



Université Saad Dahlab, Blida-1
Faculté de Technologie
Département des Énergies Renouvelables

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de MASTER
En Énergies Renouvelables
Option : conversion thermique

Thème :

Le stockage thermique par chaleur latente

Réalisée par :
ROUDJ Maya Zehira

Suivi par :
Mr : LAFRI Djamel

2019/2020

DEDICACE

A travers quelques expressions exprimant ma gratitude et ma profonde affection, dans ce petit espace à eux ; le jour est venu pour leur dire Merci

*Je dédie ce modeste travail **A mes chers parents**, à ceux qui m'ont donné la vie, l'espoir et l'amour, à ceux qui ont veillé pour mon bien être, qui m'ont encouragé tout au long de mes études, à ceux qui étaient patients et compréhensifs ;*

***A toi mon grand -père**, ceci est ma profonde gratitude pour ton éternel amour et ton énorme soutien, que ceci soit le meilleur cadeau que je puisse t'offrir.*

Remerciements

Tout d'abord, j'adresse mes vifs remerciements aux membres des jurys pour pouvoir bien voulu examiner et juger ce travail.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon cher professeur et encadrant **Mr LAFRI Djamel** pour son suivi et pour son énorme soutien, qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de la période du travail.*

Enfin, je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements à tous les enseignants du département des énergies renouvelables qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

Résumé

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande du monde jusqu'à maintenant : c'est l'énergie solaire, qui est libre et abondante dans la plupart des régions du monde, et est avérée une source économique.

L'utilisation d'énergie solaire comme source alternative d'énergie souffre par sa nature d'une puissance intermittente. Selon la fluctuation des conditions atmosphériques (jour/nuit), aléatoire (orages et passages de nuages), diluée et décalée par rapport aux demandes énergétiques quotidiennes ou saisonnières. Par conséquent, Pour satisfaire la demande, s'ajuster aux variations et répondre à une production importante alignée avec la demande ; la solution est le stockage de cette énergie.

A cet effet, ce travail vise à fournir une étude sur le stockage thermique par chaleur latente, nous décrivons au premier chapitre le développement du stockage thermique par changement de phase et les évolutions sur l'utilisation des MCP après beaucoup d'expérimentations

Le second chapitre, se caractérise par tous ce qui concerne les MCP .Ces derniers sont connus par leurs applications en industries tels que l'isolation des bâtiments et par conséquent beaucoup d'avantages en domaine du stockage d'énergies. Nous avons parlé aussi sur les différents type de stockage de l'énergie thermique selon le critère de l'état de matériau, on faisant une comparaison entre les différents types de stockage ainsi les différentes applications du stockage thermique.

Le troisième chapitre qui consiste à une étude expérimentale dans le but d'étudier et de suivre les phénomènes de fusion et de solidification du MCP à l'intérieur d'une cuve de stockage. Nous avons utilisé des données expérimentales non traités dans la conception de la cuve de stockage du travail de la thèse de MR LAFRI.

Finalement, ce travail sera terminé par une conclusion générale qui résume les principaux résultats, obtenus

Abstract

Global energy demand is changing rapidly and natural resources such as uranium, gas and oil are declining due to widespread diffusion and development of the industry in recent years. To cover energy needs, research is conducted on renewable energy. One of the renewable energies that can fulfill the world's demand so far is solar energy, which is free and abundant in most parts of the world, and has proven to be an economic source. The use of solar energy as an alternative source of energy suffers by its nature of intermittent power. According to the fluctuation of the atmospheric conditions (day / night), random (thunderstorms and passages of clouds), diluted and shifted with respect to the daily or seasonal energy demands.

Therefore, to satisfy demand, adjust to variations and respond to a significant production aligned with demand; the solution is the storage of this energy. To this end, this work aims to provide a study on the state of solar storage, in particular thermal storage. In this study, we describe in the first chapter the development of phase change thermal storage and changes in the use of PCM after many experiments.

All that concerns PCMs characterize the second chapter. These are known for their applications in industries such as building insulation and therefore many advantages in the field of energy storage. We also talked about the different types of thermal energy storage according to the material condition criterion, making a comparison between the different types of storage and the different applications of thermal storage

The third chapter, which consists of an experimental study with the aim of studying and monitoring the phenomena of melting and solidification of PCM inside a storage tank. We used untreated data in the design of the storage tank of MR LAFRI's thesis.

Finally, this work will be completed with a general conclusion, which summarizes the main results obtained.

ملخص

يتغير الطلب العالمي على الطاقة بسرعة، كما أن الموارد الطبيعية مثل اليورانيوم والغاز والنفط أخذت في الانخفاض بسبب انتشار الصناعة على نطاق واسع في السنوات الأخيرة. لتغطية احتياجات الطاقة، يتم إجراء الأبحاث على الطاقة المتجددة. واحدة من الطاقات المتجددة التي يمكن أن تلبى الطلب العالمي حتى الآن هي الطاقة الشمسية، وهي مجانية وفيرة في معظم أنحاء العالم، وقد أثبتت أنها مصدر اقتصادي.

يعاني استخدام الطاقة الشمسية كمصدر بديل للطاقة من طبيعة الطاقة المتقطعة. وفقا لتقلبات الظروف الجوية (نهار / ليل) والعشوائية (العواصف الرعدية وممرات السحب) تضعف وتحولت فيما يتعلق بمتطلبات الطاقة اليومية أو الموسمية. لذلك، لتلبية الطلب والتكيف مع الاختلافات والاستجابة لإنتاج كبير تتماشى مع الطلب؛ الحل هو تخزين هذه الطاقة.

ولتحقيق هذه الغاية يهدف هذا العمل إلى توفير دراسة عن حالة التخزين الشمسي ولا سيما التخزين الحراري في هذه الدراسة نوضح في الفصل الأول تطور التخزين الحراري للتغيير في المرحلة والتغيرات في استخدام مواد تغيير الطور بعد الكثير من التجارب.

يتميز الفصل الثاني بكل ما يتعلق بمواد تغيير الطور وهذه الأخيرة معروفة بتطبيقاتها في صناعات مثل عزل المباني وبالتالي العديد من المزايا في مجال تخزين الطاقات وتحديثنا أيضا عن أنواع مختلفة من تخزين الطاقة الحرارية وفقا لمعيار حالة المواد مما يجعل المقارنة بين أنواع مختلفة من التخزين والتطبيقات المختلفة للتخزين الحراري.

الفصل الثالث يتكون من دراسة تجريبية بهدف دراسة ورصد ظاهرة دويان وتصلب مادة تغيير الطور (PCM) داخل خزان تخزين. ولهدا استخدمنا بيانات غير معالجة في تصميم خزان التخزين لأطروحة Mr LAFRI

وأخيرا، سوف تختتم هذه الورقة بنتيجة عامة تلخص النتائج الرئيسية التي تم الحصول عليها.

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I : Etat de l'art	3
I.1 Stockage d'énergie par chaleur latente dans les plaques	6
I.1 Stockage d'énergie par chaleur latente dans les cylindres	10
I.1 Stockage d'énergie par chaleur latente dans les capsules sphériques	17
Chapitre II: Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase ...	27
II.1. Le stockage thermique de l'énergie	27
II.1.1. Introduction	27
II.1.2. Types de stockage de l'énergie thermique	28
II.1.2.1. stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible	29
II.1.2.2. stockage thermochimique	30
II.1.2.3. stockage de l'énergie thermique par chaleur latente	32
II.1.3. Les avantages du stockage thermique par chaleur latente	34
II.1.4. comparaison des différents types de stockage thermique	34
II.1.5. systèmes de stockage de l'énergie par chaleur latente	35
II.1.5.1. Bacs à glace	35
II.1.5.2. MCP encapsulés	36
II.1.5.3. Fluides frigoporteurs diphasiques	36
II.1.6. Les applications du stockage thermique	36
II.2. Les matériaux à changement de phase	38
II.2.1 Définition	38
II.2.2. Base théorique des matériaux à changement de phase	39
II.2.2.1 Température de fusion	39
II.2.2.2. La cristallisation	40
II.2.3. Les problèmes liés au changement de phase	41
II.2.3.1 La ségrégation	41
II.2.3.2. La surfusion	42
II.2.3.3. La corrosion	44
II.2.4. Amélioration de la conductivité des MCP	43
II.2.5. Propriétés des matériaux à changement de phase	45
II.2.5.1. Critères thermodynamiques	45
II.2.5.2. Critères cinétiques	46
II.2.5.3. Critères chimiques	46
II.2.5.4. Critères économiques	46
II.2.6. Classification des matériaux à changement de phase	48
*Les sels hydratés	48
II.2.6.2. Les composés organiques	51
II.2.6.2.1. Les paraffines	51
II.2.6.2.1.1. Avantages et Inconvénients des paraffines	52

II.2.6.2.1.2. Différentes cires paraffiniques	53
II.2.6.2.1.3. Conditionnement des paraffines	53
II.2.6.2.2. Les composés organiques non paraffiniques	54
*Les acides gras	56
II.2.6.3. Les eutectiques	57
II.2.7. Les méthodes de détermination des propriétés physiques des MCP	57
II.2.7.1. Thermogravimétrie	58
II.2.7.2. Analyse thermique différentielle (DTA)	58
II.2.7.3. Calorimétrie différentielle à balayage (DSC)	58
II.2.7.4. Méthode "T-History"	59
II.2.8. Méthodes de conditionnement de MCP dans les applications de stockage thermique	60
II.2.8.1. La macro-encapsulation	60
II.2.8.2. La micro-encapsulation	61
II.2.9. Classes des MCP	63
II.2.9.1. Matériaux à changement de phase SP	63
II.2.9.1.1. Applications	63
II.2.9.1.2. Avantages	64
II.2.9.2. Matériaux à changement de phase RT	64
II.2.9.2.1. Caractéristiques	65
II.2.9.2.2. Avantages	65
II.2.10 Les Applications des MCP	65
II.3 Conclusion	67
Chapitre III : Etude expérimentale	68
III.1 Introduction	68
III.2 Description du banc d'essai	68
III.3 Instrumentation	71
III.3.1 Mesure de débit	72
III.3.2 Mesure de température	73
III.4 Résultats et discussion	74
III.4.1 Variation temporelle de la température du MCP suivant le diamètre à différentes hauteurs	74
III.4.2 Évolution des températures du MCP contenant dans la cellule cylindrique pour différentes hauteurs	79
III.4.3 La variation de la vitesse de croissance de la température du MCP	80
III.4.4 Position de l'interface solide-liquide	81
III.4.5 Calcul de la quantité d'énergie stockée	82
III.5 Déroulement de la solidification	84
III.5.1 la décharge	84
III.5.2 Évolution de la température du MCP suivant le diamètre au cours d'une décharge	85

III.5.3 Évolution de la température du MCP suivant la hauteur pendant la décharge	86
III.5.4 Évolution de la position de l'interface liquide-solide	87
III.6 Conclusion	89
Conclusion générale.....	90

Liste des figures

CHAPITRE I : Etat de l'art

Figure I.1 : Schéma d'un échangeur de chaleur latente	8
Figure I.2 : Fonction principale du système de refroidissement air-PCM: (a) pendant le jour, le PCM est en train de fondre et (b) pendant la nuit, le PCM sa solidification.	9
Figure I.3 : schéma du problème YOUNSI (2009)	9
Figure I.4 : Schéma du modèle de stockage d'énergie avec flux laminaire à l'intérieur du tube	11
Figure I.5 : cuve de stockage posée verticalement avec des tubes cylindriques (a) modèle de cylindre (b).....	12
Figure I.6 : Coupe transversale du système de stockage de transfert de chaleur	13
Figure I.7 : a) Système de stockage d'énergie thermique latente ; b) thermique Unité de stockage d'énergie.....	14
Figure I.8 : Schémas du système de stockage et du modèle physique étudié	14
Figure I.9 : Schéma de stockage de chaleur latente avec deux MCP.....	15
Figure I.10 : Schéma du modèle physique	15
Figure I.11 : Le modèle physique étudié El Bahjaoui (2013)	16
Figure I.12 : Schéma du réservoir	17
Figure I.13 : Schéma du lit de stockage BENMANSOUR et al (2001).....	19
Figure I.14 : plan de la situation expérimentale.....	20
Figure I.15 : système solaire de changement de phase KOUSKSO (2007)	21
Figure I.16 : le montage expérimental BENMANSOUR (2009)	22
Figure I.17 : Géométrie de problème de WALID FOU DHIL.....	23
Figure I.18 : modèle de calcul de la capsule avec vide	23
Figure I.19 : Diagramme schématique du système de stockage thermique à lit compact Peng at al	24
Figure I.20 : système expérimentale avec une vue de la capsule en aluminium de SHOBO AB et al	25

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

Figure II.1 : Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique	28
Figure II.2 : Différentes méthodes possibles du stockage de l'énergie thermique ...	29
Figure II.3 : Schéma de principe du stockage thermo chimique	31
Figure II.4 : charge et décharge de l'énergie.....	40
Figure II.5 : Fusion incongruente d'un sel hydraté (Streicher, 2006).....	42

Figure II.6 : Evolution théorique de la température en fonction du temps.....	42
Figure II.7 : Evolution de température T en fonction du temps t.....	43
Figure II.8 : Classification des matériaux à changement de phase.....	47
Figure II.9 : a)Conditionnement des MCP dans un module critopia	60
Figure II.9 : b) conditionnement en sac plastique c) conditionnement en briquette plastique.	61
Figure II.10 : Vue au MEB de microcapsules renfermant des paraffines.....	62
Figure II.11 : MCP classe SP.....	63
Figure II.12 : MCP classe RT.....	64

CHAPITRE III : Etude expérimentale

Figure III.1 : Emplacement de la paraffine au centre.....	69
Figure III.2 : Système de chauffage.	70
Figure III.3 : Photo de l'installation expérimentale	70
Figure III.4 : Dispositif expérimental.....	71
Figure III .5 : La disposition des thermocouples dans la cuve.....	72
Figure III .6 : Débitmètre à électromagnétique	72
Figure III.7 : Le dispositif d'étalonnage des thermocouples	73
Figure III.8 : Variation temporelle à la température du MCP suivant le diamètre à la Hauteur H=0cm	74
Figure III.9 : Variation temporelle à la température du MCP suivant le diamètre à la Hauteur H=6cm	75
Figure III.10 : Variation temporelle à la température du MCP suivant le diamètre à la Hauteur H=12cm.....	75
Figure III.11 : Variation temporelle à la température du MCP suivant le diamètre à la Hauteur H=18cm.....	76
Figure III.12 : Variation temporelle à la température du MCP suivant le diamètre à la Hauteur H=24cm.....	76
Figure III.13 : Variation temporelle à la température du MCP suivant le diamètre à la Hauteur H=30cm.....	77
Figure III.14 : Variation temporelle à la température du MCP suivant le diamètre à la Hauteur H=36cm.....	77
Figure III.15 : Évolution des profils de température du MCP suivant la Hauteur de milieu de la cellule cylindrique.....	79
Figure III.16 : la vitesse de croissance de la température de MCP	80
Figure III.17 : Position de l'interface solide –liquide pour des temps différents ...	81

Figure III.18 : Evolution de la température du MCP en fonction de l'énergie stockée.....	83
Figure III.19 : La boucle hydraulique expérimentale de la phase de décharge	84
Figure III.20 : Évolution de la température du MCP suivant le diamètre au cours de décharge de capacité de 5 litres.....	85
Figure III.21 : Évolution de la température du MCP suivant la hauteur au cours de décharge. Capacité de 5 litres	86
Figure III.22 : Position de l'interface liquide – solide pour des temps différents ...	88

Liste des tableaux

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

Tableau II.1 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur	34
Tableau II.2 : Avantages et inconvénients comparés des différents changements d'état	38
Tableau II.3 : Différents hydrates salin	49
Tableau II.4 : Exemple de propriétés physique de paraffines	53
Tableau II.5 : propriétés thermo-physique des matières organiques non-paraffiniques	54
Tableau II.6 : Propriétés thermo physique des acides gras.....	55
Tableau II.7 : Liste de quelques eutectiques	56

CHAPITRE III : Etude expérimentale

Tableau III.1 : Les propriétés thermo physiques de la paraffine	69
--	----

Liste des symboles

- **T** : La Température.
- **m** : La masse.
- **E** : La quantité d'énergie.
- **na** : Le nombre de mole du produit A.
- ΔH_r : L'enthalpie de la réaction.
- **Q** : La quantité d'énergie stockée.
- **C_{p,s}** : La chaleur spécifique des matériaux solide.
- **C_{p,l}** : La chaleur spécifique des matériaux liquide.

Les unités

- **[KJ/kg]** : La chaleur latente.
- **[Kg/m³]** : La masse volumique.
- **[Pa]** : La pression.
- **[N/m]** : La tension superficielle.
- **[Kg]** : La masse.
- **[J.kg-.K-1]** : La chaleur spécifique des matériaux.
- **[Kj/kg.K]** : La capacité thermique massique.
- **[W/mK]** : La conductivité thermique.
- **[J.mol⁻¹]** : L'enthalpie.
- **[Mol]** : quantité de la matière.
- **[kg/l]** : Densité
- **[MWe]** : Megawatt électrique.
- **[KW]** : La puissance

Introduction Générale

Utiliser l'énergie solaire pour chauffer ou refroidir est une idée qui paraît d'une logique implacable. Le principe est simple et la technique est aujourd'hui fiable et éprouvée. Non polluante et inépuisable à l'échelle humaine, l'énergie solaire permet de respecter l'environnement et de préserver les ressources énergétiques, sans produire de déchets ni d'émissions polluantes, notamment du gaz carbonique.

Cependant beaucoup de facteurs tels que, l'utilisation grandissante de l'énergie par les pays émergents, l'usage croissant des transports et l'accroissement de la population, ont accéléré l'évolution historique de cette énergie alternative ; dont Le progrès le plus significatif est celle en fin de 2015 . Cet essor a été principalement porté par l'éolien et le solaire photovoltaïque. Cependant ces dernières se caractérisent par un manque total de flexibilité puisque la production est irrégulière, difficilement prévisible et souvent en déphasage avec la demande **globale d'énergie qui fluctue constamment** . Cette consommation varie selon des **cycles journaliers** (jour/nuit), **hebdomadaires** (jours /week-end) ou **saisonniers** (été/hiver).

Et donc Pour satisfaire la demande, s'ajuster aux variations et répondre à une production importante alignée avec la demande ; la solution est le stockage de cette énergie.

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie. Cette application est nécessaire car elle répond à plusieurs enjeux d'où elle permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes ; de disposer des services système plus efficaces mettant à profit les performances des moyens de stockage ; et en plus le but essentiel est de rationaliser l'utilisation des productions intermittentes et donc conférer aux énergies renouvelables une place plus importante dans le mix du réseau énergétique ce qui nous confirme l'amélioration de la qualité.

