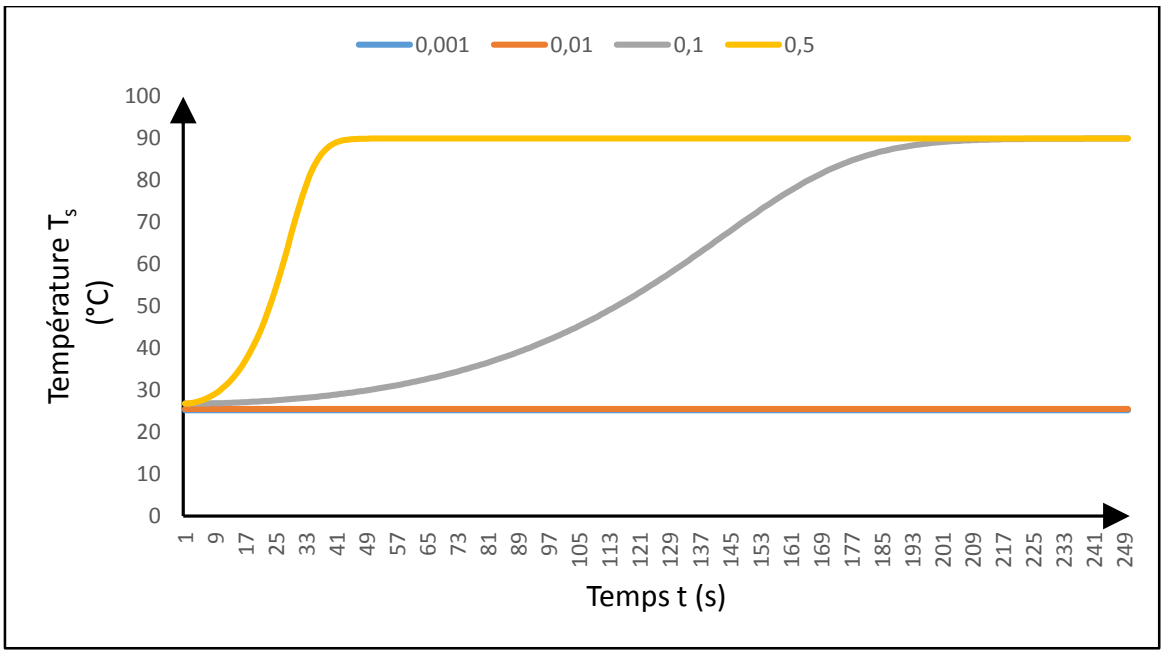


Figure 3-5 Profil de la température du solide en fonction du temps pour différents longueur (L)

On remarque que le profil de T_f augmente très rapidement en fonction du temps quand la longueur est grand afin de se stabiliser à $90^{\circ}C$, au temps qu'il évolue d'une manière moins rapide lorsque la longueur est moins grande et il reste presque constant pour les faibles longueurs.
Après que le fluide atteint la température correspondante à l'échauffement de MCP, la température de ce dernier commence aussi à s'augmenter de la même façon que l'évolution de T_f (début d'échauffement (charge)) jusqu'à la fusion complète de MCP (stockage de la chaleur). Pour des faibles longueurs, le fluide ne s'échauffe pas et donc le MCP reste à son état solide.

Les Figures (3-6) et (3-7) montrent respectivement les profils de la température du fluide et du solide en fonction du temps obtenus à différentes surfaces de contact.

