

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par:

DJELTI Mohammed

HADJ CHIKH Mohammed

Sujet

Approximation de la fraction liquide à partir des relevés expérimentaux de la température

Soutenue devant le jury composé de :

M M.BENRAMDANE	MCA	Univ. Tlemcen	Président
M H.GUELLIL	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur
M A.N. KORTI	Pr	Univ. Tlemcen	Encadreur
Mme K.MISSOUM	Doctorante	Univ. Tlemcen	Co-Encadreur

Dédicace

Avant toute chose je tiens à remercier Dieu pour l'accomplissement de ce projet.

Je dédie ce travail

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A ma chère sœur NOURA pour son encouragement permanent, et son soutien moral,

A mes chers amis, BILAL, ABDENOUR, YOUCEF pour leurs appuis et leurs encouragements.

A mon binôme HADJ CHIKH Mohammed

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Merci d'être toujours là pour moi.

DJELTI Mohammed

Je dédie ce travail de la fin d'études :

A mes très chers parents qui sans eux je ne suis rien aujourd'hui

A ma famille et ma chère sœur

A tous mes amis : Chahine, Ismail, Mohammed, Rabah, Nasro, Kader, Younes,

Aissa, Sidahmed

A toute la promotion de génie mécanique

Sans oublié mon binôme Djelti

Enfin pour tous les gens qui m'estiment espérant bien que je n'ai oublié

Personne dans cette courte page.

HADJ CHIKH Mohammed

REMMERCIEMENT

*Pour commencer, nous voulons adresser notre remerciements à **Mr KORTI AB-DE ILLAH NABIL** notre professeur et notre encadreur et notre co-encadreur **MISSOUM KHAOULA**, pour leurs aide, conseils et pour l'orientation, la guidance, l'encouragement, ainsi que pour ses précieux conseils lors de la réalisation de notre mémoire dans les meilleures conditions.*

*Nous remercions également les membres du jury **Mr GUELIL HOCINE** et **Mr BENRAMDANE MOHAMMED** pour leurs efforts et leur soin apporté à notre travail*

Sans oublier de remercier toute l'équipe du laboratoire génie mécanique de L'université Abou bekr belkaid de Tlemcen et tous nos professeurs de GM qui ont contribué à notre formation.

Enfin, nous adressons notre plus sincère remerciement à nos familles : nos parents pour leur amour et leur soutien. Nos sœurs et nos frères et aussi nos amies pour leurs encouragements à poursuivre notre route et réaliser tous nos vœux.

Résumé

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur latente représente l'un des moyens les plus prometteurs pour l'économie d'énergie. Ces systèmes ne sont pas très répandus car leur conception est freinée par la complexité des phénomènes de transferts thermiques qui se déroulent particulièrement au niveau de l'interface solide-liquide. L'objectif principal de ce travail est l'élaboration d'un code numérique écrit en langage Matlab pour la détermination des différents paramètres thermiques (fraction liquide, chaleur stockée, coefficient de convection, etc.). Le code est validé avec les résultats expérimentaux élaborés précédemment.

Mots clés : Matlab, transfert thermique, fusion, paraffine, convection naturelle.

Abstract

One of the most promising ways to save energy is to store thermal energy by latent heat. These systems are not very widespread because their design is hampered by the complexity of the heat transfer phenomena that take place particularly at the solid-liquid interface. The main objective of this work is the development of a digital code written in Matlab language for the determination of the various thermal parameters (liquid fraction, stored heat, convection coefficient, etc.). The code is validated with the experimental results developed previously.

Keywords: Matlab, heat transfer, fusion, paraffin, natural convection

ملخص

من أكثر الطرق الواعدة لتوفير الطاقة تخزين الطاقة الحرارية بواسطة الاقتصاد الحراري. هذه الأنظمة ليست منتشرة على نطاق واسع لأن تصميمها يعيقه تعقيد ظاهرة انتقال الحرارة التي تحدث بشكل خاص في الواجهة الصلبة والسائلة. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تطوير كود رقمي مكتوب بلغة Matlab لتحديد المعلمات الحرارية المختلفة (نسبة السائل ، الحرارة المخزنة ، معامل الحمل الحراري ، إلخ). يتم التحقق من صحة الكود من خلال النتائج التجريبية التي تم تطويرها مسبقاً.

الكلمات المفتاحية: Matlab ، انتقال الحرارة ، الدوبان، البارافين ، الحمل الحراري الطبيعي.

Table des matières

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Généralité sur le stockage thermique

1.2	Introduction.....	3
1.3	Stockage d'énergie.....	3
1.4	Intérêt de stockage de l'énergie	3
1.5	Différents types de stockage	4
1.5.1	Stockage mécanique.....	4
1.5.1.1	Énergie mécanique potentielle	4
1.5.1.2	Énergie mécanique cinétique	5
1.5.2	Stockage thermochimique.....	6
1.5.3	Stockage électrique	6
1.5.4	Stockage thermique.....	7
1.5.5	Stockage chimique	7
1.6	Critères de choix des matériaux pour le stockage thermique :	8
1.7	Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible	8
1.7.1	Métaux liquides.....	10
1.7.2	Eau	10
1.7.3	Huiles	10
1.7.4	Métaux solides	11
1.7.5	Roches, béton et briques	12
1.7.6	Métaux	12
1.8	Stockage d'énergie thermique par chaleur latente.....	13

1.8.1	Contraintes technologiques du stockage par chaleur latente	15
1.8.2	Avantages du stockage par chaleur latente	16
1.9	Stockage d'énergie thermique par voie thermochimique	17
1.9.1	Principe de fonctionnement	17
1.10	Comparaison entre les différents types de stockage d'énergie thermique	18

Chapitre II : Matériaux à changement de phase

2.2	Introduction.....	21
2.3	Matériaux à changement de phase	21
2.4	Types des matériaux à changement de phase (MCP) :	21
2.4.1	Les MCP inorganiques :	21
2.4.2	Les MCP Organiques :	22
2.4.3	Les MCP eutectiques :	22
2.5	Choix du matériau à changement de phase	23
2.5.1	Critères thermodynamiques	24
2.5.2	Critères cinétiques	24
2.5.3	Critères chimiques	24
2.5.4	Critères économiques.....	25
2.6	Classification des matériaux à changement de phase(MCP).....	25
2.6.1	Composés organiques	26
2.6.1.1	Avantages et inconvénients de paraffine	27
2.6.1.2	Conditionnement des paraffines	28
2.6.2	Les composés organiques non-paraffiniques.....	31
2.6.3	Les sels hydratés	32
2.7	Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage	34
2.7.1	Surfusion.....	34

2.7.2	Surchauffe.....	35
2.7.3	Dilatation	35
2.8	Le choix d'un MCP	35
2.8.1	Considérations thermiques.....	35
2.8.2	Propriétés physiques	35
2.8.3	Considérations cinétiques	36
2.8.4	Considérations de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux.....	36
2.8.5	Considération chimiques	36
2.8.6	Considérations économiques	36
2.9	Applications des MCP	36
2.9.1	Stockage de l'énergie thermique	36
2.9.2	Application aux bâtiments	37
2.9.2.1	Parois à MCP	39

Chapitre III : Position du problème

3.1	Introduction.....	41
3.2	Partie expérimentale	42
3.2.1	Description de l'installation.....	42
3.3	Résultats expérimentaux	44
3.4	Partie numérique	45
3.4.1	Description du logiciel.....	45
3.4.2	Présentation du programme élaboré	45
3.4.3	Fraction Liquide :	46
3.4.4	Chaleur sensible.....	48
3.4.5	Chaleur latente	48
3.4.6	Chaleur totale.....	48
3.4.7	Coefficient de convection	49

3.4.8 Nusselt	49
3.4.9 Stefan	49
3.4.10 Rayleigh	50

Chapitre IV : Résultats et discussions

4.1. Introduction.....	52
4.2. Evolution de la fraction liquide	52
4.3. Evolution de l'énergie stockée.....	53
4.4. Evolution du coefficient de convection :	54
4.5. Evolution du nombre de Nusselt.....	55
4.6. Evaluation du nombre de Stefan.....	56
4.7. Evaluation du nombre de Rayleigh.....	56
Conclusion générale.....	58
Référence bibliographiques.....	59

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur le stockage thermique

Fig1. 1. Mode de fonctionnement de l'énergie hydraulique.....	4
Fig1. 2. Installation du système air comprimé.....	5
Fig1. 3. Principales techniques de stockage de l'énergie thermique .	7
Fig1. 4. Diagramme de changement d'état d'un matériau.....	8
Fig1. 5. Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.	14
Fig1. 6. Variation de l'enthalpie : A) pour un corps pur, B) pour un mélange.	15
Fig1. 7. Stockage de chaleur dans les matériaux	15
Fig1. 8. Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible et latente.....	16
Fig1. 9. Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermochimique.	17

Chapitre II : Matériaux à changement de phase

Fig2. 1. Classification des MCP.....	25
Fig2. 2. Système de stockage et conditionnement de MCP en nodules	29
Fig2. 3. Exemples d'encapsulation de MCP	30
Fig2. 4. Profil de la paraffine micro-encapsulés à différents instants de cycles Thermiques ..	31

Fig2. 5. L'efficacité de MCP dans les textiles	37
Fig2. 6. Intégration des MCP dans l'habitat.....	37

Chapitre III : Position du problème

Fig3. 1 . Matériel et accessoire de l'installation	42
Fig3. 2. Positions des capteurs de température.....	42
Fig3. 3.Evolution de la température de la paraffine et la température de la paroi.	44
Fig3. 4. Evolution de la fraction volumique de la paraffine.....	44
Fig3. 5. Vecteurs temps et températures importés sous Matlab	45
Fig3. 6. Division de la surface du MCP en volume de contrôle.....	46
Fig3. 7. Interpolation linéaire entre deux thermocouples voisins.....	47
Fig3. 8. organigramme montrant le code MATLAB	50

Chapitre IV : Résultats et discussions

Fig4. 1. Evolution de la fraction volumique de liquide.....	52
Fig4. 2. Evolution temporelle de la chaleur stockée.....	53
Fig4. 3. Evolution du coefficient de convection.....	54
Fig4. 4. Evolution du nombre de Nuesselt.....	55
Fig4. 5. Evolution du nombre de Stefan.	55
Fig4. 6. Evolution du nombre de Rayleigh.....	56

Liste des tableaux

Tableau1. 1. Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20°C	9
Tableau1. 2. Avantages et inconvénients de l'eau.....	10
Tableau1. 3. Avantages et inconvénients de l'huile comme stockeur de chaleur	11
Tableau1. 4. Avantages et inconvénients des métaux	12
Tableau1. 5. Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.	18
Tableau 2. 1..Propriétés thermophysiques de certains MCP.....	22
Tableau 3. 1. Propriétés thermo-physiques de la paraffine	43
Tableau 4. 1. Erreurs de calculs.	53

Introduction Générale

Au cours des dernières années, il existe plusieurs études scientifiques réalisées dans le domaine de l'énergie solaire, en particulier dans l'énergie thermique. Celle-ci peut être stockée sous forme de chaleur sensible, chaleur latente ou les deux à la fois. L'analyse du stockage thermique se fait très souvent numériquement. La fusion de la paraffine peut utiliser comme moyen de stockage de la chaleur latente au cours du changement d'état. L'énergie thermique peut être alors stockée de façon isotherme en utilisant des matériaux à changement de phase.

Le choix des matériaux à changement de phase repose sur la chaleur latente élevée et la température de changement de phase qui doit être proche de la température ambiante. Il permet à la fois de réduire considérablement l'encombrement du stockeur et les pertes thermiques pendant la période de stockage.

Notre plan de travail comporte quatre chapitres suivants :

Le premier chapitre représente une description sur le stockage thermique en générale.

Le deuxième chapitre présente un aperçu sur les matériaux à changement de phase.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux utilisés pour la validation du code numérique élaboré.

Le dernier chapitre regroupe les résultats obtenus avec leurs interprétations.

On termine avec une conclusion générale.

Chapitre I

Généralité sur le stockage d'énergie

1.1 Introduction

En parlant de l'environnement et de rationalisation de l'exploitation des ressources énergétiques, le stockage de l'énergie thermique se présente comme une solution particulièrement intéressante puisqu'il permet de dissocier l'utilisation de la production de l'énergie. Le stockage d'énergie est une solution très adaptée aux systèmes de froid industriel et de climatisation. Mais dans ce secteur, le stockage par chaleur sensible est souvent inopérant du fait de la nécessité de forts écarts en températures et le stockage thermochimique est encore peu développé.

Actuellement, le stockage d'énergie par chaleur latente apporte une solution efficace aux investisseurs soucieux d'optimiser leur équipement. Il permet une réelle gestion de l'énergie et de son utilisation au moment où elle est la plus disponible (énergie solaire, tarifs de nuits pour l'électricité, etc.).

1.2 Stockage d'énergie

Le stockage d'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Il est un des principaux thèmes de recherche développé en énergétique et un des moyens les plus adaptés à la modulation d'une source variable comme c'est le cas avec le soleil [1].

Par son importance dans notre civilisation grande consommatrice d'énergie, le stockage d'énergie est une priorité économique. Il concourt à l'indépendance énergétique, c'est-à-dire à la capacité d'un pays à satisfaire par lui-même ses besoins énergétiques. De ce fait, le stockage d'énergie est souvent l'objet d'une attention particulière de la part des pouvoirs politiques, surtout dans les pays fortement dépendants de l'étranger. Par extension, le terme "stockage d'énergie" est souvent utilisé pour décrire le stockage de la matière qui produira cette énergie [2].

1.3 Intérêt de stockage de l'énergie

Le stockage d'énergie est un enjeu à la hauteur de la consommation d'énergie primordial. Pour les états, l'indépendance énergétique est stratégique et économiquement essentielle. Pour les individus et les entreprises, une énergie disponible à la demande, sans

coupure inopinée, est un confort et une commodité pour la production. Même pour la production d'énergie, le stockage est essentiel : en réalité, ce qu'on appelle couramment et économiquement production d'énergie n'est pas physiquement, de la production, mais de la transformation d'un stock d'énergie (thermique.....) en énergie directement utilisable pour un travail (électricité....).

1.4 Différents types de stockage

L'énergie peut être stockée par différentes options ; stockage sous forme potentielle (L'énergie est stockée sous forme d'un fluide (eau ou air comprimé)), stockage sous forme cinétique Ex : Stockage par volant d'inertie [3].

1.4.1 Stockage mécanique

Cette catégorie regroupe les voies les plus connues de stockage à grande échelle : le stockage hydraulique et à air comprimé. Elle inclut aussi les volants d'inertie.