En effet, pour résumer, stocker de l'énergie répond à deux objectifs : technique et économique.

Premier principe de gestion de l'énergie sur le réseau est de parvenir à équilibrer la quantité d'énergie produite et la demande de cette énergie et le second principe de gestion est de faire en sorte que le prix de revient de l'électricité soit toujours le plus bas possible.

Techniquement ; on fait une projection de ce terme stockage sur une des plus importantes énergies alternative : l'énergie solaire. Cette dernière qui est une source d'énergie qui dépend du soleil permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires (photovoltaïque ou thermique). On insiste beaucoup sur les limites du solaire quant à son incapacité à produire lorsqu'il n'y a pas de soleil.

D'une part L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques (énergie photovoltaïque) est stockée principalement dans les batteries solaires qui ont une énergie massique élevée. Ces batteries permettent ainsi d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour, nuit, ciel couvert). Les batteries utilisées avec des panneaux solaires, appelées batteries à décharge lente n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une batterie de voiture par exemple. La batterie solaire se décharge progressivement et supporte bien les décharges fréquentes peu profondes.

D'autre part et en ce qui concerne l'énergie thermique les méthodes les plus utilisées, sont : le stockage thermo-chimique (consiste à utiliser une réaction chimique endothermique), stockage thermique par chaleur sensible ou le stockage thermique par chaleur latente.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés aux derniers développements dans les champs du stockage thermique d'énergie par changement de phase. Le premier chapitre donc sera consacré à l'étude bibliographique, ou nous allons parler des travaux qui ont été fait sur le même sujet que le nôtre durant les 40 dernières années. Dans le deuxième chapitre, nous exposons des généralités sur les matériaux à changements de phase et leur théorie d'application, et aborder les techniques de stockage d'énergie par chaleur sensible et chaleur latente. Et à la fin nous allons terminer avec le troisième chapitre qui consiste à une étude expérimentale dans le but d'étudier et de suivre les phénomènes de fusion et de solidification du MCP à l'intérieur d'une cuve de stockage.

CHAPITRE I : Etat de l'art

Certaines recherches s'orientent vers les méthodes d'économie d'énergie en utilisant des moyens moins coûteux et facilement accessibles, l'un de ces moyens d'économie est le stockage. Le stockage d'énergie est une solution d'appoint aux moyens traditionnels de production de pointe. La fonction du stockage d'énergie est essentielle pour apporter de la flexibilité et renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques.

Les systèmes de stockage d'énergie sont identifiés dans de nombreux pays comme une thématique prioritaire pour la recherche. Donc le besoin de stockage est une réponse à des considérations d'ordre économique, environnemental et technologique.

Le stockage thermique par changement de phase est une technologie innovante et prometteuse en matière d'économie d'énergie. C'est un domaine de recherche relativement nouveau et qui a débuté avec le **Dr. Telkes** dans les années 40 (**Lane, 1983**) [1]. Ses travaux n'ont pas suscité au début beaucoup d'intérêts et ce jusqu'à la crise énergétique de la fin des années 1970 et le début des années 80.

La première application d'un MCP décrite dans la littérature était leur utilisation pour le chauffage et la climatisation dans les bâtiments par **Telkes (1975)** [2] et **Lane (1983)** [1].

Bien que la recherche sur le stockage de chaleur latente pour les systèmes de chauffage solaire continue de susciter l'intérêt de beaucoup de chercheurs (**Sari et autres 2000**) [3]. On le considère de plus en plus pour la récupération et le stockage de la chaleur résiduelle des équipements industriels et le lissage de la charge pour la production d'électricité (**El Dessouky et autre (1997)**) [4]. Le principe d'utiliser un accumulateur thermique pour stocker l'énergie latente générée par un procédé n'est pas récent. Son intérêt réside dans l'ajustement des pics de la demande d'énergie. La chaleur ou le froid généré par les équipements est récupéré et stocké dans une batterie thermique et peut par la suite être utilisé lorsque nécessaire, par exemple lors des moments où la demande est à son maximum. La technique permet à la fois de diminuer les appels de puissance et d'améliorer l'efficacité énergétique de l'équipement en le faisant fonctionner à un régime optimal.

L'eau est ainsi le plus connu des accumulateurs thermiques à chaleur latente : on peut par exemple l'utiliser sous forme de glace pour refroidir.

La nouveauté tient aujourd'hui dans l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) comme batterie de stockage. Confinés dans des réservoirs hermétiquement clos de formes géométriques différentes, ces MCP sont des substances chimiques capables d'absorber ou de libérer de grandes quantités d'énergie thermique pendant un changement de phase, de solide à liquide et vice versa. Des échangeurs de chaleur contenant un fluide caloporteur (solution de glycol ou autre) assurent le transfert de l'énergie. Celui-ci fournit ou puise dans le stock les kWh thermiques en faisant changer l'état du MCP suivant les besoins de charge ou de décharge du système. Selon le point de fusion du MCP, on obtient ainsi du chaud ou du froid.

Les principaux avantages de ces nouveaux matériaux sont : une large gamme de températures de fusion qui permet d'adapter la technologie à divers procédés, une excellente conduction et une disponibilité associée à des temps de charge/décharge très performante.

Le stockage d'énergie thermique est généralement fait sous deux formes :

- stockage par chaleur sensible, où on utilise un matériau ayant une grande capacité thermique, tel que l'eau et autres fluides, les briques de céramique, les pierres et galets, le béton.
- stockage par chaleur latente de fusion où un matériau à changement de phase (MCP) est utilisé.

Le stockage par chaleur sensible a plus d'avantages économiques que thermiques, telle que la disponibilité des matériaux de stockage avec des prix abordables.

Ils présentent néanmoins des inconvénients majeurs qui sont : il nécessite des systèmes volumineux et une grande marge de température de fonctionnement et par conséquent une bonne isolation thermique (couteuse) est exigée.

Cependant, le stockage par chaleur latente offre plus d'avantages thermiques qu'économiques, tels que l'isotherme ou faible plage de température de fonctionnement,

une grande capacité de stockage par unité de masse ou de volume (et par conséquent, moins d'espace occupé) et un meilleur contrôle thermique des systèmes.

Leurs inconvénients sont : les MCP ne sont pas aussi disponibles que ceux du premier type et ils sont plus ou moins chers ; ils ont une faible conductivité thermique, notamment les MCP organiques et leur comportement chimique vis-à-vis du contenant n'est pas toujours neutre. Plus de détails sur les différents matériaux de changement de phase et leurs caractéristiques sont présentés dans le chapitre II, et l'on peut en outre se référer aux articles et ouvrages par **Abhat (1983) [5]** et **Lane (1986) [6]**.

Plusieurs configurations géométriques dans lesquelles les MCP sont contenus dans des enceintes rectangulaires ou dans des tubes annulaires placés horizontalement ou verticalement, utilisées afin d'optimiser les performances des systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente sont présentées. Cependant les systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente ne sont pas encore très répandus car leur conception est freinée par la complexité des phénomènes de transfert thermiques qui les caractérise.

Des études théoriques et expérimentales sont actuellement en cours au sein de multiple groupes de recherche afin de mieux comprendre ces phénomènes complexes.

Plusieurs options d'un tel accumulateur sont en cours d'étude :

- accumulateur de forme parallélépipédique à une ou plusieurs couches de MCP.
- accumulateurs cylindriques (cylindres concentriques ou échangeurs de chaleur à tubes et calandre)

Plusieurs dispositions possibles sont également étudiées : verticale, horizontale, appareils destinés à être placés contre un mur, au plafond, dans le plancher ...

Des études comparatives (performances, compacité etc.) avec d'autres types d'accumulateurs sont aussi abordées.

Les études aussi bien expérimentales que numériques qui ont été réalisées durant les trois dernières décennies ont pris en considération surtout des éléments de stockage cylindriques et planaires. Dans la configuration cylindrique on trouve principalement les

éléments consistant en deux cylindres concentriques contenant séparément le MCP et le fluide caloporteur et les échangeurs de chaleur à tubes et calandre (le fluide caloporteur circulant dans les tubes et le MCP dans la calandre).

La configuration planaire consiste en une ou plusieurs couches de MCP autour desquelles circule en convection libre ou forcée le fluide caloporteur.

Bransier (1979) [7] est le premier qui a étudié analytiquement la solidification et la fusion cyclique d'un MCP. Un modèle conductif unidimensionnel est utilisé. Le MCP est mis dans deux configurations, à savoir :

- un élément plan où le fluide caloporteur circule de part et d'autre de ces deux surfaces (courants parallèles)
- un élément composé de deux cylindres concentriques où le fluide caloporteur circule à l'intérieur du cylindre alors que le MCP se trouve dans l'espace annulaire entre les cylindres, la surface extérieure du cylindre étant isolée.

I.1 Stockage d'énergie par chaleur latente dans les plaques :

Farid et Hsian (1990) [8] ont étudié expérimentalement et analytiquement un élément planaire qui consiste en plusieurs couches de MCP indépendantes. Le stockage de la chaleur dans le MCP est fait par l'intermédiaire d'éléments électriques chauffants et de l'air circulant entre les couches permet le déstockage. Le transfert de chaleur à travers le MCP est supposé unidimensionnel justifié par le fait que l'épaisseur des couches est très faible devant leur hauteur. La convection naturelle dans la phase liquide a été prise en compte à l'aide d'une conductivité thermique équivalente calculée partir de la conductivité de la phase liquide en utilisant une corrélation où les valeurs de deux constantes sont déterminées par comparaison entre des résultats expérimentaux et des résultats théoriques. Les résultats montrent entre autre que 20 à 50% de la résistance thermique totale se trouve dans l'air de circulation suggérant qu'il faut autant que possible augmenter la turbulence dans l'air servant au stockage afin d'améliorer le transfert de chaleur.

Laouadi, Lacroix et Galani (1994) [9] ont développé et utilisé un modèle basé sur la conduction unidimensionnelle pour étudier les performances d'un accumulateur de chaleur plan qui consiste en une couche de MCP de deux centimètres d'épaisseur isolée thermiquement d'un côté. Le stockage de chaleur s'effectue grâce à des résistances électriques chauffantes placées dans le MCP juste au-dessous de l'isolant. Le déstockage vers l'environnement se fait par radiation et/ou par convection. Cette étude a montré que cette unité peut être chargée et déchargée deux fois par jours et pourrait donc servir pour déplacer les pics dus aux appels de puissance en période de pointe vers les heures creuses de la journée.

Autres résultats de cette étude :

- lorsque la puissance électrique de chauffage augmente la température de l'élément augmente tandis que le temps de stockage diminue et que le temps de déstockage augmente.
- Les pertes de chaleur augmentent aussi avec la puissance de chauffage et atteignent une valeur maximale à la fin de la période de stockage.
- La performance de l'unité dépend fortement de la puissance électrique de chauffage et du coefficient de transfert de chaleur vers l'environnement.
- Des sources de chaleur électriques sont distribuées uniformément dans les couches de MCP de cette unité et fournissent la puissance nécessaire pour le stockage de chaleur. Le déstockage est effectué par une circulation d'air autour des éléments de MCP.

Cette étude a mis en évidence que le phénomène de stockage comporte trois étapes :

- Stockage par chaleur sensible dans le MCP solide.
- Stockage par chaleur latente au début de la fusion.
- Stockage simultané par chaleur sensible et par chaleur latente dans le MCP liquide.

Quant au déstockage il comporte quatre étapes :

- Déstockage par chaleur sensible dans le MCP liquide.
- Déstockage par chaleur sensible au début de la ré-solidification du MCP.
- Extraction de la chaleur du MCP par refroidissement de celui-ci et de la phase solide,
- Déstockage par chaleur sensible de la phase liquide.

Comparés aux systèmes de stockage d'énergie par chaleur sensible, pour une même quantité d'énergie stockée, les accumulateurs d'énergie par chaleur latente sont plus compacts (moins encombrants).

Cependant un inconvénient majeur des MCP est leur faible conductivité thermique qui empêche un transfert de chaleur suffisant lors du déstockage (à cause de la couche de solide qui se forme tout de suite après le début de la période de déstockage et qui impose la conduction comme mode d'échange de chaleur avec l'environnement).

Cet inconvénient peut être en partie diminué par l'utilisation d'ailettes implantées dans le MCP pour améliorer l'échange de chaleur sur la surface d'échange entre le MCP et l'environnement. Dans d'autres articles.

Ismail et al [10] (1997) présentent les résultats d'une étude expérimentale et numérique sur des plaques parallèles constituées de matériau à changement de phase (la glace). L'objectif est d'identifier l'importance relative des paramètres géométriques et opérationnels et leur influence sur la performance de l'ensemble des plaques. Le modèle mathématique est basé sur une formulation monodimensionnelle de problème de changement de phase, et sa solution numérique a été réalisée en utilisant la méthode des différences finies. Les prédictions du modèle ont été comparées avec l'expérience. L'énergie stockée, la position de l'interface et le temps de solidification complète sont présentés en fonction de la température initiale du PCM, et de l'espace entre les plaques. L'efficacité de l'unité expérimentale est également présentée et discutée.

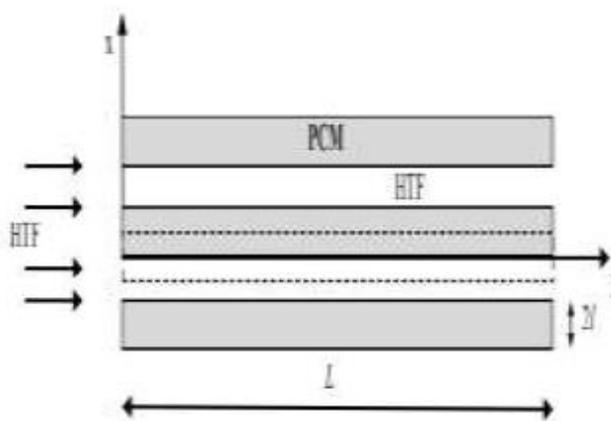


Figure I.1 : Schéma d'un échangeur de chaleur latente

Hed et Bellander [11] (2005) ont inséré un matériau à changement de phase, PCM, dans un échangeur de chaleur à plaques parallèles qui utilise l'air comme fluide caloporteur. Au cours de la nuit le PCM se solidifie, et l'énergie est libérée. Pendant la journée, l'air est mis en circulation dans l'échangeur, l'énergie est absorbée et l'air ambiant est refroidi.

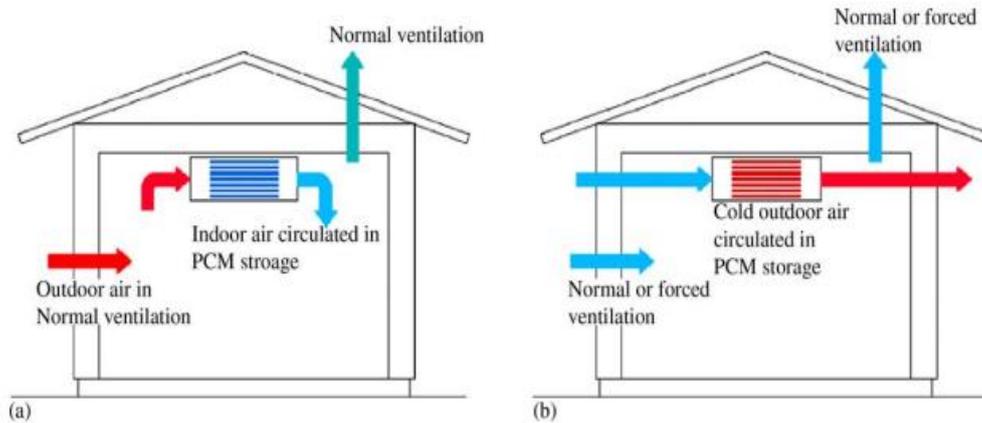


Figure I.2 : Fonction principale du système de refroidissement air-PCM: (a) pendant le jour, le PCM est en train de fondre et (b) pendant la nuit, le PCM se solidifie.

YOUNSI (2009) [12] a étudié l'intégration des éléments de MCP dans les murs solaires passifs. Le matériau à changement de phase étudié (MCP 27 sels hydratés) a un point de fusion situé à 27°C . Les échantillons fournis par le fabricant sont des éléments parallèles épipédriques (briquettes) de dimensions $210 \times 140 \times 25 \text{ mm}^3$. Géométrie qui semble bien adaptée à l'intégration dans un mur.

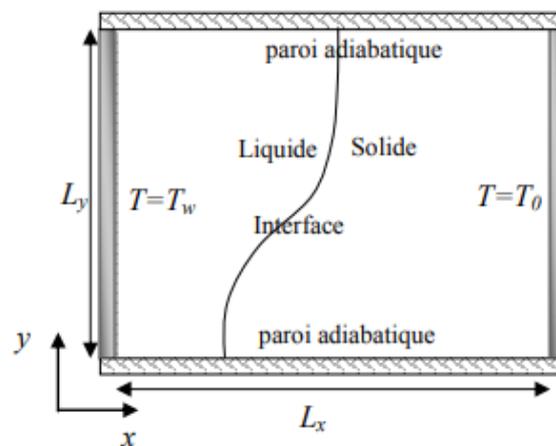


Figure I.3 : schéma du problème YOUNSI (2009)

L'objectif est d'étudier les caractéristiques thermiques du processus de fusion du MCP chauffé sur une paroi verticale d'une enceinte rectangulaire. Une formulation enthalpique est utilisée pour analyser le stockage par chaleur latente. La solution est obtenue en employant la méthode des volumes finis afin de comprendre la part de convection naturelle dans la fusion.

HOUSSEYNATOU BAH (2010) [13] a fait une étude sur l'effet de l'épaisseur de la paraffine sur la performance d'un chauffe-eau solaire à changement de phase pour produire de l'eau chaude sanitaire. Formé de deux sections dont l'une est remplie de paraffine (52C- 54C) et l'autre d'eau ; ce type de capteur utilise le stockage combiné de chaleur sensible et de chaleur latente et peut être une alternative pour chauffe- eau traditionnel.

S.BOUADILA (2011) [14] a étudié numériquement le problème de la fusion et solidification des matériaux à changement de phase, compléter par une application expérimentale qui consisté à la réalisation d'un capteur solaire stockeur.

