

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK
BEN YAHIA - JIJEL**



**FACULTE DES SCIENCES EXACTES ET
INFORMATIQUE
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

N° de Série :

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Physique

Spécialité : physique des matériaux

Thème

**Intégration des matériaux a changement de phase (MCPs) comme système
de stockage de la chaleur**

Présenté Par : Deffass Meriem

Soutenu le : /7 /2021

Devant le jury :

Président :	Brihi Nouredine	Prof	Université de Jijel
Encadreur :	Laouer Abdelghani	MCA	Université de Jijel
Examineur :	Boumaiza Ahcene	Prof	Université de Jijel

Année Universitaire 2020-2021

REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le tout puissant et miséricordieux, qui Nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En début je remercie mes chers parents qui m'encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Je tiens mes remerciements à mon promoteur Laouer Abdelgani pour son aide, sa disponibilité ainsi que ses encouragements durant toute la période de la préparation de notre mémoire de fin de cycle. Je remercie également tous les membres du jury Mr. Brihi Noureddine et Mr. Boumaiza Ahcene pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect. Je remercie également le professeur Bouzerara Ferhat pour son soutien et ses encouragements.

Je tiens également à remercier les employés qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de nos travaux. Nous tenons également à souligner la contribution de tous les enseignants de notre département.

Merci à tous.



Dédicaces

Merci à Dieu, qui nous a permis de compléter cette mémoire et de compléter cette modeste recherche scientifique. Que je dédie à :

ma mère bien-aimée, qui m'a entouré de ses prières et m'a encouragé à travailler et à persévérer, et à mon cher père, qui a travaillé dur pour mon éducation.

A mes chers frères : Sarah, Ahmed, Isaac, Youssef.

Merci et merci à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Meriem

REMERCIEMENT**DEDICACES****LISTE DES FIGURES****LISTE DES TABLEAUX****NOMENCLATURE****INTRODUCTION GENERALE..... 1****CHAPITRE I : SYSTEME DE STOCKAGE D'ENERGIE THERMIQUE**

I.1 Introduction 3

I.2 Nécessite et avantage de système de stockage d'énergie..... 3

I.3 Types de systèmes de stockage d'énergie thermique..... 4

I.3.1 Stockage par chaleur sensible..... 5

I.3.1.1 Stockage par un matériau liquide..... 6

I.3.1.2 Stockage par un matériau solide..... 6

I.3.2 Stockage par chaleur latente..... 7

I.3.3 Les avantage du stockage par chaleur latente..... 9

I.3.4 Stockage par voie thermochimique..... 10

I.3.5 Stockage combiné..... 11

I.4 Comparaison entre les différents types de stockage d'énergie thermique..... 12

I.5 Applications des systèmes de stockage d'énergie thermique..... 13

I.5.1 Chauffage solaire..... 13

I.5.2 Application dans le bâtiment..... 14

I.5.3 Transport des matériaux sensibles à la température..... 14

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE..... 15

CHAPITRE II : GENERALITE SUR LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE

II.1 Définition..... 16

II.2 Principe de fonctionnement des MCP..... 16

II.3 Classification des matériaux a changement de phase..... 17

II.3.1 Les MCP inorganiques..... 17

II.3.2 Les MCP organiques..... 19

II.3.3 Les MCP Eutectiques..... 19

II.4 Caractéristiques de quelques MCP..... 20

II.5 Comparaison entre les différents types de MCP.....	22
II.6 Choix d'un MCP.....	22
II.7 Différentes formes des matériaux a changement de phase.....	23
II.7.1 Micro encapsulation.....	24
II.7.2 Macro encapsulation.....	24
II.8 Applications des MCP.....	25
II.8.1 Transport des produits alimentaires.....	25
II.8.2 Application médicales.....	26
II.8.3 L'industrie textile.....	26
II.8.4 MCP en réfrigérateur domestique.....	27
II.8.5 MCP en refroidissement des composants électroniques.....	28
II.8.6 Application aux bâtiments.....	29
II.8.7 Rafraichissement d'air à l'aide de MCP.....	29
II.8.8 Stockage de l'énergie solaire par MCP.....	30
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	31

CHAPITER III : SIMULATION NUMERIQUE

III.1 Introduction.....	33
III.2 Modele physique.....	33
III.3 Hypothèses.....	34
III.4 Modele mathématique.....	34
III.4.1 Equation de conservation de masse.....	34
III.4.2 Equation de quantité de mouvement.....	34
III.4.3 Equation de conservation d'énergie.....	35
III.4.4 Les conditions initiales et aux limites.....	36
III.5 Principales étapes pour définir le problème.....	36
III. 6 Résultats et discussion.....	41
III.6.1 Evolution de la fraction liquide en fonction du temps.....	41
III.6.2 Evolution temporelle des isothermes et des lignes de courant.....	45
III.6.3 Evolution de la fraction liquide en fonction du temps.....	52
III.6.4 Energie totale stockée.....	53
CONCLUSION GENERALE.....	55

LISTE DES FIGURES

Fig.1.1 : différents méthodes possibles du stockage de l'énergie thermique	5
Fig.I.2 : Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente.....	9
FigI.7 : Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermochimique.....	10
Fig. 1.8 : Système de stockage combiné.....	12
Fig. II.1 : Principe de fonctionnement des MCP.....	17
Fig. II.2 : classification des matériaux a changement de phase.....	18
Fig.II.3 : Paraffines brutes, en capsulées, en poudre ou en granulés.....	19
Fig. II.4 : Conteneurs de MCP et la configuration du MCP par rapport HTF. (a) coquille et le récipient de tube ; (b) récipient cylindrique ; (c) contenant rectangulaire..	24
Fig.II.5 : paraffine encapsulé.....	24
Fig.II.6 : Capsules de différentes formes : parallélépipédiques, cylindriques, sphériques	25
Fig. II.7 : Photographies de macro encapsulation de diverses géométries.....	25
Fig.II.8 : Les applications Transport de produits alimentaires.....	26
Fig.II.9 : Récipients contenant sang et des organes qui contiennent MCP.....	26
Fig.II.10 : L'efficacité de MCP dans les textiles.....	27
Fig. II.11. (a) : Réfrigérateur normale, (b) : Réfrigérateur avec (MCP).....	28
Fig. II.12 : Exemple d'un processeur refroidi par un MCP.....	28
Fig. II.13 : Exemple d'utilisation d'un MCP dans les bâtiments.....	29
Fig. II.14 : Echangeur de chaleur à MCP.....	30
Fig. II.16 : Stockage de l'énergie dans un capteur solaire utilisant un MCP.....	30
Fig. III.1 : Géométrie du problème physique.....	33
Fig III.2 Interface Design-Modeler (workbench).....	37
Fig III.3: Interface ANSYS Meshing.....	38
Fig III.4: Interface ANSYS Fluent.....	40
Fig. III.5 : Interface Fluent exécution.....	40
Fig. III.6 : Interface CFD Post.....	41
Fig. III. 7 : Evolution temporelle de la fraction liquide, cas de l'Eau.....	42
Fig. III. 8 : Evolution temporelle de la fraction liquide, cas de RT31.....	43
Fig. III. 9 : Evolution temporelle de la fraction liquide, cas de N-eicosene.....	44
Fig. III.10 : Evolution temporelle des isothermes durant le processus de charge. Cas de l'Eau.....	46

LISTE DES FIGURES

Fig. III.11 : Evolution temporelle des isothermes durant le processus de charge. Cas de RT31	47
Figure III.12 : Evolution temporelle des isothermes durant le processus de charge. Cas de N- eicosene.....	48
Fig. III.13 : Distribution des lignes de courants durant le processus de charge. Cas de l'Eau.....	49
Fig. III.14 : Distribution des lignes de courants durant le processus de charge. Cas de RT31.....	50
Fig. III.15 : Distribution des lignes de courants durant le processus de charge. Cas de N-eicosene.....	51
Fig. III.16 : Variation de la fraction liquide pour les différents matériaux en fonction de temps.....	52
Fig. III.17 : Variation de l'énergie stockée pour les différents matériaux en fonction de temps.....	53
Fig. III.18 : Comparaison de l'énergie totale stockée entre les trois types de MCP.....	54

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20°.....	7
Tableau.I.2 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.....	13
Tableau.II.1 : Avantages et inconvénients comparés des différents changements d'état	16
Tableau.II.2 : Liste de quelques eutectiques.....	20
Tableau.II.3 : Propriétés thermiques de certains MCP.....	20
Tableau.II.4 : Caractéristiques de quelques MCP organiques.....	21
Tableau.II.5 : Caractéristiques de quelques MCP inorganiques.....	21
Tableau.II.6 : Avantages et désavantages des différentes catégories de MCP.....	22
Tableau III.1 Propriétés thermophysiques des matériaux utilisés.....	36
Table III.2 : Etapes nécessaires pour une simulation dans ANSYS (Workbench).....	37
Table III.3 : Mise en données en Fluent.....	39

NOMENCLATURE

Symboles

T	Température (°C)
T_0	Température initiale de la paroi (°C)
t	Temps (s)
k	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
C_p	Chaleur spécifique (J/kg.k)
L	Chaleur latente de fusion (J/kg)
T_m	Température de fusion (°C)
Q	quantité d'énergie thermique (J)
m	la masse de substance (kg)
T_h	températures chaude (°C)
T_c	températures froide (°C)
u_x	la composante de la vitesse suivant la direction x (m.s ⁻¹)
u_y	la composante de la vitesse suivant la direction y (m.s ⁻¹)
$\rho g \beta (T - T_{ref})$	le terme de l'approximation de Boussinesq
C	la constante du darcy
f_l	la fraction massique

Symboles grec

ρ	Densité (kg/m ³)
β	Coefficient de dilatation thermique (k ⁻¹)
μ	Viscosité dynamique (kg/m .s)

Abréviation

MCP	matériaux à changement de phase
SET	stockage d'énergie thermique
SCS	Système de stockage combiné
HTF	fluide caloporteur

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie a toujours été le moteur de l'activité humaine, et c'est un élément qui entre dans toutes les actions quotidiennes de l'homme. Elle joue un rôle important dans le développement des secteurs technologique, industriel, économique et social.

Alors que les tentatives se poursuivent pour développer des technologies qui permettent la production d'énergie renouvelable à moindre coût. Le stockage d'énergie peut aller dans ce sens, car il permet une utilisation différée de l'énergie issue de la production, évitant ainsi les pics de surproduction aux heures de pointe.

Le stockage de l'énergie est devenu une priorité économique. Parce qu'elle contribue à l'indépendance énergétique, c'est-à-dire à la capacité de l'État à satisfaire seul ses besoins énergétiques. Elle est devenue un sujet d'intérêt particulier de la part des autorités politiques, notamment dans les pays fortement dépendants de l'étranger.

L'importance du stockage réside dans l'obtention d'une relation stable entre l'énergie requise et l'énergie fournie. Elle permet d'adapter la production aux besoins, on peut donc dire que c'est la meilleure méthode pour une gestion optimale de l'énergie thermique.

Ce stockage d'énergie peut être fait avec les matériaux à changement de phase (MCP), ou aussi appelé des matériaux du stockage de la chaleur latente comme les Cires, les eutectiques et les hydrates salines...etc.

Les matériaux à changement de phase font référence à toute substance capable de subir une transformation réversible d'un état solide à un état liquide et de stocker ou de libérer de grandes quantités d'énergie dans une plage de température étroite. Ainsi, l'observation intéressante qui a conduit à cette recherche était l'émergence de tendances récentes dans les systèmes de stockage d'énergie thermique basés sur des matériaux à changement de phase pour améliorer l'efficacité énergétique. Les systèmes de stockage d'énergie thermique basés sur des matériaux à changement de phase comblent le fossé entre la disponibilité et la nécessité de l'énergie en réduisant l'énergie requise pour le refroidissement ou le chauffage.

L'objectif de notre travail est lié à l'étude du phénomène de stockage d'énergie thermique dans différents matériaux à changement de phase encapsulé dans une cavité

carrée, pour atteindre l'objectif spécifié dans cette étude, nous avons divisé le travail en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous parlons de la généralité et l'étude bibliographie de stockage d'énergie et leurs types et essentiellement le principe de stockage par la chaleur latente,

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique des travaux de recherche sur les systèmes de stockage thermique effectués.

Dans le second chapitre on fait une étude sur le stockage thermique, et présente les différents matériaux à changement de phase, leurs applications et les lois les plus utilisées.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique, discussion et interprétation des résultats.

En fin dans la conclusion, on donne un résumé de l'essentiel des résultats obtenus.

CHAPITER I
SYSTEME DE STOCKAGE D'ENERGIE
THERMIQUE

I.1-INTRODUCTION

Ces dernières années, la demande d'énergie a augmenté en raison de la forte consommation d'énergie dans différents domaines. Les combustibles fossiles ont servi et satisfait tous les besoins humains en énergie pendant longtemps, ces combustibles fossiles ont causé d'énormes dommages à l'environnement qui ont conduit à la plupart des problèmes environnementaux récents, à savoir le réchauffement climatique et le danger de fonte des glaces dans les pôles nord et sud. De plus, les prix de ces combustibles fossiles ont augmenté ces dernières années et on s'attend à ce qu'ils continuent augmentant dans les années à venir parce que la demande d'énergie augmente tandis que les combustibles fossiles dans les réserves diminuent. Par conséquent, d'autres sources d'énergie doivent être développées afin de prendre le rôle de combustibles fossiles. Les énergies renouvelables devraient jouer un rôle majeur dans l'approvisionnement énergétique dans un proche avenir. Les énergies renouvelables sont presque durables et causent beaucoup moins de pollution que dans le cas des combustibles fossiles. Les énergies renouvelables sont l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse, l'énergie géothermique, l'énergie marémotrice et l'hydroénergie. Presque toutes ces formes d'énergie sont freinées par leurs coûts élevés. De plus, l'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'énergie marémotrice se caractérisent par leur caractère intermittent, car elles ne sont pas disponibles en permanence. Une autre propriété importante de ces types de sources d'énergie est les fortes fluctuations (à l'échelle du jour ou de l'année), c'est-à-dire de fortes variations de l'énergie disponible. Ce problème intermittent et de fluctuation peut être résolu par le stockage d'énergie.

I.2-NECESSITE ET AVANTAGE DE SYSTEME DE STOCKAGE D'ENERGIE

Les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, gagne en importance dans le monde entier, car elle est tout à fait gratuite, non polluante, inépuisable et propre. Cette énergie est de nature intermittente, une disponibilité insuffisante et la demande inadaptées de temps. Le système de ces sources devrait être intégré aux unités de stockage d'énergie.

En effet, il existe de nombreux types de systèmes de stockage d'énergie :

- Énergie chimique : Batteries au plomb-acide, Batteries électrochimiques, Piles au soufre, Stockage moléculaire organique, Stockage de pompe à chaleur chimique, Piles au lithium sulfure de fer.
- Energie mécanique : Stockage d'air comprimé, Stockage hydraulique,etc.

- Énergie thermique
- Énergie électromagnétique

Parmi les méthodes de stockage que nous avons mentionnées précédemment, le stockage d'énergie thermique (SET) est l'une des principales technologies pour la conservation de l'énergie, en pratique ce type de stockage est d'une grande importance. Pour une consommation d'énergie plus efficace et plus respectueuse de l'environnement les systèmes de stockage d'énergie thermique contribuent de manière significative à une consommation d'énergie plus efficace et plus respectueuse de l'environnement dans de nombreux domaines tels que l'aérospatiale, l'électricité, le chauffage et la climatisation, ... Pour augmenter l'efficacité de l'utilisation des équipements de conversion d'énergie, les systèmes de stockage d'énergie thermique ont un potentiel énorme dans cet aspect.

Parmi les avantages des systèmes SET, on peut citer :

- Consommation d'énergie réduite
- Émissions réduites de polluants
- Flexibilité accrue de l'opération
- Réduction des coûts énergétiques
- Taille réduite d'équipement

I.3-TYPES DE SYSTEMES DE STOCKAGE D'ENERGIE THERMIQUE

L'énergie thermique peut être stockée sous différentes formes :

- Stockage par chaleur sensible.
- Stockage par chaleur latente.
- Stockage thermochimique.
- Stockage combiné.

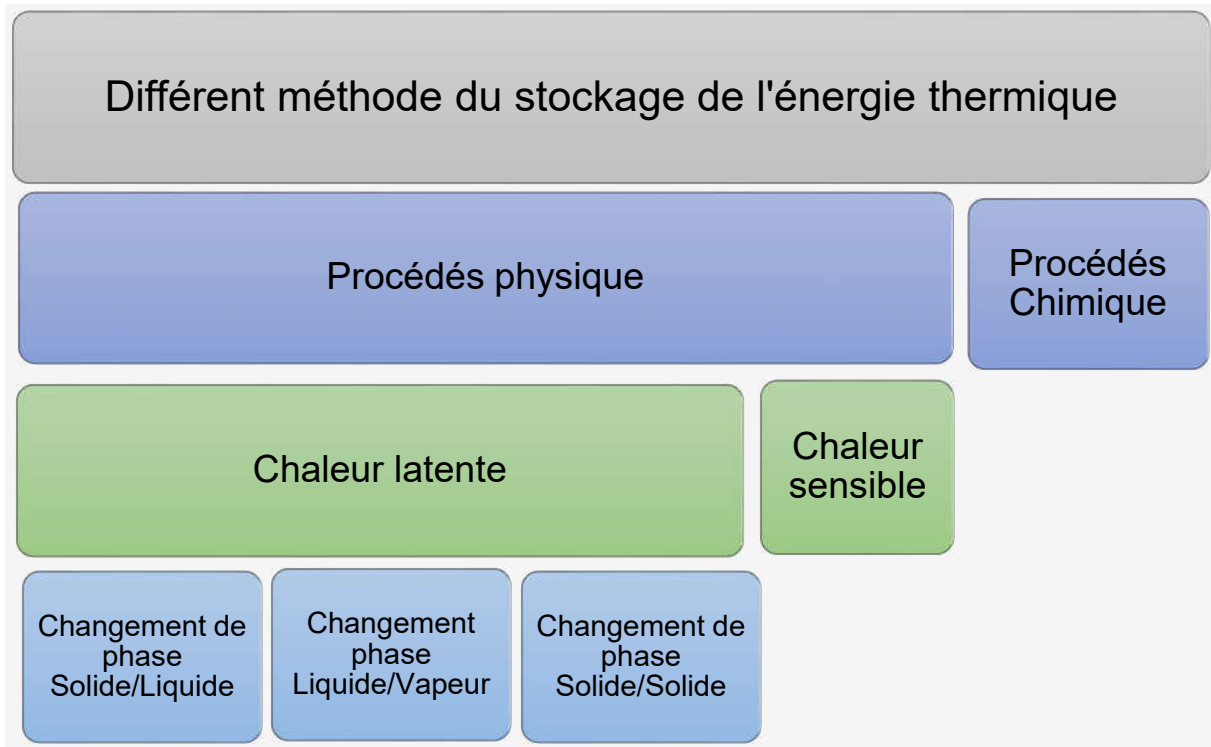


Figure I.1 : différents méthodes possibles du stockage de l'énergie thermique [3].