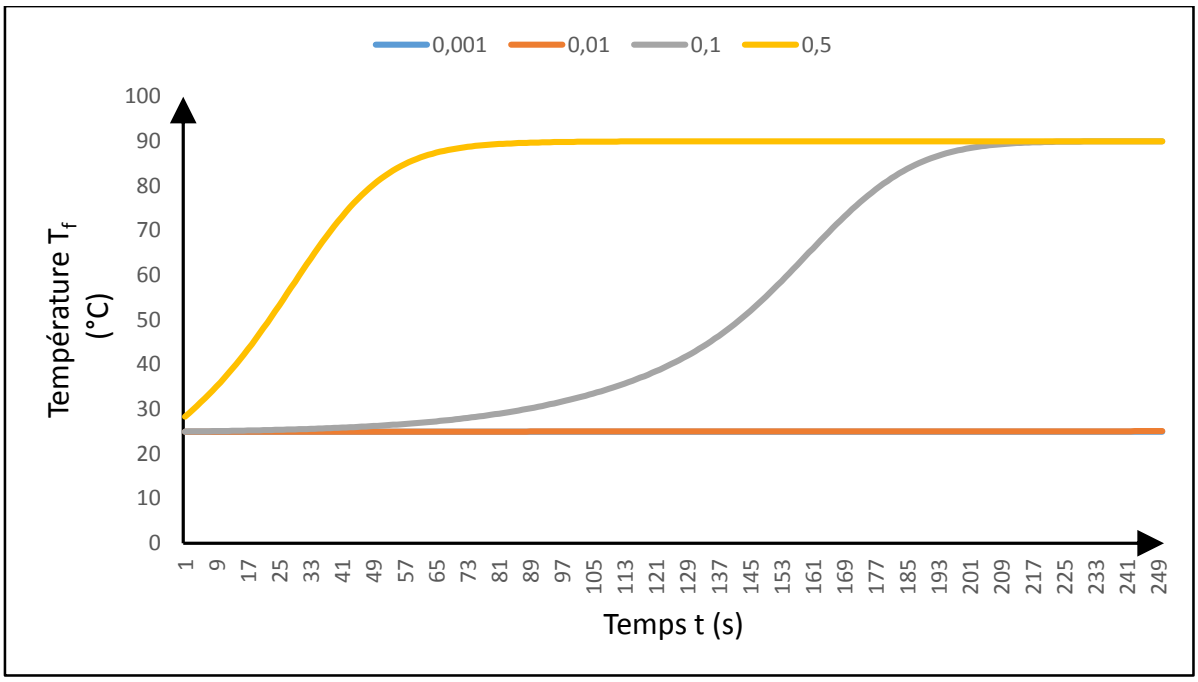


Figure 3-6 Profil de la température du fluide en fonction du temps pour différents surfaces de contact (A_c)