L'application des MCP dans les capteurs solaires pour le stockage thermique, et un fluide caloporteur à une grande capacité thermique est aujourd'hui disponible. Et dans ce cas le même principe est suivi et observé en laboratoire, le comportement durant la fusion et solidification du MCP (la paraffine) comme un accumulateur et comme un isolant dans un élément de stockage (cuve munie par une paroi amovible) ainsi que l'impact de ces phénomènes sur un élément de stockage et son exploitation

I.2 Stockage d'énergie par chaleur latente dans les cylindres :

Farid et Kanazawa (1989) [15] et **Farid et cool (1990) [16]** ont étudié expérimentalement et analytiquement un élément de stockage d'énergie par chaleur latente constitué de plusieurs capsules cylindriques montées verticalement et fixées dans un tube isolé. Les capsules sont disposées en trois groupes contenant trois différents MCP. Pendant la charge, de l'air chaud passe à travers les capsules de façon à ce que les températures de fusion des trois MCP décroissent dans la direction de l'écoulement.

Cependant, pendant la décharge, la direction de l'écoulement d'air est inversée. Les auteurs rapportent que le taux de transfert de chaleur est amélioré pendant la charge et la décharge, et leur modèle numérique est en accord raisonnable avec l'expérience.

Zhang et Faghri [17] (1995) ont exposé une méthode d'analyse conjuguée pour étudier les phénomènes de transfert entre un PCM placé dans une coquille et un fluide caloporteur (HTF) circulant à l'intérieur du tube. Ils ont également signaler une erreur importante si une corrélation est utilisée pour calculer le nombre de NUSSELT en régime pleinement développé dans le cas d'un nombre de Prandtl modéré.

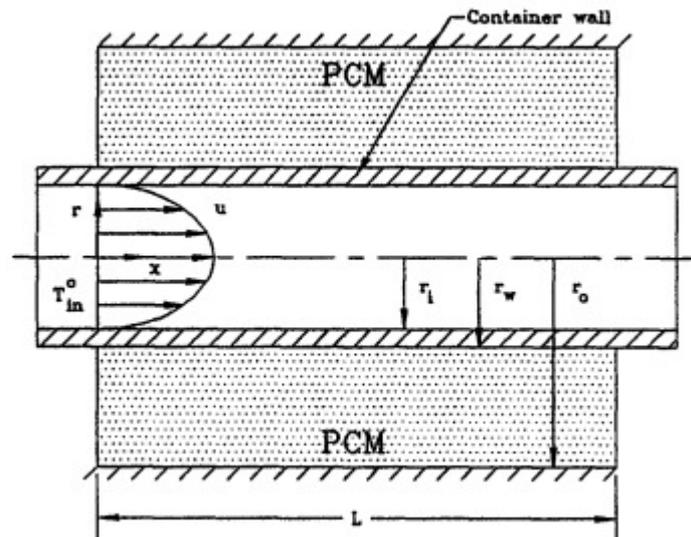


Figure I.4 : Schéma du modèle de stockage d'énergie avec flux laminaire à l'intérieur du tube

ESEN (1995) [18] a représenté la performance d'un réservoir cylindrique de stockage d'énergie solaire. L'énergie entrée posée comme chaleur latente de MCP et ce dernier est emballé dans les cylindres, les courants qui transfèrent la chaleur de fluides placent parallèlement à lui. La méthode enthalpique c'est la base du modèle.

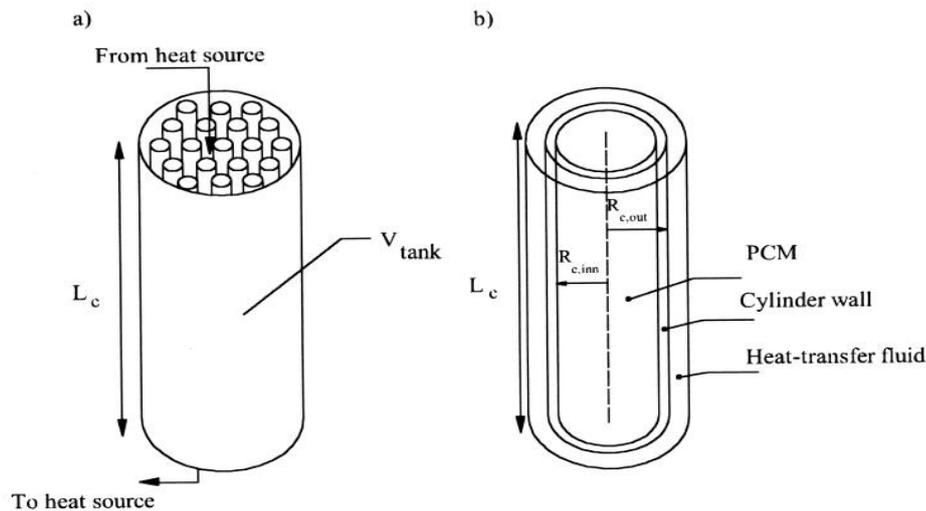


Figure I.5 : cuve de stockage posée verticalement avec des tubes cylindriques (a) modèle de cylindre (b)

Ce modèle à montrer que l'énergie d'entrée posée pas beaucoup plus de ces considérations, la matière du cylindre ne soit pas approprié parce que la conductivité thermique de la matière du cylindre est même petite, Le temps qui fondant MCP est allongé plus, les radius du mur du cylindre sont grand, la conductivité thermique de la matière du cylindre doit être beaucoup plus grande. Et ce type MCP doit être sélectionné avec soin pour optimiser la performance du réservoir. Les prédictions numériques sont validées avec données expérimentales et seulement une analyse théorique a été présentée.

Ismail et Abugderah [19] (2000) ont étudié le changement de phase en régime transitoire d'un système de stockage thermique composé de tubes verticaux à l'aide d'un modèle numérique.

La solution de ce système consiste à résoudre les équations du fluide caloporteur (HTF), de la paroi du tube et du matériau à changement de phase (PCM) en un seul domaine.

La méthode des différences finies sur le volume de contrôle est utilisée pour résoudre les équations décrivant le changement de phase.

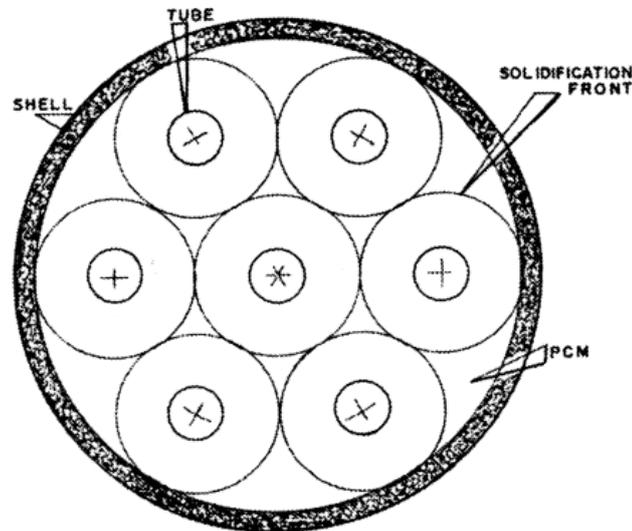


Figure I.6 : Coupe transversale du système de stockage de transfert de chaleur.

HAMID EL QARNIA (2005) [20] a fait un modèle mathématique basé sur les équations de conservations de l'énergie a été développé pour prédire le comportement thermique ainsi que les performances d'une unité de stockage de l'énergie solaire sous forme de chaleur latente de fusion d'un matériau à changement de phase MCP. L'unité de stockage est constituée d'une série de tube placé dans le MCP. Durant le mode de charge d'un fluide caloporteur (l'eau) provenant du capteur solaire en matériau à changement de phase.

A.Trp [21] (2005) a traité un système de stockage d'énergie thermique latente constitué de tubes concentriques. Le matériau à changement de phase est placé dans l'espace annulaire et le fluide caloporteur circule dans le tube intérieur. La convection forcée entre le fluide caloporteur (HTF) avec un nombre de Prandtl modéré et la paroi du tube est étudiée expérimentalement et numériquement. La conduction de la chaleur à travers la paroi PCM est basée sur la formulation d'enthalpie. La comparaison entre les prédictions numériques et les données expérimentales montre un bon accord pour deux types de paraffines, fusion non-isotherme et solidification isotherme. Afin de fournir des lignes directrices pour les performances du système et l'optimisation de la conception,

les distributions transitoires des températures de la HTF, de la paroi du tube et du PCM ont été obtenues par une série de calculs numériques pour différentes conditions de travail, et divers paramètres géométriques.

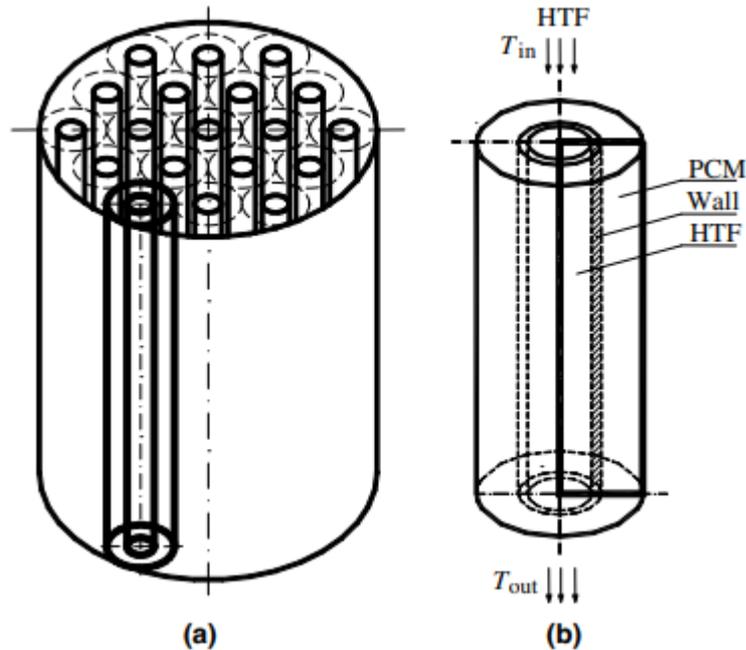


Figure I.7 : a) Système de stockage d'énergie thermique latente ; b) thermique Unité de stockage d'énergie

T. Anica & al [22] ont présenté une analyse numérique du phénomène de transfert thermique pendant le processus de charge et de décharge d'un système de stockage thermique par chaleur latente constitué de deux tubes concentriques. Le système est composé d'un récipient contenant des tubes dans lesquels l'écoulement du fluide caloporteur HTF circule. Le MCP (paraffine) remplit l'espace entre le récipient et les tubes. Une série de calculs numériques a été faite afin d'analyser l'influence de plusieurs conditions de fonctionnement de HTF et des paramètres géométriques sur le procédé de transfert thermique à l'intérieur de l'unité entre le HTF et MCP

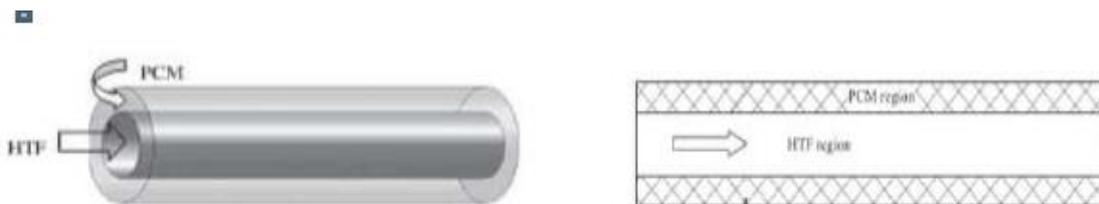


Figure I.8 : Schémas du système de stockage et du modèle physique étudié.

Ait ADINE et El QARINA [23] (2009) ont étudié numériquement une unité de stockage de chaleur latente (LHSU) constitué par deux tubes coaxiaux. L'espace entre les tubes est rempli de deux matériaux à changement de phase (PCM) différents, la paraffine P116 et le noctadécane, avec des températures de fusion différentes (50°C et $27,7^{\circ}\text{C}$, respectivement).

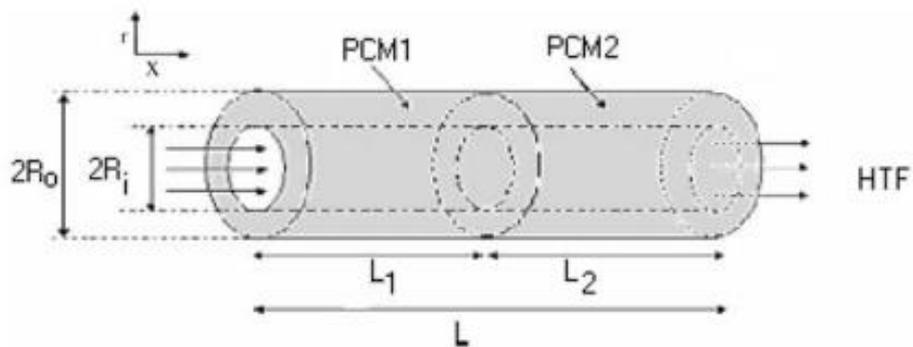


Figure I.9 : schéma de stockage de chaleur latente avec deux MCP

Prashanth sridharan [24] présente une étude numérique sur le processus de la fusion et la solidification dans des cylindres verticaux creux, rempli d'air et d'une matière à changement de phase (nitrate sodium). L'influence de la forme du cylindre sur le temps de fusion a été déterminée. La vitesse de convection naturelle diminuait pendant le processus de solidification et par conséquent, ses effets diminuaient à mesure que la solidification se poursuivait.

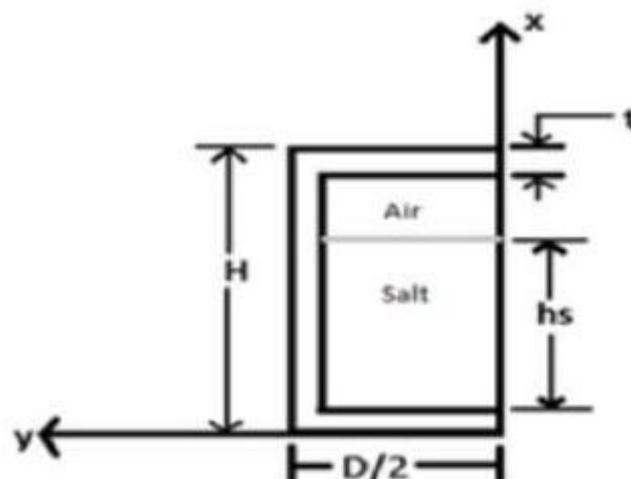


Figure I.10 : schéma du domaine physique

El Bahjaoui (2013) [25] à présent une étude numérique d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion d'un matériau à changement de phase MCP, la n-octa-décane. L'élément de stockage d'énergie est constitué de deux tubes concentriques. L'espace annulaire est rempli de MCP. Celui-ci est chauffé par un fluide caloporteur (Eau) en écoulement pulsé dans le tube intérieur.

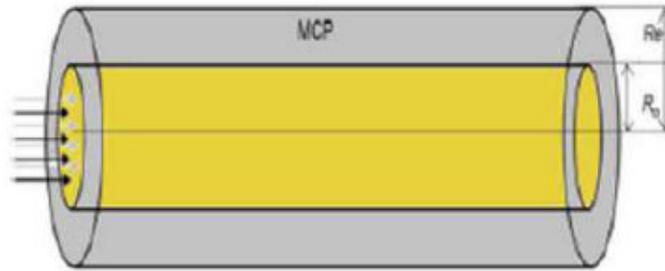


Figure I.11 : le modèle physique étudié El Bahjaoui (2013)

Ce modèle permis l'importance d'un écoulement pulsé par rapport à un écoulement de Poiseuille, pour favoriser la fusion du matériau à changement de phase pour certaines conditions satisfaites par la fréquence et l'amplitude adimensionnelles de l'écoulement pulsé.

Les investigations numériques menées ont permis de dégager les résultats suivants :

- Pour une amplitude adimensionnelle relativement élevée et une fréquence adimensionnelle faible, l'utilisation d'un fluide caloporteur en écoulement pulsé est favorable pour le stockage thermique.
- Un nombre de Reynolds élevé est favorable pour le transfert de chaleur et contribue à la réduction de la durée de fusion du MCP pour les faibles valeurs de la fréquence adimensionnelle et les valeurs élevées de l'amplitude adimensionnelle.
- Pour une fréquence adimensionnelle très élevées, l'utilisation d'un fluide caloporteur en écoulement pulsé au lieu d'un fluide en écoulement de poiseuille est sans utilité.

I.3 Stockage d'énergie par chaleur latente dans les capsules sphériques :

YAGHI (1995) [26]. A utilisé la méthode enthalpique avec un schéma de changement de phase a très haute température (aux environ de 500C°) dans une sphère de 4cm de diamètre, avec une petite différence sur la condition à la surface. Ce qui se traduit par un échange convecto-radiatif.

La recrudescence des recherches sur le stockage du froid surtout celui utilisé dans le conditionnement d'air est à l'origine des études théoriques et expérimentales à l'image de celle menée par BEDECARRATS et ALL [27] (1995) Une étude des transferts de chaleur dans des nodules contenant un MCP liquide-solide placées dans un fluide frigoporteur est réalisée. Une cuve verticale en modèle réduit d'une cuve industrielle, et remplie de nodules sphériques, fait l'objet d'expériences en vue de déterminer les paramètres influant le processus de stockage et déstockage du froid.

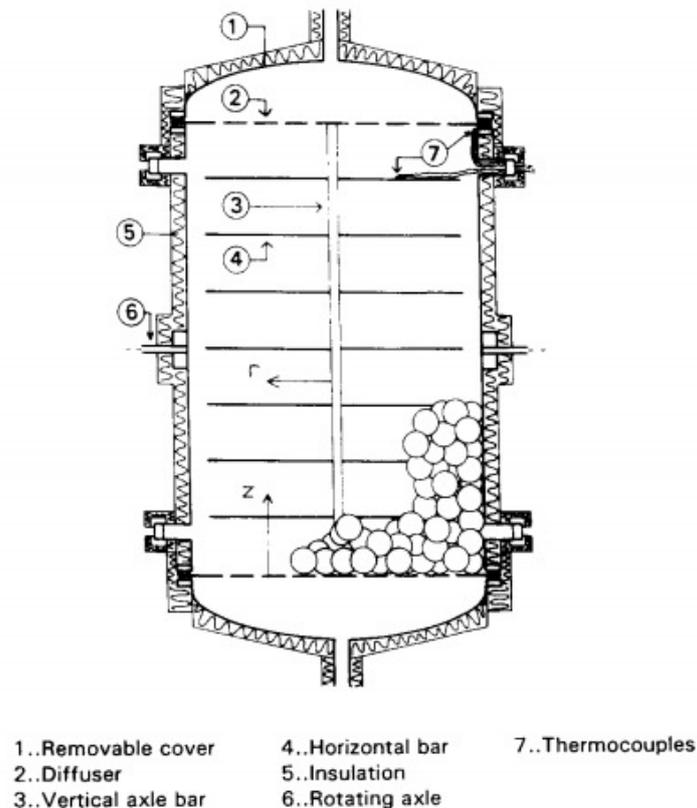


Figure I.12 : Schéma du réservoir

Durant le processus du refroidissement continu avec une stabilisation programmée, et à l'aide de thermocouples placés sur différents niveaux comme il est montré dans la figure, un suivi de l'évolution de la température permet de révéler des paliers indiquant le déclenchement et la fin de la cristallisation à une température encore inférieure à la température de solidification

(0° C dans ce cas), bien qu'on ait utilisé des agents nucléants, le degré de surfusion est évalué à 2.5°C.