1.4.1.1 Énergie mécanique potentielle

- Stockage hydraulique

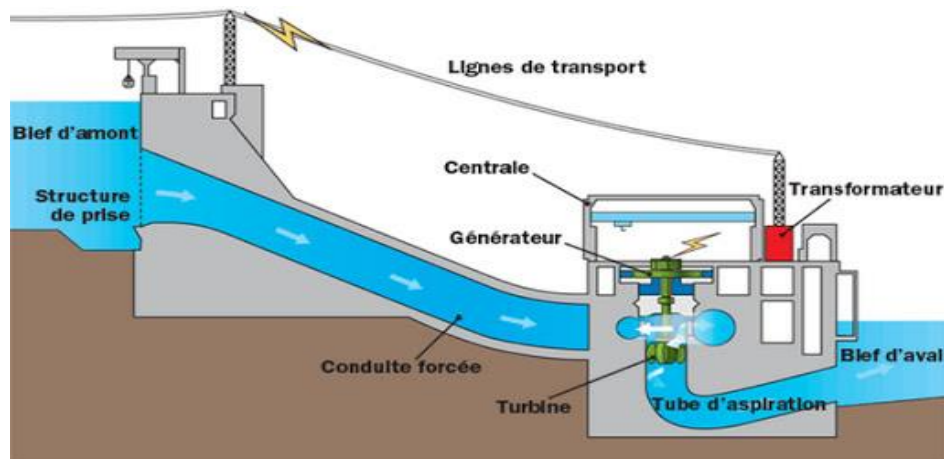


Fig1. 1. Mode de fonctionnement de l'énergie hydraulique

Il permet de stocker de grande quantité d'énergie électrique par l'intermédiaire de l'énergie potentielle de l'eau. Une STEP (station de transfert d'énergie par pompage), type de centrale hydroélectrique, est utilisée pour transférer l'eau entre deux bassins situés à des altitudes différentes. Lorsque le réseau fournit un surplus d'électricité, l'eau du bassin inférieur est pompée dans le bassin supérieur. Sous l'effet de la pesanteur, cette masse d'eau représente une future capacité de production électrique. Lors d'un déficit de pro-

duction électrique, la circulation de l'eau est inversée : la pompe devient turbine et restitue l'énergie accumulée. Avec un rendement pouvant atteindre plus de 80%, il s'agit de la solution la plus employée pour stocker l'énergie des centrales électriques.

➤ Stockage d'air comprimé

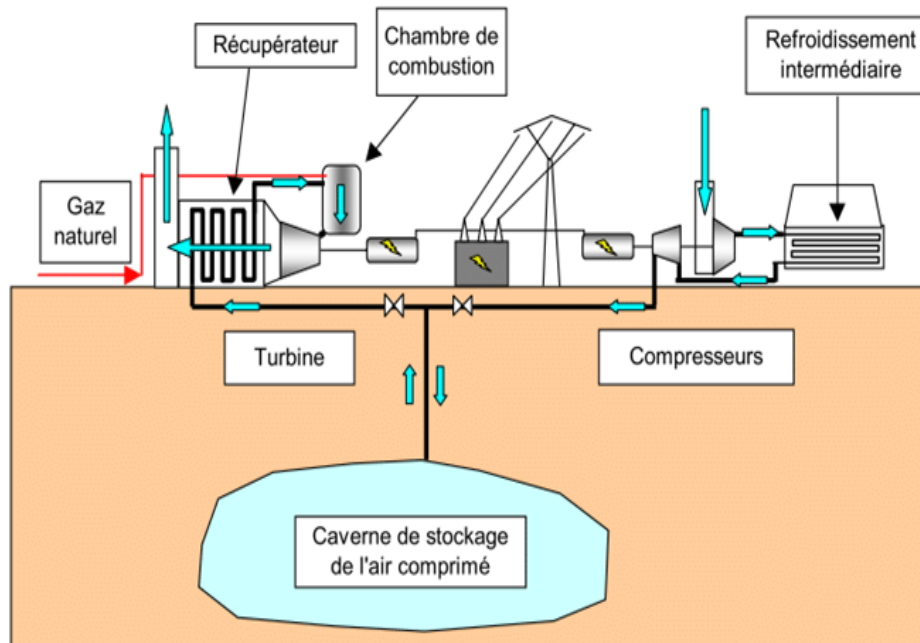


Fig1. 2. Installation du système air comprimé

Quand la demande d'électricité est faible, les systèmes existants utilisent d'anciennes mines de sel comme réservoirs et un ensemble moteur-générateur-turbine. Quand la demande d'électricité est importante, l'air comprimé est utilisé pour faire tourner une turbine couplée à un alternateur produisant de l'électricité. Le rendement, actuellement aux environs de 50%, est un axe de recherche et de développement. Le stockage à air comprimé à partir des énergies éolienne et solaire fait l'objet d'installations pilotes en Allemagne et aux Etats-Unis [4] [5].

1.4.1.2 Énergie mécanique cinétique

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie cinétique dans un « volant d'inertie », dispositif en forme de roue tournant autour de son axe central. Une machine électrique lui fournit l'énergie cinétique (fonctionnement moteur) et la récupère selon les besoins

(fonctionnement générateur), entraînant une baisse de la vitesse de rotation du volant d'inertie. Ce système permet de restituer plus de 80% de l'énergie accumulée mais pour un temps de stockage limité. En pratique, le volant d'inertie est utilisé pour un lissage à très court terme de la fourniture d'énergie au sein d'appareils de production. C'est notamment le cas des moteurs thermiques et surtout des moteurs Diesel.

1.4.2 Stockage thermochimique

Les systèmes thermochimiques comptent sur l'énergie absorbée et libérée dans la rupture et la réformation des attaches moléculaires dans une réaction chimique complètement réversible.



Cette technologie est à l'heure actuelle encore en développement, toutefois il est intéressant de connaître ses principales caractéristiques. L'utilisation principale de ce système reste le stockage de l'énergie solaire [6].

Le stockage d'énergie thermochimique est basé sur l'énergie des liaisons des composés chimiques mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles [7-9]. Dans ce système, la capacité de stockage de chaleur est généralement élevée parce qu'une énergie chimique élevée se produit au cours de la rupture et de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction chimique réversible [8]. Le stockage d'énergie thermochimique peut être effectué à l'aide de caloduc chimique ou d'une pompe à chaleur chimique. Ce système est plus compliqué que le stockage de la chaleur sensible et latente.

Pour ce système, la réaction chimique doit être réversible et les composés chimiques utilisés doivent être inoffensifs et non corrosifs [8-10].

1.4.3 Stockage électrique

- photovoltaïque (batteries, accumulateur)
- Stockage à très basse température : supraconducteurs magnétiques (stockage électromagnétique) [11].

1.4.4 Stockage thermique

L'utilisation différée de l'énergie est l'idée commune qui vient à l'esprit dès que l'on parle de stockage. Essentiellement trois modes de stockage thermique peuvent être envisagés ; le stockage par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente, le stockage thermochimique.

L'énergie thermique est la somme des énergies potentiel et cinétique des atomes et des molécules qui composent la substance. A la suite de vibrations atomiques et moléculaires, l'énergie thermique se produit dans la substance. Ainsi l'énergie thermique peut être stockée comme un changement de l'énergie interne d'un matériau en tant que peut être sensible, chaleur latente et thermochimique, ou en combinaison de ces derniers.

Un aperçu des principales techniques de stockage de l'énergie thermique est illustré à la figure suivante :

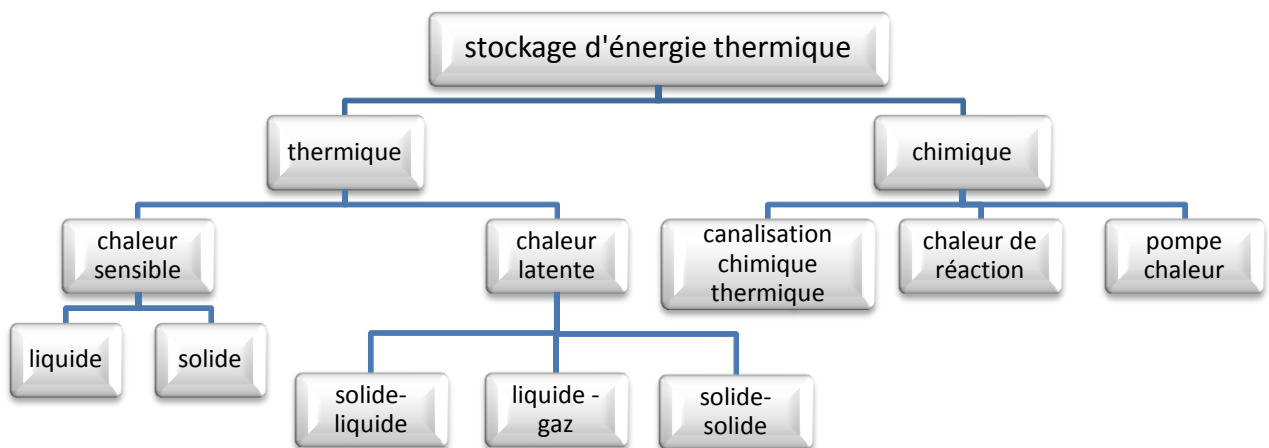


Fig1. 3. Principales techniques de stockage de l'énergie thermique [12].

1.4.5 Stockage chimique

Stockage d'énergie par réactions chimiques est un procédé lors duquel les molécules d'adsorbat sont fixées par liaison covalente à la surface Le de l'adsorbant provoquant l'irréversibilité du mécanisme. Ce type de stockage consiste par exemple à utiliser l'énergie solaire pour initier une réaction chimique endothermique. La chaleur est stockée au sein du système et peut être restituée souvent à l'aide d'un catalyseur.

1.5 Critères de choix des matériaux pour le stockage thermique :

Stockage d'énergie thermique (SET) peut être obtenu par refroidissement, le chauffage, la fusion, la solidification, la vaporisation, ou un matériau avec l'énergie sous forme de chaleur devient disponible lorsque le processus est inversé.

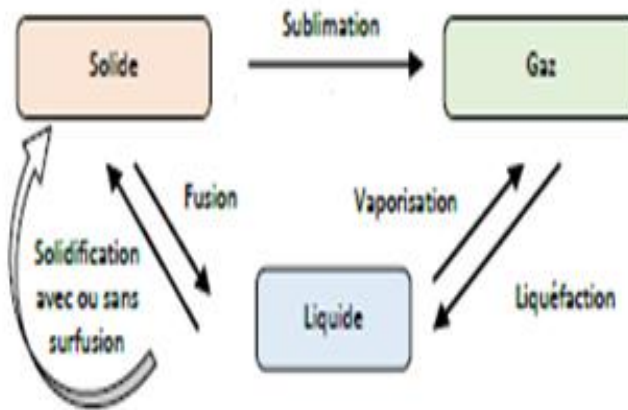


Fig1. 4. Diagramme de changement d'état d'un matériau

1.6 Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible

Dans le stockage par chaleur sensible, l'énergie thermique transférée fait varier la température du matériau. Si h est l'enthalpie massique du matériau, la variation de la quantité de chaleur Q échangée par le matériau lorsqu'il passe d'un état initial noté avec l'indice i à état final noté avec l'indice f est :

$$Q = m (h_f - h_i) \quad [\text{J}] \quad (1.2)$$

Où m : est la masse du matériau [kg],

h_i : est l'enthalpie massique initiale [J/kg],

h_f : est l'enthalpie massique finale [J/kg].

Si la capacité thermique massique du matériau C_p (ou chaleur spécifique massique, J/kg K) est constante, l'expression de l'enthalpie massique permet d'écrire :

$$Q = mC_p(T_f - T_i) \quad [\text{J}] \quad (1.3)$$

Où T_i : est la température initiale [K],

T_f : est la température finale [K].

Il est donc conseillé d'utiliser des matériaux à forte capacité thermique qui emmagasineront un maximum d'énergie. Mais ces matériaux doivent avoir d'autres propriétés comme une stabilité à long terme lors des cycles thermiques, la compatibilité avec le récipient de stockage et également un coût raisonnable.

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

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

Certaines propriétés des substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible sont données dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1. Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20°C [13].

Matériaux	Masse volumique (Kg/m³)	Chaleur spécifique (J/Kg.K)	Capacité thermique volumétrique (J/m³K)
Argile	1458	879	1.28
Briques	1800	837	1.51
Grés	2200	712	1.57
Bois	700	2390	1.67
Béton	200	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

1.6.1 Métaux liquides

Les métaux liquides sont de bons candidats pour un système de stockage de chaleur sous forme sensible. En effet, leur état liquide permet généralement une meilleure intégration au système d'échange de chaleur. De plus, la vitesse de restitution de la chaleur est généralement plus élevée due aux effets convectifs qui se produisent à l'intérieur du liquide. Cette caractéristique spécifique aux matériaux liquides leur procure par contre une plus grande autodécharge, résultant en une plus faible autonomie pour une puissance donnée. Les principaux liquides utilisés sont l'eau et les huiles thermique[14].

1.6.2 Eau

Etant un des matériaux les plus accessibles et abondant au monde, l'eau a vite été considéré pour une utilisation de stockage thermique sous forme sensible. L'essai a été concluant pour certaines situations, car son utilisation comporte de nombreux avantages. Par contre, certains inconvénients font que d'autres matériaux peuvent y être préférés dans certains systèmes. Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients de l'utilisation de l'eau dans un système de stockage de chaleur sous forme sensible[14].

Tableau 1. 2. Avantages et inconvénients de l'eau

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

1.6.3 Huiles

Les plus communs des matériaux liquides, après l'eau, pour un système de stockage thermique sous forme sensible. La chaleur spécifique de certaines huiles est de 25 à 40% plus élevée que celle de l'eau. Ils ont également une plus basse pression de vapeur ce qui permet de les utiliser à une température de fonctionnement plus élevée. Les deux principales huiles qui ont retenu l'attention pour une application de stockage de chaleur

sont le therminol et la caloria-HT. Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients des huiles.

Tableau 1. 3. Avantages et inconvénients de l'huile comme stockeur de chaleur [14]

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

1.6.4 Métaux solides

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

Cependant, la fonte est très dispendieuse et d'autres matériaux sont généralement préférés pour leur cout inférieur. Un autre candidat de premier choix est la roche. Utilisé sous forme de lit de pierre, l'énergie peut y être emmagasinée en laissant le fluide caloporteur circules directement entre les pierres ou par le biais d'un échangeur thermique. Un dernier type de matériaux à considérer est les métaux

Ils ont d'avantage d'avoir une excellente conductivité thermique et peuvent résister à de très hautes températures. Leur utilisation est considérée généralement dans des applications nécessitant une conductivité thermique élevée. Les résidus industriels de cuivre, de fer, de fonte et d'aluminium sont de bons exemples de métaux potentiels.[14]

1.6.5 Roches, béton et briques

Ayant des caractéristiques très rapprochées, les roches, le béton et les briques forment une catégorie à haut potentiel d'utilisation comme matériaux dans un système de stockage thermique sous forme sensible. En effet, leur stabilité à long terme, leur disponibilité et leur prix abordable en font de bons candidats. Par contre, leur faible conductivité thermique ainsi que leur faible chaleur spécifique font que d'autres matériaux leur soient souvent préférés. [14]

1.6.6 Métaux

La principale caractéristique qui fait que les métaux soient intéressants pour un système de stockage de chaleur sous forme sensible est leur grande capacité thermique. Celle-ci leur permet une absorption rapide de la chaleur, mais également une dissipation rapide, ce qui implique une grande autodécharge, une faible autonomie et une efficacité réduite. Pour ces raisons, ils seront principalement utilisés dans des applications de courte durée. Le tableau suivant résume leurs avantages et inconvénients [14].

Tableau 1. 4. Avantages et inconvénients des métaux

Avantages	Inconvénients
Conductivité thermique élevée	Très dispendieux
Chimiquement stable	
Disponible	
Recyclable	

1.7 Stockage d'énergie thermique par chaleur latente

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est emmagasinée grâce au changement d'état d'un matériau de stockage. La chaleur latente est la quantité de chaleur absorbée ou restituée par un matériau lors de son changement de phase, à température et pression constantes. Elle s'exprime ainsi :

$$Q_{\text{latente}} = m L_s \quad (1.4)$$

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

L_s 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). L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente et de la quantité du matériau de stockage qui change d'état. La capacité du stockage de systèmes du stockage de la chaleur latente est influencée par : [15]

- Pèsent de moyen du stockage de la chaleur.
- Chaleur spécifique dans phase solide et liquide.
- Différence entre la température initiale et température de fusion.
- Différence entre température de fusion et température finale.
- Chaleur spécifique de fusion.