I.3.1-Stockage par chaleur sensible

Le stockage de la chaleur sensible est basé sur la capacité thermique spécifique des solides et des liquides tels que les roches, le béton, les plaques de plâtre, le sable, l'eau et les sels fondus. Le processus de stockage de chaleur est basé sur le changement de température du milieu de stockage.

Si on chauffe une substance solide ou liquide d'une température initiale T_1 à une température finale T_2 , sans changer sa phase, sous pression constante. La quantité d'énergie stockée sous forme de chaleur sensible peut être exprimée mathématiquement par la relation suivante :

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} m C_p(T) dT \quad (I.1)$$

Où Q est la quantité d'énergie thermique stockée ou libérée sous forme de chaleur sensible (kJ), m : la masse de substance et C_p : la capacité calorifique en (J/Kg.K).

Supposant que $C_p(T) = C^{ts}$ on obtient :

$$Q = m C_p \Delta T \quad (I.2)$$

On distingue deux cas :

- si $T_2 > T_1$ on parlera de stockage du chaud.
- si $T_2 < T_1$ on parlera de stockage du froid.

La relation (I.2) montre que la quantité d'énergie thermique stockée dépend de la capacité thermique du corps, de la température et de la quantité de matériel de stockage. Donc les critères pour la sélection appropriée de matériau de stockage thermique sensible :

- chaleur spécifique élevée.
- stabilité à long terme avec cycles thermiques.
- faible coût.

Selon l'état physique du matériau de stockage, le stockage par chaleur sensible a deux variantes [3] :

- stockage par un matériau liquide.
- stockage par un matériau solide.

I.3.1.1-Stockage par un matériau liquide

Le stockage par l'eau

L'eau est le meilleur milieu pour le stockage aux faibles températures. Elle a la capacité thermique massique la plus grande par rapport aux autres corps. De plus, l'eau n'est pas chère et facilement disponible. Les différentes formes de stockage de l'eau sont :

- Les réservoirs.
- Les nappes aquifères naturelles en sous-sol....etc.

Le stockage par d'autres fluides

- *Huiles organiques* : Elles ont une pression de vapeur plus faible que celle de l'eau et peuvent être utilisées à des températures supérieures à 300 °C mais inférieures à 350 °C pour éviter leur décomposition.
- *Sels fondus* : Le plus courant est l'hydroxyde de sodium. Il a un point de fusion de 320°C et il est possible de l'utiliser à une température supérieure à 800°C. Mais, il est fortement corrosif et il est difficile à Stocker à fortes températures [3].

I.3.1.2-Stockage par un matériau solide : Les pierres, les métaux, le béton, le sable et la brique sont les matériaux généralement utilisés pour le stockage thermique aux faibles et hautes températures parce qu'ils ne peuvent ni se congeler ni entrer en ébullition [3].

Certaines propriétés de la substance utilisée comme matériau de de stockage de chaleur sensible sont données dans le tableau (I-1).

Tableau I.1 : propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20°[3].

Matériaux	Densité(Kg/m ³)	Chaleur spécifiques (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
Ferre	7900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68
Eau	988	4182	4.17

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 [3].

I.3.2-Stockage par chaleur latente

Le stockage thermique latent se produit pendant le changement de phase du matériau de stockage de solide a liquide ou de liquide a gaz ou vice versa, lorsqu'un matériau de stockage absorbe ou libère une quantité de chaleur a une température et une pression constantes , on parle de chaleur latente , il s'exprime comme suit :

$$Q_{latent} = m L \quad (I.3)$$

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

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

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée sous la forme d'un changement d'état du matériau de stockage (fusion ou vaporisation).

Changement de phase solide-solide

Il est considéré comme le plus simple à gérer car il y a peu ou pas d'expansion de volume, ce qui limite les risques de fuite et de surpression. Cependant, peu de matériaux ont été identifiés, parfois car la chaleur latente de transition solide-solide est trop faible devant celle de la transition solide-liquide, ou parfois car le matériau n'est pas stable thermiquement [7].

Changement de phase liquide-gaz

Ces transitions ont la plus grande chaleur latente, mais le changement massif de volume associé à l'évaporation des liquide rend le stockage compliqué et souvent inutilisable. C'est pourquoi cette transition est exclue des systèmes de stockage latent.

Changement de phase solide-liquide

Dans la plupart des cas, le processus de changement de phase solide- liquide est utilisé en raison de la faible expansion volumétrique, où la fusion est utilisée pour stocker la chaleur et la solidification est utilisée pour libérer la chaleur.

La capacité du stockage de systèmes du stockage de la chaleur latents est influencée par [4] :

- chaleur spécifique dans phase solide et liquide.
- différence entre la température initiale et température de fusion.
- différence entre température de fusion et température finale.

Le stockage d'énergie dans les MCP est stocké sous forme de chaleur sensible dans les phases solide et liquide ainsi que de chaleur latente pendant la transition de phase. La quantité d'énergie stockée peut être exprimée mathématiquement par :

$$Q = \int_{T_1}^{T_{fusion}} m C_{p,s} dT + mL_f + \int_{T_{fusion}}^{T_2} m C_{p,l} dT \quad (I.4)$$

$$Q = m C_{p,s}(T_{fusion} - T_1) + mL_f + m C_{p,l}(T_2 - T_{fusion}) \quad (I.5)$$

où m est la masse en (kg), $C_{p,s}$ et $C_{p,l}$ sont respectivement les capacités thermiques massiques du matériaux à l'état solide et liquide ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), T_1 et T_2 températures initiales à l'état solide et température finale à l'état liquide du PCM en K , T_{fusion} température de transition de phase du PCM en K .

Dans l'équation précédente trois composantes sont présentées. Le premier composant représente le stockage de chaleur sensible dans la phase solide avant que la température du

PCM n'atteint la température de changement de phase, le second est la chaleur latente de changement de phase et le troisième composant représente le stockage de chaleur sensible dans la phase liquide.

L'énergie thermique stockée est présentée sur le graphe température-énergie (figure I-2).

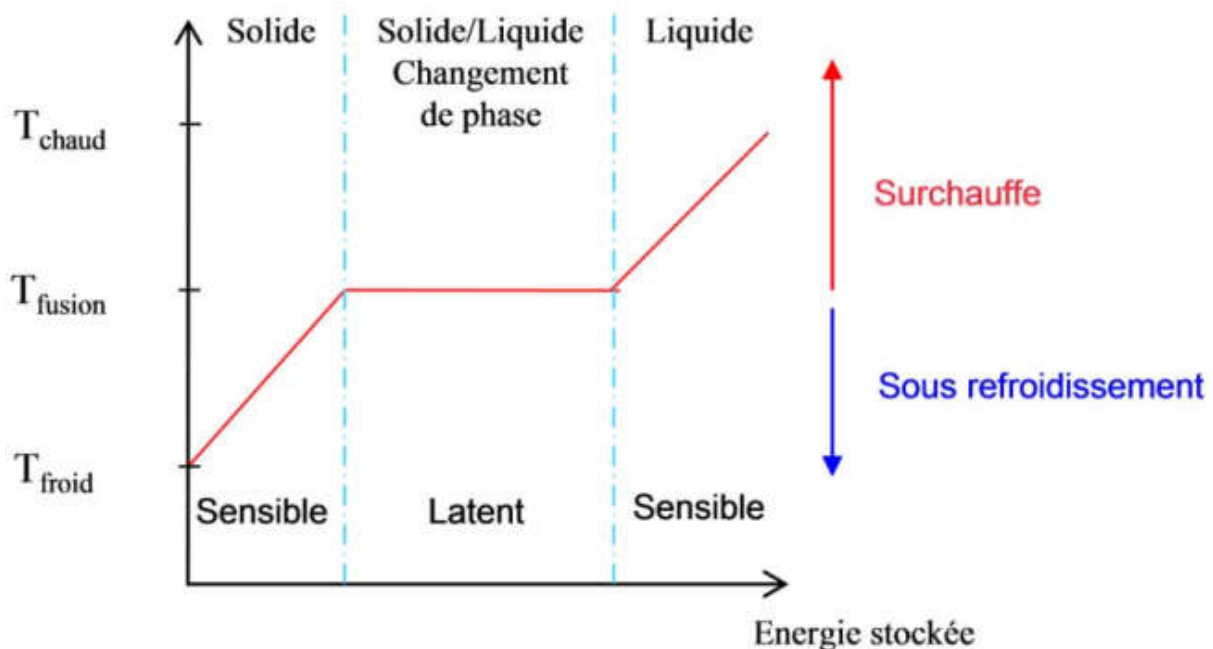


Figure I.2 : Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente pour un matériau poly cristallin [6].

I.3.3-Les avantages du stockage par chaleur latente

- La chaleur latente est beaucoup plus importante que la chaleur sensible (pour un écart de température pas trop important).
- Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures de confort en thermique du bâtiment (20 à 30°C), peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible.
- Quand la décharge d'énergie thermique a lieu, la température de la surface de MCP reste proche de la valeur de la température de changement d'état. On a donc un contrôle passif de la température de la surface. La quantité d'énergie de la décharge ne dépend donc que de la température de l'environnement.
- Le stockage par chaleur latente ne pose pas de problème de surchauffe saisonnière grâce à sa faible masse [8].

I.3.4-Stockage par voie thermochimique

Quand on parle de stockage thermochimique, on parle de deux phénomènes : l'absorption et la réaction chimique, le stockage de chaleur par absorption convient au stockage à basse température ($T \approx 80^\circ\text{C}$) tandis que pour des applications de type solaire concentré ($T \approx 200$ à 1000°C), ce sont les réactions de synthèse chimique qui semblent être les plus adaptées. La Figure I.7 présente la classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique [6].

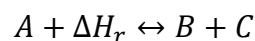
Principe de fonctionnement

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



Tell que : A, B, C, D = produits , ΔH_r =l'enthalpie de la réaction (J.mol^{-1})

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



La réaction impliquée doit être totalement réversible pour que le procédé ne perde pas sa capacité de stockage au cours des cycles.

Le schéma de principe du stockage de chaleur par voie thermochimique est présenté sur la Figure (I.7) [6].

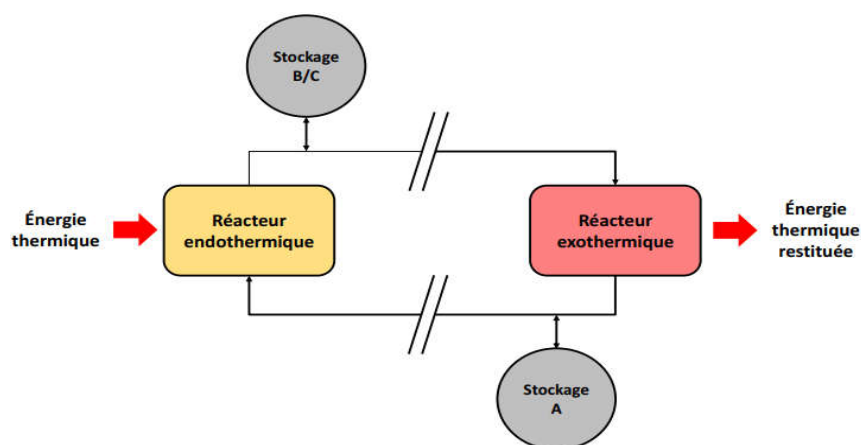


Figure I.7 : Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermochimique [6].

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

$$Q = \sum_{i=1}^N \int_{T_1}^{T_f} m_i C_{p,i} dT + mL_f + n_A \times \Delta H_r \quad (I.6)$$

Où, Q est la quantité d'énergie stockée (J), n_A est le nombre de moles du produit A (mol), ΔH_r est l'enthalpie de la réaction ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$) [6].

Les avantages de système de stockage thermochimique

Le stockage de chaleur par voie thermochimique est le processus le moins mature de stockage thermique, mais il offre plusieurs avantages par rapport aux deux autres systèmes :

- La densité énergétique (volumétrique ou massique) est respectivement 5 à 10 fois plus importante que pour des systèmes de stockage par chaleur latente ou par chaleur sensible.
- La restitution de la chaleur peut se faire à température constante.
- La durée de stockage théoriquement illimitées, puisque les produits peuvent être stockés à température ambiante (aucune perte thermique). C'est le seul procédé de stockage de chaleur qui permet de réaliser un stockage « inter-saisonnier », c'est-à-dire, stocker l'énergie l'été pour la restituer l'hiver.

I.3.5-Stockage combiné

Les systèmes de stockage combinés sont d'une conception complètement plus simple que les systèmes de stockage de chaleur thermochimique et latente. D'autre part. Il souffre des inconvénients d'une faible capacité de stockage de chaleur par unité de volume de matériau de stockage et de son comportement irrégulier lors de la charge (stockage de chaleur) et de la décharge (récupération de chaleur). Contrairement aux systèmes de stockage de chaleur latent qui présentant un intérêt particulier en raison de leur avantage, par exemple, stocker une grande quantité d'énergie dans un petit volume. Cependant, il n'est pas utilisé aussi largement que les systèmes de stockage combiné commerciaux, en raison du faible taux de transfert de chaleur.

Le système de stockage combiné présente les systèmes de stockage de chaleur sensible et latents [8].

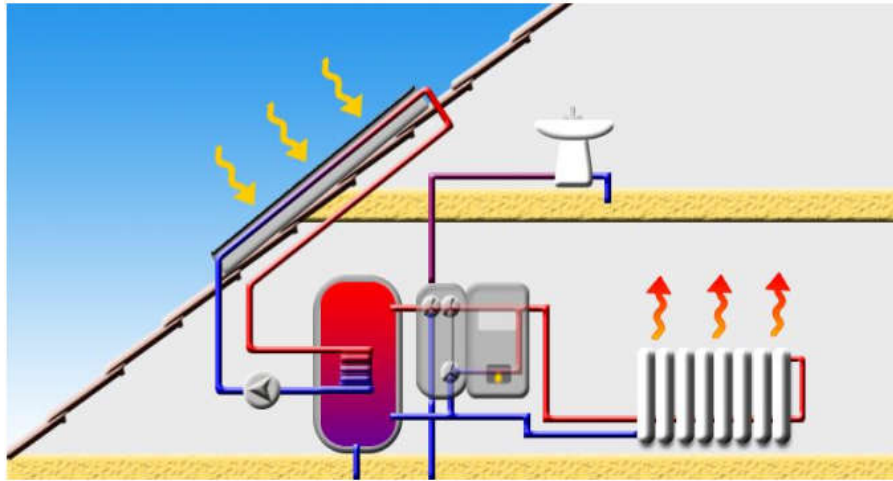


Figure 1.8 : Système de stockage combiné [8].

Dans ce système, les conteneurs / capsules MCP sont toujours entourés par le fluide caloporteur, qui fonctionne également comme un matériau SCS et c'est une meilleure alternative, qui offre les avantages suivants :

- Capacité thermique supérieure.
- Chargement et déchargement isothermes.
- Elimination de la variation du taux de transfert de chaleur en surface, due à la mauvaise conductivité thermique du matériau à changement de phase.
- Format compact

Donc, le système combiné de stockage de chaleur sensible et latente a trouvé de nombreuses applications dans les secteurs domestique, commercial et industriel [8].

I.4-COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTS TYPES DE STOCKAGE D'ENERGIE THERMIQUE

Le Tableau I.2 représente les caractéristiques des trois systèmes 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 [4].

Tableau.I.2 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur [4].

		Stockage par chaleur sensible	Stockage par chaleur latente	Stockage voie thermochimique
Densité D'énergie	volumétrique	Faible ~ 15-60 KWh.m ⁻³	Moyenne ~ 50- 100 KWh.m ⁻³	Elevée ~ 100-500 KWh.m ⁻³
	massique	Faible ~0.02-0.03 KWh. Kg	Moyenne~ 0.05- 0.1 KWh. Kg	Haute~ 0.5-1 KWh. Kg
Température de stockage		Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge ou ambiante
Durée de stockage		Limitée (pertes thermique)	Limitée (pertes thermique)	Théoriquement illimitée
Transport de l'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance théoriquement
Maturité		Echelle industrielle 20MWe	Echelle pilote 20MW _{th}	Echelle laboratoire 20MW _{th}
technologie		Simple	Moyenne	Complexe

I.5-APPLICATIONS DES SYSTEMES DE STOCKAGE D'ENERGIE THERMIQUE

Les systèmes SET sont d'un grand intérêt dans les applications thermique telles que le chauffage, le refroidissement et la climatisation, bien que ces systèmes fournissent de l'énergie à un cout plus élevé que les combustibles fossiles leur principal avantage est leur impact limité sur l'environnement et la durabilité de la source d'énergie. L'application de SET sont variées et nombreuses, certaines application soit présentée dans les sous-sections suivantes [8].

I.5.1-Chauffage solaire

L'énergie solaire est une source importance d'énergie alternative. Le principal facteur limitant l'utilisation de l'énergie solaire est qu'il s'agit d'une source d'énergie cyclique

dépendant du temps. Par conséquent. Les systèmes solaires nécessitent un stockage d'énergie par le biais duquel sont fournies de l'énergie pendant la nuit et les périodes où le rayonnement solaire est faible.

Le chauffage-eau solaire à base de matériau à changement de phase permet un meilleur contrôle de la température de l'eau, Les systèmes SET sont intégrés aux systèmes de chauffage solaire de l'air qui sont utilisés pour le chauffage des locaux, le séchage des cultures [8].

I.5.2-Application dans le bâtiment

Les maisons aux murs épais sont particulièrement confortables, fraîches en été et chaudes en hiver, l'inconvénient des bâtiments légers est leur faible masse thermique, ils ont tendance à être soumis à de fortes fluctuations de température ce qui entraîne des chauffages ou de climatisation, le système de stockage basé sur MCP intégré dans les bâtiments diminue donc la fréquence des oscillations internes de la température de l'air et maintient en conséquence la température plus proche de la valeur désirée sur une longue période (en absorbant la chaleur aux pics et la libérant plus tard dans la nuit ; dans des cas favorables, on peut même se passer de la climatisation) [8].

I.5.3-Transport des matériaux sensibles à la température

Le transport de substances thermosensibles nécessite des camions frigorifiques. Parmi ces produits, on peut citer :

- Produits pharmaceutiques.
- Appareils électroniques divers.
- Produits chimiques (explosifs).

Mais les camions de transport sont très chers. Ses applications sont donc bien adaptées aux applications MCP, car la capacité de MCP à stocker la chaleur et le froid dans une plage de quelques degrés seulement peut être très bonne [8].