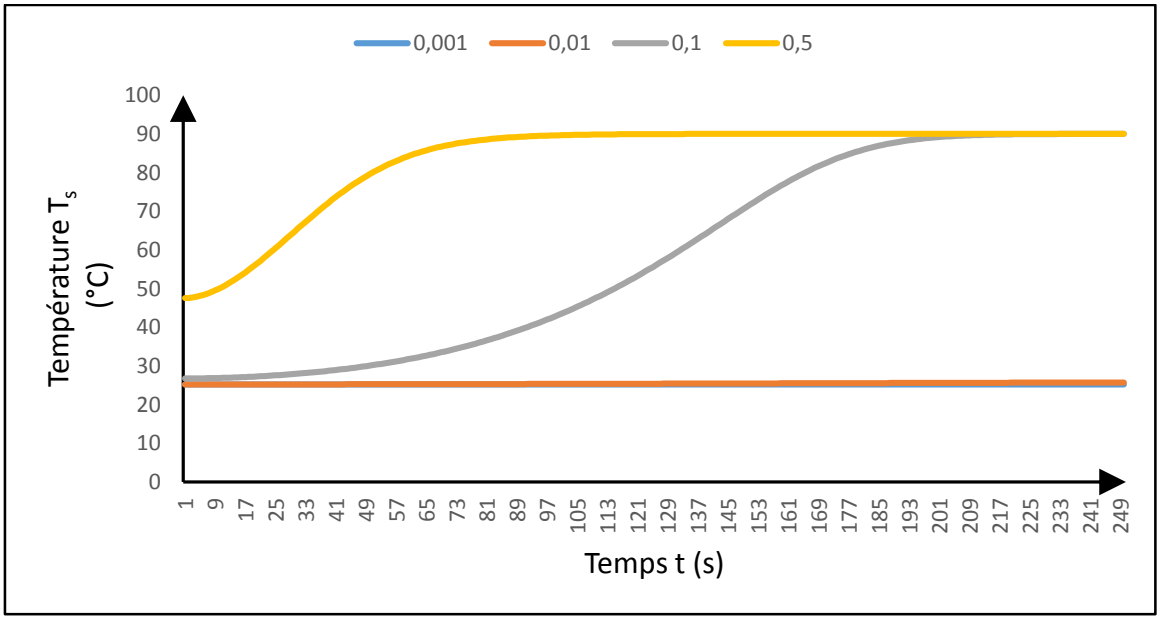


Figure 3-7 Profil de la température du solide en fonction du temps pour différentes surfaces de contact (A_c)

Pour les surfaces de contact, on remarque que l'évolution du profil de la température de fluide et de solide est presque similaire à celle de différentes valeurs de longueur ; sauf que lors la surface de contact soit plus grande que l'évolution de T_s se débute par une température de fusion d'environ $50^{\circ}C$ au contraire des autres profils qui se débutent à environ $25-30^{\circ}C$. Ce qui signifie que lorsque le contact entre solide/fluide soit grand, la température de fusion du solide augmente plus rapidement possible.

Les Figures (3-8) et (3-9) montrent respectivement les profils de la température du fluide et du solide en fonction du temps obtenus à différentes valeurs de porosité.

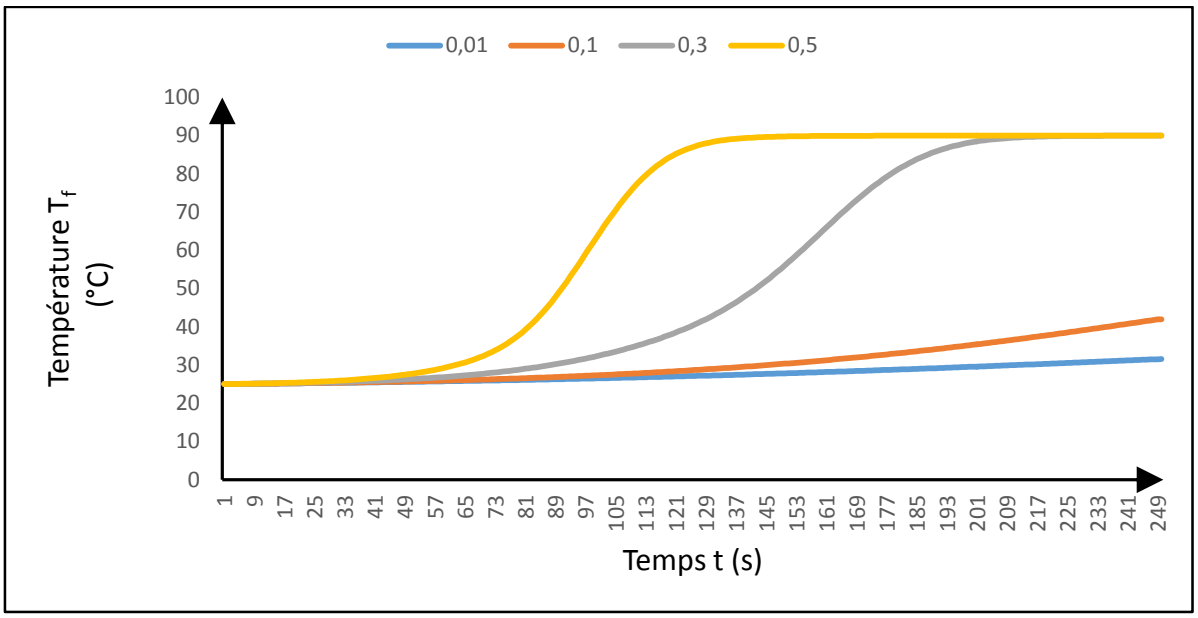


Figure 3-8 Profil de la température du fluide en fonction du temps pour différentes porosités (ε)