Le stockage par chaleur latente permet de stocker de plus grandes quantités d'énergie avec des masses et des volumes réduits.

Dans le cas d'un corps pur on trouve une courbe de variation des températures analogue à celle présentée ci dessous. Pendant le chauffage du matériau avant sa température de fusion, on observe une variation linéaire de la température en fonction du temps tandis que pendant le changement d'état la température reste constante.

$$\Delta H = \int_{T_i}^{T_f} m \times C_s(T) dT + m \times L_s + \int_{T_f}^{T_2} m \times C_l(T) dT \quad [J] \quad (1.5)$$

$C_s(T)$: Chaleur spécifique du corps à l'état solide. $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$

$C_l(T)$: Chaleur spécifique du corps à l'état liquide. $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$

L_s : Chaleur latente de changement de phase. $[\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$

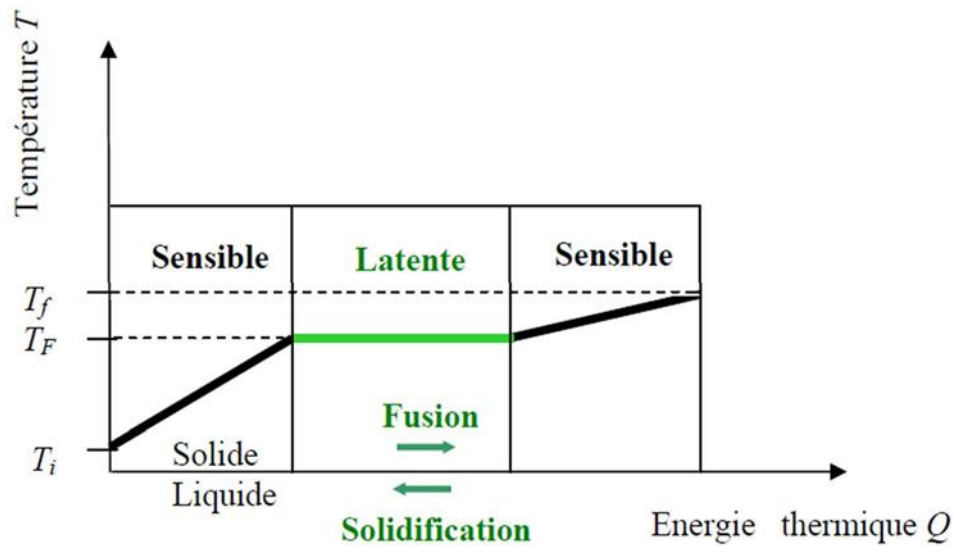


Fig1. 5. Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.

T_i, T_f : représentent respectivement la température initiale / finale du stockage

T_F : La température de fusion du matériau à changement de phase.

Sur la Figure 1.5 est représentée l'enthalpie spécifique en fonction de la température pour un corps pur A et pour un mélange B [16]. On peut remarquer l'existence d'une discontinuité lors du changement de phase dans le cas d'un corps pur (le changement de phase se fait à température constante).

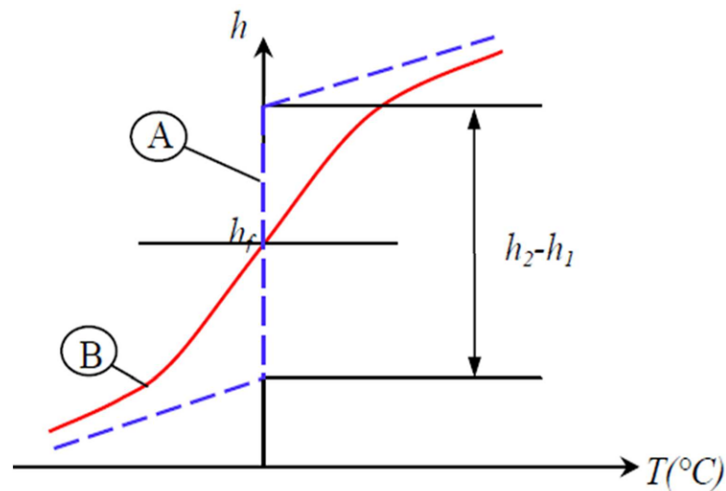


Fig1. 6. Variation de l'enthalpie : A) pour un corps pur, B) pour un mélange.

On peut voir sur la Figure 1.7 la capacité de stockage d'une quantité de 5700 kJ (intervalle de température de 10°C et une surface de 1m²) par différents matériaux

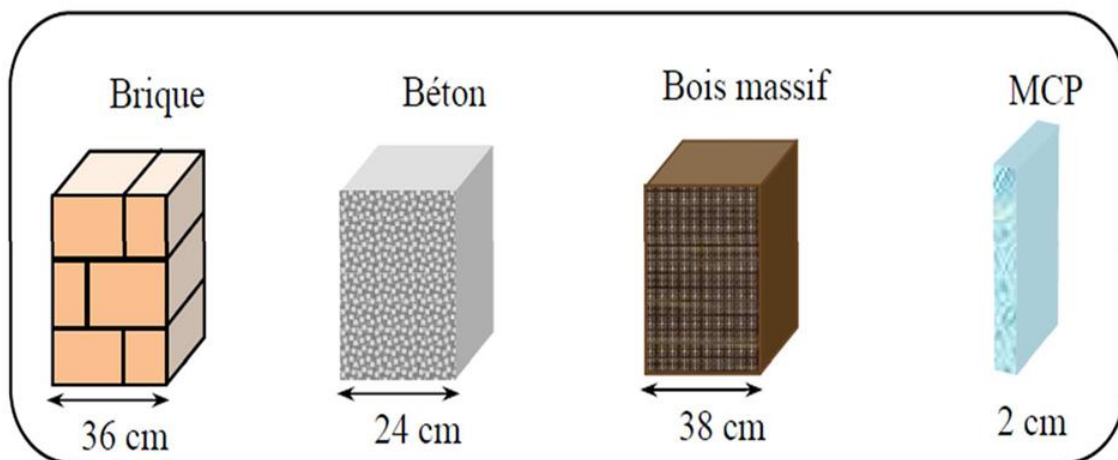


Fig1. 7. Stockage de chaleur dans les matériaux [17]

1.7.1 Contraintes technologiques du stockage par chaleur latente

Le stockage par chaleur latente utilise l'enthalpie de changement d'état pendant la fusion ou la solidification du milieu utilisé, mais il peut utiliser également la chaleur sensible nécessaire pour chauffer le solide jusqu'à son point de fusion. Il faut donc :

- Que le système de stockage supporte le changement de phase dans les limites des températures demandées pour ce changement.

- Que le système de stockage supporte le changement de phase avec le changement de volume qui lui est lié.
- Un conteneur capable de stocker les matériaux suivant leur nature.
- Une surface d'échange pour transférer l'énergie thermique entre la source de chaleur et le matériau à changement de phase.

1.7.2 Avantages du stockage par chaleur latente

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

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.

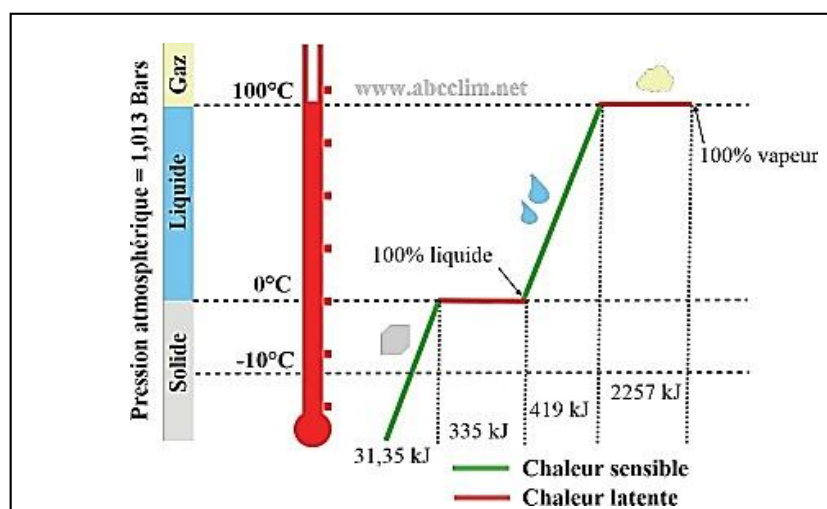


Fig1. 8. Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible et latente.

1.8 Stockage d'énergie thermique par voie thermochimique

Le terme de stockage thermochimique recouvre deux phénomènes : la sorption et la réaction chimique. Le stockage de chaleur par sorption est intéressant pour le stockage basse température ($T \approx 80 \text{ °C}$) tandis que pour des applications de type solaire concentré ($T \approx 200 \text{ à } 1000 \text{ °C}$), ce sont les réactions de synthèse chimique qui semblent être les plus adaptées [18].

1.8.1 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 :



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



Pour ce type de stockage, la réaction mise en jeu doit être totalement réversible afin que le procédé ne perde pas sa capacité de stockage au cours des cycles. Le schéma de principe du stockage de chaleur par voie thermochimique est présenté sur la Figure (1.9).

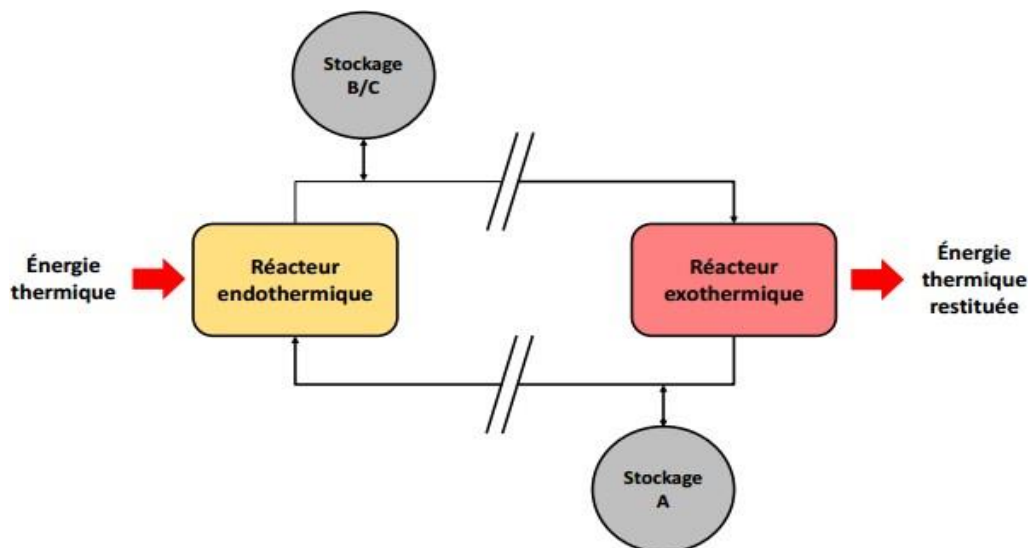


Fig1. 9. Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermochimique.

$$E = \sum_{i=1}^N = \int_{T_i}^{T_f} m_i \cdot C_p \cdot dT + n_A \cdot \Delta H_r \quad (1.8)$$

Où, E 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 ($J \cdot mol^{-1}$)

Dans ce système, la capacité de stockage de la chaleur est généralement élevée parce qu'une énergie chimique élevée se produit au cours de la rupture ou de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction chimique réversible [19].

1.9 Comparaison entre les différents types de stockage d'énergie thermique

Tableau 1. 5. Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.

		Stockage par chaleur sensible	Stockage par chaleur latente	Stockage par 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 ⁻¹	Moyenne ~ 0,05-0,1 kWh. Kg ⁻¹	Haute ~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 T ambiante
Durée de stockage		Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes thermiques)	Théoriquement illimitée
Transport de l'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance théoriquement illimitée
Maturité		Echelle Industrielle (20 MWe)	Echelle pilote (100kWth)	Echelle laboratoire (1-5 kWth)
Technologie		Simple	Moyenne	Complexe

Le tableau (1.5) 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.

Chapitre II

Généralités sur les matériaux à changement de phase

2.1 Introduction

Les matériaux à changement de phase, appelés communément « MCP », sont des matériaux intelligents qui reposent sur l'application d'un principe physique simple : ils se liquéfient en absorbant de l'énergie à partir d'une certaine température caractéristique pour chaque type de matériau (en général fixée par leur formulation) et restituent cette énergie lorsque la température de leur environnement est inférieure à celle-ci. Les matériaux à changement de phase ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente ; la chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide et vice versa. L'énergie est alors stockée sous forme d'un changement d'état du matériau de stockage et dépend de la chaleur latente et de la quantité du matériau de stockage.

2.2 Matériaux à changement de phase

Les matériaux à être utilisés pour le changement de phase pour un stockage d'énergie thermique doivent avoir une grande chaleur latente et une conductivité thermique élevée. Ils doivent avoir une température de fusion comprise entre pratique de l'exploitation, faire fondre en bonne adaptation avec sous-refroidissement minimum et être chimiquement stable, de faible coût, non toxique et non corrosif.

Les matériaux qui ont été étudiés au cours des 40 dernières années sont des sels hydratés, des cires de paraffine, les acides gras et les eutectiques de composés organiques et non organiques [20].

2.3 Types des matériaux à changement de phase (MCP) :

Parmi les MCP subissant cette transformation, nous avons trois groupes de matériaux : les inorganiques, les organiques et les eutectiques.

2.3.1 Les MCP inorganiques :

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre -100 °C et $+1000\text{ °C}$. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0 °C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0 °C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5 °C et 130 °C), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à 150 °C).

Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (c'est-à-dire une plage de fusion étroite). 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 nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables.

2.3.2 Les MCP Organiques :

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0° C et 150°. 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 et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables.

2.3.3 Les MCP eutectiques :

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. Engénéral, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique organique, organique inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs.

Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels.

Tableau 2. 1. Propriétés thermophysiques de certains MCP.

Matériaux		Température de fusion (C°)	Enthalpie de fusion (kJ/Kg)
PCMs Organiques	Eau	0	333,6
	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique_laurique	21	143
PCMs 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
PCMs Eutectiques	66,6%CaCl ₂ .6H ₂ O + 33,3%Mgcl ₂ . 6H ₂ O	25	127
	48%CaCl ₂ + 4,3%NaCl + 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

2.4 Choix du matériau à changement de phase

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0-120°C). Cependant ils ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lorsqu'ils possèdent certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques, chimiques et économique. Ces critères vont donc être définis pour faciliter le bon choix de MCP pour une application donnée [21].

2.4.1 Critères thermodynamiques

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- Une température de fusion dans la gamme de température souhaitée
- Une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur).
- Une chaleur spécifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative.
- Une fusion congruente.
- Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition.
- 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.

2.4.2 Critères cinétiques

Le matériau à changement de phase ne doit montrer ou presque pas de phénomène de surfusion. Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiquée par les tables thermodynamiques. Des cinétiques de charge et de décharge rapides.

2.4.3 Critères chimiques

Le matériau à changement de phase doit montrer

- Une stabilité chimique.
- Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur latente soit viable.
- Aucune corrosion avec les matériaux de constructions.
- Un bon taux de cristallisation.
- Aussi le matériau ne doit pas être empoisonnant ; il doit être non inflammable et non explosif.

2.4.4 Critères économiques

Le matériau à changement de phase doit être

- Disponible en grande quantité.
- A bon marché.

A priori aucun matériau à changement de phase ne peut satisfaire tous ces critères. Beaucoup de matériaux ont été étudiés comme de potentiels matériaux à changement de phase, mais peu d'entre eux sont commercialisés. Les matériaux à changement de phase se classent en trois grandes familles : organique, inorganique et eutectique.