REFERENCES DE BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] I.Dincer, M.A.Rosen, thermal energy storage systems and applications, second edition, University of Ontario Institute of Technology Ontario, Canada, 2002.
- [2] A. Benhamza, S. Belkhir, Simulation numérique d'un capteur solaire plan utilisant des matériaux a changement de phase, mémoire de master : Génie Energétique, Université KASDI Merbah d' Ouargla, 2016.
- [3] M.Boutaoui, Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique, mémoire de master : Thermique et Combustion, Université M'Hamed Bougara Boumerdes, 2016.
- [4] S.Berreksi, S.Latarsa, Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule sphérique, mémoire de master : systèmes Thermique et Combustion, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, 2016.
- [5] E.Milisic, Modelling of energy storage using phase-change materials (PCM materials), Norwegian University of Science and Technology, 2013
- [6] M. Pierre Pardo, Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique, thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2013.
- [7] A. Soupart-Caron, Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de phase, thèse de doctorat, université Grenoble Alpes, 2013.
- [8] M. Benbrika, Etude Thermique des Performances d'un Echangeur de Chaleur à Section Elliptique pour le Stockage Thermique par Chaleur Latente, thèse de doctorat, Université Amar Telidji – Laghouat, 2020.

CHAPTER II
GENERALITE SUR LES MATERIAUX A
CHANGEMENT DE PHASE

II.1-DEFINITION

Nous appelons tout matériau capable de changer l'état physique dans une plage de température finie un matériau à changement de phase (PCM). Cette plage est approximativement située entre 10 et 80 degrés. Dans cette plage de température, le changement de phase prédominant reste la fusion /solidification. Ces températures peuvent être atteintes naturellement et sont omniprésentes dans notre vie quotidienne (température ambiante de la maison, température du corps humain, eau chaude domestique, etc.)

Ces matériaux ont la capacité de stocker l'énergie sous forme de chaleur latente. Le stockage thermique latent du MCP peut être obtenu en changeant la phase, solide-liquide, le gaz-solide et gaz-liquide. Mais le seul changement de phase utilisé dans le PCM est le changement liquide-solide. En effet, les changements de phase gaz-liquide ne sont pas pratiques pour une utilisation comme stockage thermique en raison des grands volumes ou pressions nécessaires pour stocker les matériaux en phase gazeuse. Les transformations gaz-liquide ont une transformation thermique plus élevée que les transitions solide et liquide. Les changements de phase solide-solide sont très lents et ont tendance à avoir une faible température de transition [1].

Le tableau qui suit résume les avantages et les inconvénients des types de changement de phase.

Tableau.II.1 : Avantages et inconvénients comparés des différents changements d'état [1].

Changement de phase	Avantages	Inconvénients
Liquide/Gaz	Grande valeur de la chaleur latente.	Grand changement de volume.
Solide/Liquide	Faible changement de volume.	Valeur moyenne de la chaleur latente.
Solide/Gaz	Grande valeur de chaleur latente.	Grand changement de volume.

II.2-PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES MCP

Les matériaux à changement de phase utilisent la chaleur latente de changement de phase pour contrôler la température dans une plage spécifique. Lorsque la température dépasse un

certain point, les liaisons chimiques dans le matériau vont commencer à briser et le matériau absorbe la chaleur dans un endothermique processus ou il passe de l'état solide à l'état liquide. Comme la température baisse, le matériau dégage l'énergie et revenir à l'état solide [2].

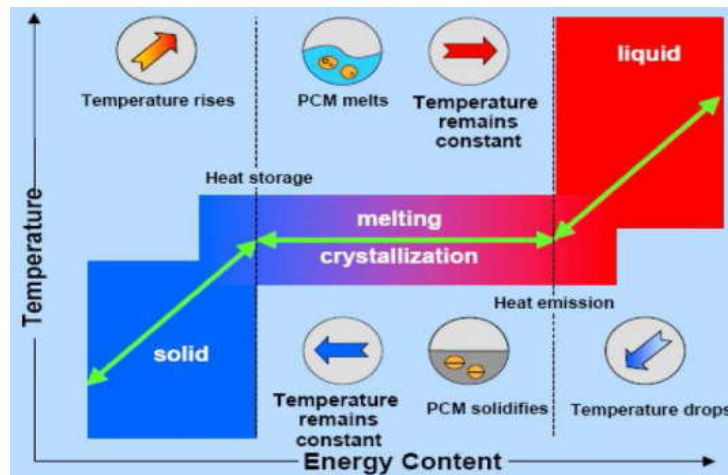


Figure II.1 : Principe de fonctionnement des MCP [2].

II.3-CLASSIFICATION DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE

On distingue trois grandes familles de MCP : les composés organiques, les composés inorganiques et les mélanges eutectiques.

Chacune de ces familles peut être décomposée en sous-groupes, dont les comportements physiques et chimiques très différents influent sur la conception du système de stockage [3].

II.3.1-Les MCP inorganiques

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les plus utilisés sont : l'eau, les solutions aqueuses de sel, des sels hydratés, des mélanges de sels, des mélanges de métaux. Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion [4].

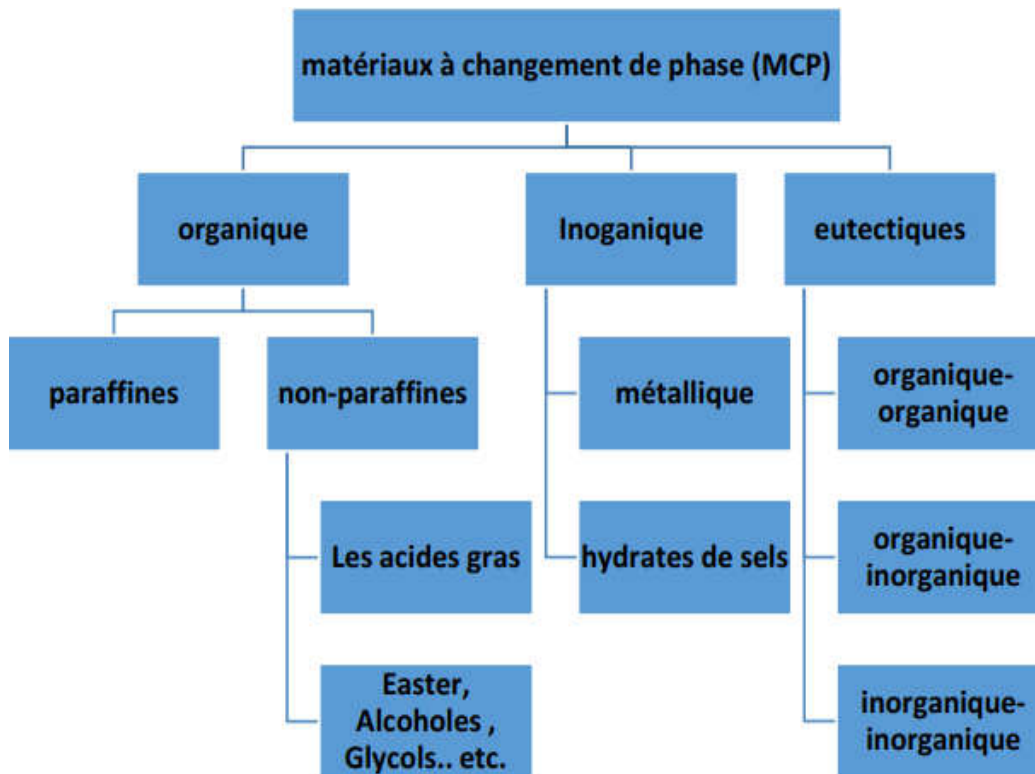


Figure II.2 : classification des matériaux a changement de phase [3].

Hydrates de sels :

Les hydrates de sel sont des sels inorganiques qui contiennent de l'eau et dont la formule générale est $AB.nH_2O$. Pendant la charge, la déshydratation du sel a lieu.

Sels :

Les sels sont des composés ioniques neutres formés à partir de cations et d'anions. Les sels purs et les mélanges de sels non eutectiques présentent généralement un large spectre de températures de fusion et une chaleur latente variant selon leur type. Les fluorures et les chlorures présentent ainsi une chaleur latente plus élevée que les nitrates ou les sulfates.

Les sels les plus connus sont les nitrates comme le $NaNO_3$ ($T_{fusion} = 307\text{ °C}$), le KNO_3 ($T_{fusion} = 333\text{ °C}$) ou encore le $LiNO_3$ ($T_{fusion} = 250\text{ °C}$) [5].

Métaux :

On peut citer notamment le Potassium ($T_{fusion} = 63.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$), le Bi58Sn42 ($T_{fusion} = 138 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ou encore le Lithium ($T_{fusion} = 186 \text{ }^{\circ}\text{C}$) [5].

II.3.2-Les MCP organiques

Les matériaux organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0°C et 150° C. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables [4].

Les paraffines :

Les paraffines sont des matériaux organiques, constitués par des mélange d'hydrocarbures saturés qui eux-mêmes sont alcanes de formule générale C_nH_{2n+2} . [4].



Figure.II.3 : Paraffines brutes, en capsulées, en poudre ou en granulés [2].

Acides gras :

Les acides gras sont des matériaux ayant pour origine les huiles végétales ou animales .Ils ont la formule chimique générale suivante : $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{2n} \text{COOH}$

II.3.3-les MCP Eutectiques

Il s'agit généralement d'un mélange de PCM organiques et inorganiques. Il se compose de plusieurs PSM purs. Ces matériaux présentent deux avantages majeurs : un point de fusion net similaire à une substance pure et des températures volumétriques latentes légèrement supérieures à celles des composés organiques purs. Deux inconvénients majeurs sont qu'il

existe peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et peu utilisées dans les systèmes industriels [6].

Tableau.II.2 : Liste de quelques eutectiques [8].

Eutectique Inorganique	Point de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [kJ/kg].
49.3%Mg Cl.6H ₂ O+50.7%Mg(NO ₃).6H ₂ O	58	132.3
61.5%Mg(NO ₃)6H ₂ O+38.5%NH ₄ NO ₃	51	131.1
58.3%Mg(NO ₃)6H ₂ O+41.7%Mg Cl. 6H ₂ O	58	106
CaCl ₂ .6H ₂ O+CaBr ₂ .H ₂ O	14	140
Eutectique organique :		
Acide caprique-laurique	18	120
Acide plamitique-laurique	33	145
Acide stéarique-laurique	34	150

II.4-CARACTERISTIQUES DE QUELQUES MCP

Les caractéristiques de quelques MCP sont rassemblées dans les tableaux suivants [8].

Tableau.II.3 : Propriétés thermiques de certains MCP [7].

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)
PCM Organiques	Eau	0	333.3
	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique-laurique	21	143
PCM Inorganiques	KF.4H ₂ O	18.5	231
	Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	25.8	125.9
	Na ₂ So ₄ .10H ₂ o	32	251
PCM Eutectique	66.6%CaCL ₂ .6H ₂ O+33.3%MgCl ₂ .6H ₂ O	25	127
	48%CaCL ₂ +4.3%Na Cl+47.3%H ₂ O	26.8	188
	47%Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O+53%Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	30	136

Tableau.II.4 : Caractéristiques de quelques MCP organiques [8].

Type de substance	composé	Température de fusion	ΔH_{fusion} (kJ/kg)	Conductivité thermique ($w.m^{-1}k^{-1}$)	Densité ($kg.m^{-1}$)
Substances organiques	Paraffine C21-C50	66-50	189	0.21 s	0.830 L.70°C 0.930 s, 20°C
	Naphtalène	80	147.7	0.132 L.83.8°C 0.341 s, 43,9°C	976.45°C 1145s, 20°C
Eutectique organique		67	123.4	0.130 L.100°C 0.282 s, 38.5°C	
Acides gras	Acide caprique	32	152.7	0.153 L, 38.5°C	848 L.100°C 965 S, 24°C
	Acide stéarique	69	202.5	0.172 L, 70°C	848 L.100°C 965 S, 24°C

Tableau.II.5 : Caractéristiques de quelques MCP inorganiques [8].

Type de substance	composé	Température de fusion (°c)	ΔH_{fusion} (kJ/kg)	Thermique ($w.m^{-1}.k^{-1}$)	Densité ($kg.m^{-1}$)
Substance inorganiques	H ₂ O	0	333	0.612 L.20°C	988 L.20°C 917 S. 0°C
	CaCl ₂ .6H ₂ O	29	190.8	0.540 L.38.7°C 1.088 s. 1.23°C	1562 L.32°C 1802 S. 24°C
	Mg Cl ₂ . 6H ₂ O	89	192.8	0.490 L.95°C 0.611 S. 37°C	1550 L.94°C 1636 S. 25°C
	Mg Cl ₂ . 6H ₂ O	117	168.6	0.570 L.120°C 0.694 S. 90°C	1450 L.120°C 1569S. 20°C
Eutectique inorganique	58.7%Mg (NO ₃).6H ₂ O+41.3 %Mg Cl ₂ . 6H ₂ O	59	132.2	0.565 L.85°C 0.678 S. 38°C	1550 L.50°C 1630 S. 24°C
Mélange non eutectique de substances inorganique	50%Na (CH ₃ COO). 3H ₂ O+50% HCONH ₂	40.5	255		

II.5-COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTS TYPES DE MCP

Plusieurs auteurs [9, 10, 11] ont présenté une comparaison des avantages et désavantages des matériaux organiques, inorganiques et eutectiques (Tableau II.6).

Tableau.II.6 : Avantages et désavantages des différentes catégories de MCP

MCP	Avantage	Désavantage
Organiques	<ul style="list-style-type: none"> • disponibles dans une large gamme de température • pas de surfusion • chimiquement stables • haute énergie de fusion • non corrosifs • simple d'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> • faible conductivité thermique • chaleur latente faible • Peut-être inflammable • chaleur spécifique massique faible • fort coût • masse faible
Inorganiques	<ul style="list-style-type: none"> • chaleur latente élevée • faible coût • point de fusion nette • non- inflammable • forte conductivité thermique • chaleur spécifique massique élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • phénomène de surfusion • agent de nucléation étranger indispensable • corrosifs pour la plupart des métaux • vieillissement rapide
Eutectiques	<ul style="list-style-type: none"> • point de fusion nette Similaire à une substance pure • chaleur latente légèrement supérieures à celle des composés organiques purs 	<ul style="list-style-type: none"> • peu de données disponibles sur les propriétés de ces matériaux • peu utilisés au niveau des applications industrielles

II.6-CHOIX D'UN MCP

Des critères vont donc être définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée [12] :

Considérations thermiques

- Le niveau de la température de changement de phase qui dépend de l'application.

- La valeur de la chaleur latente de fusion (>130 kJ / kg pour être compétitif).
- Une grande conductivité thermique pour des cinétiques de charge et de décharge rapides.
- Une faible pression de vapeur pour minimiser les problèmes de tenue en pression des systèmes de stockage.

Propriétés physiques

- Un faible changement de volume lors du changement d'état pour le dimensionnement du stockage et sa tenue à la pression.
- Une grande masse volumique pour que le MCP puisse réaliser un stockage suffisant dans le volume le plus faible possible.
- Une fusion congruente lors de l'utilisation d'un corps composé.

Considérations cinétiques

- Des cinétiques de charge et de décharge rapides.
- Pas de surfusion qui détruit la cinétique et altère la possibilité de déstockage.

Considérations de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux :

- Stabilité du corps lors des cyclages thermiques.
- Compatibilité avec les matériaux du réservoir de stockage pour chaque phase pour éviter tous les problèmes de corrosion, de réactivité chimique ou électrochimique.

Considérations chimiques

- Stabilité chimique des corps avec le temps et avec les niveaux de température.
- Un bon taux de cristallisation. et ininflammabilité et non-toxicité.

Considérations économiques

- Un coût raisonnable et une bonne disponibilité.

II.7-DIFFERENTES FORMES DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE

Il doit avoir un échange de chaleur efficace entre le MCP et le fluide caloporteur afin d'avoir une grande efficacité du stockage d'énergie. Par conséquent, les MCP sont généralement contenus tels que soit grande surface de transfert de chaleur ou de coefficient de

transfert de chaleur par convection élevée entre Pack MCP et le fluide caloporteur est possible.

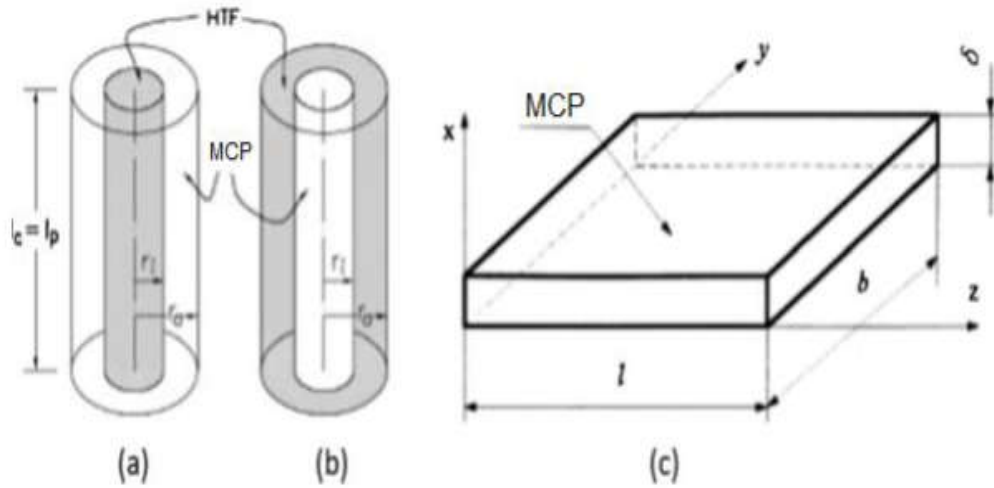


Figure II.4 : Conteneurs de MCP et la configuration du MCP par rapport HTF. (a) coquille et le récipient de tube ; (b) récipient cylindrique ; (c) contenant rectangulaire [13].

II.7.1-Micro encapsulation

La micro encapsulation des MCP consiste à emballer les matériaux MCP dans des capsules qui vont de moins de $1\mu\text{m}$ et jusqu'à environ $300\mu\text{m}$ [14].

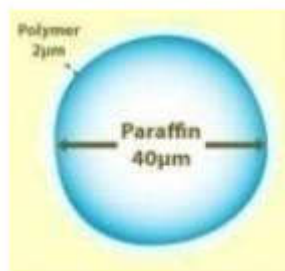


Figure.II.5 : paraffine encapsulé.

II.7.2-Macro encapsulation

Macro encapsulation se réfère à MCP encapsulés dans n'importe quel type de conteneurs tels que des tubes, des sphères ou des panneaux [14].



Figure.II.6 : Capsules de différentes formes : parallélépipédiques, cylindriques, sphériques [14].