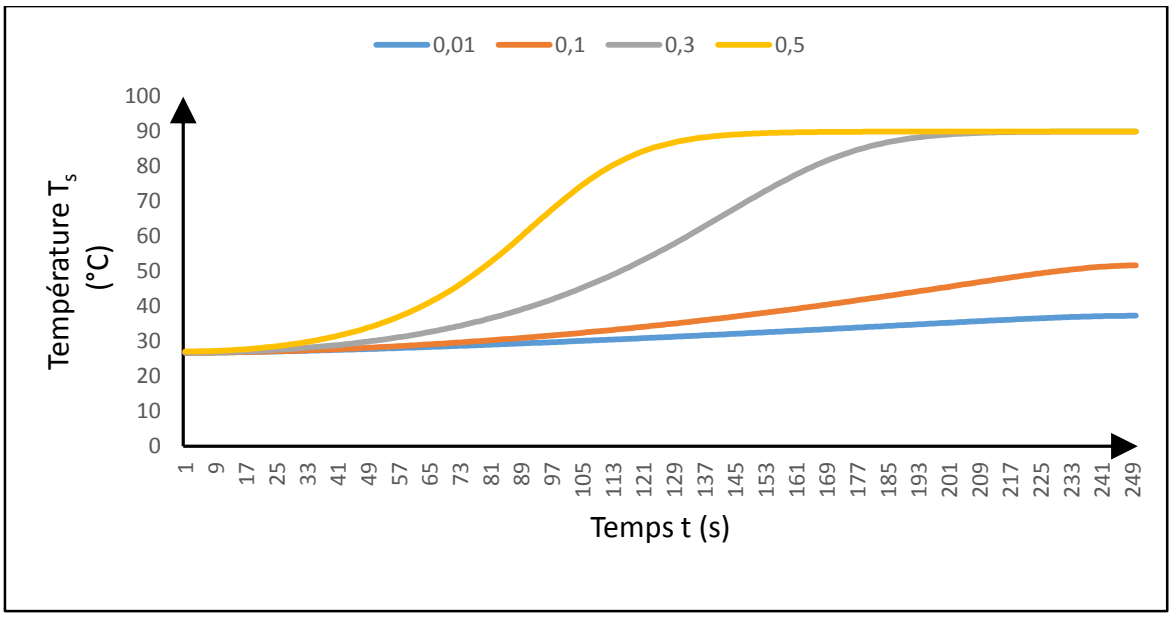


Figure 3-9 Profil de la température du solide en fonction du temps pour différentes porosités (ε)

On remarque que, les températures pour différentes porosités évoluent contrairement à l'évolution des températures pour différents débits ; dont l'augmentation des températures est proportionnelle à l'augmentation de porosité.
Quand la porosité est grande le fluide chaud remplit le total des pores et par la suite influe sur la température de MCP.

Les Figures (3-10) et (3-11) montrent respectivement les profils de la température du fluide et du solide en fonction du temps obtenus à différents nœuds.