MEHLING et al (2000) [28] a présenté une étude numérique pour examiner l'influence du rayon intérieur de la capsule, son épaisseur, ainsi que la température externe sur le processus de solidification d'un MCP dans une sphère. Le modèle, ne pris en compte que de la phase solide. L'analyse de l'effet de l'épaisseur a conduit à l'introduction du rayon critique défini comme $r_c=k/h$ qui indique une valeur de laquelle la taille de la sphère et le flux seront inversement proportionnels

BENMANSOUR et M.A HAMDAN (2001) [29] a présenté une étude numérique du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente à basses températures (0 C° à 100C°) dans un lit cylindrique rempli de sphères uniformes disposées au hasard et contenant chacune un MCP, traversé par un flux d'air. Un modèle numérique mono dimensionnel à deux phases séparées est appliqué Il a permis de prédire la distribution axiale de la température du fluide et du matériau fusible le long du lit ainsi que les performances de ce lit fixe dans les deux modes de stockage et de récupération de la chaleur pour une température du fluide à l'entrée constante et un nombre de Reynolds variable. Ce modèle s'applique à la fois pour un processus de changement de phase isotherme et non isotherme. L'évolution de la température à l'intérieur du lit a permis de déterminer les domaines de stockage les plus efficaces et de définir par conséquent les dimensions optimales de l'unité de stockage.

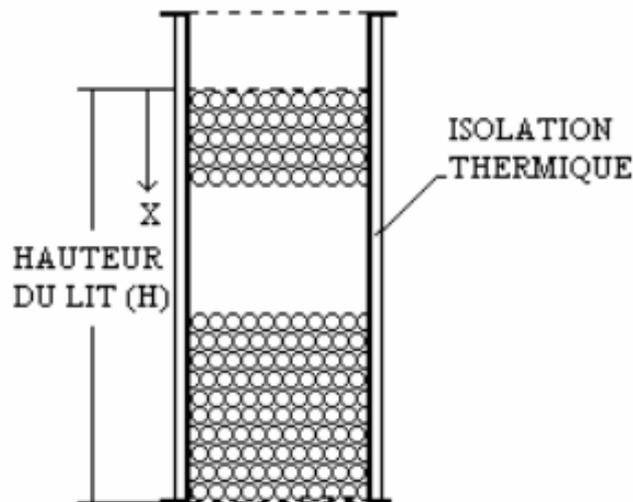


Figure I.13 : Schéma du lit de stockage BENMANSOUR et al (2001)

Ismail (2003) [30] a étudié l'influence de quelques paramètres sur la durée de la solidification complète d'un MCP dans une sphère. L'auteur a conclu que cette durée est proportionnelle à la taille de la sphère.

Cette étude a permis aussi de justifier le choix d'une enveloppe non métallique car bien que la conductivité des matériaux soit très élevée, son utilisation comme enveloppe ne peut réduire la durée de solidification complète que par 30 minutes environ.

ARKAR (2005) [31] a étudié la chaleur latente de stockage d'énergie thermique dans un cylindrique contenir des sphères remplies de la paraffine a été développé. Un lit a été adapté pour prendre en considération la non uniformité dû à la porosité de MCP et vitesse du fluide. La boîte prend aussi en considération les propriétés thermiques ; températures dépendantes du MCP. La distribution de la température de la chaleur latente de la paraffine (RT20) usage dans l'expérience dans la forme de capacités de la chaleur apparente a été déterminée par une utilisation d'une analyse différentielle calorimètre (ADC) à différents taux de chauffage et de refroidissement.

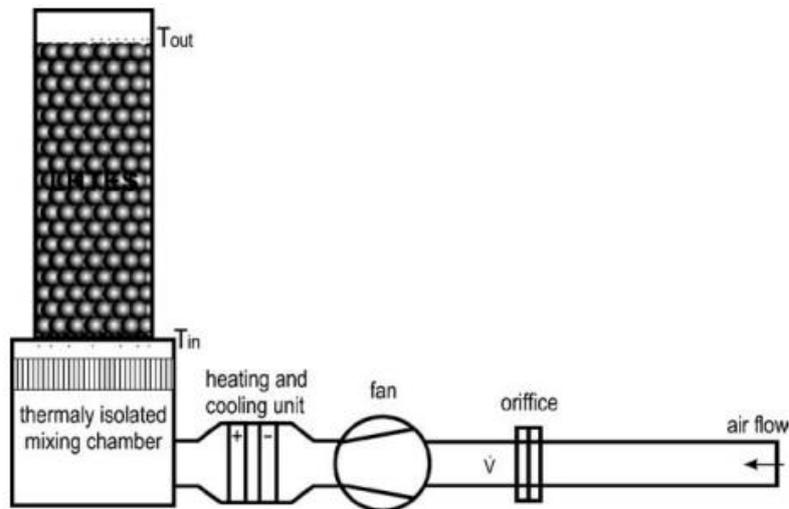


Figure I.14 : plan de la situation expérimentale

Le modèle a montré que la capacité de la chaleur apparente, $C_{app}(T)$, un paramètre qui est décrit comme la chaleur latente du MCP évolue sur la gamme de la température, devrait inclure aussi un paramètre influant supplémentaire qui chauffe au taux refroidissant (θ). Le taux de changement de température MCP était dans l'expérience aussi enquêté, et il a été trouvé que pour l'application faite, la moyenne ne dépasse pas 0.1K/min. Les propriétés thermiques du MCP devraient par conséquent être citées pour chauffer et taux refroidissant qui sont semblables aux taux du changement de la température dans l'application.

Kouskso et al (2007) [32] ont présenté un système constitué d'un collecteur solaire chauffant l'air associé avec un réservoir cylindrique contenant des capsules sphériques rempli d'un MCP.

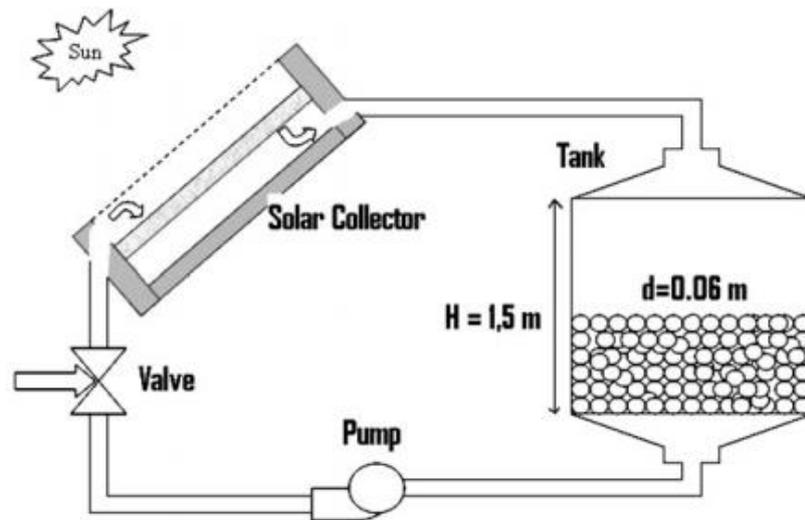


Figure I.15: systeme solaire de changement de phase KOUSKSO (2007)

Le modèle numérique utilisé dans cette étude a montré que l'efficacité thermique du système peut être considérablement amélioré pour une sélection adéquate de la température de fusion du MCP, et peut réduire aussi l'irréversibilité à l'intérieur du système en utilisant un MCP multiple. Le processus de la sélection des MCP doit être basé sur les conditions opératoires. Ce serait plus réaliste de réaliser cette étude pendant une période saisonnière et pas seulement pour certains jours typiques choisis.

BENMANSOUR (2009) [33] a étudié expérimentalement et numériquement les performances transitoires d'un lit rempli de sphères uniforme, disposées au hasard et contenant chacune un MCP. Un modèle théorique bidimensionnel à deux phases séparées est appliqué. Considérant à la fois la dispersion thermique axiale et radiale. Ce modèle est résolu par la méthode implicite aux différences finies. Il a permis de prédire la distribution de la température du fluide et du matériau fusible le long du lit dans les deux modèles de stockage et récupération de la chaleur et pour un large domaine de nombre de Reynolds.

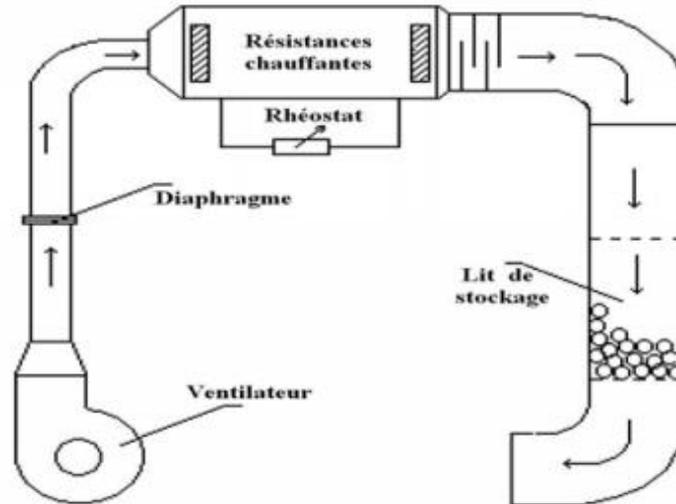


Figure I.16 : le montage expérimental BENMANSOUR (2009)

Walid FOU DHIL et al (2012) [34] ils ont étudié analytiquement les performances d'un système de stockage d'énergie thermique dans un canal poreux vertical en deux modes de stockage : sensible et latent. Le canal poreux qui est soumis à une ventilation d'air à faible vitesse, est limité par deux parois soumises à deux contraintes différentes : l'une est chauffée par une densité de flux constant alors que l'autre est supposé adiabatique. Pour décrire le comportement du système, les équations de conservation utilisant le modèle à deux températures et appliquant la loi de Darcy-Brinkman sont utilisées. Une modélisation de la quantité d'énergie stockée pour les deux modes de stockage a été effectuée. Les résultats indiquant que l'accroissement de l'énergie stockée dans des billes de MCP comparée à celle emmagasinée dans des billes de verre varie de 45 à 82% lorsque la température d'entrée de l'air varie de 25 à 40°C.

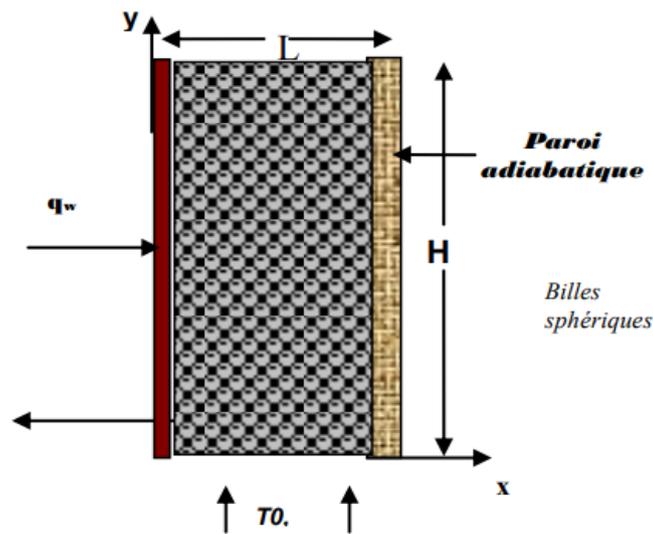


Figure I.17 : Géométrie de problème de WALID FOUDHIL

Ils ont étudié expérimentalement les caractéristiques et les performances de stockage d'énergie thermique dans un système solaire de chauffage d'eau par la réalisation d'une cuve de stockage avec un matériau à changement de phase d'une capacité de 45 litres d'eau. Une configuration contient plusieurs tubes chacun contient un MCP différent à l'autre.

Laura Solomon et al [35] (2014) ont aussi réalisés des travaux concernant l'effet d'un vide de l'air interne sur la performance du transfert de chaleur sur le stockage d'énergie par changement de phase dans une capsule. Le cas d'un vide initial localisé au centre de la capsule NEPCM a le plus haut taux de transfert de la chaleur et donc le plus court temps de fusion, une capsule NEPCM avec un vide localisé au sommet a le plus long temps de fusion.

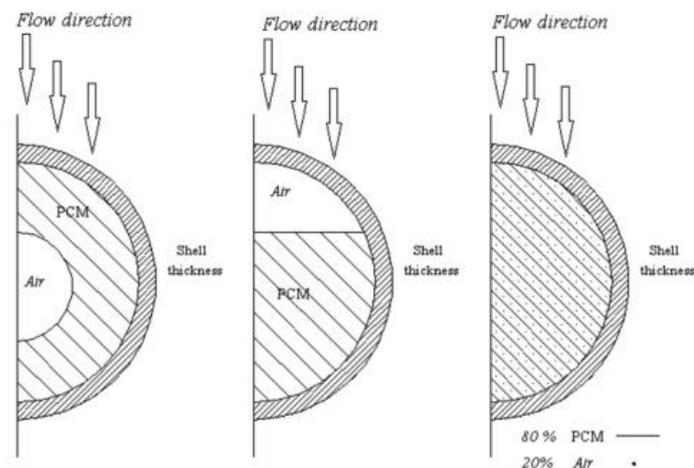


Figure I.18 : modèle de calcul de la capsule avec vide :

Peng et al (2014) [36] ont étudié un système de lits composés de capsules pour le cas d'un stockage thermique efficace en raison de leur efficacité élevée de transfert de chaleur. La structure générale du système de stockage thermique à lit tassé est illustrée sur la figure ci-dessous, qui se compose d'un réservoir cylindrique vertical avec une entrée et un collecteur de sortie au niveau des extrémités et un matériau isolant autour des parois verticales. La hauteur de la zone de remplissage est dénotée H . D est le diamètre du réservoir cylindrique. La majeure partie du réservoir est occupé par un matériau de remplissage, des sphères MCP ; à une porosité ε . Le processus de changement de phase de MCP peut être divisé en trois processus, à savoir phase solide, une transition de phase, et la phase liquide.

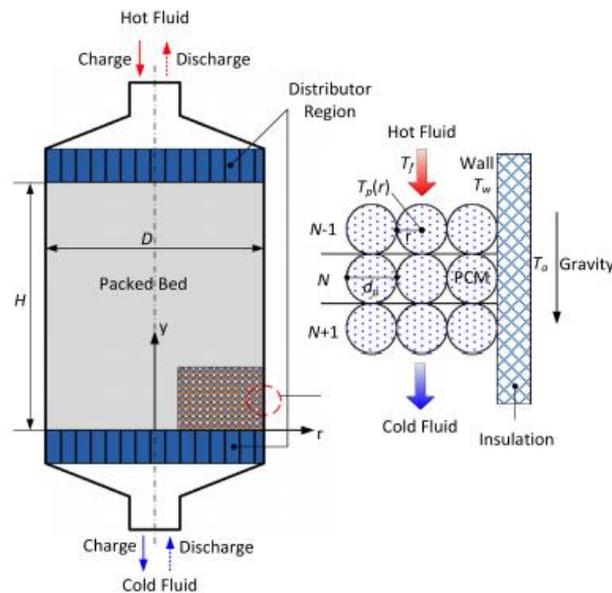


Figure I.19 : Diagramme schématique du système de stockage thermique à lit compact
Peng et al

SHOBO AB et al (2017) [37] se sont intéressés à l'effet d'un lit compacté formé de mésoérythritol encapsulées (dans des capsules sphériques), sur la distribution de la stratification d'une unité de stockage thermique à l'huile de tournesol pendant les cycles de charge à différents débits. Les deux systèmes sont chargés avec des débits de : 3ml/s, 6ml/s et 12ml/s. L'effet de mélange probablement dû à la turbulence est plus évident sans le réservoir à huile que dans le réservoir à lit compacté au débit maximum, ce que se traduit par les oscillations des valeurs du nombre de stratifications.

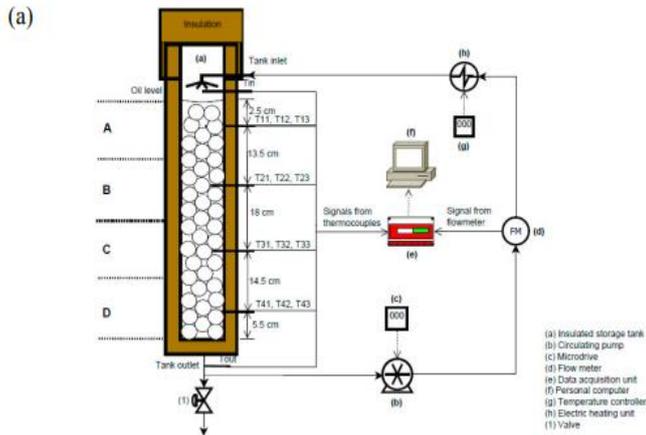


Figure I.20 : système expérimentale avec une vue de la capsule en aluminium de SHOBO AB et al

Conclusion :

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

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée/déstockée en fonction du changement d'état du matériau de stockage (fusion ou solidification). L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente et de la masse du matériau à changement de phase.

La performance des systèmes de stockage par chaleur latente est limitée par la faible conductivité thermique des MCP utilisés. Dans la plupart des travaux, le MCP occupe tout le domaine et est considéré homogène.

Les matériaux à changement de phase (MCP) présentent un inconvénient majeur, à savoir leur faible conductivité thermique.

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique a suscité un regain d'intérêt ces dernières années. Cela est dû au fait que les MCP ont de fortes densités de stockage (quantité d'énergie stockée par unité de masse). En outre, ces matériaux peuvent être appliqués dans plusieurs domaines.

Par ailleurs nous pouvons dire que l'utilisation des matériaux à changement de phase pour le stockage de l'énergie thermique présente un grand intérêt au regard du contexte énergétique actuel.