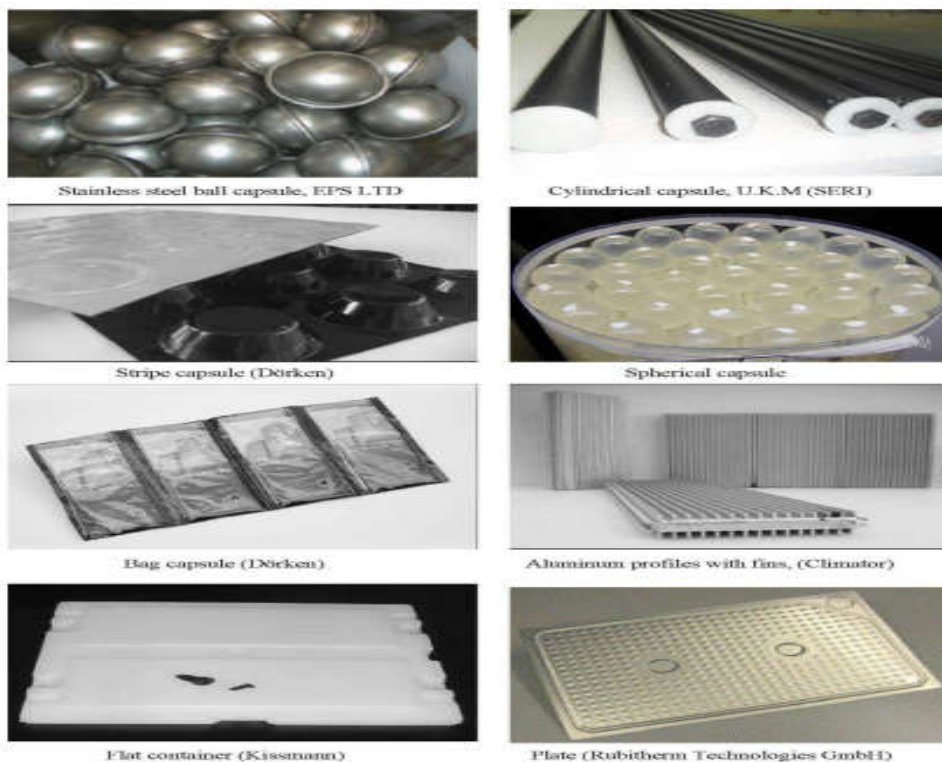


Figure II.7 : Photographies de macro encapsulation de diverses géométries [15].

II.8-APPLICATIONS DES MCP

II.8.1-Transport des produits alimentaires

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent

principalement sous la forme de « petits sacs » plastiques contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à conserver [16].



Figure.II.8 : Les applications Transport de produits alimentaires [2].

II.8.2-Application médicales

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang Figure.II.9 et organes. D'autres applications médicales peuvent être des coussinets chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps [17].



Figure.II.9 : Récipients contenant sang et des organes qui contiennent MCP [4].

II.8.3-L'industrie textile

Les matériaux à changement de phase peuvent être appliqués dans des nombreux domaines d'application de l'industrie qui sont appropriés pour optimiser le confort thermo physiologique de vêtements, de couil à matelas, de sacs de couchage. Il devient alors particulièrement important de trouver des matériaux dont les températures de fusion et de cristallisation sont très proches de la température superficielle du corps humain [16].

Les matériaux utilisés pour ce genre d'applications sont généralement des paraffines qui ont une température moyenne de 30-34°C, ce qui devient très confortable pour le corps humain.

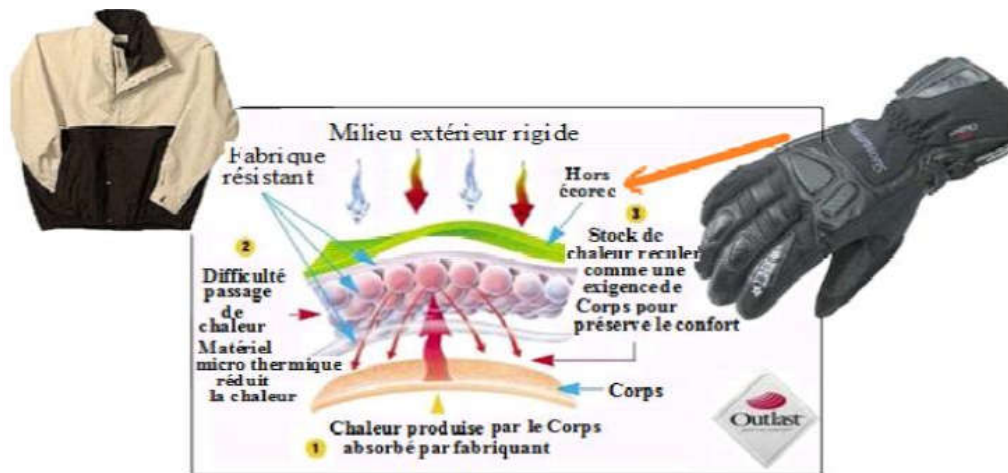


Figure.II.10 : L'efficacité de MCP dans les textiles [2].

II.8.4-MCP en réfrigérateur domestique

Les réfrigérateurs fonctionnant en permanence ont des médiocres performances énergétiques. Ces appareils consomment 18 milliards de kWh ce qui équivaut à 20% de la consommation résidentielle d'électricité et contribuent ainsi à l'effet de serre à hauteur de 2,25 milliards de tonnes de CO₂/an. L'intégration de matériaux à changement de phase dans un réfrigérateur domestique est une solution technologique innovante et économique pour réduire cette consommation d'énergie et limiter les pics de puissance en électricité.

L'effet de la plus grande inertie thermique apportée par ces matériaux aura également pour conséquence de limiter le nombre d'arrêt démarrage de privilégier certaines heures de fonctionnement dans la journée et de stabiliser la température pour une meilleure conservation des aliments [18].

La figure II.11 montre un exemple d'un réfrigérateur domestique contenant le matériau à changement de phase.

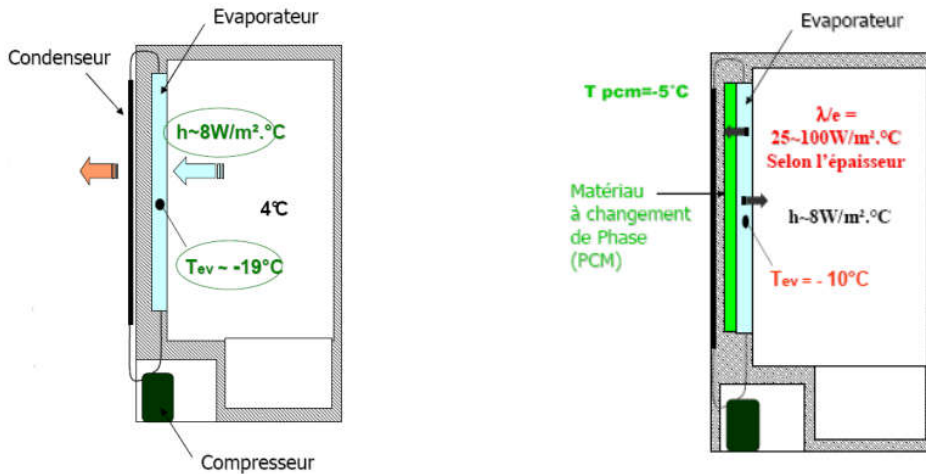


Figure II.11. (a) : Réfrigérateur normale, (b) : Réfrigérateur avec (MCP) [19].

II.8.5-MCP en refroidissement des composants électroniques

Le système de refroidissement actuellement le plus courant est la convection (naturelle ou forcée) de l'air ambiant. Un MCP peut absorber une grande quantité de chaleur en fondant, ce qui en fait une alternative très intéressante pour dissiper l'énergie émanant des composants électroniques. Étant donné que le phénomène de fusion se produit à l'intérieur d'une plage de température étroite, il est alors possible de contrôler la température de ces composants. Il suffirait donc de juxtaposer à ces composants une enceinte de MCP qui permettrait de dissiper l'énergie produite par les sources de chaleur pour un temps d'utilisation donné. Ce système est particulièrement bien adapté à l'utilisation cyclique d'équipements électroniques. Le MCP peut alors céder sa chaleur (en se resolidifiant) pendant la période d'inactivité. La figure II.12 montre un exemple d'un matériel électronique refroidi en utilisant un MCP [18].

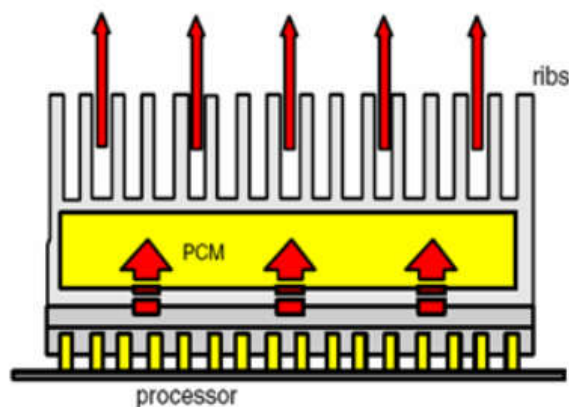


Figure II.12 : Exemple d'un processeur refroidi par un MCP [19].

II.8.6-Application aux bâtiments

L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage de chaleur dans les bâtiments est l'une des premières applications de ces matériaux [20]. Actuellement, la majorité des études sur les matériaux à changement de phase (MCP) s'orientent vers :

- Leur utilisation, lorsqu'ils sont intégrés à l'enveloppe du bâtiment, pour des applications de chauffage.
- Leur intégration à l'enveloppe de bâtiments à faible inertie thermique dans le but d'améliorer le confort d'été.

Méthodes d'utilisation du MCP dans les bâtiments

Intégration directe : les MCP sont mélangés avec des matériaux de construction (en général le plâtre ou le béton) lors de la fabrication.

Encapsulation avant intégration : les MCP sont soit en micro encapsulation, soit en macro encapsulation. Ces derniers sont intégrés soit dans les matériaux de construction, soit dans les échangeurs de chaleur [2].

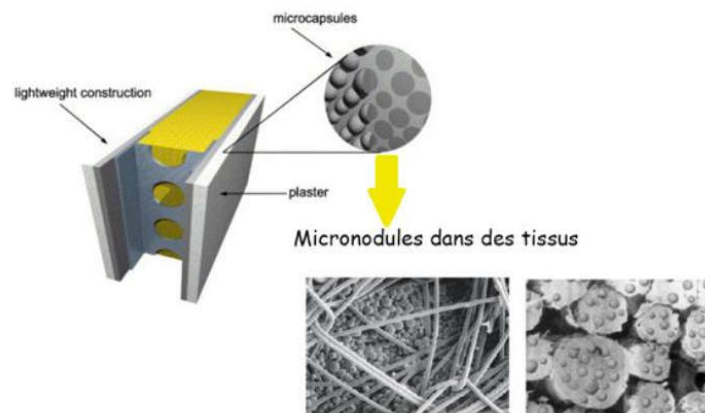


Figure II.13 : Exemple d'utilisation d'un MCP dans les bâtiments [20].

II.8.7-Rafraîchissement d'air à l'aide de MCP

Une autre voie explorée est celle des échangeurs air/MCP sous forme de plaque. Zalba et al [21] ont expérimenté des caissons contenant des plaques de MCP et dans lesquelles l'air de ventilation est forcé pour être rafraîchi au contact des plaques. Le schéma du dispositif est montré dans figure II.14.

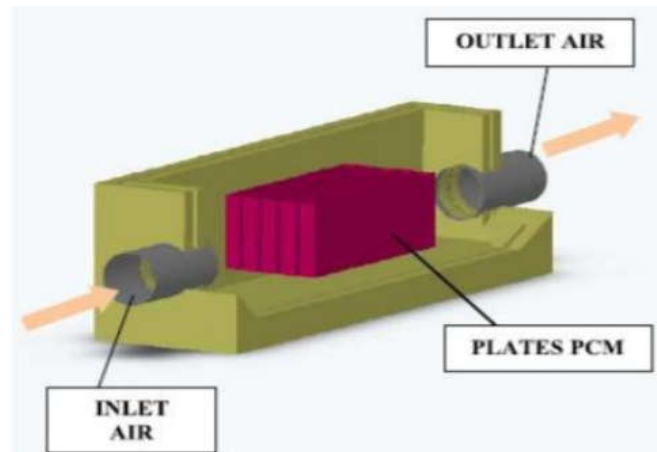


Figure II.14 : Echangeur de chaleur à MCP [21].

II.8.8-Stockage de l'énergie solaire par MCP

L'énergie solaire dépend du temps durant la journée qui est fonction de la saison, alors une énergie d'appoint est nécessaire pour assurer la continuité de fonctionnement des installations solaire. L'utilisation des matériaux à changement de phase pour stocker l'énergie est l'utilisée dans les périodes critiques était une solution inadéquate. L'une des applications les plus importantes de l'énergie solaire est le chauffage de l'eau. Cette application requiert deux composants : un capteur solaire et une unité de stockage thermique. Dans le but d'augmenter la capacité de stockage thermique, l'eau peut être remplacée par un matériau à changement de phase (MCP), caractérisé par une chaleur latente de fusion relativement élevée [18].

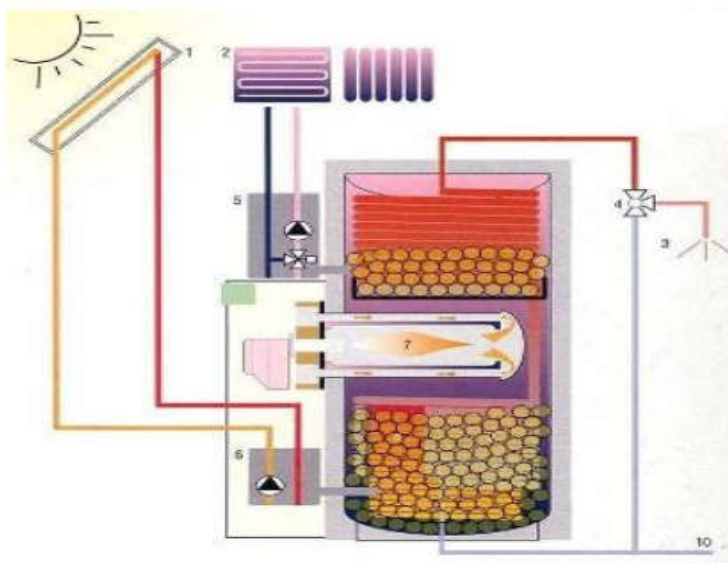


Figure II.16 : Stockage de l'énergie dans un capteur solaire utilisant un MCP [22].

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] M. Boutaoui, Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique, mémoire de master : Thermique et Combustion, Université M'Hamed Bougara Boumerdes, **2016**.
- [2] S. Berreksi, S. Latarsa, Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule sphérique, mémoire de master : systèmes Thermique et Combustion, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, **2016**.
- [3] A. Benhamza, B. Settou, Simulation numérique d'un capteur solaire plan utilisant des matériaux a changement de phase, mémoire de master : Génie Energétique, Université KASDI Merbah d' Ouargla, **2016**.
- [4] A .Guezei, Etude numérique des transferts de chaleur et de masse lors de la fusion d'un matériau à changement de phase, mémoire de master : Installations énergétiques et turbomachines, Université Mohamed Larbi Ben M'hidi, Oum El bouaghi ,**2018**.
- [5] A. Soupart-Caron, Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase, Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES, Mécanique des fluides, énergétique et procédés, **2015**
- [6] M.T. Dribat, Etude expérimentale de l'effet des MCP sur l'amélioration du confort thermique des habitats, mémoire de master : Energie Renouvelable, Université Kasdi Merbah Ouargla, **2015**.
- [7] S. Blaise, Eango « Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase» l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, **2011**
- [8] S.Hongois (Ingénieur) « Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle » L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1er avril **2011**.
- [9] A. Sharma, Review on thermal energy storage with phase change material and applications, Renewable and sustainable energy reviews 13 (**2009**).
- [10] A. abhat, S .Aboul- Enein, N .Malatidis « Heat of fusion storage system for solar heating applications ».C.Den Quden,**1981**
- [11] H. Saib, Etude de simulation des phénomènes de transfert thermique lors de la solidification d'alliages, mémoire de master **2009**.
- [12] D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, A. Athienitis and C. Liu «Energy storage building materials with organic PCM's, 28th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf,

- Georgia, Alta, Vol. 2, pp143-148, **1993**
- [13] Ben Xu and al, Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: A review to recent developments, *Applied Energy*, **2015**, 160, pp286–307
- [14] S. Ben Jabrallah, Professeur universitaire, physique-énergétique « Les Matériaux à changement de phase », Laboratoire d'énergétique et des Transferts Thermique et Massique(Tunis)
- [15] M. Alkilani and al, Review of solar air collectors with thermal storage units, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, **2011**, pp 1476–1490
- [16] A. GONTARD, K. GRYSKA, L. LALLEMAND « Amélioration de la conductivité thermique de matériau à changement de phase », Université de Pau des pays de l'Adour **2012**.
- [17] E. Oró Prim « Thermal energy storage (TES) using phase change materials (PCM) for cold applications », University de Lleida, **2013**.
- [18] D. Guerraiche, Contribution à l'étude des Transferts Thermiques lors de la Solidification d'un Liquide dans un Capteur Solaire, thèse de doctorat : Energétique, Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, **2020**
- [19] K.Azzouz, modélisation dynamique d'un système frigorifique domestiquer couple à un matériau a changement de phase ,**2007**.
- [20] B. Binet « Etude de la fusion dans des enceintes munies de sources de chaleur discrètes ».Sherbrooke (Québec), CANADA Novembre **1998**.
- [21] J.M.B. Zalba...and P.A Lazaro, Characterization of melting and solidification in a real scale PCM-air heat exchanger : Numerical model and experimental validation. *Energy Convers. Manag.* 52, 1890–1907. **2011**.
- [22] A. Lane. George, Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, Vol II:Technology, published Taylor & Francis Group **1986**.

CHAPTER III
SIMULATION NUMERIQUE

III.1-INTRODUCTION

La fusion et la solidification du matériau conduit à des processus de changement de phase accompagnés par des phénomènes d'absorption ou de dégagement de l'énergie thermique. Une frontière mobile existe, qui sépare les deux phases dans laquelle l'énergie thermique est absorbée ou libérée.

Dans ce chapitre, nous présentons une étude de simulation numérique du stockage thermique de chaleur latente par un matériau à changement de phase (MCP). La simulation numérique est réalisée par le logiciel ANSYS FLUENT 18.2. La méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. La simulation est réalisée sur 3 matériaux différents. Le modèle est basé sur la conduction pure dans le MCP solide et la conductivité ainsi que la convection dans le MCP liquide.

III.2-MODELE PHYSIQUE

Le système considéré est une cavité carrée de longueur L et de hauteur H , contenant un matériau à changement de phase (Eau, RT31 ou N-eicosene). Les parois verticales de l'enceinte sont isothermes et soumises respectivement aux températures chaude T_h et froide T_c , dont les valeurs sont respectivement inférieure et supérieure à la température de fusion T_m ($T_c < T_m < T_h$). Par ailleurs, les deux parois horizontales sont adiabatiques figure III.1.