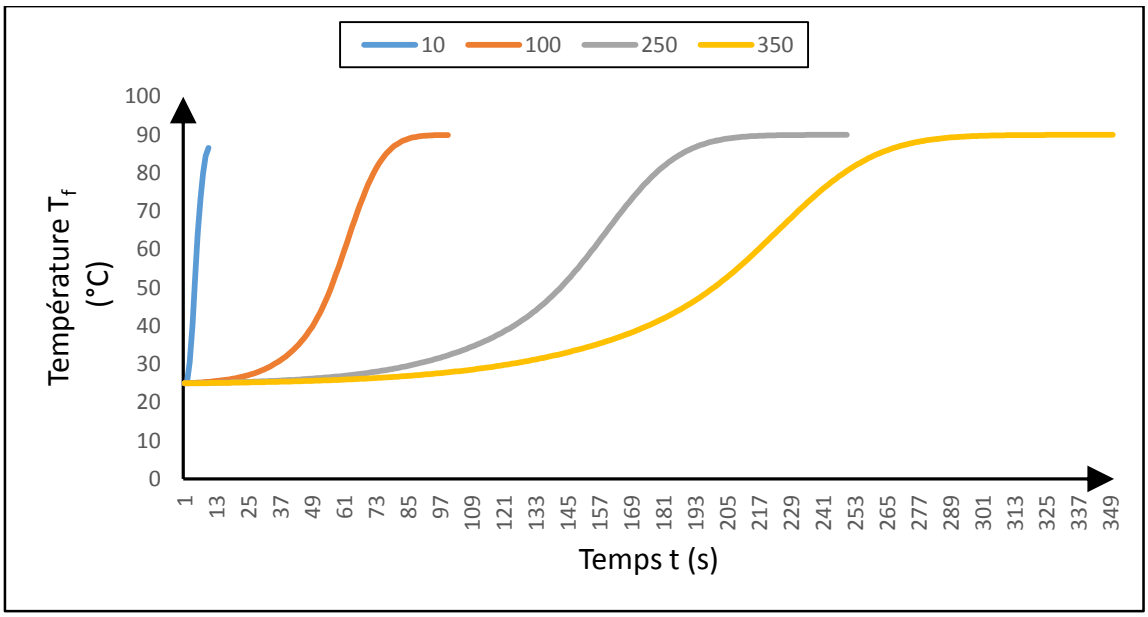


Figure 3-10 *Profil de la température du fluide en fonction du temps pour différents nœuds* $(N_x ; N_t)$

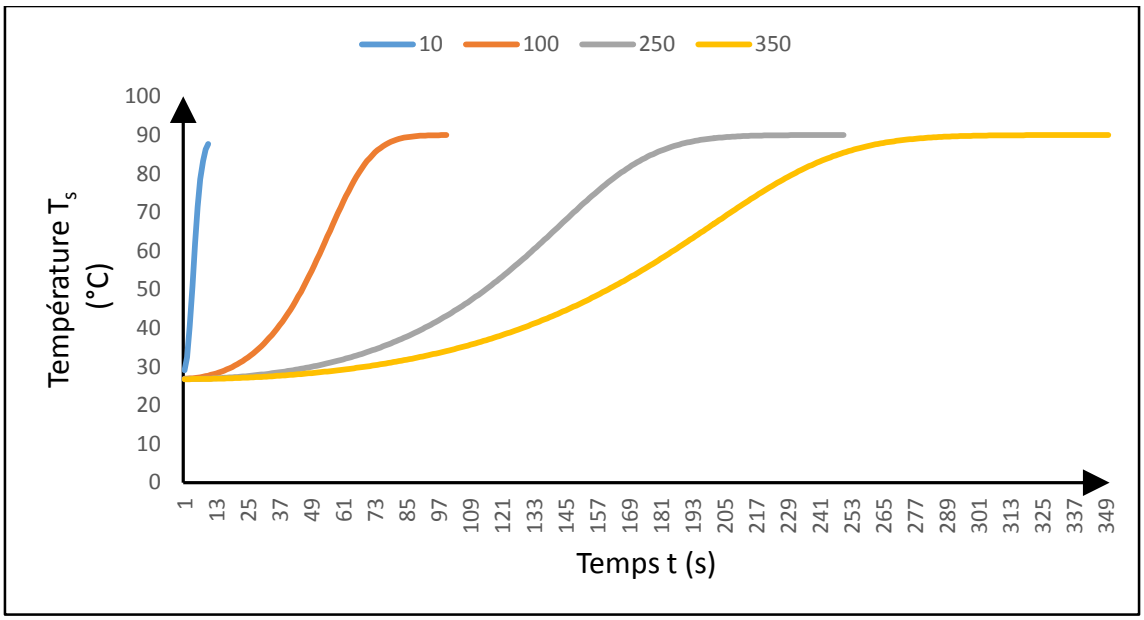


Figure 3-11 Profil de la température du solide en fonction du temps pour différents nœuds $(N_x ; N_t)$

On remarque que, le nombre des nœuds joue un rôle important pour l'évolution de la température. Lorsque le maillage est petit la température augmente très rapidement en fonction du temps, le fluide et le MCP n'ont pas besoin une longue durée pour s'échauffer tandis qu'ils ont besoin assez de temps pour un grand nombre de nœud.