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

II .1 Le stockage thermique de l'énergie :

II .1.1 Introduction :

Le stockage thermique de l'énergie concerne principalement la chaleur provenant du soleil, comme il concerne également la chaleur produite par certaines industries (industrie métallurgique, centrale à gaz, centrale d'incinération...). Les technologies de stockage de l'énergie thermique peuvent être classifiées dans diverses catégories selon différents critères (figure II.1). Si le critère est la plage de température, les systèmes de stockage sont divisés en « stockage de la chaleur » et « stockage du froid ». Dans le cas où le critère est la durée de stockage deux classes sont considérées, « le stockage long terme » et « le stockage court terme ». D'autre part, si le critère est l'état du matériau de stockage, il existe trois principaux types : « stockage par chaleur sensible », « stockage par chaleur latente », et « Stockage thermochimique ». Les systèmes de stockage de l'énergie thermique peuvent aussi être classés en deux autres catégories : « actifs » ou « passifs ». Le terme de stockage actif est utilisé dans le cas où le matériau de stockage circule dans le système. À l'opposé, dans le cas d'un système de stockage d'énergie thermique passif (aussi appelé régénérateur), le matériau de stockage ne circule pas dans le procédé. L'énergie thermique est transportée via un fluide caloporteur, et est transférée vers le matériau de stockage à l'aide d'un échangeur. La structure de l'échangeur de chaleur est installée au sein du matériau de stockage.

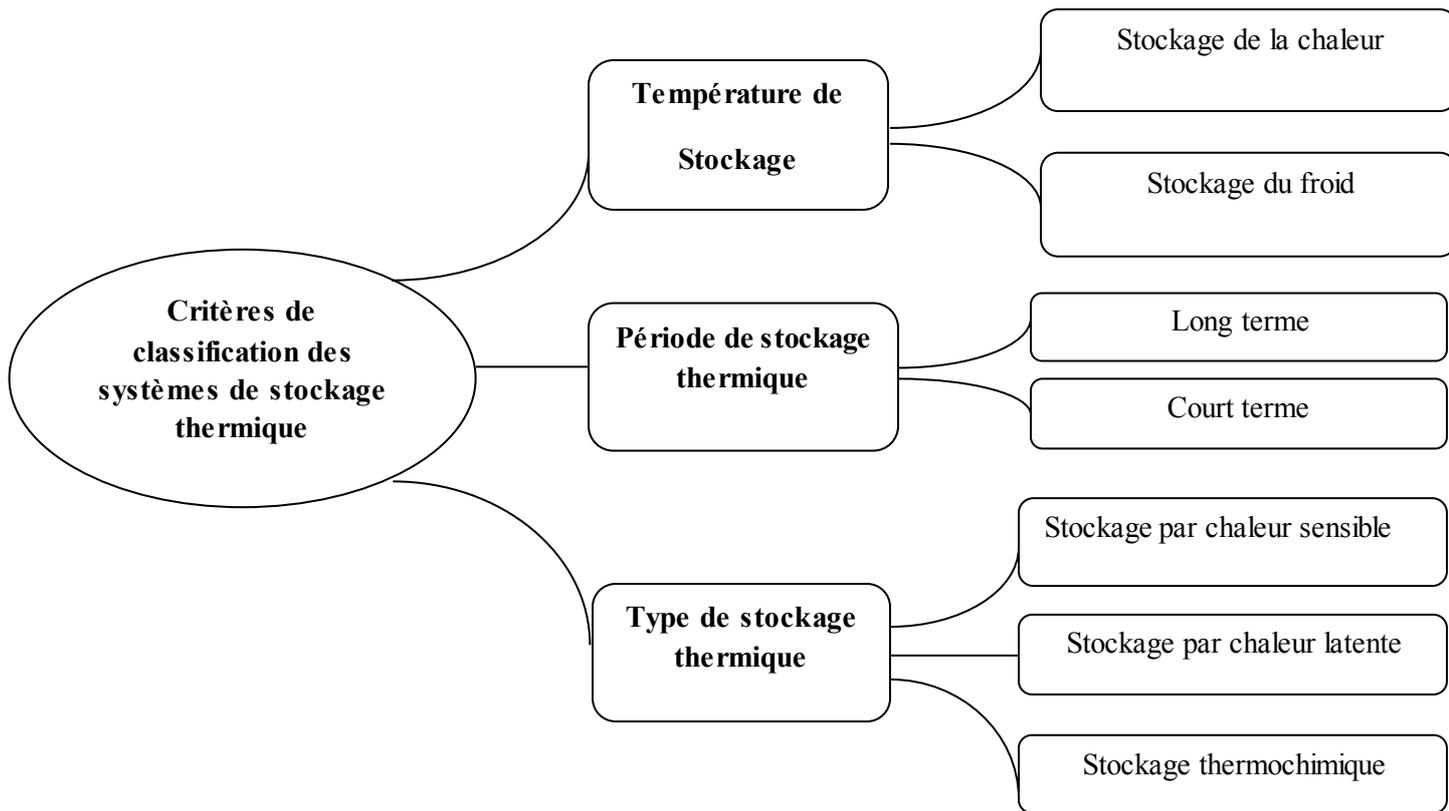


Figure II.1 : Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous concentrons sur la classification selon le type de stockage. Ces types seront introduits brièvement dans ce qui suit.

II.1.2 Types de stockage de l'énergie thermique :

L'énergie peut être stockée sous sa forme thermique et ensuite restituée sous forme de chaleur. 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 [38]

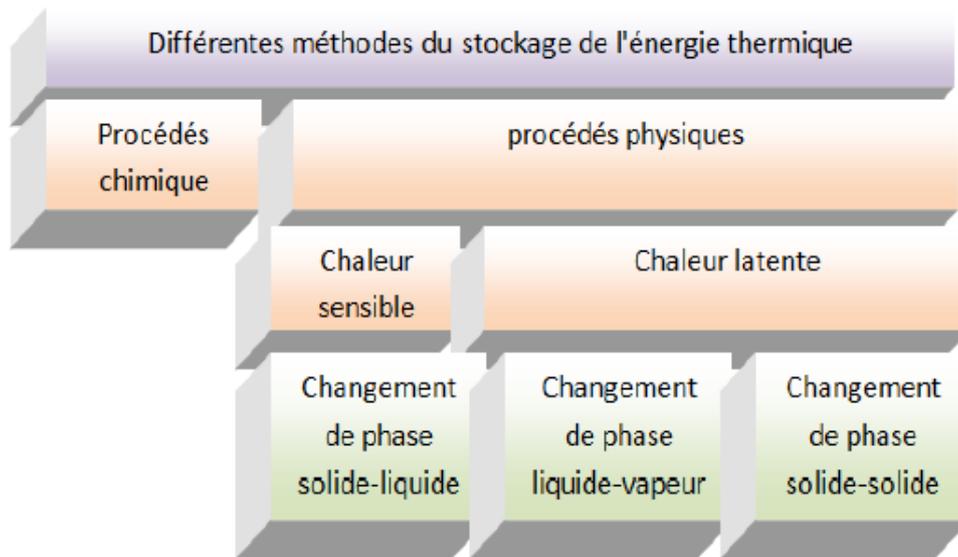


Figure II.2 : Différentes méthodes possibles du stockage de l'énergie thermique [39]

II .1.2.1. Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible :

Dans le cas du stockage par chaleur sensible, l'énergie est emmagasinée sous forme d'augmentation de température du matériau. La quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle au volume, à l'élévation de température, et à la capacité calorifique du matériau de stockage.

Les cycles de stockage et de récupération de la chaleur accumulée, peuvent être répétés plusieurs fois en utilisant ce système de stockage sans aucun problème, c'est le plus important avantage de cette méthode. Cependant, l'exigence d'un volume important du support de stockage peut être considérée comme un inconvénient pour ce système. La quantité de chaleur dans ce système dépend de la capacité calorifique du support de stockage, du changement de température et de la masse du matériau de stockage.

Cette quantité de chaleur peut être calculée à partir de l'équation suivante

$$\Delta H = H_{\text{finale}} - H_{\text{initiale}} = \int_{T_i}^{T_f} m C(T) dT \quad (1)$$

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

Si la chaleur spécifique peut être considérée comme constante dans l'intervalle de température entre T_1 et T_2 ($c(T) = \text{cte} = c$) alors :

$$\Delta H = m \cdot c \cdot (T_1 - T_2) \quad (2)$$

On remarque que la quantité d'énergie stockée est proportionnelle à l'écart de température : ce type de stockage serait donc intéressant uniquement pour les grands écarts de température. On distingue les deux cas suivant :

Si $T_2 > T_1$ on parlera de stockage du chaud

Si $T_2 < T_1$ on parlera de stockage du froid

On peut classer les supports de stockage thermique par chaleur sensible comme suit :

Les supports de stockage liquide (eau, fluide à base d'huile, sel fondu...)

Les supports de stockage solides (roches, les métaux et autres...)

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

II 1.2.2 Stockage thermochimique :

Certaines réactions chimiques réversibles peuvent être utilisées comme solution pour le stockage thermique de l'énergie. Ce type de stockage est dit : stockage thermochimique. Le principe de base du stockage thermochimique est décrit par les équations (4) :

Réaction endothermique $AB + Q_1 \rightarrow A + B$

Réaction exothermique $A + B \rightarrow AB + Q_2$

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

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

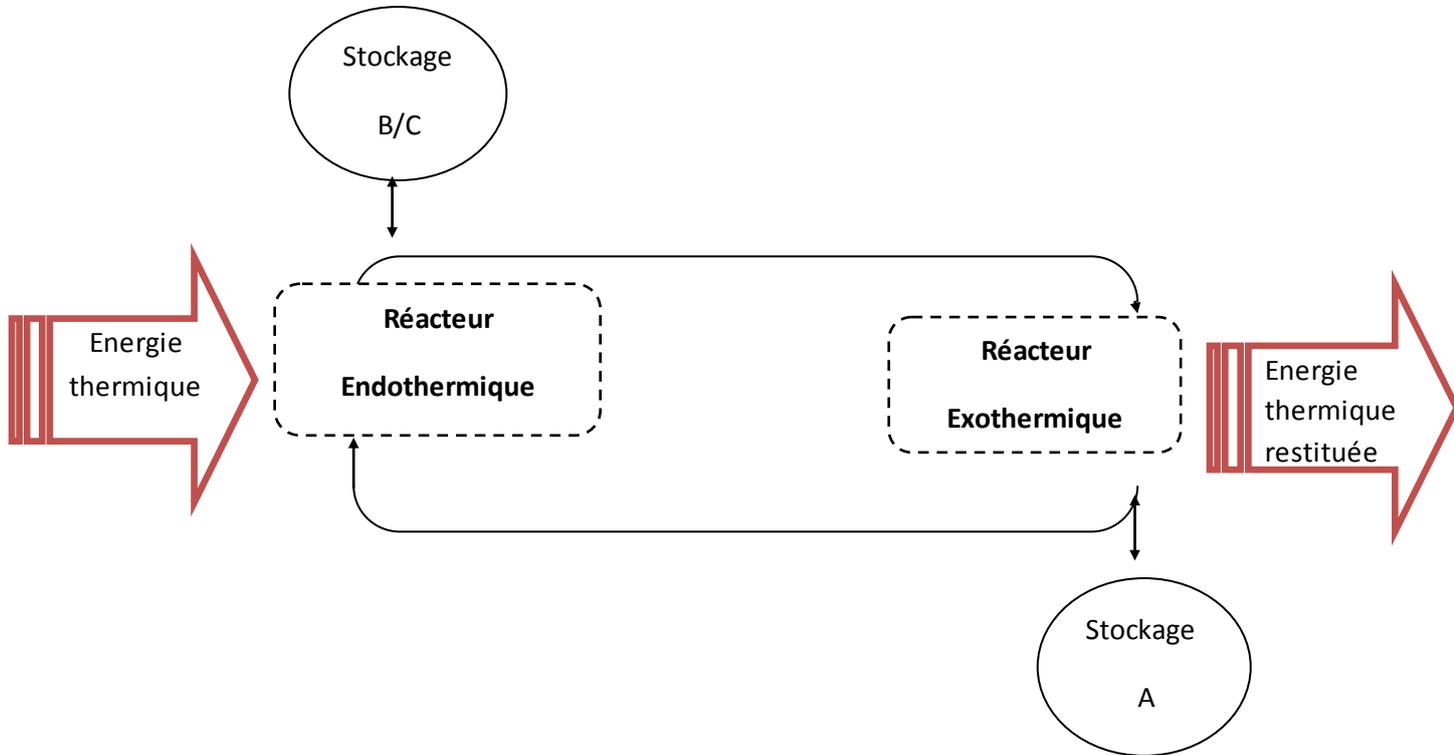


Figure II.3 : Schéma de principe du stockage thermochimique

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

La quantité d'énergie qui peut être stockée dans une réaction chimique (4) est la somme des énergies sensibles des matériaux et de la chaleur de réaction. La quantité d'énergie stockée est exprimée selon la relation (5)

$$E = \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_f} m_i C_{p_i} dT + n_A * \Delta H_r \quad (5)$$

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 ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$).

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

Parmi les réactions les plus utilisées, nous citons :

La décomposition réversible du l'hydroxyde de Calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), qui a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches. Cette réaction se fait à une température relativement haute (510°C)

La dissociation de l'ammoniaque a attiré l'attention des chercheurs depuis plus de vingt ans ; en raison de deux avantages majeurs qui sont la faisabilité à température ambiante et la basse toxicité de l'ammoniaque en comparaison avec d'autres produits chimiques. L'inconvénient majeur de cette réaction est son enthalpie de réaction ($66,5\text{kJ/mol}$) considérée comme faible par rapport aux autres réactions telles que le reformage du méthane par le dioxyde de carbone (247 kJ/mol).

Le reformage du méthane par le dioxyde de carbone.

Comparé aux autres types de stockage, le stockage thermochimique ne nécessite pas l'isolation du système, permet d'obtenir une grande densité de stockage, et la restitution de l'énergie est réalisée à haute température. En revanche, cette technologie est complexe, coûteuse, et toujours en cours de développement.

II .1.2.3 Stockage thermique par chaleur Latente :

Pendant le changement de phase des matériaux, solide/liquide ou liquide/vapeur, l'énergie thermique peut être stockée de façon isotherme, dépendant ainsi de la chaleur latente, propriété intrinsèque du matériau et de la quantité de matériau utilisée. Ce type de stockage peut être efficace pour des différences de températures très faibles. Les matériaux utilisés dans ce cas sont appelés : Matériaux à Changement de Phase (MCP).

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

De nombreuses substances ont été étudiées comme des matériaux à changement de phase potentiels, mais seuls quelques-uns sont commercialisés.

Durant l'étape de charge, l'énergie thermique fournie au matériau permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. Cette énergie est ensuite stockée à la température de charge. Lors de l'étape de restitution de l'énergie stockée, le matériau de stockage change de nouveau de phase et reprend son état initial.

La quantité d'énergie stockée dans le matériau à changement de phase est la somme de l'énergie sensible et de l'énergie latente suivant la relation (3). La majeure partie de l'énergie stockée est comprise dans l'enthalpie de changement de phase du matériau.

$$Q = \int_{T_{\text{froid}}}^{T_{\text{fusion}}} m C_{p_s} dT + m \Delta L + \int_{T_{\text{fusion}}}^{T_{\text{chaud}}} m C_{p_l} dT \quad (3)$$

Avec ; Q est la quantité d'énergie stockée (J), m est la masse du matériau de stockage (kg), C_{p_s} et C_{p_l} sont respectivement les chaleurs spécifiques des matériaux solide et liquide ($J.k^{-1}.K^{-1}$), ΔL est l'enthalpie infinitésimale de changement de phase ($J.kg^{-1}$) et dT est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K).

L'utilisation du stockage par chaleur latente permet de réduire les volumes de stockage par rapport au stockage par chaleur sensible, avoir des densités importantes de stockage et avoir des températures de changement de phase (cristallisation et fusion) quasiment constante pour les corps purs ou les composés définis. En revanche, les technologies à utiliser pour le transfert de chaleur et la sélection des matériaux sont plus complexes. Des problèmes subsistent encore, dont notamment, la durée de vie des produits qui se dégradent après plusieurs cycles de fusion solidification et les transferts thermiques qui sont difficiles à optimiser.

II .1.3 Les avantages du stockage thermique par chaleur latente :

Les principaux avantages du stockage par chaleur latente peuvent être résumés ainsi :

- Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures du confort 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.

II .1.4 Comparaison des différents types de stockage thermique :

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

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

Tableau II.1 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur. [40]

		Stockage sensible	Stockage Latent	Stockage thermochimique
Densité énergétique	Volumique [KWh .m ³]	Faible 15_60	Moyenne 50_100	Elevée 100_500
	Massique [KWh.kg ⁻¹]	Faible 0.02_0.03	Moyenne 0.05_0.1	Haute 0.5_1
Température de stockage		Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge ou température ambiante
Durée de stockage		Limitée (pertes thermiques)	Limitée (pertes thermiques)	Théoriquement illimitée
Transport de l'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance théoriquement illimitée
Maturité		Echelle industrielle (20MWe)	Echelle pilote (100 KW th)	Echelle laboratoire (1_5 KW th)
Technologie		Simple	Moyenne	Complexe

II .1.5 Systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente :

Il existe différents procédés de stockage d'énergie par chaleur latente. Dans le domaine du froid, on rencontre essentiellement les technologies suivantes : [41]

II .1.5.1 Bacs à glace :

C'est le système qui est actuellement très répandu grâce de sa simplicité et de la très longue expérience des installateurs. Il s'agit simplement d'une cuve contenant de l'eau en contact direct avec une batterie ou circule un liquide froid qui peut être de l'eau glycol ou le fluide frigorigène lui-même. Autour de ce circuit va se former de la glace remplissant complètement ou partiellement la cuve. Le déstockage s'effectue soit par

pompage de l'eau à 0°C mélangée à la glace (fusion externe) soit par circulation d'un liquide chaud (fusion interne) dans la batterie. [41]

II .1.5.2 MCP encapsulés :

Le principe de ce stockage est d'utiliser un MCP confiné dans des récipients étanches de petites dimensions (quelques cm³ à quelques litres). Il suffit de les refroidir pour cristalliser leur contenu et de les mettre en contact avec la charge chaude pour le déstockage. Essentiellement, trois formes des capsules sont disponibles : des sphères, des bâtonnets et des plaques. Un fluide caloporteur procède à un échange d'énergie au contact des capsules. Ce type de stockage, permet l'utilisation des eutectiques par exemple, s'avère impossible ou très difficile dans les systèmes tels que le bac à glace car dans de gros volumes, nous rencontrons facilement les phénomènes de ségrégation (séparation des composant de la solution). [41]

II .1.5.3 Fluides frigoporteurs diphasiques :

Les frigoporteurs diphasiques solide-liquide les plus étudié ces dernières années sont les coulis de glace formés de cristaux de glace en suspension dans une solution aqueuse. Ces coulis sont généralement produits sur des parois réfrigérées raclées ou brossées permettant leur détachement de la paroi. Les limites de ce procédé résident, pour l'instant, dans le cout élevé du dispositif de production et dans une fiabilité réduite. [41]

II .1.6 Les applications du stockage thermique :

Parmi les applications usuelles du stockage thermique on peut citer :

- La récupération dans les installations industrielles de la chaleur perdue pendant la durée de leur fonctionnement pour l'utiliser ultérieurement pour d'autre besoins.
- Le stockage sous forme thermique du surplus d'énergie électrique produite pendant les heures creuses pour couvrir des besoins qui auraient nécessités le recours à la consommation d'énergie pendant les heures de pointes ou les appels en puissance peuvent dépasser les capacités des centrales.
- Le stockage de l'énergie frigorifique en froid industriel et en climatisation quand la capacité libre de production de froid en heures creuses peut être utilisée pour

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

couvrir les besoins lors de pointes de consommation ; comme dans le cas de la gestion de l'énergie électrique.