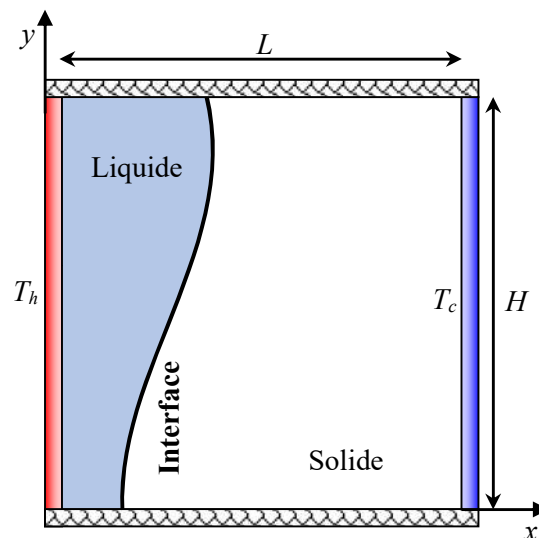


Figure III.1 : Géométrie du problème physique.

III.3-HYPOTHESES

Afin d'écrire les équations régissant le problème physique à traiter, il est nécessaire d'effectuer un certain nombre d'hypothèses.

- Les propriétés thermophysiques du MCP sont constantes.
- Le problème est bidimensionnel et transitoire.
- le transfert de chaleur par conduction dans les phases solide et liquide du MCP est pris en compte, particulièrement aux premiers instants.
- Le transfert par rayonnement est négligé.
- L'écoulement est considéré laminaire, incompressible et l'hypothèse de Boussinesq est prise en considération.
- La phase liquide est newtonienne et incompressible.
- la dissipation visqueuse est négligeable au niveau des parois verticales.
- Le MCP est pur, homogène et isotrope.
- L'expansion du MCP est négligée et le changement de phase est isotherme.

III.4-MODELE MATHEMATIQUE

III.4.1-Equation de conservation de masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} = 0 \quad (\text{III. 1})$$

Pour un fluide incompressible la masse volumique demeure constante et on a $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ donc :

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (\text{III. 2})$$

Où u_x et u_y sont les composantes de la vitesse du fluide dans les directions x et y respectivement.

III.4.2-Equation de quantité de mouvement

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \vec{\nabla} u \right) = -\vec{\nabla} p + \mu \Delta u + \vec{F} \quad (\text{III.3})$$

Suivant (Ox) :

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) + S_x \quad (\text{III.4})$$

Suivant (Oy) :

$$\rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) - \rho g \beta (T - T_{ref}) + S_y \quad (\text{III.5})$$

$\rho g \beta (T - T_{ref})$ Représente de terme de l'approximation de Boussinesq. La masse volumique du fluide varie avec la température et cette variation de la masse volumique est la cause du mouvement du fluide. Si la variation est faible, on peut traiter la masse volumique comme constante dans les termes transitoire et convectif et la traiter comme uniformément variable dans le terme source.

S_x et S_y représentent les termes sources dans les directions x et y , respectivement, utilisées pour modifier les équations de la quantité de mouvement dans la région pâteuse. Le modèle de Darcy pour les milieux poreux est utilisé pour modifier les vitesses dans les régions solide et pâteuse :

$$S_x = A u_x \quad \text{et} \quad S_y = A u_y \quad (\text{III.6})$$

Avec A représenté la porosité exprimée par :

$$A = C \frac{(1 - f_l)^2}{f_l^2 + 0.000001} \quad (\text{III.7})$$

C et f_l représentent la constante du darcy et la fraction massique, respectivement.

$$f_l = \begin{cases} 1, & T > T_l \\ \frac{T - T_s}{T - T_s}, & T_s < T < T_l \\ 0, & T < T_s \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

III.4.3-Equation de conservation d'énergie

En tenant compte du phénomène de changement de phase dans un matériau à changement de phase en cours de la fusion, trois régions distinctes peuvent être considérées : une région solide, une région liquide et une région pâteuse où coexistent les deux phases.

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \Delta T + S_T \quad (\text{III.9})$$

$$u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.10})$$

$$a = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{III.11})$$

III.4.4-Les conditions initiales et aux limites

Conditions initiales

$t=0$:

$$T_h=60^\circ\text{C} \quad T_0=T_c$$

Conditions aux limites

$$\begin{cases} 0 < x < L, y = 0: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, u_x = 0, u_y = 0 \\ 0 < x < L, y = H: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, u_x = 0, u_y = 0 \\ x = 0, 0 < y < H: T = T_h \\ x = L, 0 \leq y \leq H: T = T_c \end{cases}$$

Tableau III.1 Propriétés thermophysiques des matériaux utilisés.

Propriétés	RT31	N-eicosene	L'eau
Température de fusion (K)	300/304	308.15/3010.15	273
Viscosité dynamique (kg/m s)	0.0234	0.00385	0.001003
Chaleur latente de fusion (j/kg)	160000	247600	0
Conductivité thermique (W/mk)	0.2	0.1505	0.6
Coefficient de dilatation thermique β (K^{-1})	7.6×10^{-4}	0.0009	2.6×10^{-4}
Chaleur spécifique (j/kg K)	2000	2460	4182
Densité (kg/m^3)	820	770	998.2

III.5-PRINCIPALES ETAPES POUR DEFINIR LE PROBLEME

Présentation du logiciel ANSYS

ANSYS Workbench est un outil de gestion de projet. Il peut être considéré comme l'interface de haut niveau reliant tous nos outils logiciels. Le Workbench permet de gérer les fichiers et le lancement des différents logiciels à partir d'une fenêtre unique. Il gère le transfert de données entre Ansys Geometry / Mesh /Outils de solveur / post-traitement, voir Figure(III.2)

Créer un système d'analyse fluide Flow 2D

Pour créer un système d'analyse, c'est-à-dire une chaîne de calcul pour une simulation fluide dans un domaine géométrique, les étapes suivantes sont nécessaires voir tableau III.2 et figure III.3.

Table III.2 : Etapes nécessaires pour une simulation dans ANSYS (Workbench)

2	Géométrie	CAO-création de la géométrie	ANSYS DesignModeler
3	Maillage	Maillage	ANSYS Meshing
4	Configuration	Mise en données et simulation	ANSYS Fluent
5	Solution	Résultats CFD	
6	Résultats	Post-traitement	Tecplot

Géométrie/CAO consiste à dessiner la géométrie du problème

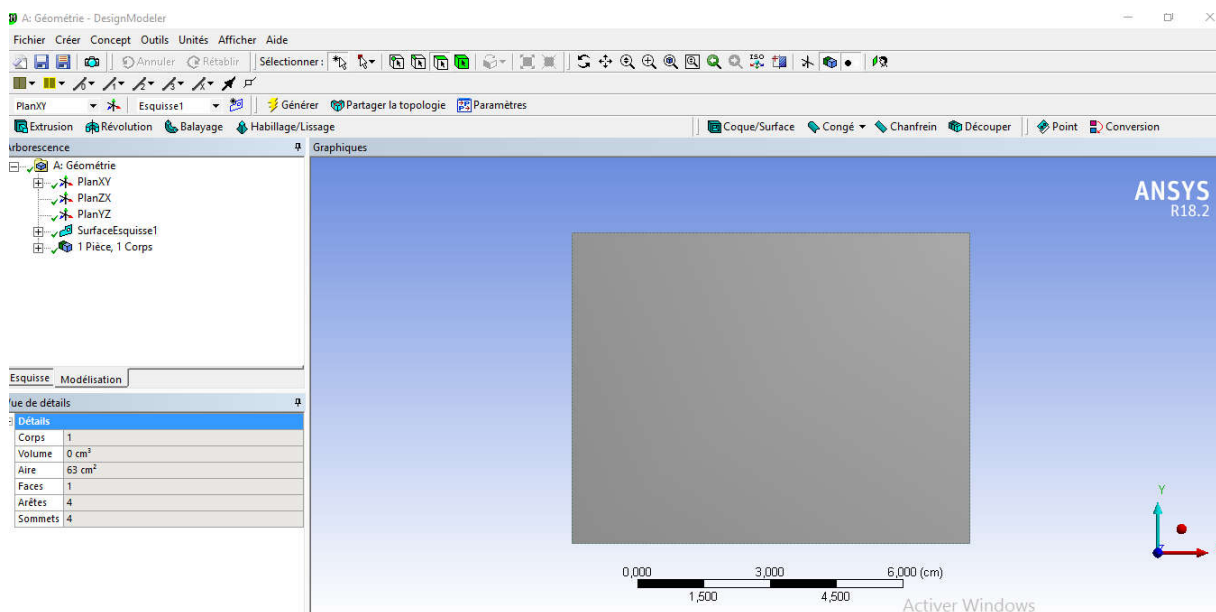


Figure III.2 Interface Design-Modeler (workbench).

- Maillage discrétisé le domaine, c'est-à-dire le découpé en mailles de calcul.
- Mise en données et choisir les modèles physiques et les hypothèses adaptées au problème.

- Résolution numérique, les équations aux dérivées partielles sont résolues par le solveur CFD après avoir discrétisées et mise sous forme algébrique. Cette résolution se fait par un algorithme itératif jusqu'à la convergence.
- Post-traitement pour visualiser et analyser les résultats.

Choix du maillage : Pour une meilleure précision et une meilleure stabilité, nous avons adopté un maillage quadrilatéral structuré à multi blocs, formé de lignes continues à travers le domaine qui suivent au mieux le contour des surfaces définissant la géométrie. Après des tests de précision, un maillage de 6400 cellules a été adopté, voir Figure (III.4).

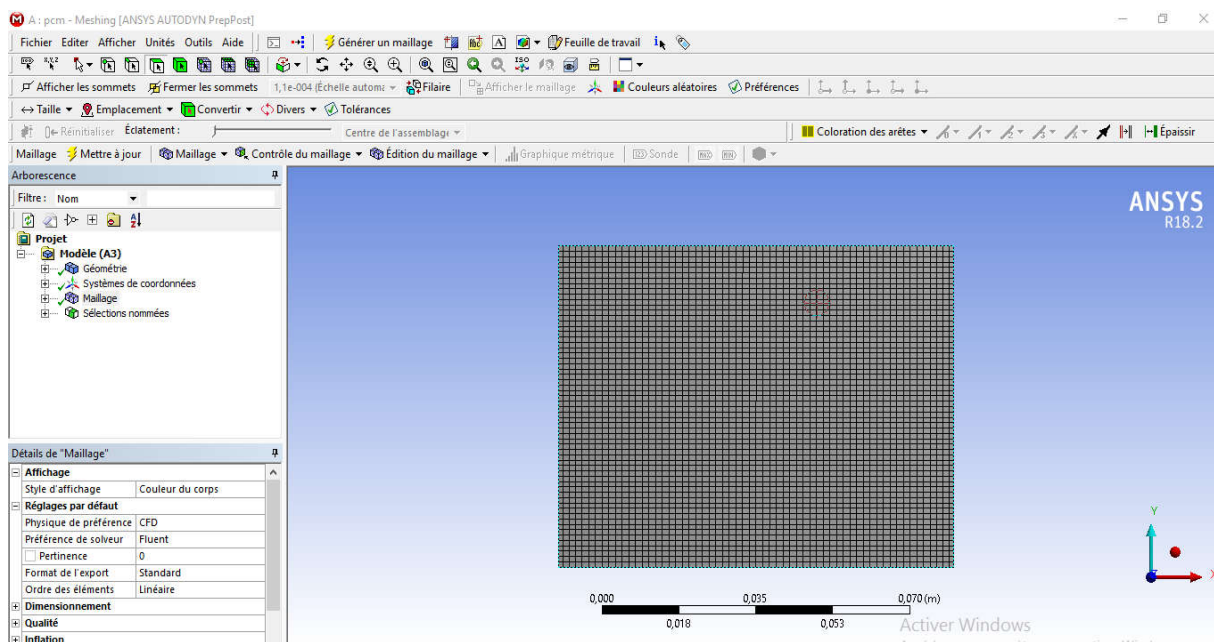


Figure III.3 : Interface ANSYS Meshing.

Mise en données : Choisir les modèles physiques et les hypothèses adaptés au problème. Pour effectuer la simulation par ce logiciel, il faut décrire les paramètres de solution comme Tableau III.3 et Figure III.4.

Table III.3 : Mise en données en Fluent

Choix de solveur	<ul style="list-style-type: none"> • Space 2D • Time Unsteady • 1-st-Order Implicit • Viscuous Laminar • Heat Transfert Enabled. • Solidification and Multing Enabled
Choix de matériau	<ul style="list-style-type: none"> • Le choix des matériaux utilisés dans notre modèle à partir des listes existantes ; sinon il faut les introduire selon nos besoins
Solver control	<p>Les équations :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mouvement • Energie <p>Les paramètres de calcul (pour le régime instationnaire) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pas de temps : 0.3 • Max .Itérations par pas de temps : 20 <p>Facteurs de sous- relaxation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pression : 0.3 • Densité : 0.9 • Forces : 0.9 • Mouvement : 0.7 • Up date de fraction liquide : 0.9 • Energie : 1 <p>Couplage pression-vitesse :</p> <ul style="list-style-type: none"> • SIMPLE <p>Schéma de discrétisation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pression (PRESTO) • Mouvement (secondorder-Upwind) • Energie (Second order- Up)

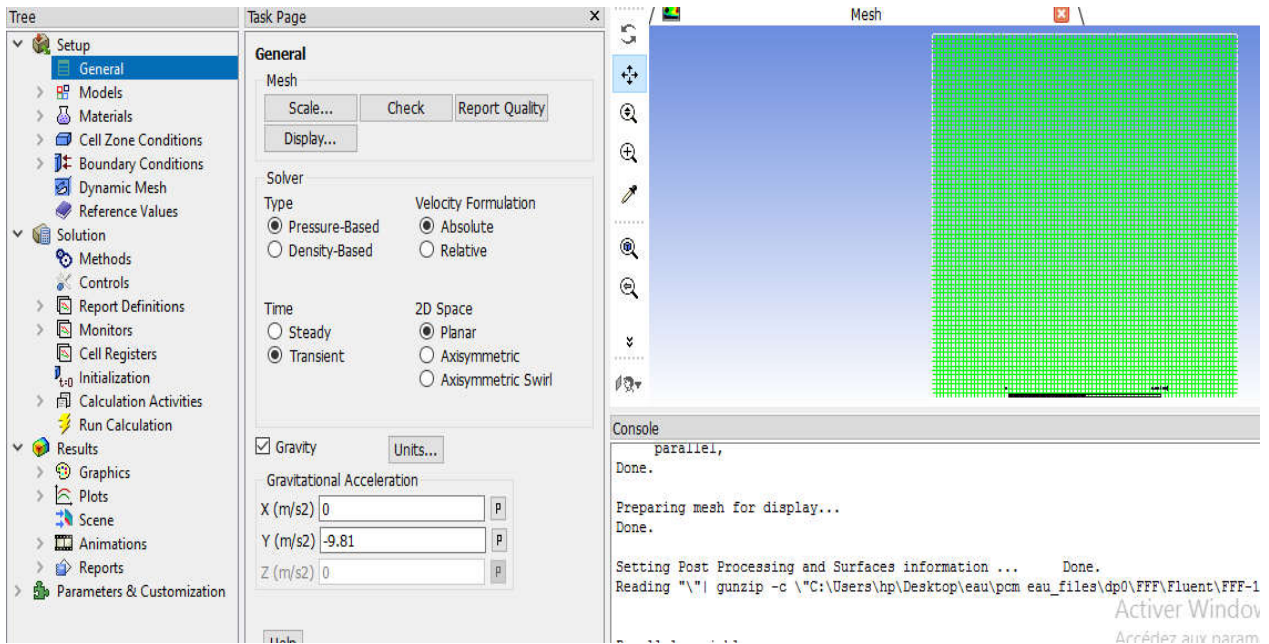


Figure III.4 : Interface ANSYS Fluent.

Résolution numérique

Les équations aux dérivées partielles sont résolues par le solveur CFD après avoir discrétisée et mise sous forme algébrique. Cette résolution se fait par un algorithme itératif jusqu'à la convergence, voir Figure III.5.

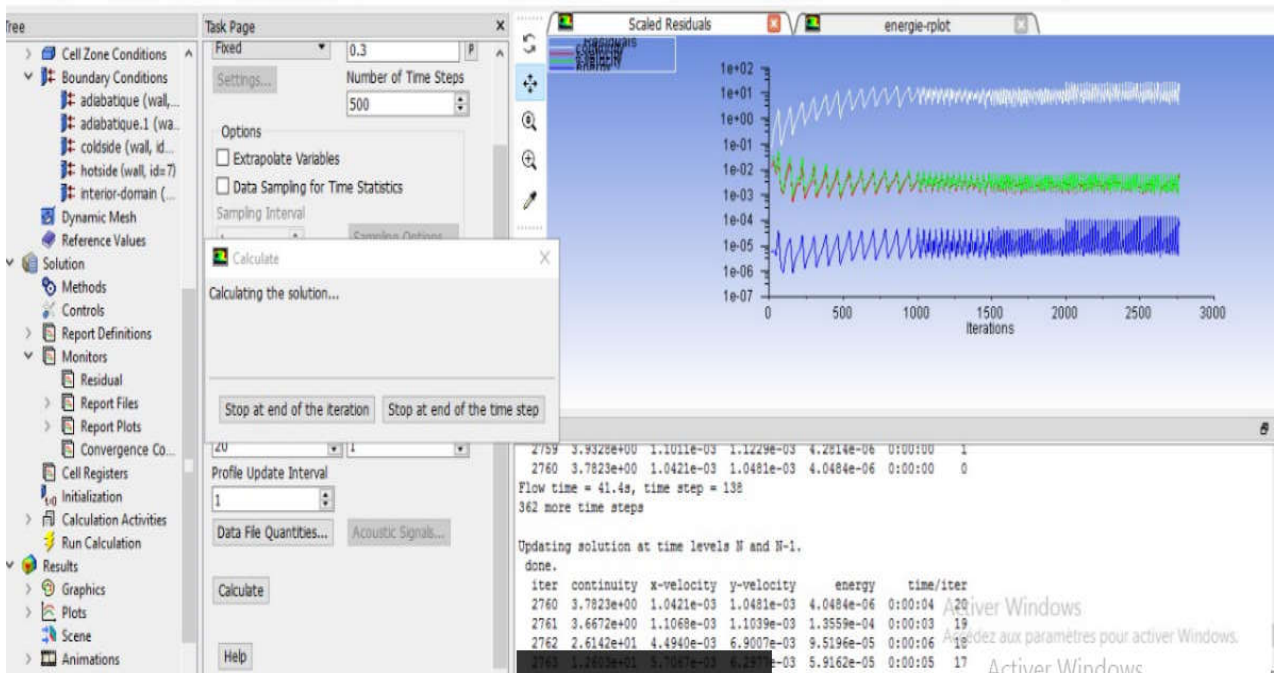


Figure III.5 : Interface Fluent exécution.

Post-traitement : Visualiser et analyser les résultats, voir Figure III.6.