Conclusion générale

Les résultats obtenus dans ce travail, nous ont conduits à conclure que le stockage de l'énergie thermique d'origine du soleil présente un impact positif sur la transition et l'efficacité énergétique et favorise l'insertion des énergies renouvelables dans le secteur industriel et domestique. Elles apportent aussi la sécurité et la flexibilité aux réseaux électriques et les bâtiments.

L'objectif principal de notre étude était de proposer un système de stockage de l'énergie solaire dans un immeuble résidentiel à Médéa. Pour ce faire, les équations de l'énergie sont considérées pour caractériser le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau de stockage. Les équations de l'énergie sont discrétiser par la méthode des différences finies schéma implicite. Un code source de calcul monodimensionnel a été développé en utilisant le logiciel du Matlab pour faciliter l'analyse thermique des phénomènes de stockage mise en jeu.

Bibliographie

[1] A. Gil, M. M. (2010). State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part1-Concepts, materials and modellization, Renew. Sust. *Energy Rev, 14*, 31–55.

[2] A. Kasaeian, L. b. (2017). Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings. *Energy and Building, 154*, 96–112. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.037

[3] A. Sharma, V. V. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13*, 318–345. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005

[4] A. Solé, L. M. (2013). Review of the T -history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM). *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26*, 425–436. doi:https://doi.org/10.1016/j.rs

[5] Alanis, E. S. (1978). Mesurement of rock pile heat transfer coefficient. *solar energy, 19*, 517-527.

[6] B.P. Jelle, S. K. (2017). Phase Change Materials for Application in Energy-Efficient Buildings. (E. Ltd, Éd.) doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101128-7.00003-4

[7] Barreneche C, F. A. (2015). Thermophysical characterization and thermal cycling stability of two TCM: CaCl2 and zeolite. *Appl Energy*, 726–730.

[8] C. Zeng, S. L. (2017). Adaptability research on phase change materials based technologies in. *Renewable and Sustainable Energy, 73*, 145–158. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.117

[9] D. Laing, S. (2015). , "4 - Using concrete and other solid storage media in thermal energy storage (TES) systems," in Advances in Thermal Energy Storage Systems. (L. F. Cabeza, Éd.) *Woodhead Publishing*, 65-86.

[10] F. Bai, C. X. (2011). "Performance analysis of a two-stage thermal energy storage system using concrete and steam accumulator. *Applied Thermal Engineering, 31*, 2764-2771.

[11] G. P. Henze, M. K. (2003). Predictive Optimal Control of Active and Passive Building Thermal Storage Inventory. University of Nebraska ,Lincoln, University of Colorado, Boulder, Tech. Rep. Ap. .

[12] H. Torab, D. .. (1985). optimisation of packed bed thermal energy storage units solar Engineering .

[13] Hasnain, S. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management, 39*, 1127-1138.

[14] Hasnain, S. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part II: cool thermal storage. *Energy Conversion and Management, 39*, 1139-1153.

[15] J. Heier, C. B. (2015). Combining thermal energy storage with buildings. *A review, Renewable and Sustainable Energy, 42*, 1305–1325. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.031

[16] Les technologies actuelles de stockage et leur état de maturité. (2015). Récupéré sur http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Les-cles-pour-comprendre/ Le-stockage-massif-de-l-energie/Les-technologies-actuelles-de-stockage-et-leur-etatde-maturite#4

[17] M. He, L. Y. (2019). Preparation, thermal characterization and examination of phase change materials (PCMs) enhanced by carbon-based nanoparticles for solar thermal energy storage. *Journal of Energy Storage, 25*. doi:https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100874

[18] M.Berdja. (2007). modélisation et simulation numérique d'un matériau à changement de phase dans une cavité rectangulaire. département de mécanique, blida.