2.5 Classification des matériaux à changement de phase(MCP)

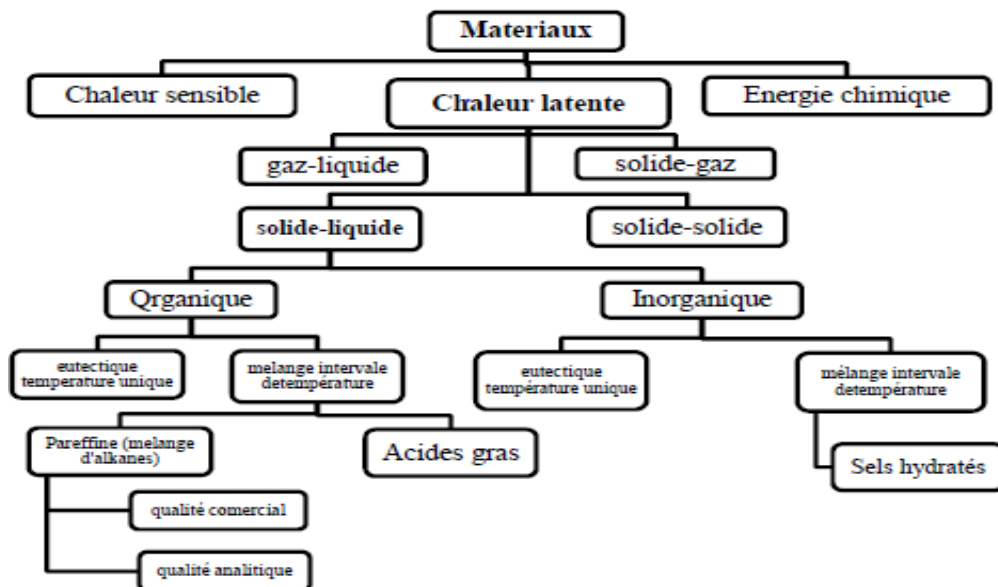


Fig2. 1. Classification des MCP.

Il y a un grand nombre de substances chimiques qui peuvent être identifiées comme MCP du point de vue de leur température de fusion et de leur chaleur latente de fusion. Cependant, excepté le point de fusion se situant dans la plage de température de fonctionnement souhaitée, une majorité de ces substances ne répondent pas aux autres critères exigés pour servir de supports appropriés à un stockage de chaleur. En effet, aucun matériau ne peut avoir intrinsèquement toutes les propriétés requises pour un support de stockage thermique idéal. Aussi ces matériaux sont employés tout en recherchant les voies et moyens qui permettent d'éviter ou de compenser les inconvénients qu'ils présentent par des techniques appropriées adaptées à chaque application. Par exemple, des ailettes métalliques ont été employées pour augmenter la conductivité thermique des MCP, la surfusion peut être évitée par addition d'un agent de nucléation dans le matériel de stockage, et la fusion non congruente est empêchée en ajoutant dans le MCP un agent épaississant ou un gélifiant approprié. On peut classer les MCP couramment utilisés selon trois catégories:

- Les composés organiques: paraffines, corps non paraffine, polyalcools.
- Les composés inorganiques: hydrates salins, sels, métaux, alliages.
- Les eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques.

Les composés organiques et les composés inorganiques présentant des propriétés thermiques et chimiques très différentes qui affectent significativement la conception d'un système de stockage thermique pour une application donnée sont détaillés dans ce qui suit.

2.5.1 Composés organiques

Les MCP organiques sont des matériaux organiques, constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés de la famille des alcanes de formule générale C_nH_{2n+2} . Ils sont soit extraits à partir du pétrole brut, soit synthétisés par un procédé chimique où intervient la catalyse du monoxyde de carbone et d'hydrogène en vue de les convertir en hydrocarbure (Procédé Fischer-Tropsch). Les paraffines sont essentiellement constituées d'hydrocarbures saturés à chaîne linéaire ou parfois ramifiée avec un groupement méthyle substitué en bout de chaîne. Les paraffines pures uniquement constituées d'alcane peuvent être caractérisés par leur point de fusion.

Cependant les paraffines existent généralement sous forme de mélange, si bien qu'il n'est pas possible de parler de point de fusion mais plutôt d'une zone de fusion. Pour des applications de stockage thermique les n-paraffines sont les plus utilisées à cause de leur capacité de stockage plus importante. Les paraffines intéressantes pour le stockage thermique sont celles qui sont sous forme solide aux températures usuelles et elles sont qualifiées de « cire de paraffine ».

Le point de fusion des alcanes augmente avec le nombre croissant d'atomes de carbone. Mises à part certaines caractéristiques favorables des paraffines, telles que la fusion congruente et de bonnes propriétés de nucléation elles montrent cependant certaines propriétés indésirables tels que :

Faible conductivité thermique sont incompatibles avec les récipients en plastique et sont modérément inflammables. Tous ces effets indésirables peuvent être éliminés en partie en modifiant légèrement la cire et l'unité de stockage.

Il existe quelques méthodes développées pour augmenter la conductivité thermique. Une de ces méthodes est l'utilisation de graphite expansé (Sari, 2004 [22] ; Marin et al. 2005 [23] ; Zhang et Fang, 2006) [24]. Mehling et coll. (2000) [25] ont signalé que le matériau composite PCM-graphite a une conductivité thermique 100 fois plus élevée que la paraffine pure. Certaines paraffines sélectionnées sont indiquées avec leur point de fusion et leur chaleur latente de fusion.

2.5.1.1 Avantages et inconvénients de paraffine

L'enthalpie de fusion varie entre 180 et 230 kJ/kg. Cette valeur est grande par rapport à celle des autres matériaux organiques dont la capacité thermique massique est de 2,1 kJ/kg.K. En tenant compte des deux valeurs (chaleur sensible et chaleur latente), on obtient une densité importante d'énergie de stockage. La capacité volumique de stockage de chaleur est 4-5 fois supérieure à celle de l'eau. La surfusion est négligeable. La pression de vapeur de fusion est faible même à des températures relativement hautes.

Elles sont stables chimiquement mais il faut les protéger de l'air pour éviter l'oxydation. En particulier quand elles sont chaudes leur dégradation est similaire à celle des acides organiques. Il n'y a pas de ségrégation de phase.

Les cires de paraffine sont inertes chimiquement (d'où le nom paraffine) avec presque tous les matériaux (sauf certains plastiques ou le cuivre). Il y a donc peu de problèmes de corrosion avec les paraffines et leur conteneur. En effet, les cires de paraffine sont utilisées pour protéger les matériaux de la corrosion (vernis de protection dans l'industrie automobile). Les cires de paraffine ne présentent aucun danger écologique. Elles n'ont pas d'effets négatifs sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes. Elles sont non-toxiques et 100% recyclables.

Quelques paraffines commerciales sont adaptées aux applications de l'énergie solaire. Pour les applications dans les bâtiments, une paroi contenant 3 cm d'épaisseur de paraffine est l'équivalent thermique d'une paroi en béton de 40 cm. La masse volumique de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850 kg/m³, et celle de la phase solide est de 800 à 900 kg/m³. La dilatation volumique est donc environ 15 % pendant le processus de changement de phase. On peut éviter ou au moins réduire ce problème par un conditionnement adapté. Les paraffines ordinaires sont souvent des mélanges d'hydrocarbures et ont un prix raisonnable. En fonction de leur composition, elles présentent des points de fusion variés. Par contre les cires de paraffine pures sont très coûteuses. Les deux principaux inconvénients sont les suivants:

Les cires de paraffine présentent une très faible conductivité thermique (0,18 – 0,25 W/m K), la moitié de celle des hydrates salins. Cette propriété diminue le taux de stockage /déstockage de la chaleur pendant les cycles fusion/solidification. Cette faible conductivité thermique qui est habituellement un handicap, bien que dans le transport de nourriture elle soit un avantage, peut être compensée par une grande surface d'échange ou par un conditionnement adapté. Les cires de paraffine sont facilement inflammables.

2.5.1.2 Conditionnement des paraffines

Le système de conditionnement des MCP doit répondre à certaines exigences. Parmi lesquelles :

- Répondre aux exigences de rigidité, de flexibilité, de résistance à la corrosion et de stabilité thermique.
- Disposer de suffisamment de surface pour un bon transfert thermique.
- Prendre en compte le changement de volume lors du changement de phase.

Il existe plusieurs techniques de conditionnement des MCP, parmi lesquelles :

a) Macro-encapsulation

La macro-encapsulation se distingue lors de l'adaptation de matériaux à changement de phase dans les récipients de taille supérieure ou égale à 1m.

La plupart du temps, on utilise des modules en plastique chimiquement neutres par rapport au MCP et au fluide caloporteur utilisé, mais on peut aussi utiliser des nodules ou des briques plastiques. Ces modules ont typiquement un diamètre de quelques centimètres, dont ils sont manufacturés dans trois diamètres (77-78 et 98mm) pour des usages respectivement aux faibles températures de changements d'état (-3 à -15 c), aux températures intermédiaires (-3 à 15) et à la température de stockage de la glace (0c). La figure(2.2) présente deux différentes formes des macrocapsules du MCP Parallélépipèdes :

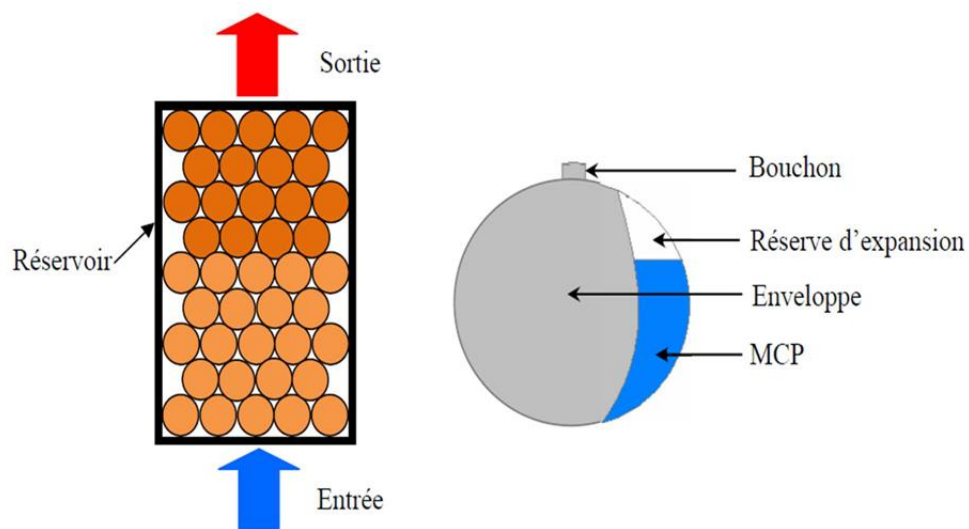


Fig2. 2. Système de stockage et conditionnement de MCP en nodules [26].

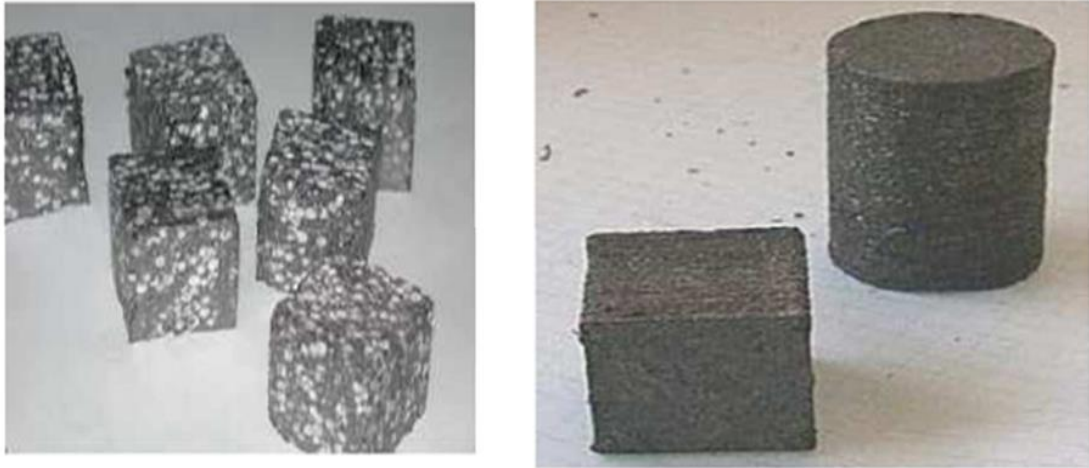


Fig2. 3.Exemples d'encapsulation de MCP [27].

b) Micro-encapsulation

Une microcapsule est une technologie moderne et efficace qui nous permet d'encapsuler les éléments actifs dans des enveloppes, avec des tailles de particules allant de 1 à 1000 microns (pour la paraffine).L'encapsulation est faite de polymères, où ils sont scellés pour empêcher les fuites. Les polymères peuvent avoir une origine naturelle, semi-industrielle ou industrielle dans l'industrie des microencapsulés. L'architecture de stockage interne de ces groupes MCP se caractérise par une grande surface d'échange.

Des expériences avec des cycles thermiques conduits sur de la paraffine ont prouvé qu'elles pouvaient conserver leur apparence géométrique et leur capacité de stockage d'énergie même après 1000 cycles, comme indiqué sur la figure (2.4).

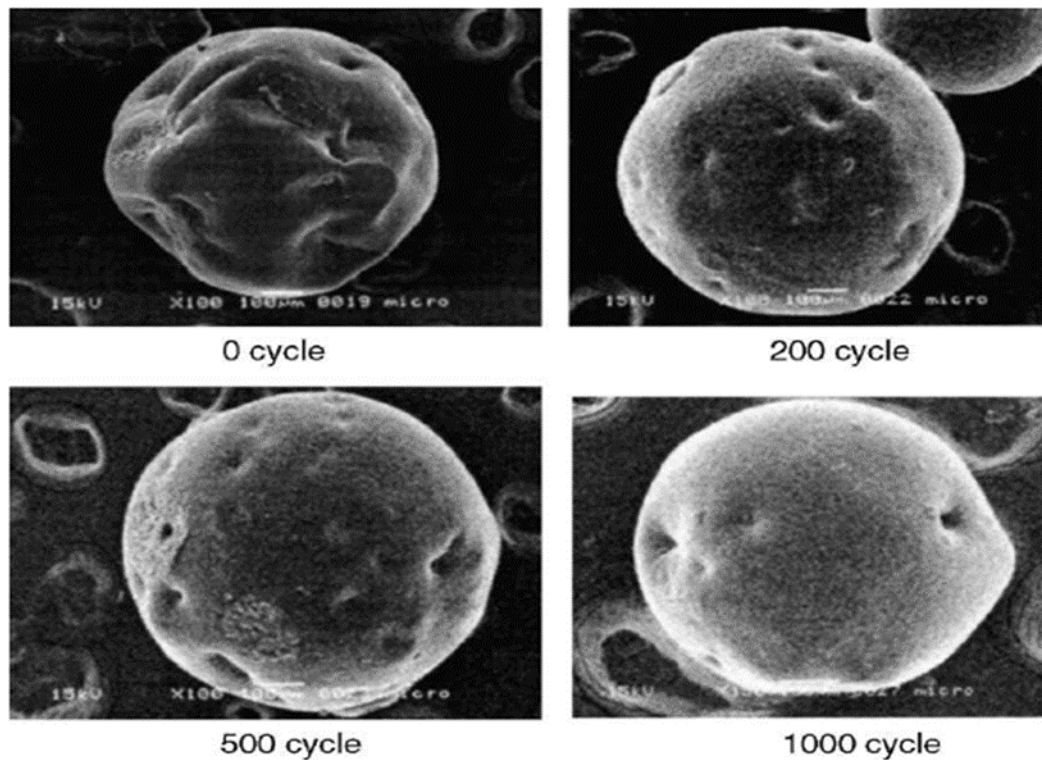


Fig2. 4. Profil de la paraffine micro-encapsulés à différents instants de cycles Thermiques [28].