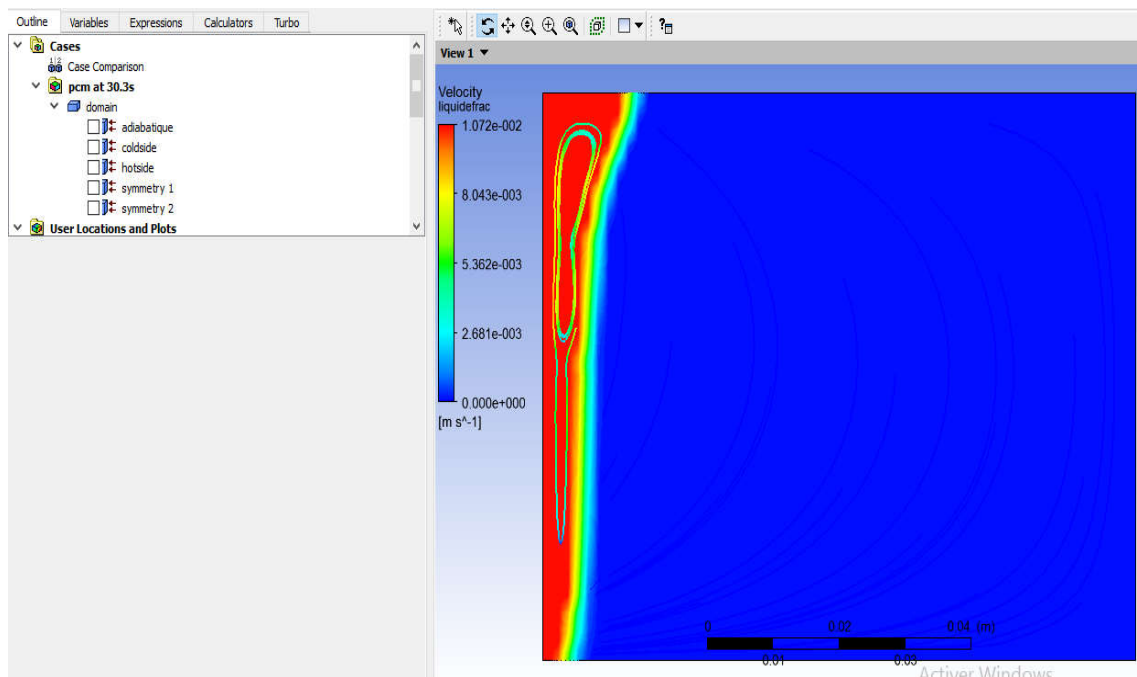


Figure III.6 : Interface CFD Post.

III.6-RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats présentés pour le système, ont été obtenus comme indiqué dans le paragraphe ci-dessus en utilisant le code commercial FLUENT. Les résultats numériques obtenus sont représentés en fraction liquide, isothermes et lignes de courant dans des figures. On a concentré notre attention sur l'effet des propriétés des différents matériaux sur le stockage d'énergie thermique, afin de trouver le meilleur.

III.6.1-Evolution de la fraction liquide en fonction du temps :

Les figures III.7 III.8 et III.9 représentent les variations de la fraction liquide avec le temps pour les différents MCPs utilisées (Eau, RT31 et N-eicosene). Nous pouvons facilement examiner la forme et le mouvement de l'interface de fusion au cours du temps. La couleur rouge représente la condition où le matériau est complètement liquide, et la couleur bleue représente la condition où le matériau est complètement solide. La ligne noire représente le front de fusion ; il sépare la région liquide et solide. Comme le montre ces figures, il est intéressant de noter que le taux de fusion le plus élevée est obtenue pour le cas de l'eau.

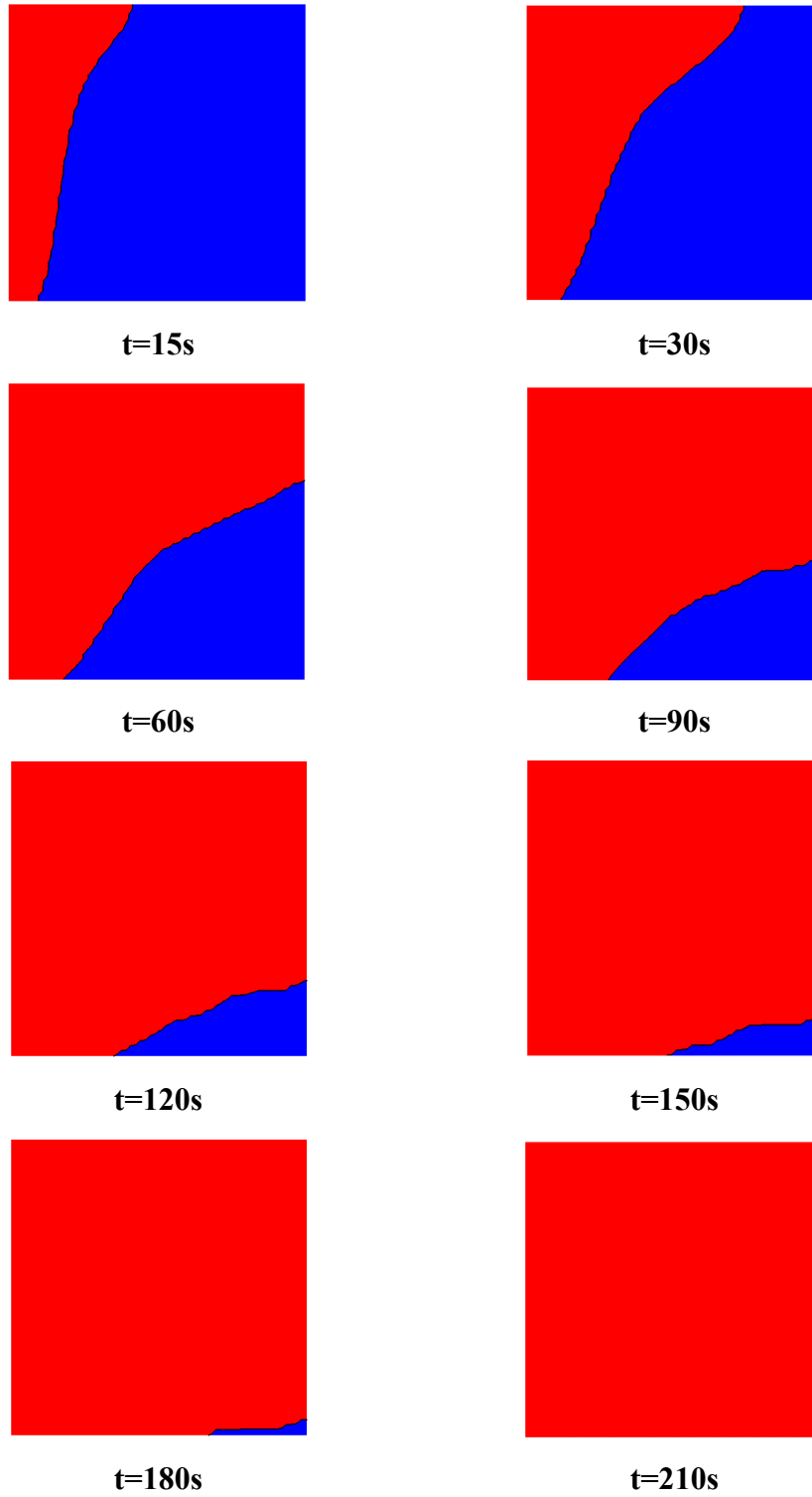


Figure III. 7 : Evolution temporelle de la fraction liquide, cas de l'Eau

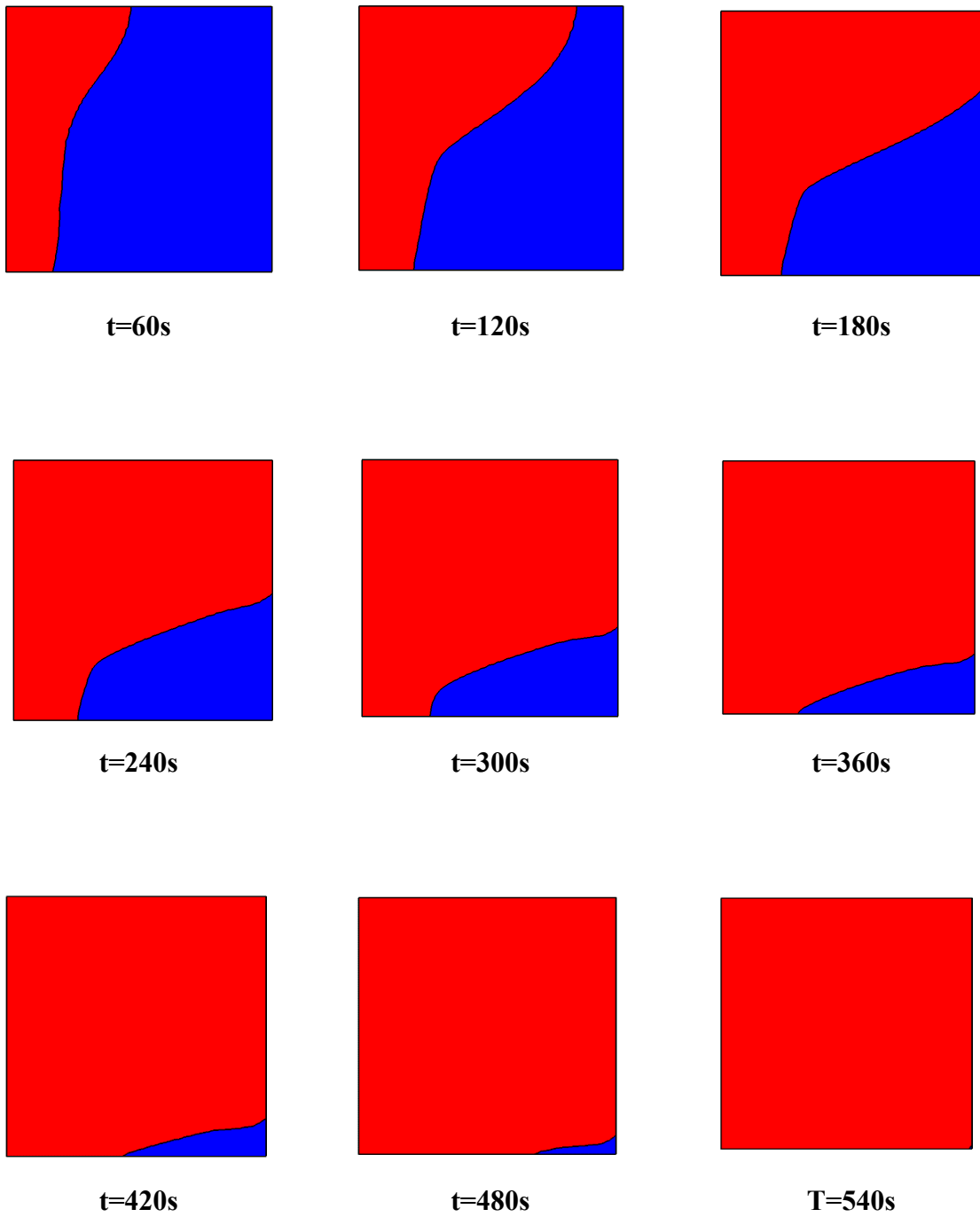


Figure III. 8 : Evolution temporelle de la fraction liquide, cas de RT31

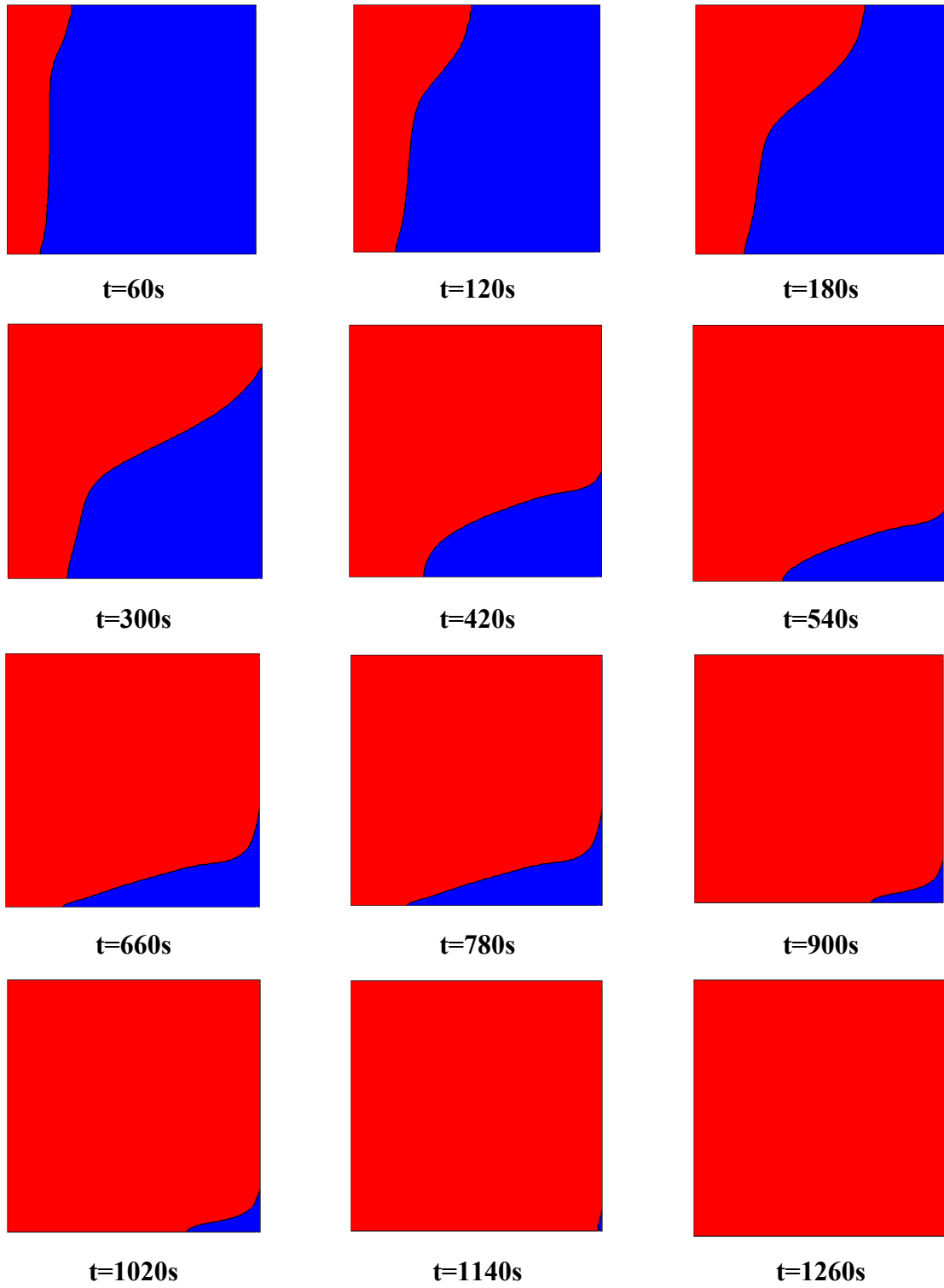


Figure III. 9 : Evolution temporelle de la fraction liquide, cas de N-eicosene

III.6.2-Evolution temporelle des isothermes et des lignes de courant

Figures. III.10 – III.15 montrent les résultats des isothermes et des lignes de courant à différents temps de fusion pour différents matériaux à changement de phase utilisées. Notez que les valeurs des contours de température sont calculées en fonction de la différence de température entre la température de fusion et la température du matériau. Puisque la température de la paroi chaude est maintenue au-dessus de la température de fusion du matériau, le matériau commence à fondre sur la paroi gauche.

Au début du processus de fusion, les isothermes sont parallèles près de la paroi chaude, grâce à la prédominance de transfert de chaleur par conduction. Ceci est dû à la gamme de mouvement limitée en raison de la résistance imposée par les forces de la viscosité.

Suite à l'augmentation de la fraction liquide de MCP dans la cavité, le mode de transfert de chaleur devient de plus en plus régi par la convection naturelle. La convection devienne par la suite l'unique mode de transfert thermique dans MCP liquide. La fusion se produit plus rapidement dans la région supérieure de la cavité par rapport à la région inférieure en raison de la température plus élevée dans la région supérieure. Ce qui explique la forme du front de fusion. Le MCP fondue, en montant le long de la paroi chaude accumule progressivement la chaleur de la paroi et arrive en haut avec une grande quantité d'énergie thermique. La chaleur accumulée par MCP accélère la fusion dans la partie supérieure, et redescend le long de l'interface solide-liquide en libérant graduellement sa chaleur. Elle arrive au fond de la cavité avec un minimum d'énergie thermique, ce qui explique une fusion faible dans cette zone de la cavité.

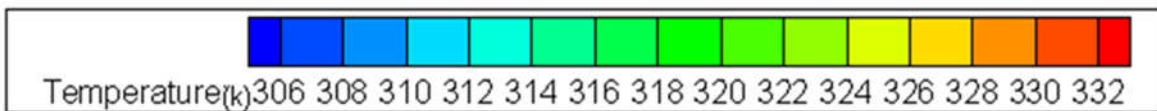
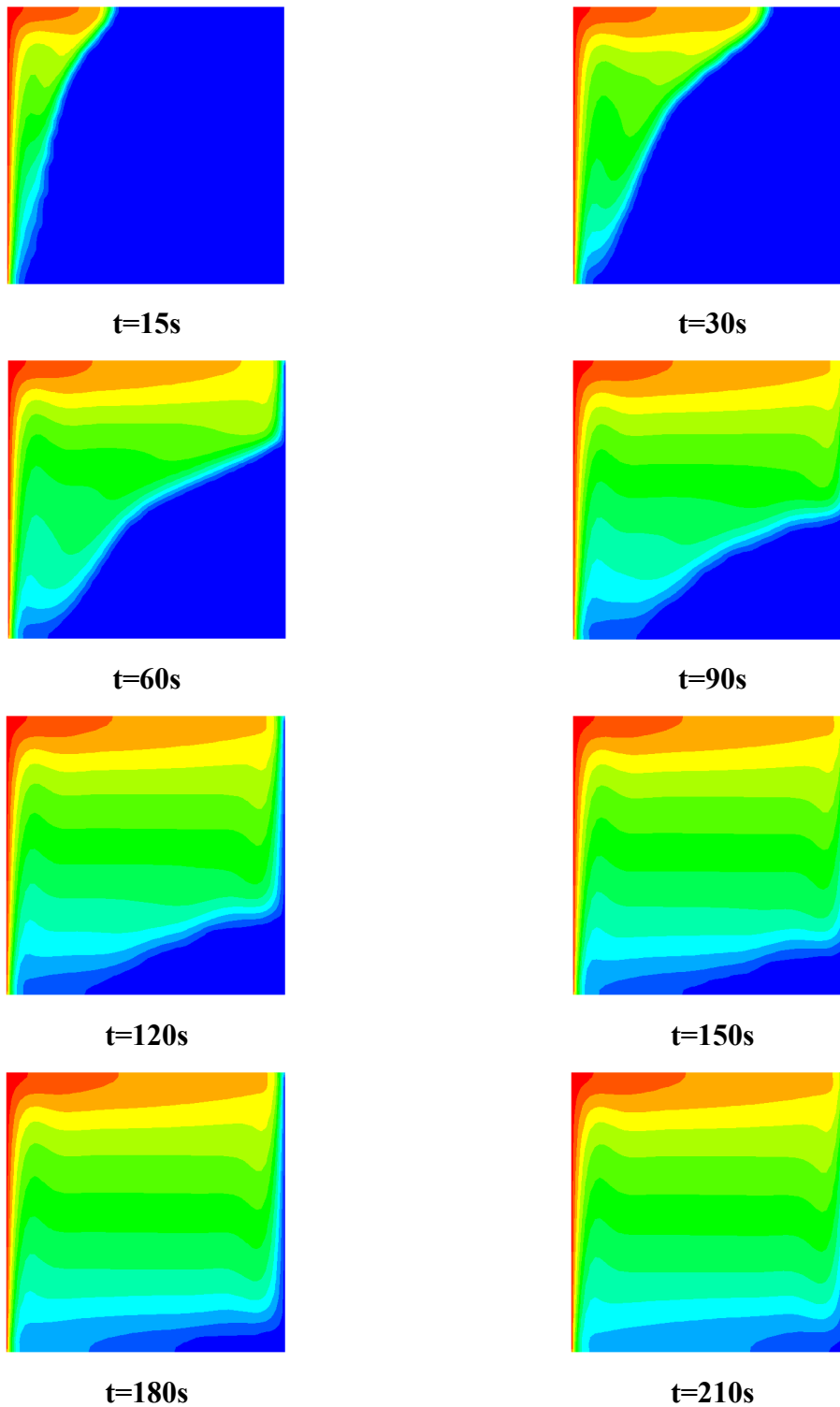


Figure III.10 : Evolution temporelle des isothermes durant le processus de charge.
Cas de l'Eau.