- Le stockage de l'énergie produite dans les systèmes solaires passifs le jour ensoleillé pour l'utiliser pendant la nuit ou dans une autre période.
- L'utilisation de la chaleur latente comme élément de stockage en thermique du bâtiment se réalise aujourd'hui en laboratoire, Un moyen de limiter les besoins énergétique et de stocker d'importantes quantités d'énergies dans l'enveloppe.
- Le refroidissement des circuits électroniques ou le fonctionnement en transitoire des circuits électroniques nécessite généralement des puissances de refroidissement bien supérieures aux puissances nominales qui conduisent à surdimensionner les circuits, leurs alimentations et leurs systèmes de refroidissement.

L'utilisation d'un stockage d'énergie associé à ces circuits permet de faire face aux appels transitoires de puissance sans surdimensionnements.

- La gestion du confort thermique dans les bâtiments qui dépend non seulement de la température et de l'humidité de l'air ambiant mais encore des températures des parois c'est une des raisons pour laquelle dans ce cas le stockage par chaleur latente est attractif.

II .2 Matériaux à changement de phase :

II .2.1 Définition :

On appelle **matériau à changement de phase**, ou MCP, tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Cette plage est grossièrement située entre 10 °C et 80 °C. Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omniprésentes dans la vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire, etc.).

Les matériaux à changement de phase (MCP) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. Il peut être réalisé par le changement solide-solide, solide-liquide, solide-gaz et liquide-gaz. Cependant, le seul changement de phase utilisé pour des MCP est le changement solide-liquide. Les changements de phase Liquide-gaz ne sont pas pratiques pour l'usage en tant que stockage thermique dû aux grands volumes ou pressions exigés pour stocker les matériaux dans leur phase gazeuse. Les transitions de liquide-gaz ont une de transformation plus élevée que des transitions de solide liquide. Les changements solide-solide sont en général très lents et ont plutôt une basse température de transformation [42].

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

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients comparés des différents changements d'état [43].

Changement de phase	Avantages	Inconvénients
Liquide-gaz	Grande valeur de la chaleur latente	Grand changement de volume
Solide-solide	Faible changement de volume Pas de formation de fluide	Faible valeur de la chaleur latente
Solide-liquide	Faible changement de volume	Valeur moyenne de la chaleur latente
Solide-gaz	Grande valeur de la chaleur latente	Grand changement de volume

II .2.2 Base théorique des matériaux à changement de phase :

II .2.2.1 Température de fusion :

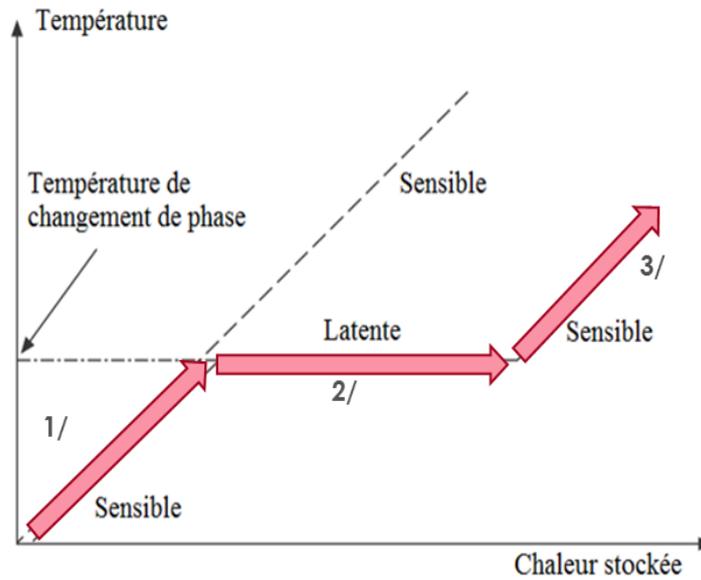
C'est une des caractéristiques essentielle du matériau. Elle représente la limite à laquelle se déclenche le stockage ou le déstockage de la chaleur latente.

Les échanges entre les matériaux et le milieu extérieur à température s'effectuent par des cycles de charge et décharge.

Ainsi la quantité de chaleur stockée par MCP qui passe de l'état solide à l'état liquide est composée de trois termes qui sont :

Dans le cas des corps purs, la quantité de chaleur stockée est illustrée par la figure suivante :

Stockage de l'énergie



Décharge de l'énergie

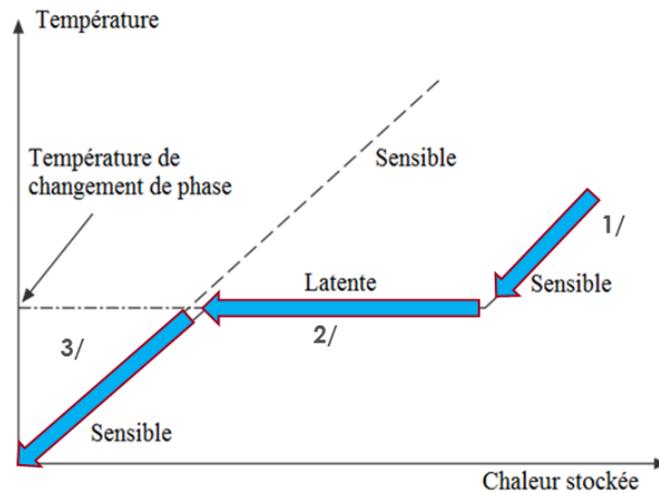


Figure II.4 : charge et décharge de l'énergie [44].

II .2.2.2 La cristallisation :

Le changement de phase liquide/solide permet d'obtenir un solide cristallisé à partir de solutions aqueuses : c'est la cristallisation. L'état cristallin ainsi obtenu est caractérisé par un arrangement régulier des atomes, des molécules ou des ions suivant un modèle rigide appelé réseau. C'est cet arrangement moléculaire qui fait la différence entre un solide cristallin et un solide amorphe (solide sans structure régulière).

La cristallisation est le résultat de deux processus successifs : la nucléation puis la formation d'un cristal macroscopique. La cristallisation est un processus qui s'accompagne d'un transfert de masse et de chaleur, elle résulte de deux transformations successives :

- La nucléation : génère de noyaux solides
- La croissance des noyaux et formation du cristal macroscopique [44]

II .2.3 Les problèmes liés au changement de phase :

II .2.3.1 La ségrégation :

C'est malheureusement un phénomène observé dans la plupart des matériaux à changement de phase. Dans le cas des sels hydratés à fusion non congruente (c'est-à-dire que la phase liquide est de la même composition que la phase solide), la solidification s'accompagne de la formation de deux phases (liquide et solide). La phase la plus dense, en général le solide se dépose au fond du récipient. C'est la ségrégation des phases. Cette dernière rend difficile l'utilisation de ces composés pour un stockage à chaleur latente. Diverses méthodes peuvent être utilisées pour minimiser la ségrégation et stabiliser les composés.

- L'agitation : elle permet de rendre homogène le liquide de départ avant la solidification, elle n'est pas très pratique car c'est une méthode de laboratoire
- La diminution des dimensions du récipient dans lequel le matériau est encapsulé car ceci confère au matériau une vitesse de refroidissement supérieure à la vitesse de décantation. L'application de cette méthode n'est cependant pas très réaliste dans le bâtiment.
- L'utilisation d'agents épaississants afin de produire un gel au sein de la solution. Les substances les plus utilisées sont : copeaux de bois, pulpe de papier, des boues minérales, la cellulose, la sciure, du gel de silice etc. [44]



Figure II.5 : Fusion incongruente d'un sel hydraté (Streicher, 2006)

II.2.3.2 La surfusion :

Le graphe ci-après illustre l'évolution théorique pendant le changement d'état lors de la décharge thermique.

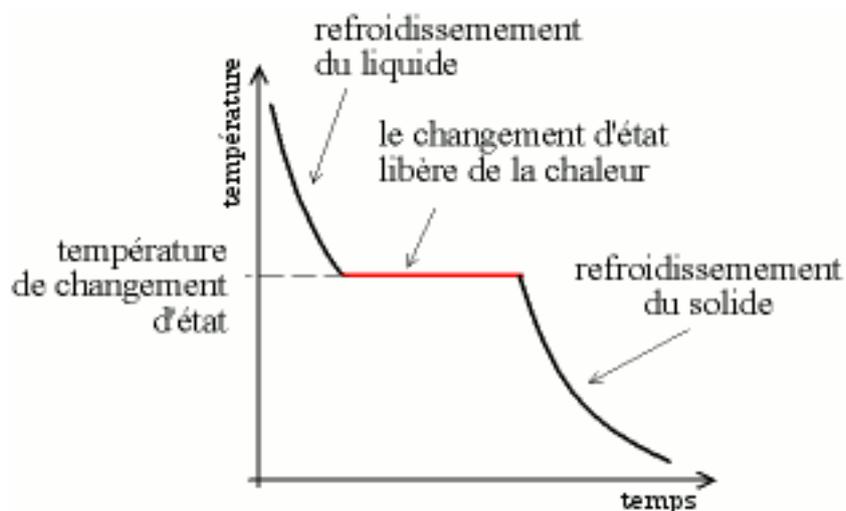


Figure II.6 : Evolution théorique de la température en fonction du temps [44]

Dans la réalité, les courbes de solidification des corps ont souvent des allures plus au moins différentes de cette courbe théorique du fait de la surfusion des composés utilisés.

Ce phénomène de surfusion est intimement lié à la cristallisation, c'est l'une des difficultés majeures affectant le stockage à chaleur latente.

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

Physiquement, comprendre la surfusion revient à comprendre les mécanismes qui font que lors du refroidissement d'un liquide, la solidification se fait en général en dessous de la température de changement de phase : le matériau peut rester liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés en dessous de la température de fusion dans certains cas. Par contre, on n'observe jamais un solide pur au-delà de la température de fusion. Il peut même arriver pour certains matériaux que la fusion se déclenche à une température T inférieure à T_f (T très proche de T_f) c'est le cas de certains matériaux comme les sels purs à fusion congruente.

Dans ce cas, pour cristalliser sous une pression atmosphérique (pression constante), la température d'un matériau à changement de phase doit être abaissée jusqu'à une température inférieure à la température de solidification théorique T_f cette température est appelée de nucléation (T nucléation). Entre ces deux températures, la solution est en surfusion, elle est à l'état liquide mais présente une plus ou moins grande instabilité. Ainsi à tout moment le départ d'un cristal peut engendrer la cristallisation complète et rapide de l'ensemble.

Ce phénomène de surfusion réduit les performances énergétiques des matériaux de stockage par chaleur latente car la réaction exothermique de solidification (décharge de la chaleur) s'opère à une température inférieure à celle de la réaction endothermique de fusion (charge). Cette différence de température va entraîner une dégradation de flux restitué par rapport au flux absorbé. [44]

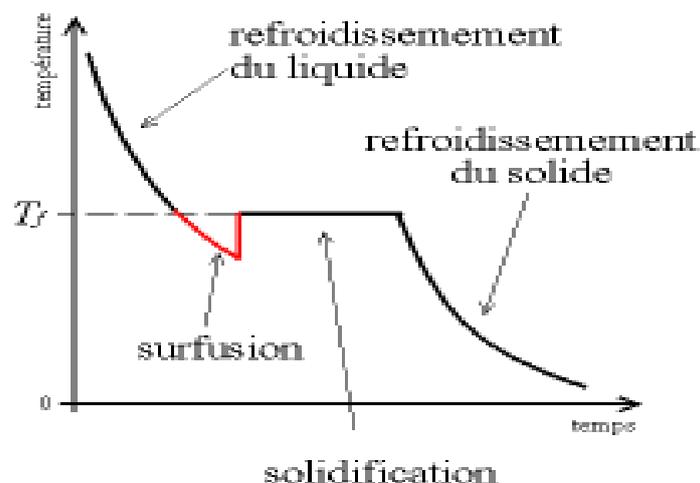


Figure II.7 : Evolution de température T en fonction du temps t [44]

Sur la première zone de la courbe (refroidissement du liquide) on note une chute de la température qui s'accompagne d'un dégagement de la chaleur, ce dernier est d'autant plus élevé que la masse du liquide est grande. Si l'échange de chaleur avec l'extérieur est faible alors la chaleur confinée dans le milieu provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement de phase (Début de la deuxième partie) Cet échange interne engendre une dégradation énergétique du stock. Dans la troisième zone on est dans la phase solide. [44]

II.2.3.3 La corrosion :

Le manque de stabilité à long-terme du système MCP container a longtemps limité l'expansion de l'utilisation des stockages à chaleur latente. Ce phénomène peut être dû à deux facteurs : le manque de stabilité chimique du matériau lui-même et/ ou la corrosion entre le MCP et le container. A ce sujet, les paraffines sont réputées pour la conservation de leurs propriétés thermiques au fil des cycles charge/décharge. En revanche, la nature ionique des sels hydratés cause des problèmes de corrosion avec les containers métalliques [45]

II .2.4 Amélioration de la conductivité des MCP :

Actuellement les MCP ont une conductivité thermique assez faible de l'ordre de 0.2 w/m .K en moyenne ce qui ne permet pas d'avoir un bon transfert thermique. Ce phénomène est alors amplifié par l'épaisseur de la phase (solide ou liquide) à traverser car lors du changement de phase du MCP l'échange thermique a lieu à l'interface solide/liquide du MCP. Lorsque le front de solidification ou de fusion se déplace, il laisse derrière lui une nouvelle phase (solide ou liquide) que le flux thermique doit traverser avant d'atteindre le front en question. Plus l'épaisseur de cette phase est importante et plus la résistance thermique qu'elle engendre est grande.

Pour pallier ce problème, deux solutions sont utilisées en général : faire en sorte que l'épaisseur à traverser soit la plus petite possible. Pour cela on utilise souvent des microcapsules sphériques qui permettent aux MCP de changer facilement de phase sur l'ensemble de leur volume. L'autre solution consiste à mélanger ou à mettre au cœur du MCP un matériau ayant une bonne conductivité (graphite, maille de fer, fil de fer, etc.) Nous avons expérimenté la deuxième solution à partir de deux concepts. Dans le premier concept, nous avons mélangé le graphite et le MCP (avant remplissage des

contenants MCP). Dans le deuxième concept, nous avons introduit du fil de fer au milieu des tubes dans les contenants MCP (en remplissage ceux-ci avec du MCP pur). [46]

II .2.5 Propriétés des matériaux à changement de phase :

Le transfert d'énergie thermique se produit quand un matériau change du solide en liquide ou liquide en solide. Ceci s'appelle un changement d'état ou de phase. Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0-120C°). Cependant ils ne peuvent être utilisés comme matériau de stockage que lorsqu'il possède certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques, chimiques et économiques qui sont définies à partir d'un certain nombre de critères. [47] Le choix du MCP pour le stockage thermique est effectué en fonction de ces critères ainsi que de la stabilité et de la compatibilité avec d'autres matériaux.