2.5.2 Les composés organiques non-paraffiniques

Il s'agit de la plus importante catégorie de matériaux aptes pour le stockage de la chaleur latente. Lane (1983, 1989), Abhat (1983) et Buddhi et coll. (1994) ont mené une recherche approfondie sur les matières organiques et ont identifié un certain nombre d'esters, d'acides gras, d'alcools et de glycols convenables pour le stockage de l'énergie. Les composés organiques non-paraffiniques sont les MCP les plus nombreux, avec des propriétés très variées. Chacun de ces matériaux possède ses propres propriétés, contrairement aux paraffines, qui ont des propriétés très similaires. Ces matériaux sont inflammables et ne devraient donc pas être exposés aux trop hautes températures, aux flammes ou aux agents oxydants.

Les matières organiques non-paraffiniques sont divisées en deux groupes : les acides gras et les autres matières organiques (Öztürk, 1997) [29]. La formule chimique générale des acides gras est $CH_3 (CH_2)_n COOH$ et ils ont relativement une haute enthalpie de changement de phase. Les acides gras ont une haute stabilité thermique et ne subissent pas le phénomène de sous-refroidissement. Cependant, selon (Abhat, 1983), ils

sont plus chers que les paraffines et sont corrosifs. Certaines des caractéristiques de ces matériaux organiques sont les suivantes :

- forte chaleur de fusion,
- inflammabilité,
- faible conductivité thermique,
- faible point d'éclair,
- niveau variable de toxicité,
- instabilité à haute température.

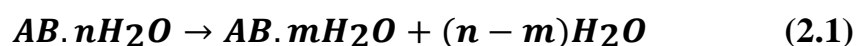
2.5.3 Les sels hydratés

Les hydrates de sels peuvent être considérés comme des alliages de sels minéraux et d'eau formant un solide cristallin typique de formule générale $AB \cdot n H_2O$. Les plus importantes propriétés des hydrates de sels sont les suivantes :

- La température de fusion élevée
- une haute enthalpie de fusion
- Une conductivité thermique élevée

En dépit de ces propriétés les hydrates de sels ont certains inconvénients importants tels que la fusion accompagnée de la séparation de phase, du sous-refroidissement et d'être corrosifs (Abhat, 1983; Sharma et al. 2009[30]).

Les méthodes élaborées pour empêcher la séparation de phase pour l'utilisation des hydrates de sels comme MCP sont l'addition d'un épaississant ou d'un agent de gélification de l'hydrate salin. Dans la première méthode, l'agent épaississant est ajouté pour augmenter la viscosité de l'hydrate de sel et dans le second, l'hydrate de sel est stabilisé dans les pores d'un polymère gel. En outre, un agent de nucléation est ajouté pour éviter les phénomènes de surfusion (Lane, 1983)[31]. La transformation solide – liquide des hydrates de sels est en réalité une déshydratation du sel, bien que ce processus ressemble thermodynamiquement à la fusion/cristallisation. Un sel hydraté se transforme habituellement soit en un hydrate de sel appauvri de quelques moles d'eau, soit au même sel dans sa forme anhydre selon les équations chimiques suivantes :





Au point de fusion les cristaux d'hydrates se transforment en un sel anhydre ou en un sel faiblement hydraté et de l'eau. Un problème avec la plupart des sels hydratés est celle de la fusion incongruente causé par le fait que l'eau libérée ne suffit pas à dissoudre toute la phase solide présente. En raison de la différence de densité, le sel anhydre se dépose au fond du récipient donnant lieu à une séparation des phases.

Les méthodes élaborées pour empêcher la séparation de phase dans l'utilisation des hydrates

des sels comme PCM sont l'épaississement et la gélification. Dans la première méthode, un agent épaississant est ajouté pour augmenter la viscosité de l'hydrate de sel et dans le second, l'hydrate de sel est stabilisé dans les pores d'un gel polymère. (Lane, 1983)[31].

La plupart des sels hydratés ont aussi de pauvres propriétés de nucléation, impliquant la surfusion de la phase liquide avant la cristallisation. Une solution à ce problème consiste à ajouter un agent de nucléation, qui fournit le nucléon (germe) qui permet d'amorcer la cristallisation. Une autre possibilité consiste à conserver certains cristaux, dans une zone froide du milieu, pour servir de noyaux pour l'amorçage de la cristallisation. Les problèmes principaux concernant la plupart des hydrates salins sont selon Jotshietal[32]:

- La surfusion (ou sous-refroidissement) ; On traite ce problème en ajoutant un agent de nucléation.
- La ségrégation de phase

Lorsque la fusion n'est pas congruente, on observe une ségrégation de phase. Pour prévenir ce problème plusieurs techniques ont été testées comme l'utilisation d'agents épaississants. Comme agents épaississants on utilise de la cellulose, de la fécule, de la sciure, du gel de silice, de la silice, etc. Ces types d'agents épaississants fonctionnent bien, mais ils sont finalement soit hydratés par le sel ou décomposés par les bactéries, et ils deviennent inefficaces [33].

- La perte d'eau d'hydratation en répétant le cycle thermique. Ce problème peut être évité en rajoutant une quantité d'eau supplémentaire dans l'hydrate et/ou en utilisant un stockage parfaitement étanche.
- Leur caractère corrosif, ce qui les rend incompatibles avec de nombreux matériaux de construction utilisés dans les bâtiments. Ce dernier problème a reçu un début de solution en encapsulant les MCP dans des capsules métalliques ou de matière plastique. On distingue la macro-encapsulation et la micro encapsulation.

2.6 Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage

2.6.1 Surfusion

Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de fusion. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés au-dessous de la température de changement d'état. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande et les échanges de chaleur avec l'extérieur faibles le déclenchement de la solidification provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement d'état. Ce phénomène réduit l'efficacité thermique des unités de stockage par chaleur latente par rapport à ceux par chaleur sensible. En effet, la décharge de la chaleur (pendant la solidification) a lieu à des températures inférieures de celles où le stockage de cette chaleur a eu lieu. On a donc une différence entre la chaleur absorbée pendant le chauffage et celle restituée pendant le refroidissement.

2.6.2 Surchauffe

La surchauffe d'un corps est le réchauffement de ce corps après son changement d'état (Réchauffement de la phase liquide après la fusion du corps, de la phase vapeur après la vaporisation du corps). Si cette surchauffe s'effectue pendant une courte durée, elle n'est considérée que comme une chaleur sensible supplémentaire stockée dans le système. Si elle s'effectue pendant une longue durée, le stockage par chaleur latente perd l'essentiel de ses avantages par rapport au stockage par chaleur sensible.

2.6.3 Dilatation

Pendant le changement de phase de solide à liquide, le matériau change de densité et donc de volume. Ceci peut poser problème dans quelques applications en particulier quand on utilise un conteneur fermé qui doit supporter l'augmentation de pression.

2.7 Le choix d'un MCP

Des critères vont donc être définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée [34]:

2.7.1 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.

2.7.2 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.

2.7.3 Considérations cinétiques

Des cinétiques de charge et de décharge rapides.

Pas de surfusion qui détruit la cinétique et altère la possibilité de déstockage.

2.7.4 Considérations de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux

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

2.7.5 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.

2.7.6 Considérations économiques

Un coût raisonnable et une bonne disponibilité.

2.8 Applications des MCP

2.8.1 Stockage de l'énergie thermique

Les MCP stockent l'énergie en changeant de phase solide-liquide (fusion) puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide-solide (solidification). Un MCP connu pour cette application est l'acétate de sodium tri-hydraté ayant un point de fusion vers 58 °C. Ce matériau a été mis en œuvre dans des conteneurs déplaçables par camions pour stocker la chaleur évacuée d'incinérateurs d'ordures ménagères. La restitution de l'énergie se fait alors à distance sur des stations équipées, à une température d'environ 50 °C [35].

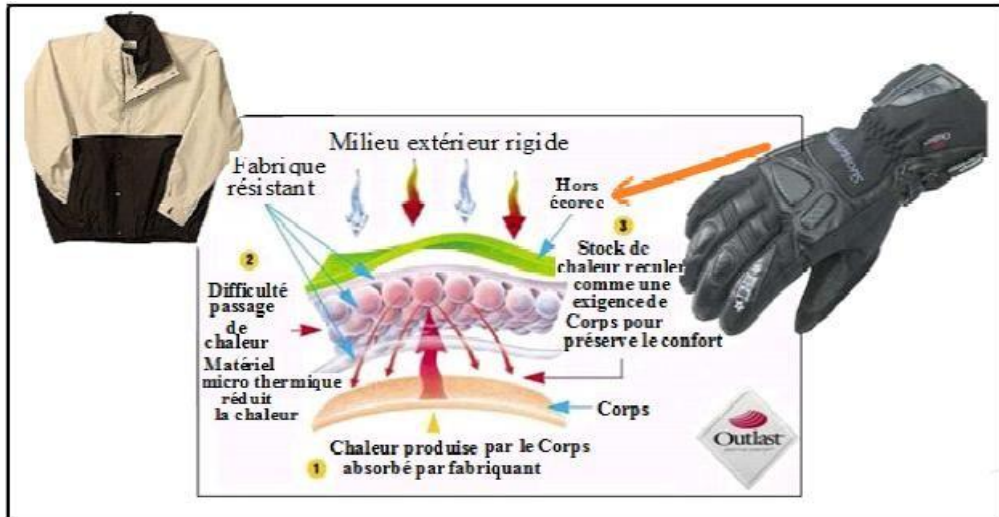


Fig2. 5. L'efficacité de MCP dans les textiles

2.8.2 Application aux bâtiments

Le rôle primaire des bâtiments est de protéger les humains contre les variations extrêmes du climat. Une manière efficace pour réaliser des économies d'énergie dans le bâtiment est de mettre en oeuvre des systèmes solaires passifs ou actifs (Figure2.6). Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser aux systèmes solaires passifs.

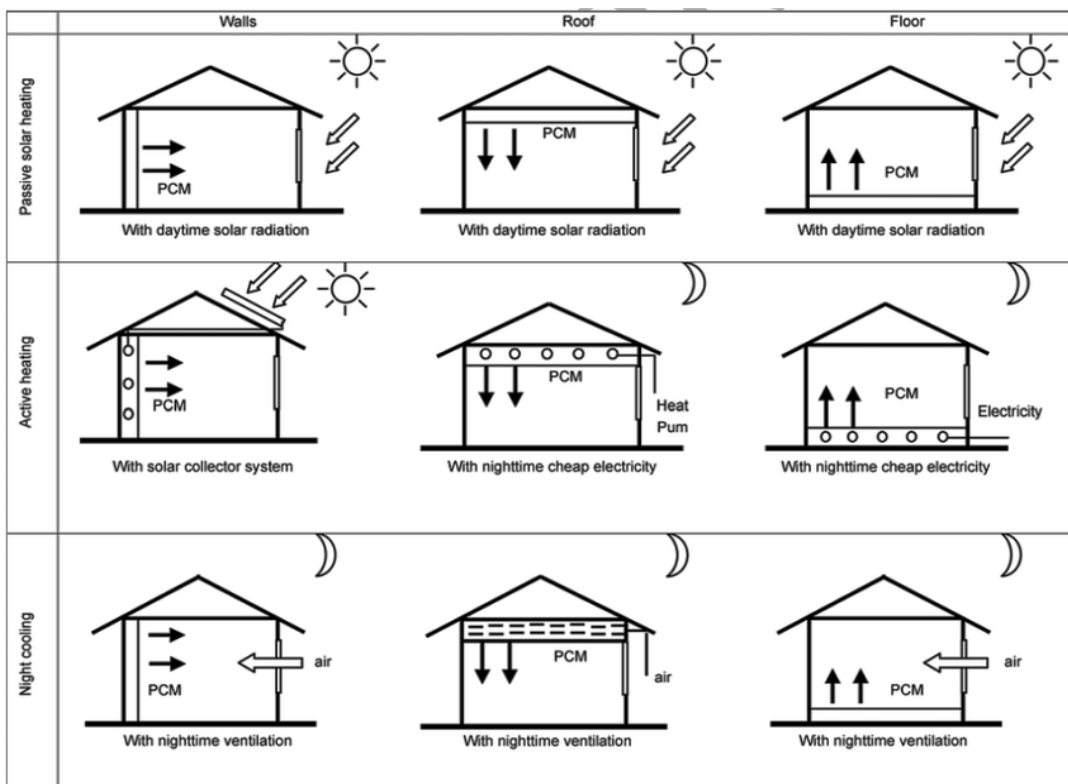


Fig2. 6. Intégration des MCP dans l'habitat [36].

Il y a certaines limitations à l'intégration d'un système de chauffage solaire passif dans un bâtiment résidentiel classique. Puisque le rayonnement solaire est intermittent, variable et imprévisible, le concept de construction solaire passif implique normalement le besoin d'une grande masse structurale pour le stockage thermique [37]. Cette structure volumineuse limite la flexibilité dans la disposition et l'adaptation ultérieure du bâtiment [38]. En outre, parce que l'énergie est stockée en tant que chaleur sensible, la surchauffe se produit de temps en temps pendant des périodes de rayonnement solaire élevé. Cette surchauffe dégrade les conditions de confort. Le stockage thermique latent peut être utilisé pour réduire de manière significative les problèmes induits par la conception solaire passive conventionnelle. Dans les systèmes de stockage par chaleur latente [39], les MCP sont employés pour absorber (ou dégager) une quantité significative d'énergie thermique pendant le changement de phase solide-liquide tout en subissant de petites variations de température. L'avantage essentiel du système de stockage thermique utilisant les MCP est qu'il peut être sensiblement plus léger et moins volumineux pour une même quantité d'énergie stockée.

L'intégration des MCP dans la construction d'un bâtiment, peut se faire à travers le plancher chauffant, le plafond, les fenêtres ou les parois [40].

2.8.2.1 Parois à MCP

- La nature du MCP : le matériau devra avoir une température de fusion/solidification inférieure et proche de celle du confort thermique (dans le cadre d'un mur solaire une température plus élevée est souhaitable), des conductivités thermiques et capacités calorifiques les plus grandes possible, une chaleur latente de fusion élevée et un prix faible.
- La répartition du MCP dans la paroi : Si on désire éviter la surchauffe de la surface extérieure des murs, on placera le MCP proche de la surface extérieure. Si on désire réguler la température intérieure, on placera le MCP près de la face intérieure.
- Les variations de températures de chaque côté du mur. Rappelons qu'il existe quatre méthodes économiques de conditionnement des MCP dans les matériaux du bâtiment [41].

- Une incorporation directe de MCP dans le mélange liquide des matériaux du bâtiment.
- Une incorporation directe par absorption (imprégnation) du MCP liquide dans les matériaux poreux du bâtiment.
- Une incorporation indirecte par encapsulation.
- Une incorporation directe de MCP dans les revêtements (plastique ou caoutchouc).