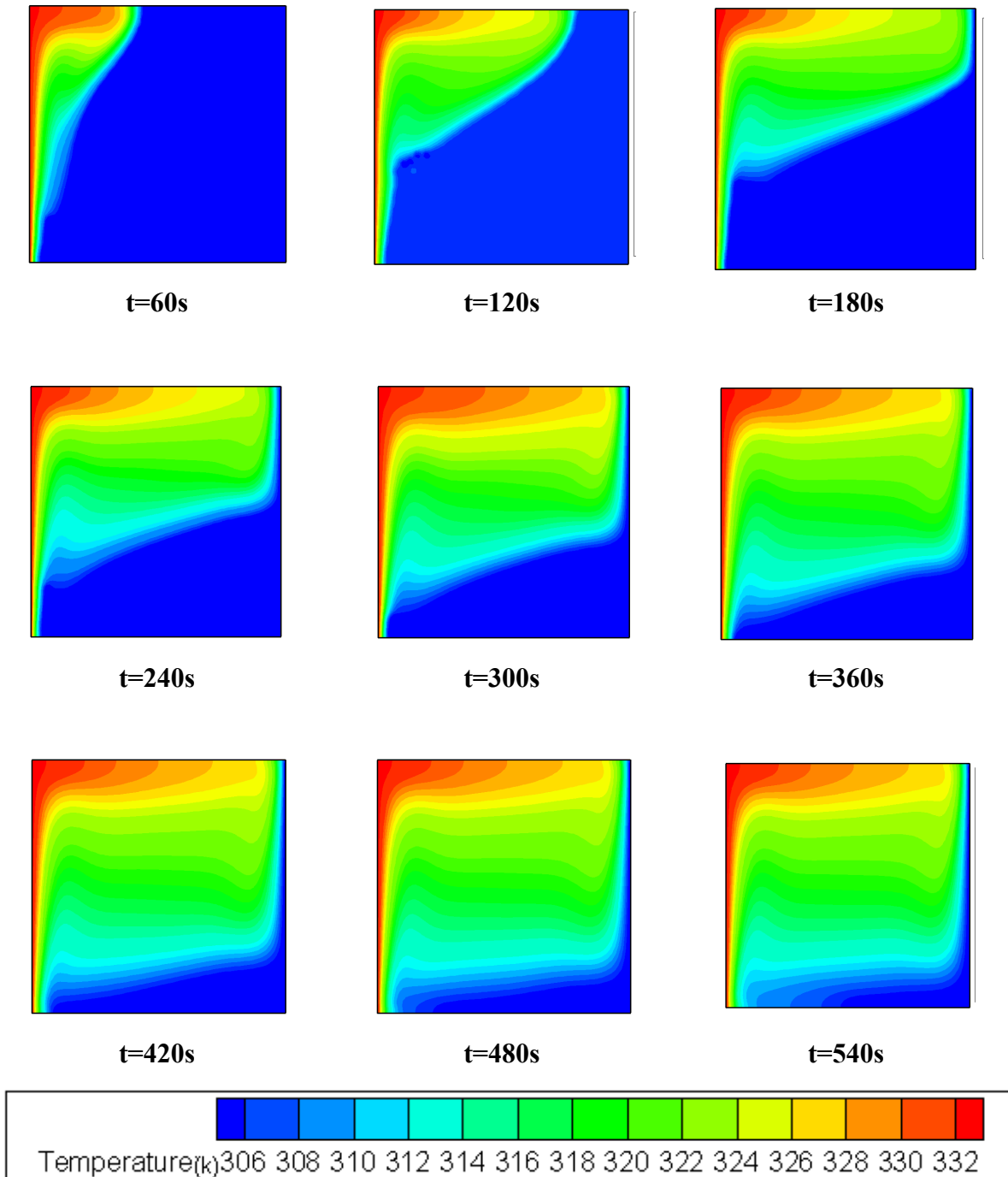


Figure III.11 : Evolution temporelle des isothermes durant le processus de charge.

Cas de RT31.

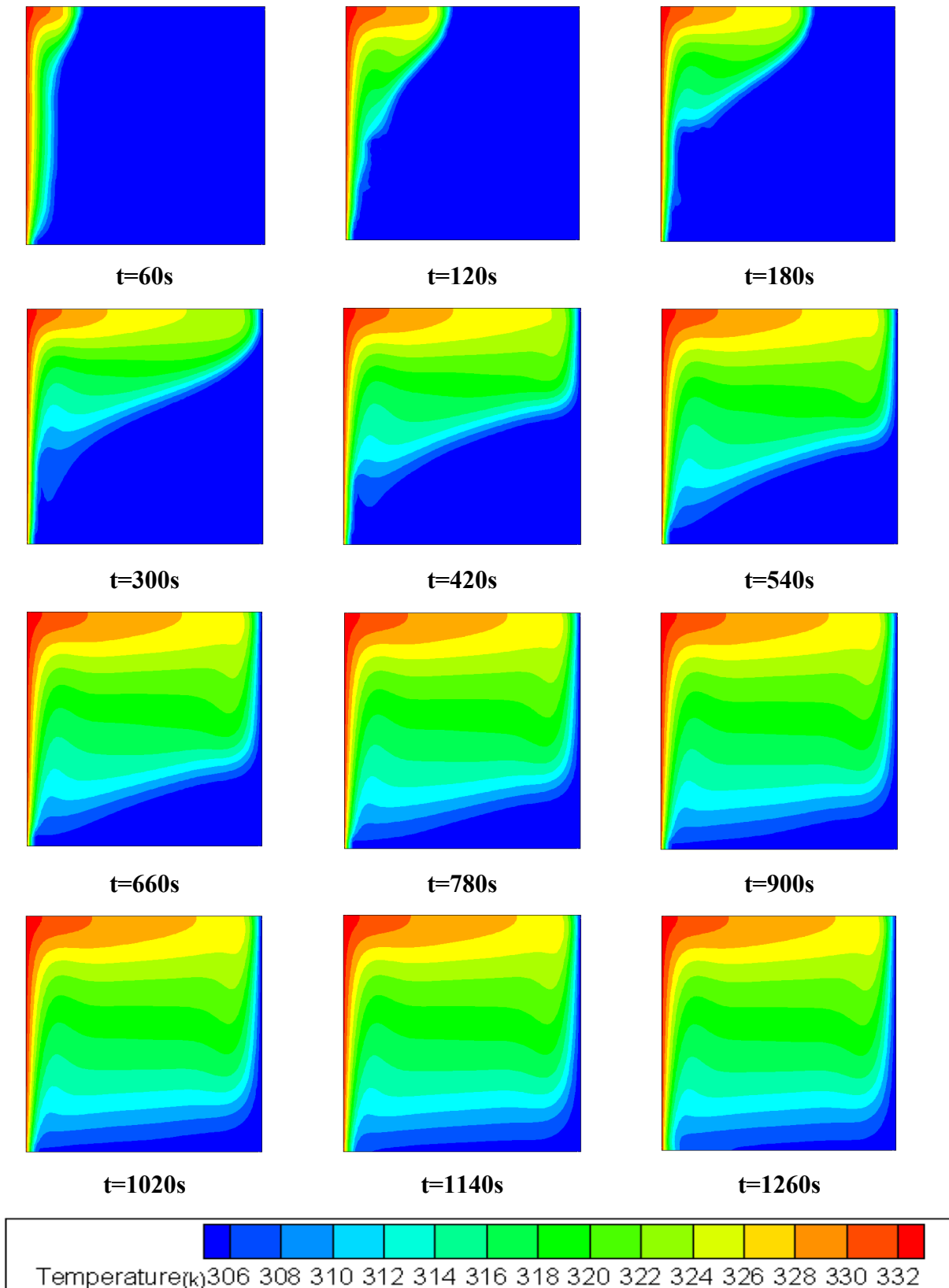


Figure III.12 : Evolution temporelle des isothermes durant le processus de charge.

Cas de N-icosene.

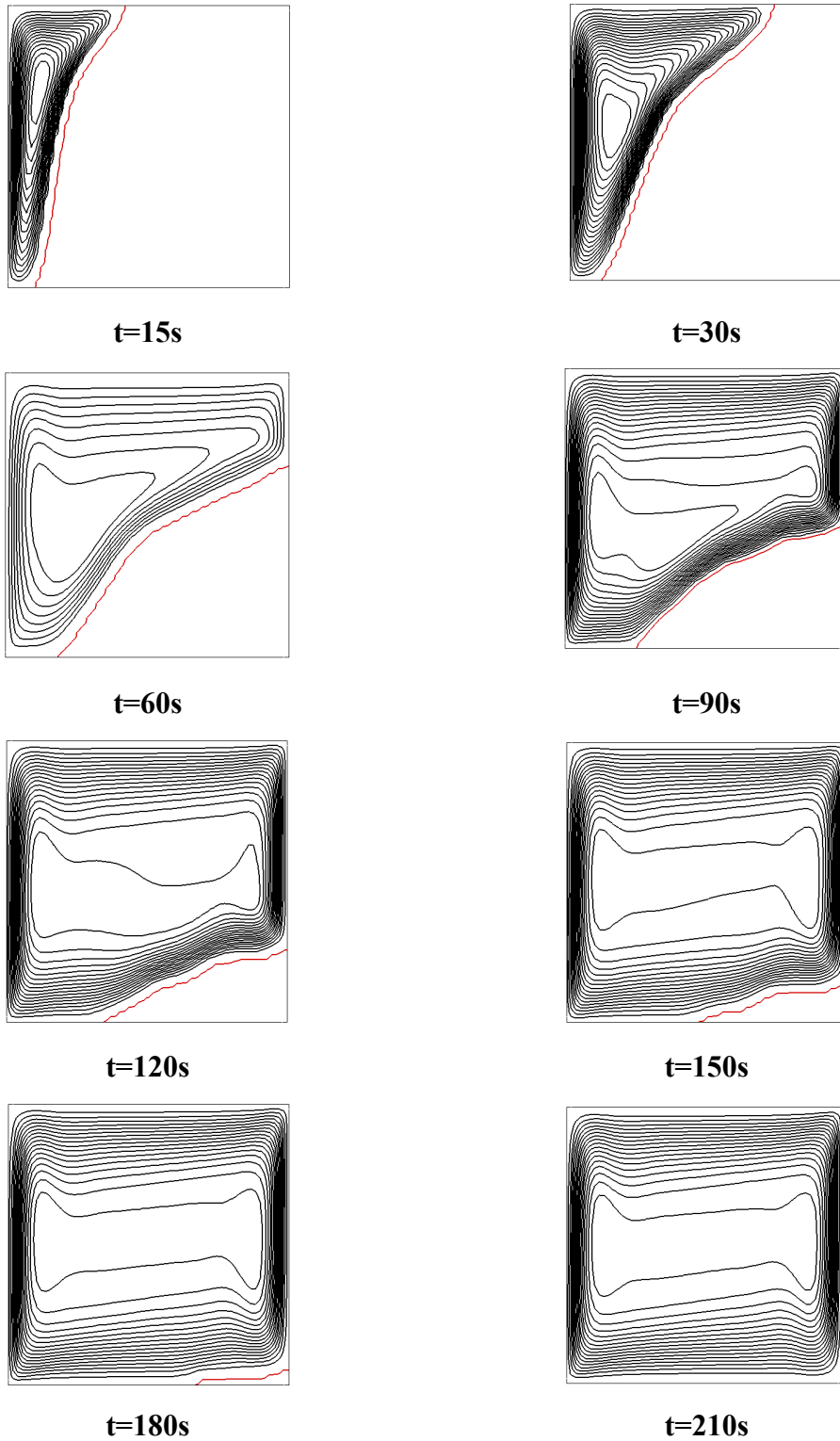


Figure III.13 : Distribution des lignes de courants durant le processus de charge.

Cas de l'Eau

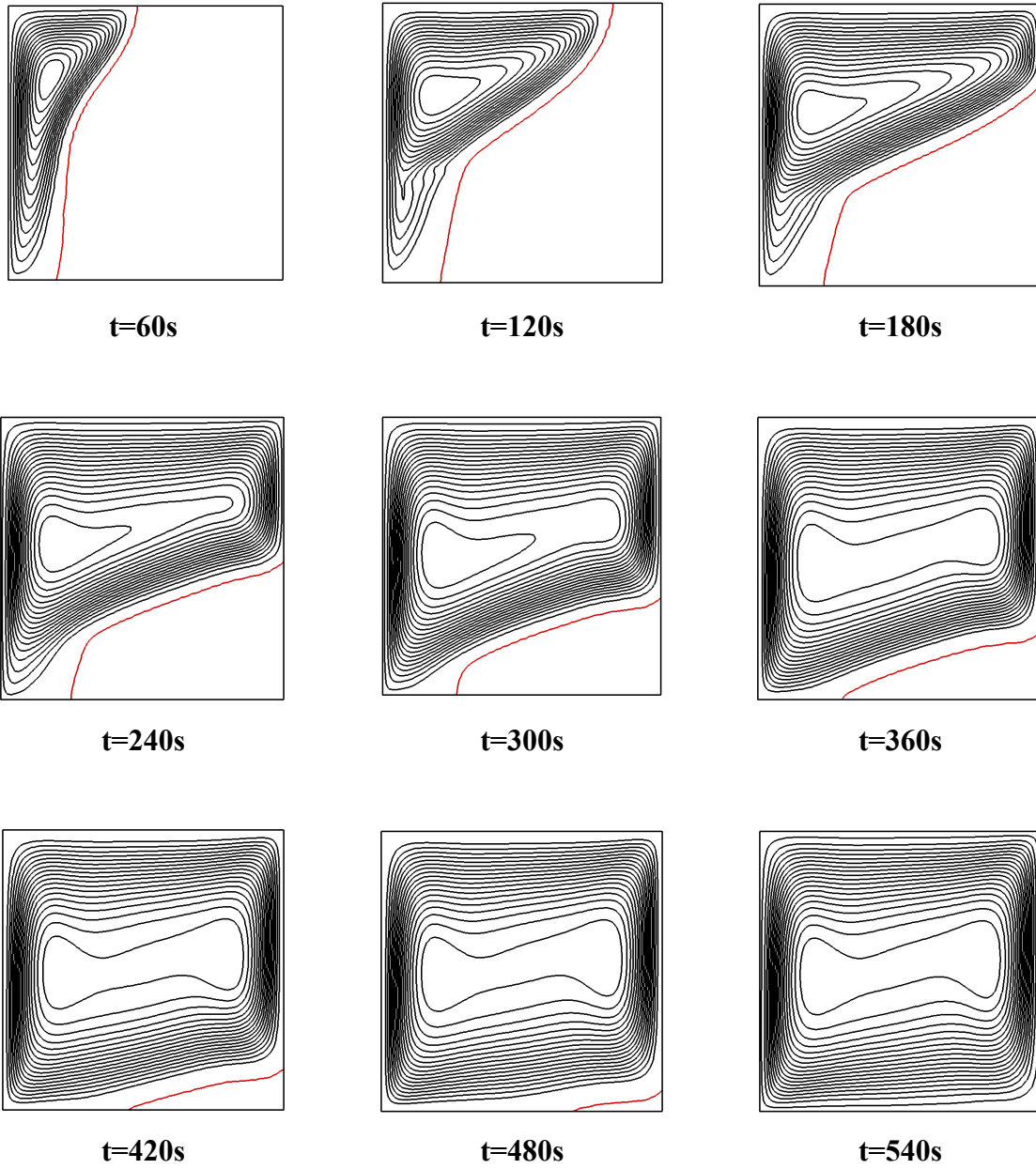


Figure III.14 : Distribution des lignes de courants durant le processus de charge.