[19] M.Rosen, I. D. (2011). Thermal energy storage: systems and applications. Dans J. W. Sons (Éd.).

[20] Mehling H, C. L.-t.-2., & 2008. (s.d.).

[21] Motahar, S. (2020). Experimental study and ANN-based prediction of melting heat transfer in a uniform heat flux PCM enclosure. *Journal of Energy Storage, 30*. doi:https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101535.

[22] N. Aslfattahi, R. S. (2020). Experimental investigation of energy storage properties and thermal conductivity of a novel organic phase change material/MXene as A new class of nanocomposites. *Journal of Energy Storage, 27*. doi:https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101115

[23] O. Imghoure, N. B. (2021). Performance evaluation of phase change materials for thermal comfort in a hot climate region. *Applied Thermal Engineering, 186*, 16. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.116509

[24] O. Maaliou, B. M. (1985). Optimization of thermal energy storage in packed columns. *Solar energy, 34*, 35-41.

[25] P. Devaux, M. F. (2017). Benefits of PCM underfloor heating with PCM wallboards for space heating in winter. *Applied Energy, 191*, 593–602. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.060

[26] Q. Wang, R. W. (2018). Parametric analysis of using PCM walls for heating loads reduction. *Energy and Buildings, 172*, 328–336. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.012

[27] R. Zeinelabdein, S. O. (2018). Critical review of latent heat storage systems for free cooling in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82*, 2843–2868. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.046

[28] S. Jeong, S. W. (2019). An experimental study on applying organic PCMs to gypsumcement board for improving thermal performance of buildings in different climates. *Energy an Buildings, 190*, 183–194. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.037

[29] S.A. Memon, H. C. (2015). Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete. *Applied Energy, 139*, 43–55. doi:https://doi.org/10.1016/j.apen

[30] S.G. Ranjbar, G. R. (2020). Fabrication and characterization of phase change material-SiO2 nanocomposite for thermal energy storage in buildings. *Journal of Energy Storage, 27*. doi:https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101168

[31] S.M. Wang, P. M. (2018). Experimental investigation of the daily thermal performance of a mPCM honeycomb wallboard. *Energy and Buildings, 159*, 419–425. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.080

[32] Uroš Stritih, P. C. (2018). PCM thermal energy storage in solar heating of ventilation. *Sustainable Cities and Society, 37*, 104-115.

[33] V.V. Tyagi, D. B. (2007). PCM thermal storage in buildings: A state of art, Renewable and Sustainable. *Energy, 11*, 1146–1166. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.002

[34] W. Yang, R. X. (2019). Experimental and numerical investigations on the thermal performance of a borehole ground heat exchanger with PCM backfil. *Energy*. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.172

[35] X. Bao, Y. T. (2019). Development of high performance PCM cement composites for passive solar buildings. *Energy and Buildings, 194*, 33–45. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.011

[36] Y. Cui, J. X. (2015). Review of Phase Change Materials Integrated in Building Walls for Energy Saving. , *Procedia Engineering, 121*, 763–770. doi:https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.027

[37] Y. Song, C. L. (2020). Optimization of the phase-change wallboard test method: Experimental and numerical investigation. *Journal of Energy Storage, 30*. doi:https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101559

[38] Y. Zhang, J. Z. (2019). Preparation of hydrophobic lauric acid / SiO 2 shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage. *Journal of Energy Storage, 21*, 611–617. doi:https://doi.org/10.1016/j.est.2018.12.022

[39] Y.KATO. (2006). Possibility of chemical heat storage in thermal energy transportation market," in First Workshop of IEA/ECES Annex 18. *1*.