Chapitre III

Position du problème

3.1 Introduction

Le présent travail consiste à étudier l'évolution de la fusion de la paraffine dans une cavité rectangulaire en verre chauffée par le bas. Pour la visualisation expérimentale de l'évolution du changement de phase, il est indispensable de réaliser la cavité thermique en verre qui sera soumise à des contraintes thermiques importantes qui peut développer des fissures dans les parois de la cavité et conduire ainsi à sa cassure. La solution pratique est de réaliser des cavités thermiques métalliques pour éviter ces problèmes de fissures. Cependant, il sera impossible de suivre l'évolution de la forme et la position du front changement de phase. L'objectif de ce travail est de prévoir l'évolution de la fraction liquide du MCP (la paraffine) en se basent sur les relevés des températures du MCP enregistrées durant les expériences. Ainsi, on propose d'élaborer un algorithme numérique écrit en langage Matlab permettant de calculer l'évolution des différents paramètres durant la fusion de la paraffine chauffée par le bas. L'évolution de la fraction liquide du MCP est valider par celle obtenue expérimentalement dans la Ref. [42].

3.2 Partie expérimentale

3.2.1 Description de l'installation

La partie expérimentale a été développée au cours du projet de fin d'étude [42]. L'objectif est d'étudier le comportement thermique d'un matériau à changement de phase MCP (paraffine) pendant la fusion. Le MCP est contenu dans une cavité carrée en verre de dimensions $12 \times 14 \times 6,2$ cm pour faciliter la visualisation par une simple appareil photo numérique placée devant la face avant de la cavité. Les faces latérales sont isolées par de la laine de roche et fermées dans une enceinte en bois pour minimiser les pertes de chaleur. Le MCP est chauffé par une résistance thermique placée sur la face inférieure de puissance (30 W) .L'évolution de la température dans la cavité et dans les couches d'isolation est enregistrée à l'aide de thermocouples de type K et reliée à l'ordinateur (PC) par une chaîne d'acquisition de type NI (National Instruments).

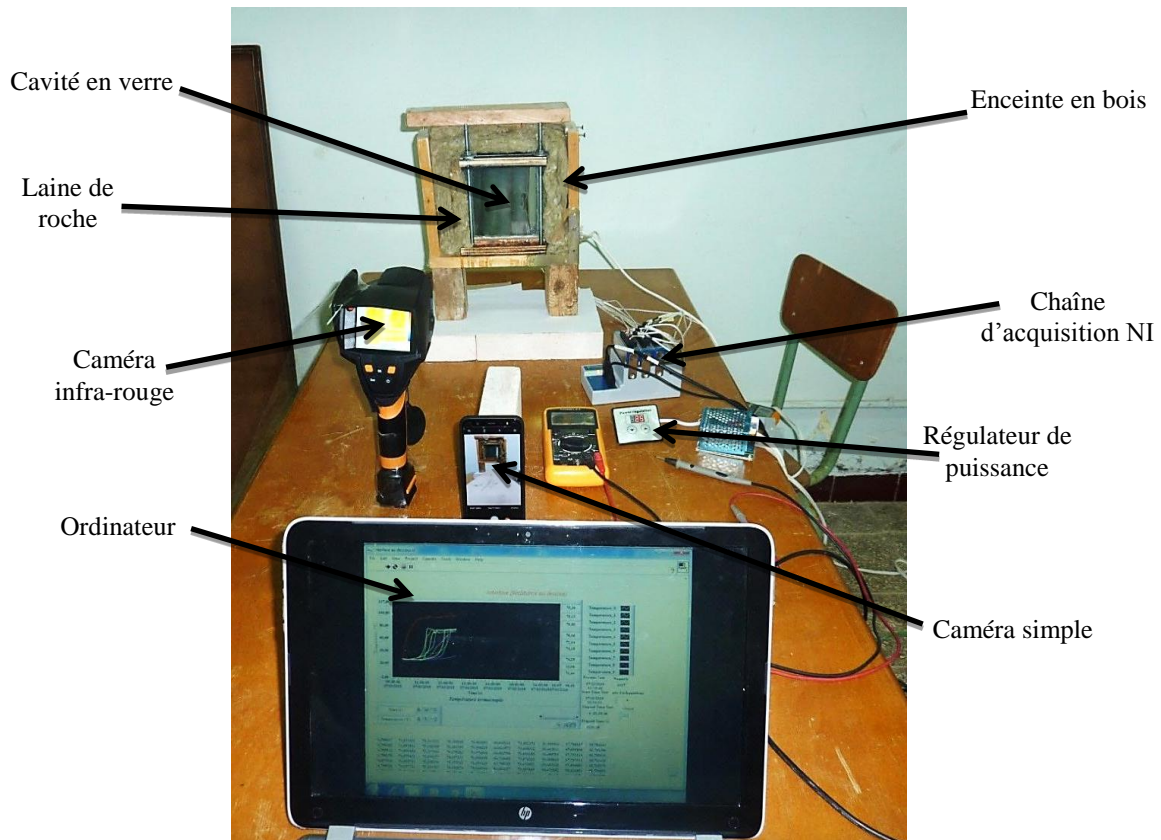


Fig3. 1 . Matériel et accessoire de l'installation

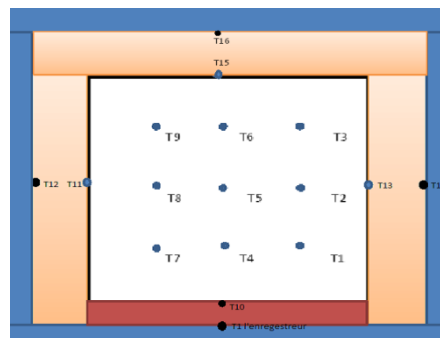


Fig3. 2. Positions des capteurs de température

➤ MCP utilisé

Le matériau à changement de phase utilisé dans les expériences est une paraffine appelée Tétracosane, de formule chimique $C_{24}H_{50}$, dont le point de fusion est compris entre 49 et 54°C. Les propriétés thermo-physiques de la paraffine sont représentées sur le tableau suivant :

Tableau 3. 2. Propriétés thermo-physiques de la paraffine

Propriétés	Symboles	Valeur	Unités
Masse volumique	ρ	853	kg/m ³
Chaleur spécifique	C_p	2000	J/kgK
Viscosité dynamique	μ	0.0018	kg/ms
Viscosité cinématique	ν	0.0036	m ² /s
Conductivité thermique(Liquide)	λ_l	0.12	W/m-K
Conductivité thermique(Solide)	λ_s	0.21	W/m-K
Chaleur Latente de fusion	L_s	167	kJ/kg

3.3 Résultats expérimentaux

➤ Evolution de la température

La figure 3.3 illustre l'évolution des températures enregistrées durant le processus de fusion de la paraffine. On peut voir que la température de la paroi chaude se stabilise autour de 93°C après une transition initiale d'environ 40min. Les températures des différentes positions de la paraffine enregistrent un changement de l'allure des températures durant la transition solide-liquide. Ce changement de l'allure va nous permettre de prévoir la position du front de fusion au cours des expériences.

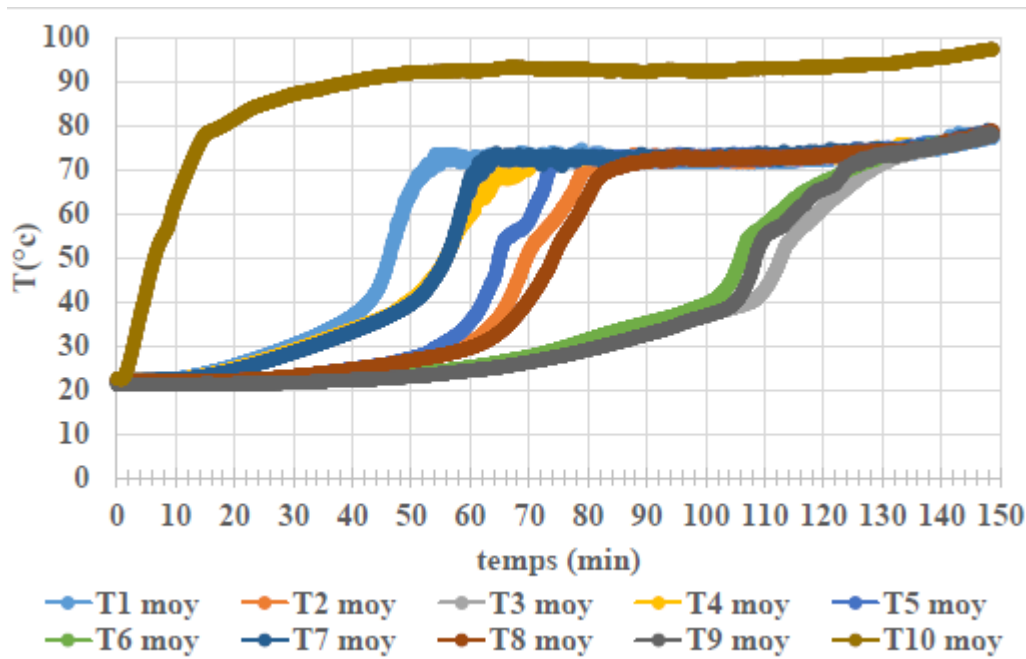


Fig3. 3. Evolution de la température de la paraffine et la température de la paroi.

➤ Fraction volumique

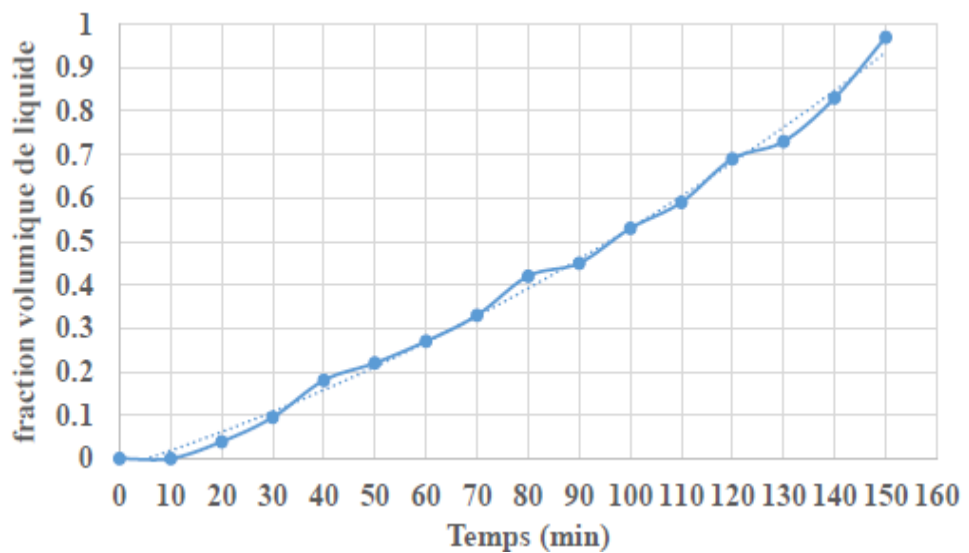


Fig3. 4. Evolution de la fraction volumique de la paraffine.

La fraction de fusion qui représente le pourcentage de la paraffine fondue dans la cavité a été calculée à l'aide du logiciel (Autocad). La figure 3.4 montre que la variation

de la fraction liquide de fusion avec le temps est assez linéaire. Cela signifie que le processus de fusion ne dépend pas de la hauteur du liquide formé.

3.4 Partie numérique

3.4.1 Description du logiciel

MATLAB (MATrix LABoratory) est un logiciel interactif basé sur le calcul matriciel. Il est utilisé dans les calculs scientifiques et les problèmes d'ingénierie parce qu'il permet de résoudre des problèmes numériques complexes en moins de temps requis par les langages de programmation courant, et ce grâce à une multitude de fonctions intégrées et à plusieurs programmes outils testés et regroupés

3.4.2 Présentation du programme élaboré

Les résultats expérimentaux sont enregistrés sous forme d'un tableau dans un fichier Excel. Il comporte essentiellement une colonne de temps et plusieurs colonnes regroupant les températures des différents points. Ainsi, il est indispensable d'importer ce fichier Excel sous Matlab afin de pouvoir le manipuler. On crée alors les différents vecteurs temps et températures (inputs) comportant les valeurs expérimentales.

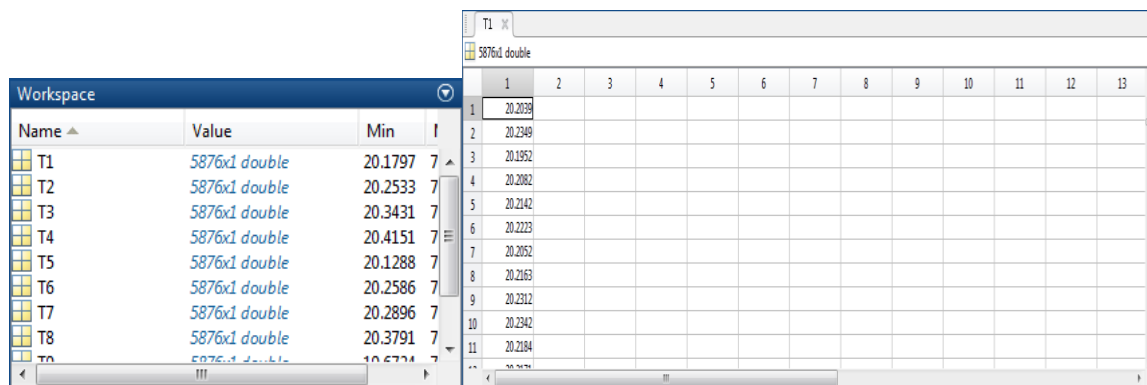


Fig3. 5. Vecteurs temps et températures importés sous Matlab

3.4.3 Fraction Liquide :

Pour calculer la fraction liquide, on propose d'utiliser les méthodes suivantes :

$$\begin{cases} 0 & \text{si } T < T_s \\ f_l = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{si } T_s < T < T_l \\ 1 & \text{si } T > T_l \end{cases} \quad (3.1)$$

1. Méthode 1 : elle consiste à calculer la température du MCP en déterminant la moyenne des températures des neuf (09) thermocouples immergés dans le MCP, Eq. 3.2.

$$T_m = \frac{\sum T_i}{9} \quad (3.2)$$

2. Méthode 2 : elle consiste à diviser la surface totale du MCP en volume de contrôle par le nombre des températures enregistrées dont le centre est la position du thermocouple.

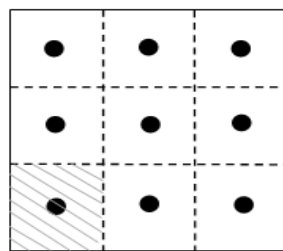


Fig3. 6. Division de la surface du MCP en volume de contrôle

On calcule la fraction liquide de chaque volume à l'aide de l'équation (3.1), la fraction volumique du MCP est la moyenne des fractions liquides obtenues.

$$f_l = \frac{\sum f_i}{i} \quad (3.3)$$

3. Méthode3 : Pour mieux évaluer la fraction liquide au démarrage, on propose d'ajouter l'évolution de la température de la paroi chaude dans l'Eq. 3.3.