II .2.5.1 Critères thermodynamiques :

- Une température de fusion dans la gamme de température de fonctionnement du système.
- Une capacité calorifique, chaleur latente et masse volumique élevée afin de réduire au minimum les dimensions du stockage.
- Une chaleur spécifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative.
- Une forte congruence
- Une bonne respectabilité et reproductibilité du changement d'état (cycles et vieillissement).
- Une conductivité thermique élevée afin d'avoir un minimum de gradient dans MCP et assurer une puissance élevée de charge et de décharge du stockage.
- Le minimum d'expansion volumique lors du changement d'état afin d'utiliser des structures géométriques simples contenant le MCP, cela limitera les dégâts dus aux contraintes mécaniques sur la structure du contenant.
- Fusion conforme du matériel de changement de phase pour une capacité de stockage constante avec chaque cycle fusion/solidification. [47]

II .2.5.2 Critères cinétiques :

- Taux de nucléation élevé pour éviter le refroidissement brusque de la phase liquide.
- Un phénomène de surfusion négligeable.
- Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiquée par les tables thermodynamiques. [47]

II .2.5.3 Critères chimiques :

- Une bonne stabilité chimique du matériau face au vieillissement.
- Aucune décomposition chimique de sorte qu'un stockage par chaleur latente soit fiable.
- Une bonne compatibilité chimique et une résistance à l'oxydation avec le contenant.
- Une toxicité et inflammabilité aussi faible que possible. [47]

II .2.5.4 Critères économiques :

- Disponible en grande quantité
- 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. [47]

II .2.6 Classification des matériaux à changement de phase :

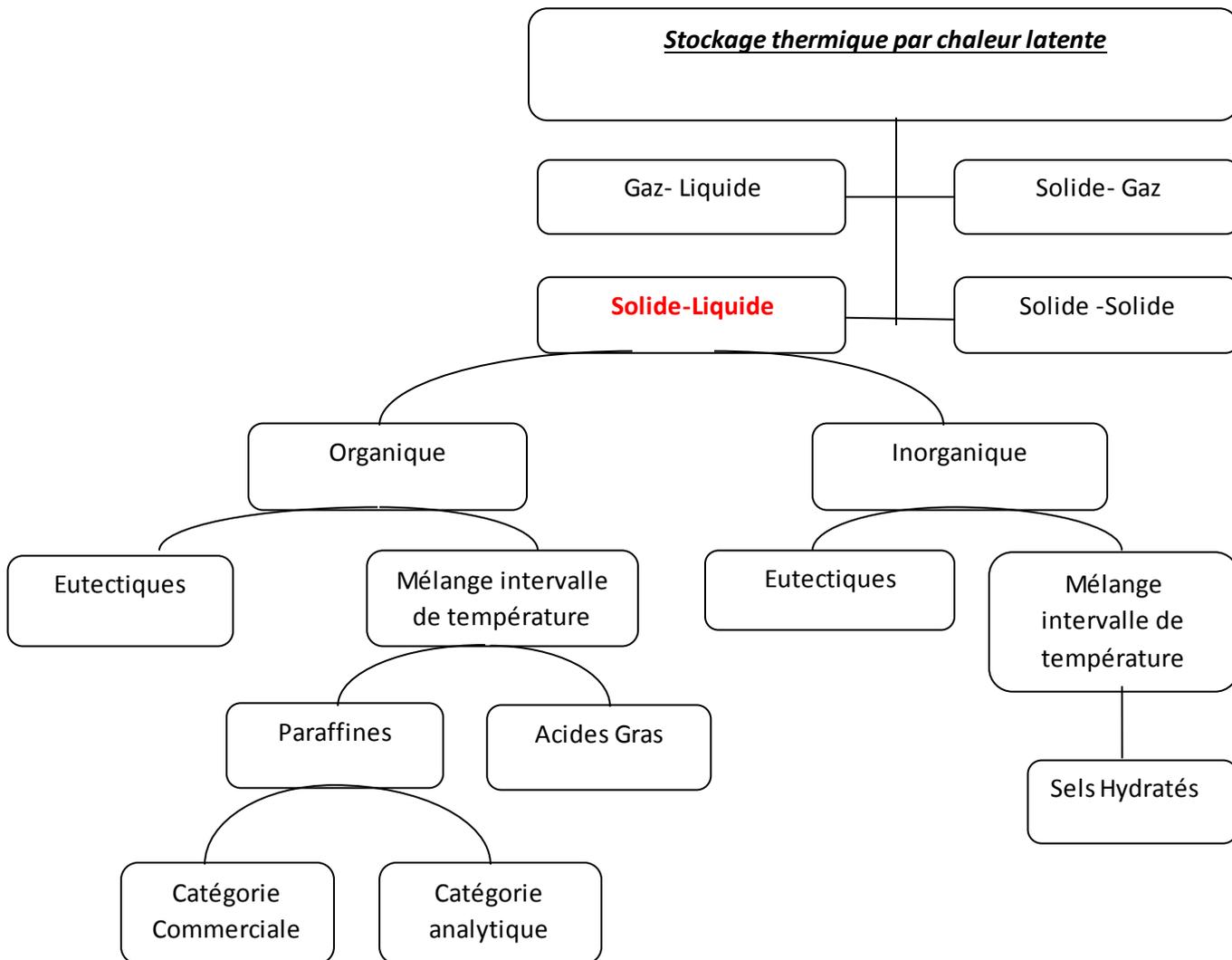


Figure II.8 : Classification des matériaux à changement de phase

Il y a un grand nombre de substances chimique qui peuvent être identifiée 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 situe dans la plage de température de fonctionnement souhaitée, une majorité de ses 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 thermiques idéal. Aussi ces matériaux sont employés tout en recherchant les voies et moyens qui permettent d'éviter ou de compenser les

inconvenients qu'ils présentent par des techniques appropriés adaptés 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 matériau 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 :

1. **Les composés minéraux (ou inorganiques)** : Parmi ces composés, seuls les sels hydratés présentent un intérêt pour leur utilisation en tant que MCP. Ils sont issus d'un alliage de sels organiques et d'eau.
2. **Les composés organiques** : De propriétés thermiques (chaleur latente et conductivité thermique en particulier) moindre que les sels hydratés. On utilise en particulier, pour le stockage de chaleur latente, les paraffines et les acides gras qui appartiennent à cette famille.
3. **Les eutectiques** : Un eutectique est un mélange de corps purs possédant une température de fusion constante pour une valeur particulière de concentration. Il peut être inorganique et/ou organique.

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

II .2.6.1 Les composés minéraux (inorganiques) :

Parmi ces composés, seuls les sels hydratés présentent un intérêt pour leur utilisation en tant que MCP. Ils sont issus d'un alliage de sels organiques et d'eau.

- **Les sels hydratés :**

Les hydrates de sels peuvent être considérés comme des alliages de sel minéraux et d'eau formant un solide cristallin typique générale $AB \cdot nH_2O$. Les propriétés les plus importantes des hydrates de sel sont les suivantes :

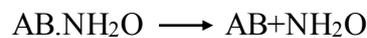
- La température de fusion élevée.

- 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. [48] [5]

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 la seconde, l'hydrate de sel est stabilisée dans les pores d'un polymère gel. En outre, un agent de nucléation est ajouté pour éviter le phénomène de surfusion.

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'hydrate se transforment en un sel anhydre ou en sel faiblement hydraté et de l'eau. Un problème avec la plupart des sels hydratés est celui de la fusion incongruente causée 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.

Ces types d'agent fonctionnent bien, mais ils sont finalement soit hydratés par le sel ou décomposés par des bactéries, et ils deviennent inefficaces :

- 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 en utilisant un stockage parfaitement étanche.
- Leur caractère corrosif, ce qui les rend incompatibles avec les nombreux matériaux de construction utilisés dans les bâtiments.

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

Ce dernier problème a reçu un début de solution en encapsulant les MCP dans des capsules métallique ou de matière plastique. On distingue la macro-encapsulation et la micro-encapsulation. Les microcapsules des MCP :

- Evitent une séparation de phase trop importante.
- Améliorent le transfert de la chaleur.
- Fournissent une structure autoporteuse pour les MCP.

Pour le stockage de l'énergie les systèmes les moins couteux sont les bouteilles plastiques ou les boites en fer blanc. Cependant la corrosion peut avoir les conséquences fâcheuses sur les boites en fer blanc si leur enduit n'est pas correctement appliqué. En revanche l'utilisation des macros capsules pour le stockage d'énergie dans les bâtiments ne semble pas satisfaisante.

Tableau II.3 : Différents hydrates salin [49]

Hydrates Salins	Température de fusion [C°]	Chaleur latente de fusion [KJ/Kg]
Sel de Glauber ($\text{Na}_2\text{SO}_4+10\text{H}_2\text{O}$)	32.4	252
Chlorure de calcium hexa hydrate $\text{CaCl}_26\text{H}_2\text{O}$	27_30	190
Acétate de sodium tri hydrate $\text{Na CH}_3\text{COOH}$ $3\text{H}_2\text{O}$	58	170 à 264
Hydroxyde de Baryum octahydrate $\text{Ba}(\text{OH})_2$ $8\text{H}_2\text{O}$	78	301
$\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 12\text{H}_2\text{O}$	95	238.5
Phosphate de sodium dodécahydrate $\text{Na}_3\text{PO}_4+12\text{H}_2\text{O}$	77	213
Pyrophosphate de sodium déca hydrate sous forme de capsules (calotherm 70)	70	184
Carbonate de sodium déca hydrate $\text{Na}_2\text{CO}_3 10\text{H}_2\text{O}$	32_35	247
Nitrate de calcium tétra hydrate $\text{Ca}(\text{NO}_3)_24\text{H}_2\text{O}$	40_43	140

II .2.6.2 Les 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} . [50] [51] [17]

Ils sont soit extraits à partir du pétrole brute, soit synthétisés par un procédé chimique où intervient la catalyse du monoxyde de carbone et d'hydrogène en vue de les convertir en hydrocarbure. (Lane et Abat en 1983 ont mené une recherche approfondie sur les matières organiques et ont identifié un certain nombre d'esters, d'acides gras, d'alcool et de glycols convenables pour le stockage de l'énergie).

II .2.6.2.1 Les paraffines :

Les paraffines sont essentiellement constituées d'hydrocarbure saturés à chaînes linéaires ou parfois ramifiées avec un groupement méthyle substitué au bout de chaîne.

Les paraffines pures uniquement constituées d'alcanes peuvent être caractérisées 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 à la température usuelle et elles sont qualifiées de « cires paraffiniques ».

Mise à part certaines caractéristiques favorables des paraffines, telles que la fusion congruente et de bonnes propriétés de nucléation, elles montrent cependant certaines propriétés indésirables telles que :

- Faible conductivité thermique.
- Sont incompatibles avec le récipient en plastique.
- 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. [3] [51]

MEHLING COLL (2000) [25] a signalé que le matériau composite MCP- graphite à une conductivité thermique 100 fois plus élevée que la paraffine pure.

II .2.6.2.1.1 Avantages et inconvénients des paraffines : [52]

- L'enthalpie de fusion varie entre 10 et 230 KJ/Kg. Cette valeur est grande par rapport à celle des matériaux organique dont la capacité thermique massique est de 2.1 KJ/Kg. 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.
- Ils sont stables chimiquement mais il faut les protéger de l'air pour éviter l'oxydation en particulier quand elles sont chaudes leur dégradation est similaires à celles des acides gras.
- Il n y a pas de ségrégation de phase.
- Les cires paraffiniques 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% recyclable.
- Quelques paraffines commerciales sont adaptées aux applications de l'énergie solaire. Pour les applications dans les bâtiments, une paroi contenant 3 centimètres d'épaisseur de paraffine est équivalent thermique d'une paroi en béton de 40 centimètres.
- Les paraffines ordinaires sont des mélanges d'hydrocarbures et ont un prix raisonnables. En fonction de leur composition, elles présentent des points de fusion varies. Par contre les cires paraffiniques pures sont très couteuses.

Les deux principaux inconvénients sont les suivants :

- Les cires paraffinique 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 compensé par une grande surface d'échange ou par un conditionnement adapté.

- Les cires paraffiniques sont facilement inflammables.

II .2 .6.2.1.2 Différentes cires paraffiniques : (C.K Jotshi et all 1992) : [45]

Dans ce paragraphe sont données quelques exemples de cires paraffiniques soit pure soit en mélange.

- N-octadécane (C₁₈H₃₈) cette cire fond à T=28°C et a une chaleur de fusion de 244 kJ/kg
- N-écossant (C₂₀H₄₂) sa fusion est congruente a T=36.7°C, la chaleur de fusion est de 247 kJ/kg

Le N-octadécane et le N-écossant sont très inflammables quand ils sont exposés à une flamme. Ils s'oxydent fortement. Ils ne sont pas toxiques. Ils ont relativement une bonne conductivité thermique. Purs, ces composés sont très chers.

- 112/118 white scale cire : Ces cires paraffiniques sont issues du raffinage du pétrole brut « pennsylvania-grade ». Elles font apparaître deux transitions de phase solide avant leur domaine de fusion (42-48°C). Ces cires été soumises à un recyclage thermique (jusqu'à 1734 pour un échantillon) sans changement ni de la température de la transition ni du profil de la transition
- P11 : cette cire a une chaleur latente de 210 kJ/kg et sa solidification se produit a T=45-48°C en forme de capsule sphérique, elle a subit 2600 cycles thermiques sans se détériorer

II .2.6.2.1.3 Conditionnement des paraffines :

Bien que les paraffines aient les propriétés requises d'un MCP leur faible conductivité pénalise la cinétique de charge/ décharge de l'énergie thermique.

Pour résoudre ce problème plusieurs types de conditionnement ont été proposés :

- Les nodules
- Les cylindres avec ailettes ou non
- La micro-encapsulation

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

Une autre méthode consiste à augmenter la conductivité apparente en incorporant une matrice métallique ou des fibres de carbone [53]

Le tableau suivant permet d'apprécier les variations de propriétés physiques de quelques paraffines en fonction de leur masse moléculaire

Tableau II.4 : Exemple de propriétés physique de paraffines [48]

	Paraffines			
	Tétradécane	hexa décane	octadécane	Eicosane
Formule	$C_{14}H_{30}$	$C_{12}H_{24}$	$C_{18}H_{38}$	$C_{20}H_{42}$
Température de fusion	5.5	16.7	28	36.7
Enthalpie de fusion [C°]	226	237	244	247
Conductivité thermique [WJ/Kg C°]	0.15	0.15	0.15	0.15
Capacité thermique massique [KJ/Kg C°]	2.07	2.11	2.16	2.21
Masse volumique solide [Kg/m³]	825	835	814	856
Masse volumique liquide [Kg/m³]	771	776	774	778
Retard de solidification[C°]	Aucun	Négligeable	Négligeable	Aucun
Pression de vapeur [Pa]	133 à75C°	133 à105C°	133 à75C°	133 à100C°
Tension superficielle [N/m]	$24.7 \cdot 10^3$	3.4	$27.4 \cdot 10^3$	–
Viscosité [Cp]	2.1	–	3.4	–

II .2.6.2.2 Les composé organique non paraffiniques :

Il s'agit de la plus importante catégorie de matériaux aptes pour le stockage de la chaleur latente. Ces composés sont les MCP les plus nombreux, avec des propriétés très variées. Chacun de ces matériaux possède des propres propriétés contrairement aux paraffines. [54] [1] [6]

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

Dans ce tableau des composés organiques non- paraffiniques sont donnés à titre d'exemple avec leurs propriétés thermo-physique.

Tableau II.5 : propriétés thermo-physique des matières organiques non-paraffiniques

Matériaux	Point de fusion [C°]	Chaleur latente de fusion [KJ/Kg]
Acide formique	7.8	247
Acide caprylique	16.3	149
Glycérine	17.9	198.7
Acide D-lactic	26	184
Méthyle palmitate	29	205
Camphenilone	39	205
Docasy bromide	40	201
Caprylone	40	259
Phénol	41	120
Heptadecanone	41	201
1-cyclohexylo octadecane	41	218
4-heptade-cane	41	197

Certains des caractéristiques de ces matériaux organiques sont les suivants :

- Forte chaleur de fusion.
- Inflammabilité.
- Faible conductivité.
- Faible point d'éclair.
- Niveau variable de toxicité.
- Instabilité à haute température.

Les matières organiques non-paraffiniques sont divisées en deux groupes : les acides gras et autres matières organique.

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

• Les acides gras :

Les acides gras sont des acides carboxyliques à chaîne carbonée plus au moins longue (de 4 à 18 atomes de carbone pour les plus courtes). On connaît une quarantaine d'acides gras naturels, dont les plus importants sont l'acide butyrique, l'acide palmitique, l'acide stéarique, l'acide linoléique... La formule chimique générale des acides gras est $\text{CH}_3\text{2nCOOH}$ 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, ils sont plus chers que les paraffines et sont corrosifs. Les acides gras ont de fortes chaleurs de fusion comparables à celles des paraffines. Les acides gras montrent également un processus de fusion/cristallisation réversible avec aucune surfusion

Certains acides gras jugés d'intérêt pour les applications de stockage d'énergie thermique à basse température sont représentés avec leurs propriétés thermo physique dans le tableau

Tableau II.6 : Propriétés thermo physique des acides gras [48]

Matériaux	Formule	Point de fusion [C°]	Chaleur latente [KJ/Kg]
Acides Acétique	$\text{CH}_3 \text{COOH}$	16.7	184
Polyéthylène glycol 600	$\text{H (OC}_2 \text{H}_2)_n \text{-OH}$	20-25	146
Acide caprique	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_8 \text{-COOH}$	36	152
Acide elaidique	$\text{C}_8\text{H}_7\text{C}_9\text{H}_{16} \text{-COOH}$	47	218
Acide l'aurique	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10} \text{-COOH}$	49	178
Acide pentadécanoïque	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{13} \text{-COOH}$	52.5	178
Tri stéarine	$(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO}) \text{C}_3\text{H}_5$	56	191
Acide myristique	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12} \text{-COOH}$	58	199
Acide palmitique	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14} \text{-COOH}$	55	163
Acide stéarique	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16} \text{-COOH}$	69.4	199
Acétamide	CH_3CONH_2	8.1	241
Fumarate de méthyle	$(\text{CHCO}_2\text{CNH}_3)$	102	242

II .2.6.3 Les eutectiques :

Les eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs corps qui par définition ont des températures de fusion précises. Ils ont un comportement similaire au comportement des hydrates salins à fusion congruent.

Les eutectiques ont un potentiel important pour les applications de stockage thermique de l'énergie. Quelques eutectiques sont utilisés pour le refroidissement et dans les systèmes passifs de stockage de l'énergie solaire. Les eutectiques sont classés en eutectiques inorganiques, eutectique organique et eutectique organiques-inorganiques.

Sur ce tableau on donne quelques eutectiques déjà utilisés pour les applications de stockage thermique :

Tableau II.7 : Liste de quelques eutectiques [55]

Eutectiques Inorganiques	Point de fusion [C°]	Chaleur latente de fusion [KJ/Kg]
49.3%MgCl ₂ ·6H ₂ O+50.7%Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	58	132.3
61.5 %Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O+38.5%NH ₄ (NO ₃)	51	131.1
58.3 Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O+41.7%MgCl ₂ ·6H ₂ O	58	106
Ca Cl ₂ · 6H ₂ O + Ca Br ₂ · H ₂ O	14	140
Eutectiques Organique:		
Acids Caprique- Laurique	18	120
Acids Palmique -Laurique	33	145
Acids Stéarique Laurique	34	150

II .2.7 Les méthodes de détermination des propriétés physique des MCP :

La stabilité thermique et les propriétés thermo-physiques des MCP doivent être déterminées par des méthodes d'analyses thermiques. Parmi les méthodes conventionnelles on trouve la thermogravimétrie (TG) l'analyse thermique différentielle (DTA) et la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) qui sont utilisées pour mesurer

les propriétés thermo-physique des MCP. Une nouvelle méthode appelée « méthode T-history » est développée.

II .2.7.1 Thermogravimétrie (TG) :

Thermogravimétrie (TG) est la méthode qui mesure les changements de masse de la matière en fonction de la température en vertu d'un programme de température contrôlée. Le dispositif expérimental de cette dernière se compose d'une balance de précision, un four et un système d'enregistrement de la masse et de la température.

II .2.7.2 Analyse thermique différentielle (DTA) :

Analyse thermique différentielle (DTA) est le dispositif le plus utilisé pour déterminer les températures de fusion et d'ébullition des matériaux organique et inorganique. Cette méthode est basée sur la mesure de la différence de la température entre l'échantillon et la référence.

C'est une technique dans laquelle la différence des températures entre l'échantillon et la référence est mesurée en fonction du temps ou de la température lorsque la température de cet ensemble est programmée dans une atmosphère contrôlée.

II .2.7.3 Calorimétrie différentielle à balayage (DSC) :

Calorimétrie différentielle à balayage (DSC) mesure la différence de vitesse de flux de chaleur entre l'échantillon et la référence sur le même programme de température.

Il existe deux types de DSC :

- DSC à flux de chaleur
- DSC à compensation de puissance

Dans la DSC à flux thermique l'échantillon et la référence sont soumis à la même source de chaleur. On détermine la différence dans les flux de chaleur entre l'ambient et l'échantillon et entre l'ambient et la référence.