Cas de RT31

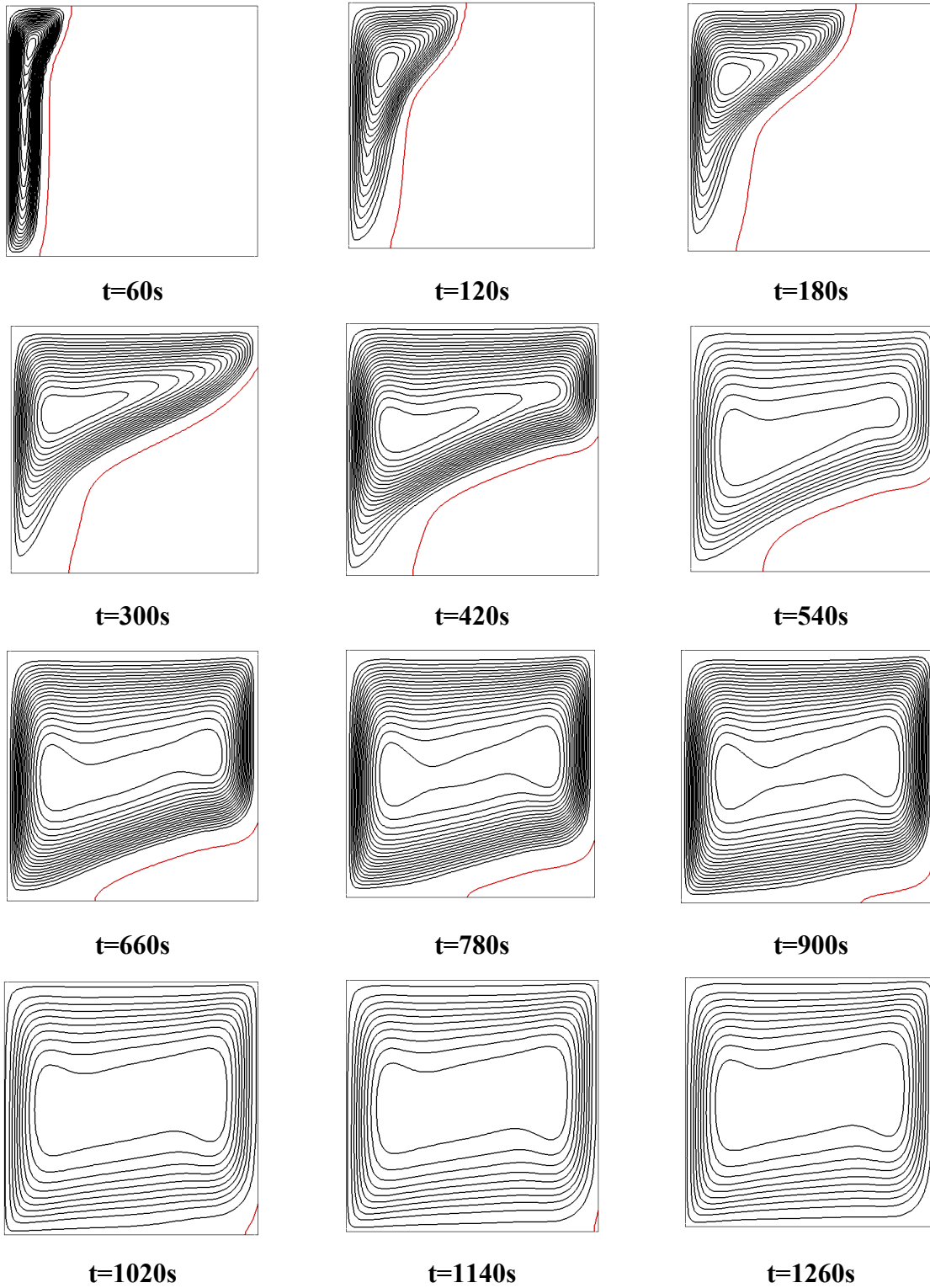


Figure III.15 : Distribution des lignes de courants durant le processus de charge.

Cas de N-eicosene

III.6.3-Evolution de la fraction liquide en fonction du temps

La fraction liquide est le rapport entre le volume solide fondu à l'instant t et le volume total de MCP à l'état solide. Pour déterminer la fraction liquide, on doit calculer le volume fondu par rapport au volume total.

Sur la figure III.16, nous avons représenté la variation de la fraction liquide pour les différents matériaux utilisés en fonction de temps. On remarque que dans le cas de la fusion du N-eicosene, le temps de fusion est plus long de 57.2% que celui de RT31 et de 84.4% que celui de l'Eau

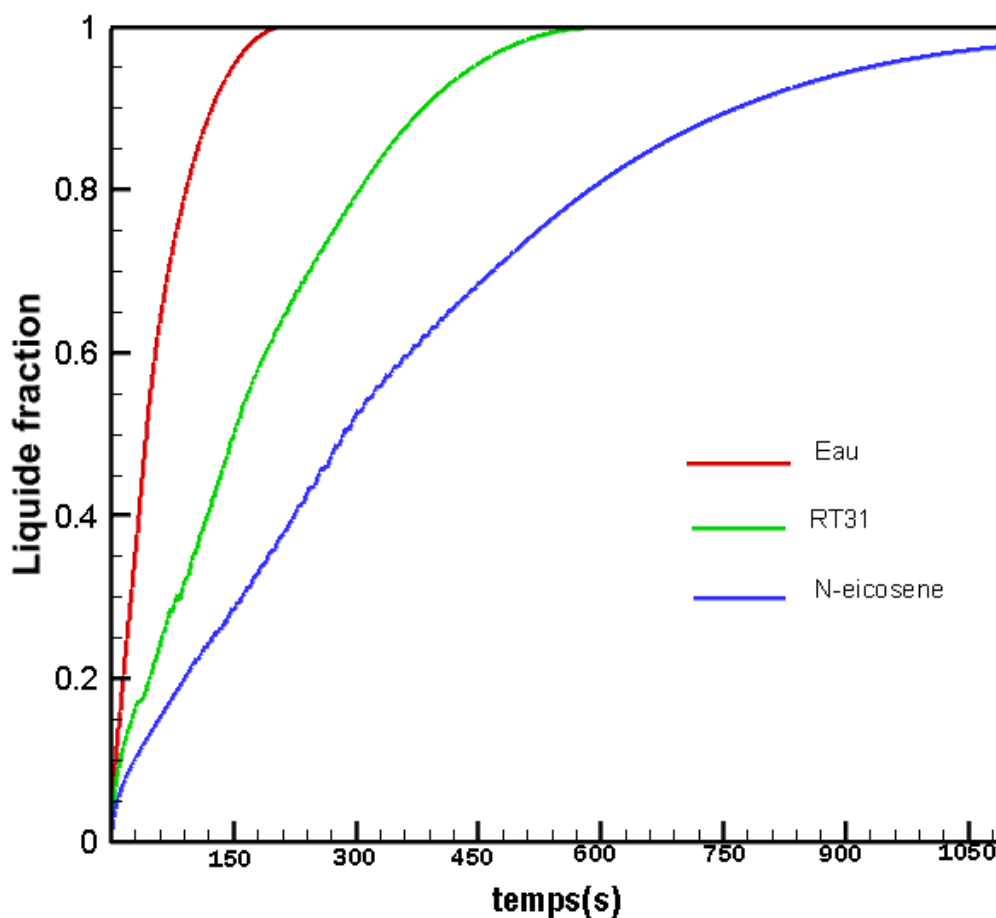


Figure III.16 : Variation de la fraction liquide pour les différents matériaux en fonction de temps.

III.6.4-Energie totale stockée

La variation en fonction du temps de la quantité d'énergie totale stockée dans la cavité est représentée sur la figure III.17 pour différents matériaux à changement de phase. La quantité d'énergie stockée augmente avec le temps jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale à la fin du processus de charge. L'énergie stockée est plus élevée pour l'Eau. La quantité de d'énergie stockée à la fin du processus de charge est d'environ 353803 J, 295473 J et 200551 J pour les systèmes de stockage par l'Eau, N-eicosene et RT31, respectivement. (Figure III.18).

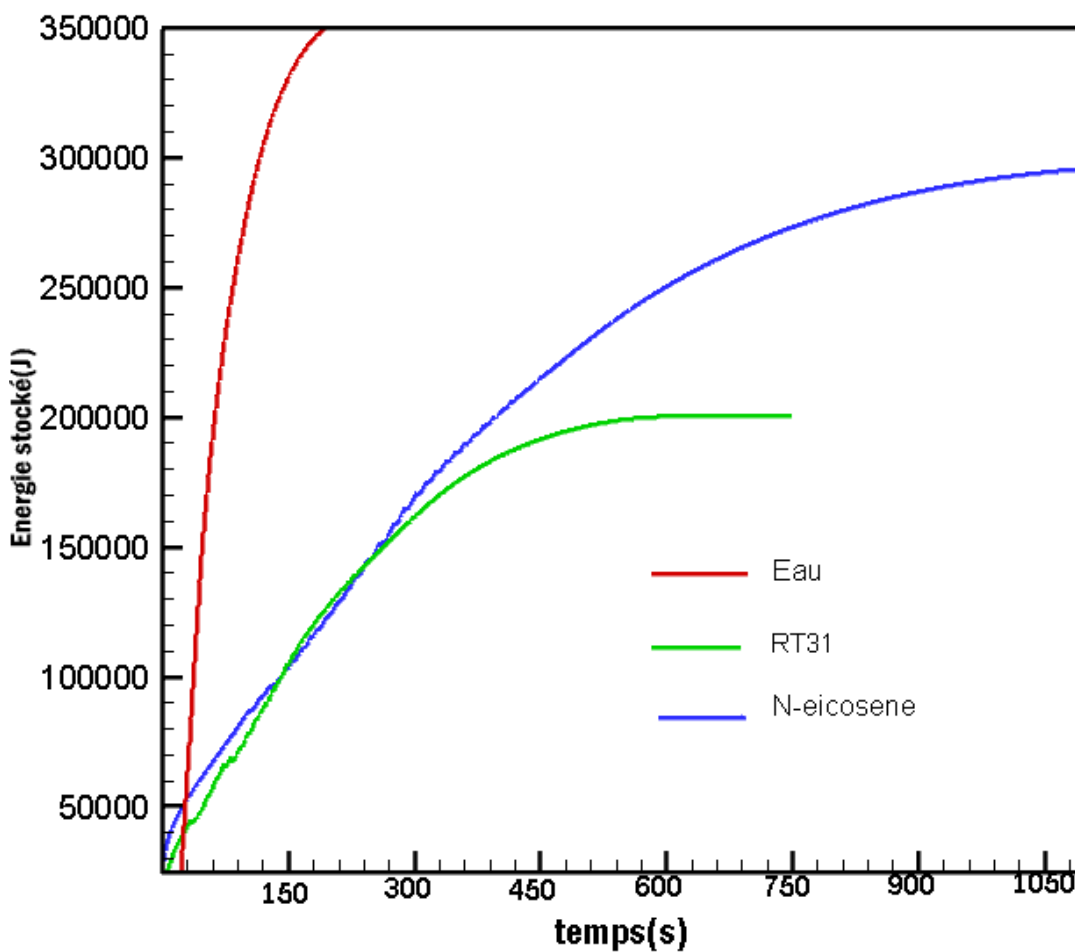


Figure III.17 : Variation de l'énergie stockée pour les différents matériaux en fonction de temps.

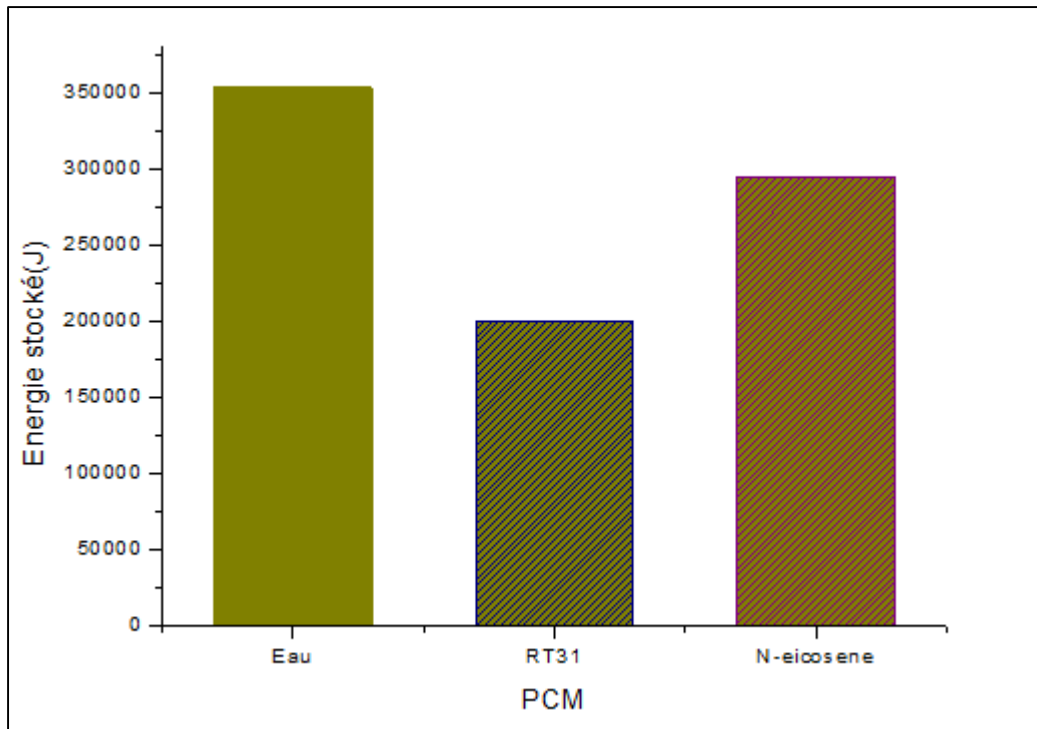


Figure III.18 : Comparaison de l'énergie totale stockée entre les trois types de MCP.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Nous avons présenté dans ce travail une étude traitant le problème de stockage par chaleur latente dans les capsules planes. Ce travail est composé de trois chapitres, le premier chapitre est consacré à recherche bibliographique des principaux travaux effectués sur le sujet. Nous avons montré au cours de cette recherche l'intérêt du sujet à travers les nombreuses applications liées au stockage d'énergie thermique. Le second chapitre, porte sur l'étude théorique des matériaux à changement de phase et leurs applications basées sur les connaissances les plus récentes. Dans le troisième chapitre, une étude de simulation numérique du stockage thermique de chaleur latente par un matériau à changement de phase (MCP) est réalisée par le logiciel ANSYS FLUENT 18.2.

L'étude numérique a été réalisée sur le transfert de chaleur lors d'un changement de phase liquide/solide d'un matériau (l'eau, RT31 ou N-eicosène) à l'intérieur d'une enceinte à parois rigides pour le cas d'une cavité carrée. Les parois verticales de l'enceinte sont isothermes et soumises respectivement aux températures chaude T_c et froide T_f ($T_c > T_f$), qui encadrent la température de fusion T_f . Par ailleurs, les parois horizontales sont adiabatiques.

La méthode des volumes finis avec une formulation enthalpie a été utilisée pour discrétiser les équations régissant le système, en prenant compte des modes de transfert par conduction et par convection, et le transfert de chaleur à changement de phase d'un MCP enveloppé dans une cavité. Différents matériaux ont été envisagés.

Les effets de la convection naturelle et le type de matériau sur processus de fusion dans une cavité rectangulaire ont été étudiés numériquement.

L'étude numérique que nous avons réalisée nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le transfert de chaleur par conduction qui régit la fusion au début du processus ne doit pas être complètement négligée par la suite, comme c'est le cas dans d'autres travaux. Car la conduction continue de contrôler la propagation de la fusion dans le MCP encore solide dans la partie inférieure de l'enceinte jusqu'à la fin du processus. Ce fait est confirmé par les résultats trouvés, sont similaires à certains travaux numériques et expérimentaux précédents.
- La cinétique de la fusion d'un matériau à changement de phase est fortement influencée par les propriétés thermophysiques de MCP.

CONCLUSION GENERALE

- Dans le cas de la fusion du N-eicosene, le temps de fusion est plus long de 57.2% que celui de RT31 et de 84.4% que celui de l'Eau
- La quantité de d'énergie stockée à la fin du processus de charge est d'environ 353803 J, 295473 J et 200551 J pour les systèmes de stockage par l'Eau, N-eicosene et RT31, respectivement.
- afin d'augmenter le taux de fusion, il est préférable d'utiliser un matériau à changement de phase de conductivité thermique élevée.

Bien que l'approche bidimensionnelle utilisée dans la modélisation soit objective, on s'attend à ce que les résultats d'une simulation numérique tridimensionnelle, que nous recommandons, confirment les résultats qualitatifs obtenus dans ce travail. Peut-être aussi prendre en compte les effets de l'inclinaison de la cavité dans des conditions aux limites fixes ou variables du domaine étudié. Notons aussi que la tendance pratique de la recherche scientifique actuelle et future vise l'amélioration de la conductivité thermique par le développement de nouveaux matériaux à changement de phase à base de nanoparticules pour arriver à améliorer le transfert de chaleur et réduire la durée de changement de phase, paramètres clés dans les systèmes de stockage thermique.

Résumé :

Dans ce travail, nous étudions numériquement le phénomène de changement de phase solide-liquide (fusion) des matériaux à l'intérieur d'une cavité. Plusieurs matériaux à changement de phase ont été utilisés : Eau, RT31 et N-eicosene. La cavité est de géométrie carrée, dont les surfaces gauche et droite sont maintenues respectivement aux températures chaude et froide alors que les surfaces supérieure et inférieure sont considérées adiabatiques. Le modèle mathématique 2D utilisé dans cette étude est basé sur la méthode d'enthalpie-porosité ainsi que les techniques des volumes finis. Un logiciel commercial de calcul (ANSYS FLUENT 18.2) est utilisé pour résoudre les équations de conservation. Les résultats obtenus concernant les isothermes, les lignes de courant ainsi que la fraction liquide sont présentées. Les résultats montrent que la convection naturelle influence considérablement le transfert de chaleur ainsi que la cinétique de la fusion. Pour le cas de la fusion du N-eicosene, le temps de fusion est plus long de 57.2% que celui de RT31 et de 84.4% que celui de l'Eau.

المخلص

في هذا العمل ، قمنا بدراسة رقمية لظاهرة تغير طور السائل- الصلب (الدوبان) لبعض المواد داخل تجويف. تم استخدام العديد من مواد تغيير الطور: الماء ، RT31 و N-eicosene. التجويف ذو شكل هندسي مربع ، حيث يتم الحفاظ على السطحين الايمن و الايسر عند درجات الحرارة الساخنة والباردة ، على التوالي ، في حين الأسطح العلوية والسفلية تم اعتبارها معزولة حراريا. يعتمد النموذج الرياضي ثنائي الأبعاد المستخدم في هذه الدراسة على طريقة الانتالبي - المسامية وكذلك تقنيات الحجوم المنتهية. تم استخدام البرنامج التجاري ANSYS FLUENT 18.2 لحل معادلات الانحفاظ. تم عرض النتائج المتحصل عليها على شكل منحنيات لكل من منحنيات الحرارة، خطوط التيار و كذلك الكسر السائل. أظهرت النتائج أن الحمل الحراري الطبيعي يؤثر بشكل كبير على انتقال الحرارة وكذلك على حركية الدوبان. في حالة N-eicosene ، يكون وقت الدوبان أطول بنسبة 57.2% مقارنة بانصهار RT31 و 84.4% أطول من وقت دوبان الماء.

Abstract:

In this work, the phenomenon of solid-liquid phase change (melting) of materials inside a cavity is numerically investigated. Several phase change materials have been used: Water, RT31 and N-eicosene. The left and right walls of the cavity are maintained at hot and cold temperatures, respectively, while the upper and lower surfaces are considered adiabatic. The applied two-dimensional physical model is based on the enthalpy method approach as well as the finite volumes techniques. Commercial software (ANSYS FLUENT 18.2) is used to solve the conservation equations. The results obtained concerning isotherms and streamlines as well as the liquid fraction are presented. The results show that natural convection considerably influences heat transfer as well as the kinetics of fusion. For the case of N-eicosene, the melting time is 57.2% longer than that of RT31 and 84.4% longer than that of Water.