L'expression devient :

$$f_l = \frac{\sum f_i + f_p}{i+1} \quad (3.4)$$

f_p représente la fraction liquide du MCP calculée à partir de la température de paroi chaude en utilisant l'Eq. 3.1

4. Méthode 4 : on calcule la position du front de fusion par une interpolation linéaire entre deux thermocouples voisins selon la direction verticale.

$$f_l = \frac{y_i - y_f}{y_i - y_j} = \frac{T_i - T_f}{T_i - T_j} \quad (3.5)$$

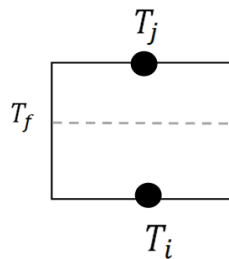


Fig3. 7. Interpolation linéaire entre deux thermocouples voisins

3.4.4 Chaleur sensible

Quand un corps est chauffé ou refroidi, l'augmentation ou la diminution de cette température sans changement d'état physique est appelée la chaleur sensible.

$$Q_{sensible} = m \times Cp \times (T_f - T_i) \quad (3.3)$$

3.4.5 Chaleur latente

Tous les corps purs ont la capacité de changer d'état physique, les solides peuvent devenir des liquides, les liquides peuvent devenir des gaz. Ces changements d'état nécessi-

tent l'ajout ou le retrait d'énergie sans modifier la température d'un corps. Donc la chaleur qui permet un changement d'état sans modifier la température d'un corps ce nomme la chaleur latente.

$$Q_{latent} = m \times L_s \times f_l \quad (3.4)$$

m : masse de la paraffine

L_s : chaleur latente de solidification de la paraffine

3.4.6 Chaleur totale

La chaleur dégagée ou récupérée durant les expériences du changement de phase du MCP représente la somme entre la chaleur sensible et la chaleur latent

$$Q_{total} = Q_{senbible} + Q_{latent} \quad (3.5)$$

3.4.7 Coefficient de convection

Le coefficient de transfert de chaleur sur au niveau de la paroi chaude peut être déterminé à l'aide de l'expression suivante :

$$h = \frac{Q_{total}}{S_p(T_p - T_f)\Delta t} \quad (3.6)$$

S_p : surface de la paroi chaude

T_f : température de fusion

T_p : température de la paroi chaude

Δt : pas de temps

3.4.8 Nusselt

Le nombre de Nusselt est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser le type de transfert thermique entre un fluide et une paroi. Il met en rapport le transfert par convection par rapport au transfert par conduction. Il est d'autant plus

élevé que la convection prédomine sur la conduction. Le nombre de Nusselt peut s'exprimer

$$Nu = \frac{H \times h}{\lambda} \quad (3.7)$$

H désigne la hauteur de la cavité

λ est la conductivité thermique moyenne de la paraffine

3.4.9 Stefan

Le nombre de Stefan Ste définit la relation entre le rayonnement thermique et la température d'un objet considéré comme un corps noir. Il représente le rapport entre la chaleur sensible et la chaleur latente

$$Ste = \frac{C_p \times (T_p - T_f)}{L_s} \quad (3.8)$$

C_p caractérise la capacité calorifique moyenne de la paraffine

3.4.10 Rayleigh

Le nombre de Rayleigh est un nombre sans dimension qui représente le rapport des forces de flottabilité et de la diffusivité thermique.

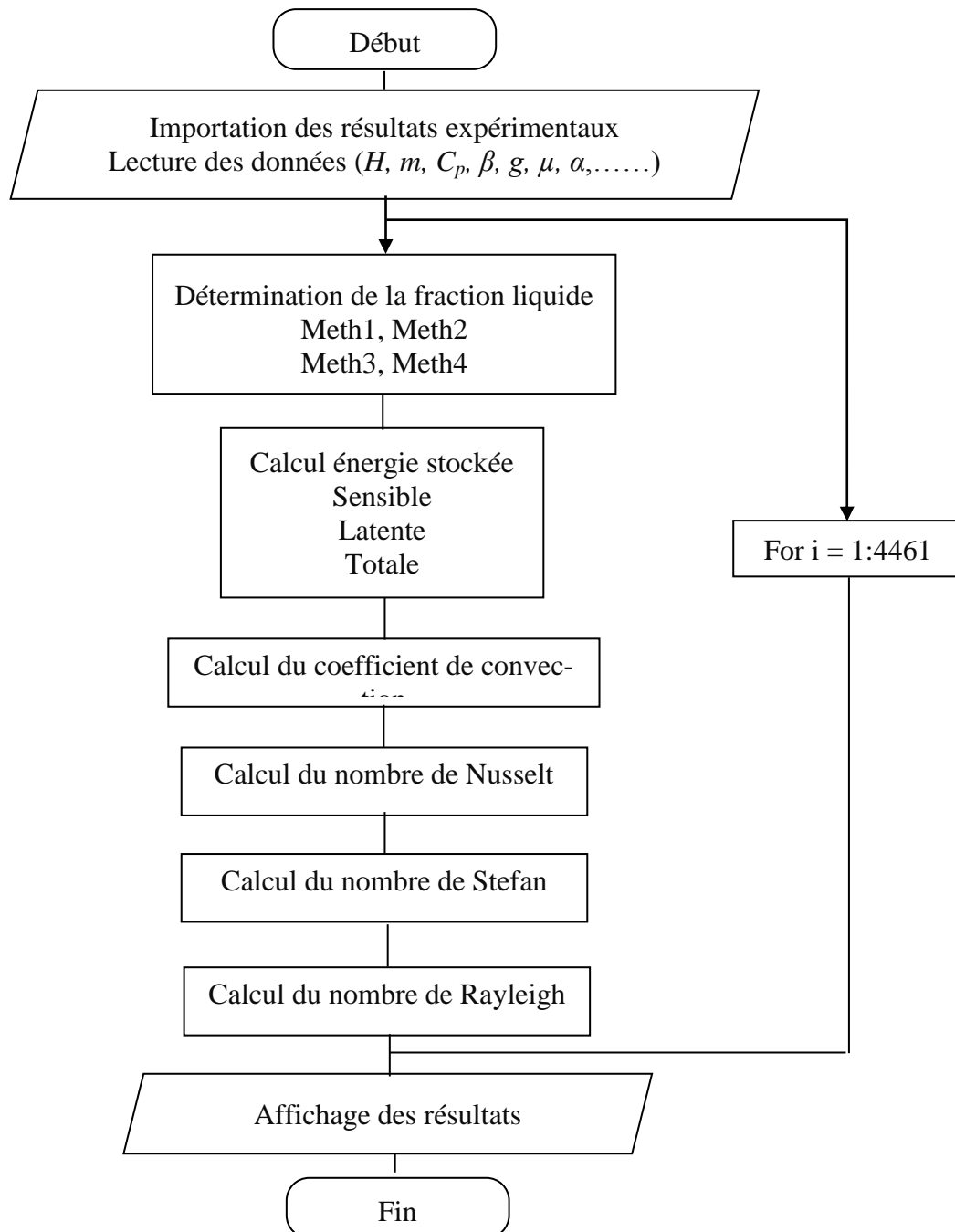
$$Ra = \frac{g\beta(T_p - T_f)H^3}{\nu a} \quad (3.9)$$

β : Coefficient de dilatation thermique de la paraffine

ν : viscosité dynamique de la paraffine

a : diffusivité thermique de la paraffine

Pour la détermination des différents paramètres, on a élaboré un code de calcul avec le langage Matlab selon l'organigramme suivant :

**Fig3. 8.** Organigramme montrant le code MATLAB

Chapitre IV

Résultats et discussions

4.1. Introduction

Ce chapitre présente les différents résultats obtenus par le code de calcul élaboré dans le chapitre 3.

4.2. Evolution de la fraction liquide

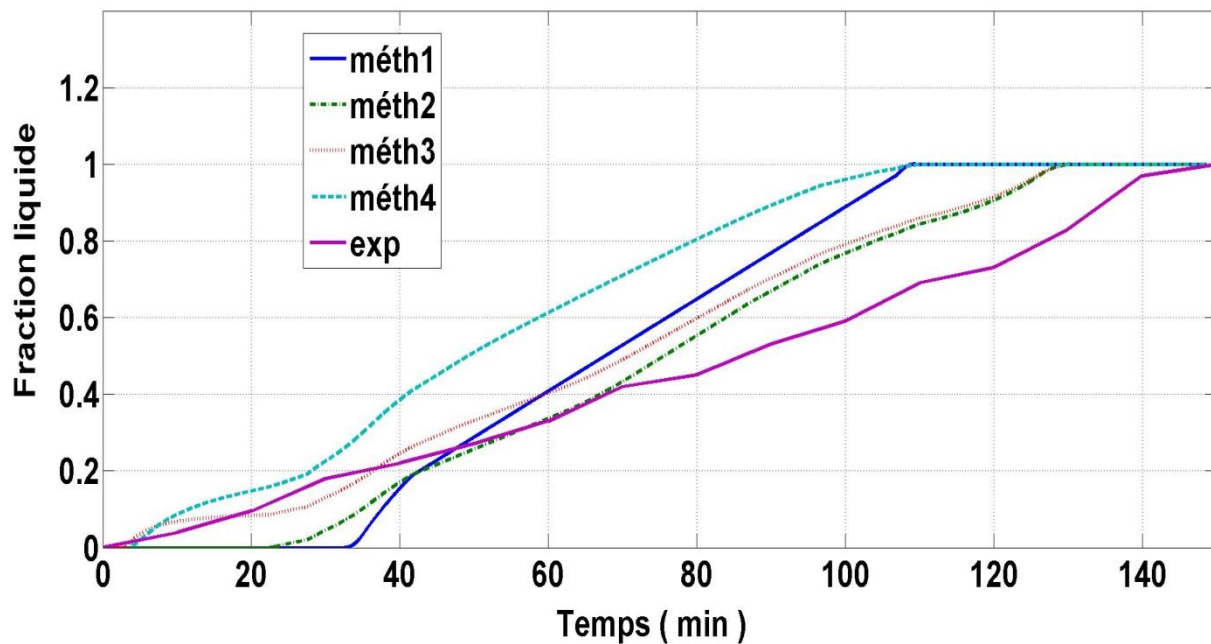


Fig4. 1. Evolution de la fraction volumique de liquide.

La figure 4.1 représente la comparaison de l'évolution de la fraction liquide obtenue expérimentalement et numériquement. La courbe de la fraction liquide expérimentale a été tirée à partir des résultats obtenus dans le travail antérieur [42]. Elle est calculée à partir des photos représentant l'évolution de la fusion dans le temps. On mesure la surface de la phase liquide par le logiciel Autocad qui, en divisant par la surface globale, fournit la fraction volumique. Les courbes des fractions des différentes méthodes montrent que le début de fusion démarre après 22 et 35 min pour les méthodes 2 et 1, respectivement, tandis que les autres méthodes fournissent un temps de début de fusion assez proche de celui de l'expérimentale. La fin de fusion atteint après 109, 130, 130 et 110 min par les méthodes 1, 2, 3 et 4, respectivement. L'expérimentale révèle une fin de fu-

sion après 150 min. Les erreurs moyennes des différentes méthodes par rapport à l'expérimental sont données dans le tableau suivant :

Tableau 4. 1. Erreurs de calcules.

Méthode	erreur moyenne %	erreur maximale %
1	51.32	100
2	35.06	75.11
3	26.92	32.41
4	46.14	68.28

L'erreur maximale obtenue est assez importante dans les méthodes 1, 2 et 4. Cette erreur se localise surtout dans la détermination du début de fusion. L'intégration de la température de paroi chaude dans le calcul améliore la précision de la méthode 3.

4.3. Evolution de l'énergie stockée

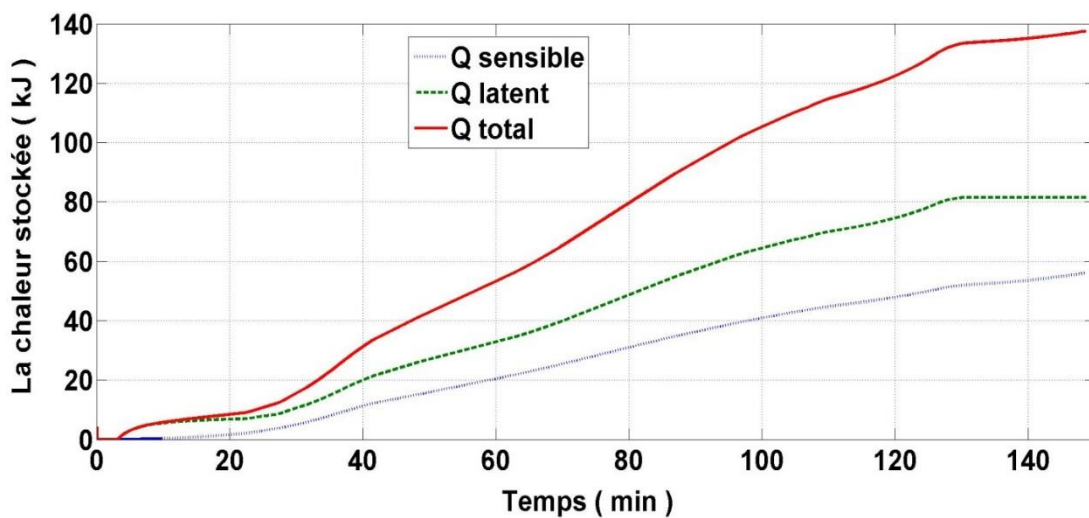


Fig4. 2. Evolution temporelle de la chaleur stockée.

La figure 4.2 représente l'évolution de l'énergie thermique stockée par la paraffine durant le processus de fusion. L'énergie totale est composée de l'énergie sensible (états solide et liquide) et de l'énergie latente (changement de phase) accumulée dans la paraffine, Eq. (3,5), (3,6) et (3,7). On remarque que le stockage par chaleur latente est toujours

supérieur du stockage sensible. A la fin de fusion, la paraffine stocke 81 kJ (58%) par chaleur latente et 56 kJ (42%) par chaleur sensible. La chaleur totale stockée à la fin de fusion atteint 137 kJ.

4.4. Evolution du coefficient de convection :

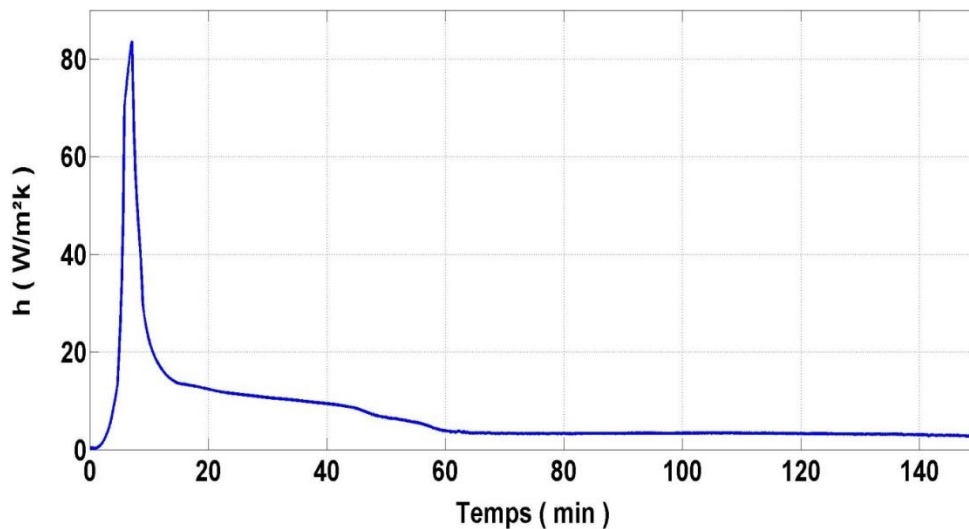


Fig4. 3. Evolution du coefficient de convection.

La figure 4.3 représente l'évolution temporelle du coefficient de convection au niveau de paroi chaude qui a été déterminé par l'équation (3.8). Au démarrage, on enregistre une augmentation du coefficient de convection pour atteindre un maximum de $83.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ après 7 min, c'est le régime instationnaire. Le transfert thermique par convection naturelle diminue progressivement jusqu'à disparaître à la fin avec un coefficient de convection autour de $3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

4.5. Evolution du nombre de Nusselt

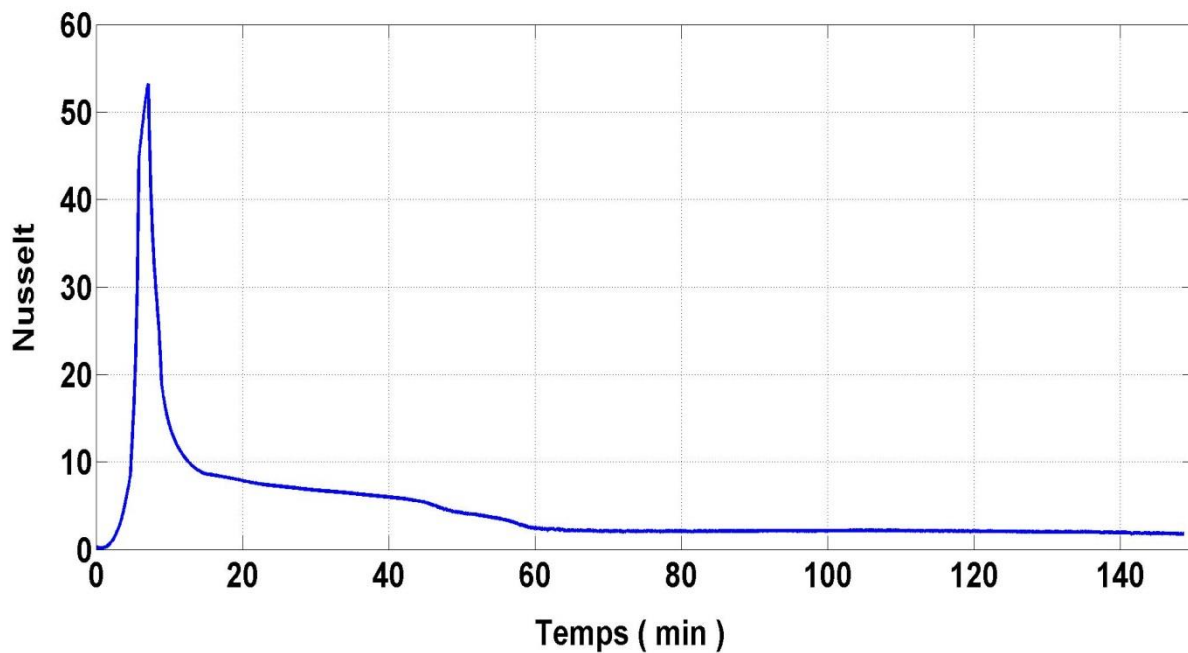


Fig. 4. 4. Evolution du nombre de Nuesselt.

La figure 4.4 représente l'évolution temporelle du nombre de Nusselt au niveau de paroi chaude qui a été déterminé par l'équation (3.9). Au début, le nombre de Nusselt monte rapidement jusqu'à atteindre la valeur maximale de 53,16. Après 15 min, il descend rapidement jusqu'à la valeur minimale de 8.64. A la fin de fusion, le nombre de Nusselt se stabilise autour de 1.8.

4.6. Evaluation du nombre de Stefan

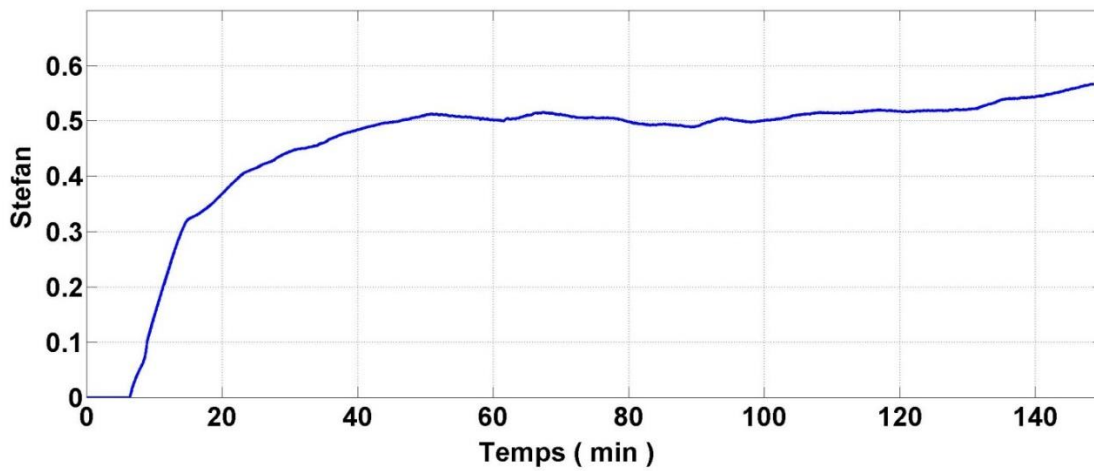


Fig. 4. 5. Evolution du nombre de Stefan.

La figure 4.5 représente l'évolution temporelle du nombre de Stefan qui a été déterminé par l'équation (3.10). Au début, on remarque que le nombre de Stefan reste nulle jusqu'à $t = 7\text{min}$. Ensuite, le nombre de Stefan augmente avec l'augmentation de la chaleur sensible jusqu'à la valeur 0.4. Il se stabilise après autour de 0.5.

4.7. Evaluation du nombre de Rayleigh

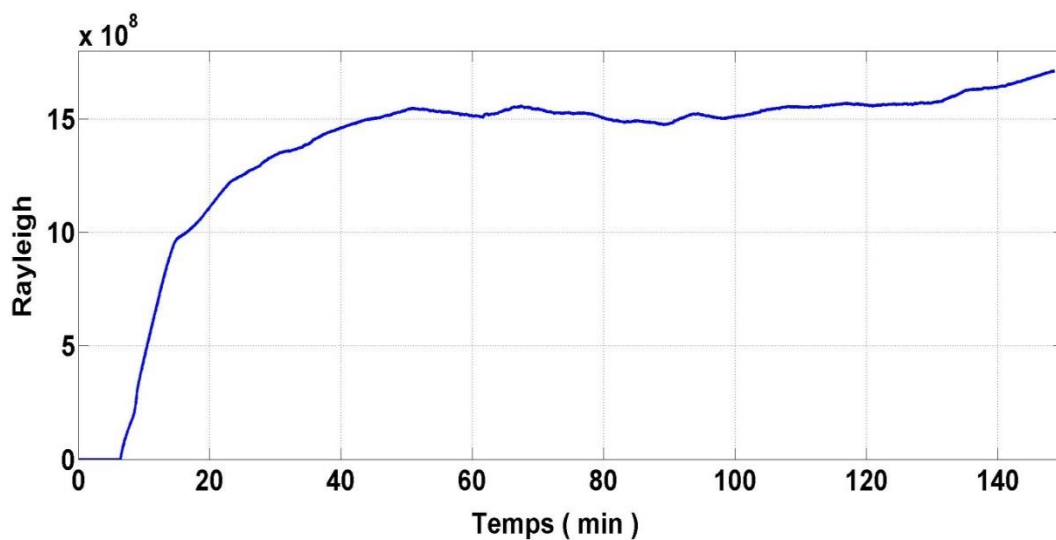


Fig4. 6. Evolution du nombre de Rayleigh.

La figure 4.6 représente l'évolution temporelle du nombre de Rayleigh, qui a été déterminé par l'équation (3.11). Au démarrage, on remarque que le nombre de Rayleigh reste nulle jusqu'à $t = 7\text{min}$. Ensuite, le nombre de Rayleigh augmente jusqu'à la valeur 1.21×10^9 . Puis, il se stabilise autour de 1.5×10^9 et atteint une valeur maximale de 1.71×10^9 . L'augmentation du nombre de Rayleigh, qui est le moteur de la convection naturelle, montre l'intensification de cette dernière par rapport la conduction.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons élaboré un code numérique pour l'approximation de la fraction liquide durant la fusion d'un MCP. Quatre méthodes ont été proposées et testées pour cette approximation. La validation est assurée à partir des relevés expérimentaux de la température réalisés précédemment.

Les résultats obtenus montrent une bonne concordance méthodes proposées avec l'expérimentale. Cependant, la méthode 3 fournit une meilleure précision dont l'erreur maximale atteint 32.41% et l'erreur moyenne 26.92%.

Comme résultats, le code numérique permet d'évaluer différents paramètres thermiques comme f_l , Q , h , Nu , Ra , Ste .

Références bibliographiques

- [1] Berreksi.S et Latarsa.S : Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule sphérique Mémoire de master Université M'Hamed Bougara Boumerdes Faculté des Sciences de L'Ingénieur Département énergétique 2016
- [2] Cours d'Énergie renouvelable (Stockage d'énergie). Dr Hamid. Université de Bli-da.Algérie.
- [3] Atul Sharma, Review on thermal energy storage with phase change material and applications, Renewable and sustainable energy reviews 13 (2009).
- [4] "PG&E teste le stockage de l'énergie par air comprimé", Enerzine, 28 août 2009.
- [5] "Énergie renouvelable: bientôt le stockage par air comprimé?", L'expansion.com, 15 janvier 2010.
- [6] http://fr.ekopedia.org/Stockage_de_chaleur (2016).
- [7] D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, A. Athienitis and C. Liu «Energy storage building materials with organic PCM's, 28thIntersociety Energy Conversion Engineering Conf, Georgia, Alta, Vol. 2, pp. 143-148, August 8-13, 1993
- [8] Bruno BINET « Etude de la fusion dans des enceintes munies de sources de chaleur discrètes ».Sherbrooke (Québec), CANADA Novembre 1998.
- [9] Sharma, A, V.V, Tyagi, C.R, Chen, & D, Buddhi. 2009a. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and sustainable energy reviews, Vol.13, pages 318–345.
- [10] Lane, (1983) solar heat storage: latent heat material, volume 1: Background and scientific principles. USA: CRC. 31
- [11] S.A. Khateeb, Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter, Journal of Power Sources 128 (2004)
- [12] Lane (1986). Lane, G.A. (1989). Phase Change Thermal Storage Materials. In: Hand Book of Thermal Design.In: Guyer, C., ed. McGraw Hill Book Co.

- [13] Dinçer et Rosen, (2002) Thermal Energy Storage Systems and Applications, Wiley and Sons Publishing Company, New York, USA.
- [14] Jean-Sébastien SAVARD, Hussein IBRAHIM, Adrian ILINCA. Etude et conception d'un échangeur thermique pour un système hybride de type éolien-diesel-stockage d'air comprimé (JEDSAC). Laboratoire de recherche en énergie éolienne. Université du Québec à Rimouski. Canada. (Octobre 2008).
- [15] Milan Ostrya, Pavel Charval « Materials for advanced Heat storage in buildings » 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013.
- [16] Zalba B., Marin J.M., Cabeza L.F., Melhing H., "Heat Transfer Analysis and Applications", Review on Thermal Energy Storage Technologies, Applied Thermal Engineering, Vol. 23, pp. 251-283, 2003
- [17] Echhoff S., Okos M., "Solar Energy Heat Storage for Home, Farm and Small Business: Suggestions on Selecting and Using Thermal Storage Materials and Facilities", <http://persephone.agcom.purdue.edu>.
- [18] M. Pierre Pardo, Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique, Thèse Doctorat, Université de Toulouse, décembre 2013.
- [19] Öztürk H.H., 1997. The Research on Storage of Solar Energy in Change Material (PCM) for Greenhouse Heating. PhD thesis, Ç.U. Institute of Natural and Applied Sciences, Adana. (In Turkish).
- [20] Mohammed M. Farid et al, A review on phase change energy storage: materials and applications, Energy Conversion and Management, 45, 2004, pp 1597–1615.
- [21] : Ahmed Maha, (2004) Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux à changement de phase, Super isolation, Apports solaires. Université Joseph Fourier Grenoble : pp 5-23.
- [22] : Sari, A. (2004). Form-stable paraffin/high density polyethylene composites as solid– liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties. Energy Conversion and Management 45: 2033-2042.

- [23] : MARIN, J.M., ZALBA, B., CABEZA, L.F., MEHLING, H., 2005. Improvement of a Thermal Energy Storage Using Plates with Paraffin-Graphite Composite. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48: 2561-2570.
- [24] : Zhang et fang 2006
- [25] : MEHLING, H., HIEBLER, S., ZIEGLER, F., 2000. Latent Heat Storage Using a PCM- Graphite Composite Material. *Proceedings of TERRASTOCK-2000, 8th International Conference on Thermal Energy Storage, 28th August – 1st September, 2000, Stuttgart, Germany, 1: 375-380.*
- [26] : Wolfgang Streicher., “Phase Change Material Heat Storage: New Materials and New Solar and Other Applications”, Graz University of Technology, Institut of Thermal Engineering, IEA Task 32 Subtask C leader (PCM), 2004.
- [27]. : Sharma A., Sharma S.D., Buddhi D., “Accelerated Thermal Cycle Test of Acetamide, Stearic Acid and Paraffin Wax for Solar Thermal Latent Heat Storage Applications”, *Energy Conversion and Management* 43: 1923-1930, 2002.
- [28] : Hawlader M.N., Uddin M.S., Zhu H.J., “Encapsulated Phase Change Materials.
- [29] : ÖZTÜRK, H.H., 1997. The Research on Storage of Solar Energy in Phase Change Material (PCM) for Greenhouse Heating. PhD Thesis, Ç.Ü. Institute of Natural and Applied Sciences, Adana. (In Turkish).
- [30] : SHARMA, A., TYAGI, V.V., CHEN, C.R., BUDDHI, D., 2009. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13: 318-345.
- [31] : Lane, 1983. *Solar Heat Storage: Latent Heat Material, Volume 1: Background and Scientific Principles*. USA: CRC.
- [32] : C.K. Jotshi, D.Y. Goswami and J.J. Tomlinson, Solar thermal energy storage in phase change materials, in *proc. 1992 ASES Annual Conf, USA, 1992.*
- [33] : Lane (1986). Lane, G.A. (1989). *Phase Change Thermal Storage Materials*. In: *Hand Book of Thermal Design*. In: Guyer, C., ed. McGraw Hill Book Co.

- [34]: D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, A. Athienitis and C. Liu «Energy storage building materials with organic PCM's, 28thIntersociety Energy Conversion Engineering Conf, Georgia, Alta, Vol. 2, pp. 143-148, August 8-13, 1993.
- [35] : 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.
- [36] : Wolfgang Streicher., "Phase Change Material Heat Storage: New Materials and New Solar and Other Applications", Graz University of Technology, Institut of Thermal Engineering, IEA Task 32 Subtask C leader (PCM), 2004.
- [37] : Husnain S.M., "Part I: Heat Storage Material and Technique", Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Energy Research, Vol. 39, pp. 1127-1138, 1998.
- [38] : Zalba B., Marin J.M., Cabeza L.F., Melhing H., "Heat Transfer Analysis and Applications", Review on Thermal Energy Storage Technologies, Applied Thermal Engineering, Vol. 23, pp. 251-283, 2003.
- [39] : Khudhair A.M., Farid M.M, "Part Application With thermal Storage by Latent
- [40] : Buddhi D., Sawhney R.L., "Proceeding of Thermal Energy Storage and Energy Conversion", School of Energy and Environmental Studies, Devi Ahilya University, Indore, India. 1994.
- [41] : Salyer I.O., Sircar A.K., "Phase Change Material for Heating and Cooling of Residential Buildings and Other Applications", In: Proceedings of the 25th intersociety energy conservation engineering conference, 1990.
- [42] :I.marouf , S.belkadi Etude expérimentale et numérique de la fusion de paraffine dans une cavité chauffée par le bas ,diplôme de Master, 2020.