En compensation de puissance les températures de l'échantillon et la référence sont indépendamment contrôlées par des sources de chaleur identiques et distinctes.

Les changements de température (en DTA) ou le flux de chaleur (en DSC) sont la conséquence de transition ou de réaction endothermique ($\Delta Q < 0$) ou exothermique ($\Delta Q > 0$) comme celle déterminée par les changements de phase, la fusion, la cristallisation, les transitions vitreuses, les dissociations, les oxydations, la polymérisation, etc. Ces changements sont détectés par une méthode différentielle.

Les courbes DTA ou DSC en fonction de la température de chauffage contiennent des séries de pics orientées négativement (vers le bas) ou positivement (vers le haut) de l'axe de flux de chaleur. Les positions des pics sur l'axe de température et leur nombre permettent l'identification qualitative de matériau analysé. Quant aux aires des pics, elles permettent le calcul de la chaleur de réaction, de transition, de fusion, ou de cristallisation. Parfois, des informations sur la cinétique des réactions peuvent être obtenues à partir des courbes DTA ou DSC.

II .2.7.4 Méthode « T-history » :

En 1999 Yiping et Yi 49 ont proposé une nouvelle technique expérimentale appelée la méthode T-history, destinée à la détermination simultanée des propriétés thermophysique des produits soumis au changement de phase, elle a reçu ce nom car elle est basée sur l'analyse de la courbe transitoire de la température d'un produit lors de son changement de phase. Le dispositif expérimental est composé de deux tubes de même dimension en verre, un contenant l'échantillon et l'autre rempli d'eau, qui sont initialement mis dans un premier bain d'eau (bain-1) la température homogène $T_{\text{eau-1}}$ est supérieur à la température de changement de phase T_f du produit en étude, $T_{\text{eau-1}} > T_f$.

Les deux tubes sont laissés dans ce bain jusqu'à est ce que la température de l'échantillon et celle de l'eau deviennent égales à T_0 ($T_0 = T_{\text{eau-1}} > T_f$) à l'instant $t=0$, les deux tubes sont retirés du premier bain et mis dans un deuxième bain d'eau (bain-2) la température $T_{\text{eau-2}}$ légèrement inférieur à la température de changement de phase du produit ($T_{\text{eau-2}} < T_f$). Un thermocouple placé dans chaque tube mesure l'évolution temporaire de la température du produit et de l'eau.

II .2.8 Méthode de conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique :

Le conditionnement des MCP pour leurs applications dans les dispositifs et systèmes de stockage thermique doit obéir à certaines exigences :

- Le matériau de conteneur de conditionnement doit être compatible avec le MCP et ne doit subir une oxydation, ni ramollissement ou toutes autres dégradations
- Le conteneur de conditionnement doit assurer une parfaite étanchéité comme les MCP change de l'état solide à l'état liquide, le liquide ayant une faible viscosité le taux de fuite se trouvant fortement augmenté
- Le conteneur doit pouvoir résister à la dilatation et au changement de volume du MCP en phase liquide, ce changement peut casser le conteneur si celui-ci ne peut pas absorber le changement de volume

Il existe deux techniques pour conditionner les MCP [56] [57] :

II .2.8.1 La macro-encapsulation :

Les conteneurs peuvent être constitués de sacs, bouteilles de plastique, de capsules de différentes formes géométriques et dimensions etc.

Il existe des procédés industriels qui ont fait leurs preuves et qui utilisent le conditionnement dans des sphères de matière plastique ou nodules comme la montre la figure ci-dessus. Ces nodules manufacturés dans trois diamètres (77*78 et 98 mm) pour usages respectivement aux faibles températures de changement d'état (-3 à -15°C) aux températures intermédiaires (-3 à 15°C) et à la température de stockage de la glace(0°C) certains modules spéciaux ont des températures de changement d'état de 27°C et plus. [54]

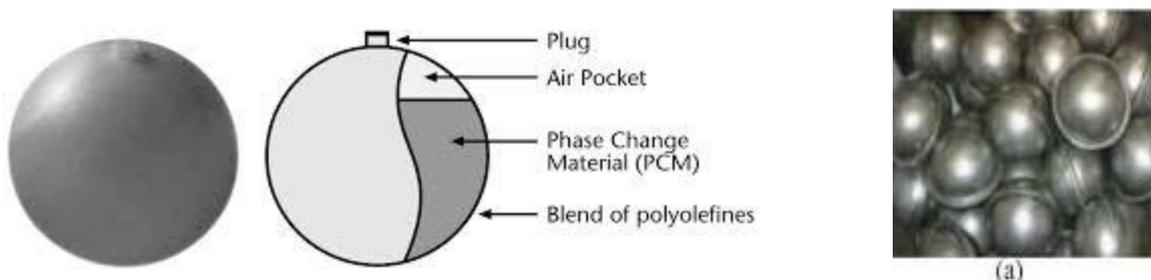


Figure II.9 : a)Conditionnement des MCP dans un module critopia



Figure II.9 : b) conditionnement en sac plastique c) conditionnement en brique plastique

II .2.8.2 La micro-encapsulation :

La micro-encapsulation est un procédé physique ou chimique qui permet d'emprisonner de petites gouttes solides ou liquides dans une coquille de 1 à 1000 micromètre de diamètre.

Les procédés physiques sont le séchage de sprays, la centrifugation ou l'utilisation de lits fluidisés ou des procédés de revêtement divers. Les procédés chimiques consistent en des encapsulations in-situ comme les polycondensations interraciales qui conduisent à des polyamides ou des polyuréthanes comme coquilles, des précipitations dû à la polycondensation de résine aminées etc...

Hawlder et al [58] ont développé des expériences et des simulations pour évaluer les caractéristiques et les performances thermiques des paraffines encapsulées dans un agent liant (HCHO) en termes de ration d'encapsulation (rapport cœur sur revêtement) et de capacité de stockage énergétique. Ils ont également effectué des tests de cyclage thermique et ont montré que les capsules gardaient leur profile géométrique et leur capacité de stockage après 1000 cycles.

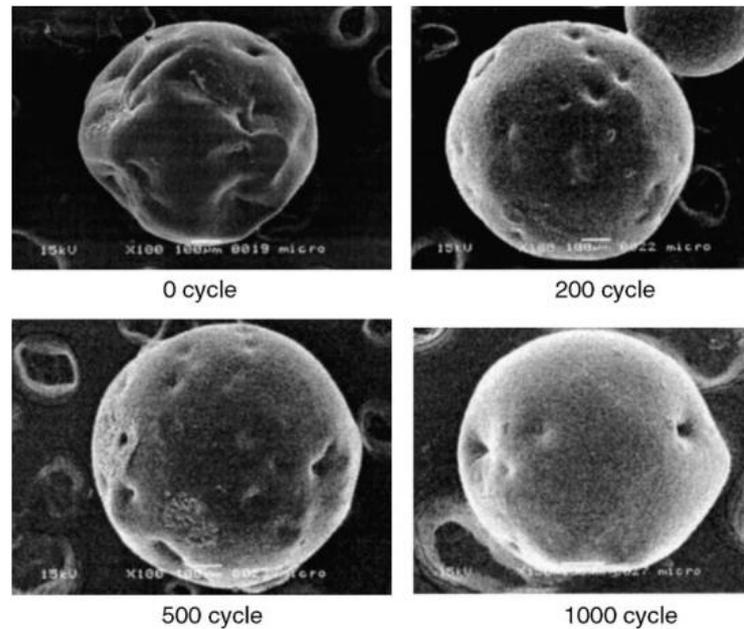


Figure II.10 : Vue au MEB de microcapsules renfermant des paraffines [58]

Il existe encore d'autres modes de conditionnement des MCP qui peuvent être associés à la macro encapsulation il s'agit de :

- Des briquettes de polyéthylène à haute densité (PEHD) les polyéthylène à haute densité et un hydrocarbure alkyle de haut poids moléculaire avec une température de fusion et de solidification de 125°C à 130°C. Ce dernier correspond à un stockage thermique de 190 à 220 kJ/kg. Le PEHD est alors irradié pour éviter l'écoulement lorsqu'il est sous forme liquide. Ces briquettes peuvent supporter au moins 1000 cycles thermiques sans changement de caractéristiques de stockage thermique. Des plaques, des barres, des tubes et d'autres formes géométriques du polyéthylène peuvent être obtenues suivant leurs usages.
- Des briquettes de polyéthylène de hautes densités réticulées peuvent être imprimées avec un MCP de température de fusion plus faible. La température de fusion et le stockage thermique ne varient pas après répétition de nombreux cycles thermiques. Ces briquettes imprimées peuvent être incorporées dans les matériaux de construction (béton et plâtre) en les ajoutant un mélange humide de processus.
- Un substrat poreux, comme le plâtre, le béton et la mousse absorbant un MCP liquide hydrocarbure alkyle. Le processus peut être effectué en 10 min la durée d'absorption contrôlant la qualité du MCP absorbée. Les hydrocarbures alkyle d'une chaîne de carbone plus au moins longue peuvent être absorbé par le plâtre et le béton. L'autre

MCP comme les acides gras et les esters peuvent aussi être absorbés par les matériaux poreux.

- Le stockage du MCP par absorption ou adsorption dans des poudres sèches de silice. C'est la méthode la plus récente et la plus universelle pour conditionner les MCP. La silice peut mécaniquement se mélanger avec les MCP. Les hydrocarbures, l'eau et les autres MCP peuvent être absorbés et adsorbés dans de la silice finement divisée.

II .2.9 Classe de MCP :

Il existe plusieurs classes de MCP ; les MCP les plus utilisés sont :

II .2.9.1 Matériaux à changement de phase SP :

La création de la chaleur latente mêlée SP a conduit d'une nouvelle et innovante classe des MCP non inflammables. SP consiste en une composition unique d'hydrate de sel et de composés organiques qui rend vraiment le cycle stable sans détérioration au fil du temps.



Figure II.11 : MCP classe SP

II .2.9.1.1 Applications :

Les MCP de classe SP sont généralement utilisés et emballés dans nos CSM-panneaux propriétaires pour les systèmes de refroidissement actif et passif et de chauffage comme par exemple des climatiseurs et les éléments de plafond et des murs. La forme SP devient rapidement le MCP le plus adapté pour une utilisation dans l'industrie de la construction.

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

Avec l'utilisation de différents additifs ses propriétés peuvent être adaptées aux besoins particuliers des clients. Il peut être aussi transformé en substance ou de en structure d'absorption.

II .2.9.1.2 Avantage :

- Une performance stable tout au long des cycles de changement de phase.
- Grande capacité de stockage thermique.
- Surfusion limitée.
- SP-21 à SP26E non inflammables.
- Non toxique.
- Les températures de fusion différentes entre -21°C et 90°C sont disponibles.

[59]

II .2.9.2 Matériaux à changement de phase RT :

Le stockage d'énergie thermique avec un matériau RT absorbe une grande quantité de chaleur, appelée chaleur latente ; à une température relativement constante. Lorsque ce processus de changement de phase est inversé, c'est-à-dire du liquide au solide la chaleur latente précédemment stockée est libérée.



Figure II.12 : MCP classe RT

II .2.9.2.1 Caractéristiques :

Les MCP de classe RT sont disponibles dans une large gamme de température de fonctionnement de 10°C à environ 82°C. Si on ne trouve pas la température de besoins de l'application ça peut être fabriquée sur place.

En outre, la température des points spécifiques de la gamme de RT de grande capacité (par exemple RT5HC) est disponible. Ceux –ci ont la capacité de stockage de chaleur de 25% à 30% plus latente que la RT classique

II .2.9.2.2 Avantages :

- La capacité de stockage d'énergie thermique élevée.
- Stockage de la chaleur et de la libération se font à température constante.
- Produit de longue durée de vie.
- Performances constantes sur plusieurs cycles.
- Gamme de température de fusion entre -10°C et 90°C.
- Manipulation facile.
- Ecologiquement inoffensifs.
- Non toxique.
- 100% recyclable. [59]

II .2.10 Les applications des MCP :

Les principales applications industrielles des matériaux à changement de phase sont les suivant :

- Les MCP sont utilisées dans l'industrie agroalimentaire pour limiter au maximum les variations de températures que subissent les aliments. Ils se présentent principalement sous forme de « petits sacs » en plastique contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à conserver.
- Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang et des organes. D'autres applications médicales peuvent être des coussinets chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps.

CHAPITRE II : Le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

- Un MCP connu pour une application qui 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 les stations équipées, à une température d'environ 50°C.
- L'utilisation des MCP de type **SP** dans les CSM-pannaux pour les systèmes de refroidissement actifs et passif et de chauffage comme, par exemple des climatiseurs et des éléments de plafond et de mur. Dans cette forme SP devient rapidement le MCP préféré pour une utilisation dans l'industrie de la construction
- Isolation des bâtiments. (L'incorporation des MCP dans le béton)
- Climatisation passive.
- Stockage d'énergie thermique.
- Industrie Textile.

Et également :

- Diminuer les effets exothermiques de réactions chimiques.
- Energie solaire.
- Système thermique dans l'aérospatiale.
- Refroidissement de moteur dans l'industrie automobile.
- Protection thermique de composants et circuits électroniques.

II .3 Conclusion :

Le stockage d'énergie est une solution très adaptée aux systèmes industriels 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 donc d'utiliser des énergies au moment où elles sont les moins coûteuses (énergie solaire, tarifs de nuits pour l'électricité. . .)

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique a suscité un regain d'intérêt ces dernières années. Cela est dû au fait que les MCP ont de fortes densités de stockage (quantité d'énergie stockée par unité de masse). Donc, ces matériaux peuvent être appliqués dans plusieurs domaines.

CHAPITRE III : Etude expérimentale

III.1 Introduction :

Le stockage de l'énergie est une solution d'appoint aux moyens traditionnels de production de pointe. La fonction du stockage d'énergie est essentielle pour apporter de la flexibilité et renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques.

Le stockage de l'énergie thermique sous forme de chaleur sensible est le mode de stockage d'énergie le plus utilisé actuellement dans les systèmes à basses températures grâce à sa simplicité, Mais le stockage thermique par changement de phase reste efficace pour des différences de températures faibles et si les périodes de charge et décharge se succèdent à température constante. 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). Ces derniers présentent l'avantage de stocker une grande quantité d'énergie avec un bon rapport masse/volume.

L'importance de l'énergie impliquée peut être démontrée en comparant la capacité de chaleur sensible du béton (1.0 kJ/kg K) avec la chaleur latente d'un matériau de changement de phase (MCP) comme hexa hydrate de chlorure de calcium $\text{CaCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ (193 kJ/kg). Les matériaux à changement de phase peuvent jouer un rôle important dans l'optimisation des réservoirs thermique.

Dans ce contexte, une étude expérimentale a été réalisée sur un stockage mixte sensible / latent à l'intérieur de la cuve. Dans la configuration, la paraffine (MCP) est centrée dans la cuve de stockage. Le but de cette étude est de bien suivre les phénomènes de fusion et de solidification du MCP (paraffine).

Suite à la conjoncture de cette année on a utilisé des données expérimentales non traités dans la conception de la cuve de stockage du travail de thèse de Mr LAFRI. [60]

III .2 Description du banc d'essai :

C'est une installation de production de l'eau chaude sanitaire ; le dispositif expérimental est conçu d'une boucle d'essai, (Figure III.1).

La boucle est composée d'une cuve de stockage. La cuve, en acier galvanisé, d'un volume de 50 litres, de 50 cm de Hauteur, 36 cm de diamètre et une épaisseur de

CHAPITRE III : Etude expérimentale

7cm de la laine de roche assure l'isolation de la cuve de stockage ayant une conductivité thermique égale à 0.04 W/mK.

Pour assurer le chauffage de l'eau dans la cuve, il a incorporé un échangeur de chaleur en cuivre en spirale, de 12/14 mm diamètre et 10 mètres de longueur.

Dans la configuration, il a mis une cellule cylindrique en acier galvanisé de 16 cm de diamètre et 45 cm de hauteur au centre de la cuve. Le remplissage de la paraffine se fait à l'état liquide pendant lequel cette paraffine est maintenue à une température qui avoisine les 65°C.

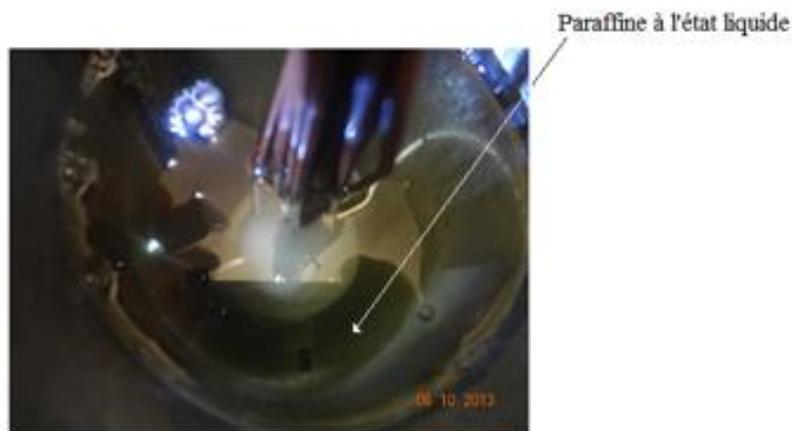


Figure III.1 : Emplacement de la paraffine au centre

Le MCP utilisé est la paraffine. Son nom commercial est RT54. Il s'agit d'hexacosane (tableau III .1), conduisant à un changement de volume de l'ordre de 10 % lors du passage d'un état à l'autre.

Tableau III.1 : Les propriétés thermo physiques de la paraffine

<u>Propriétés</u>	T_{Fusion} (C°)	Chaleur Latente (kJ/kg)	Cp (kJ/kg K)	Densité (kg/l)	Conductivité thermique (W/m k)
<u>Valeurs</u>	54-56	185	1.8 solide 2.4 liquide	0.9 solide 0.75 liquide	0.21 (solide /liquide)

CHAPITRE III : Etude expérimentale

Le chauffage du fluide primaire (Figure III.2) est assuré à l'aide d'un bain thermostaté composé d'une quinzaine de litres d'eau et chauffé par un thermoplongeur de 2 KW piloté par un régulateur de Type PID, une pompe hydraulique assure la circulation et l'agitation du fluide pour avoir une température homogène du bain.



Figure III.2 : Système de chauffage

Ce bain thermostaté permet d'imposer la température d'entrée du fluide primaire dans la cuve qui atteint 66°C à 68°C. Pour assurer la circulation de fluide caloporteur dans le circuit primaire, un circulateur à trois vitesses est mis en place avec un système de bypass.



Figure III.3 : Photo de l'installation expérimentale

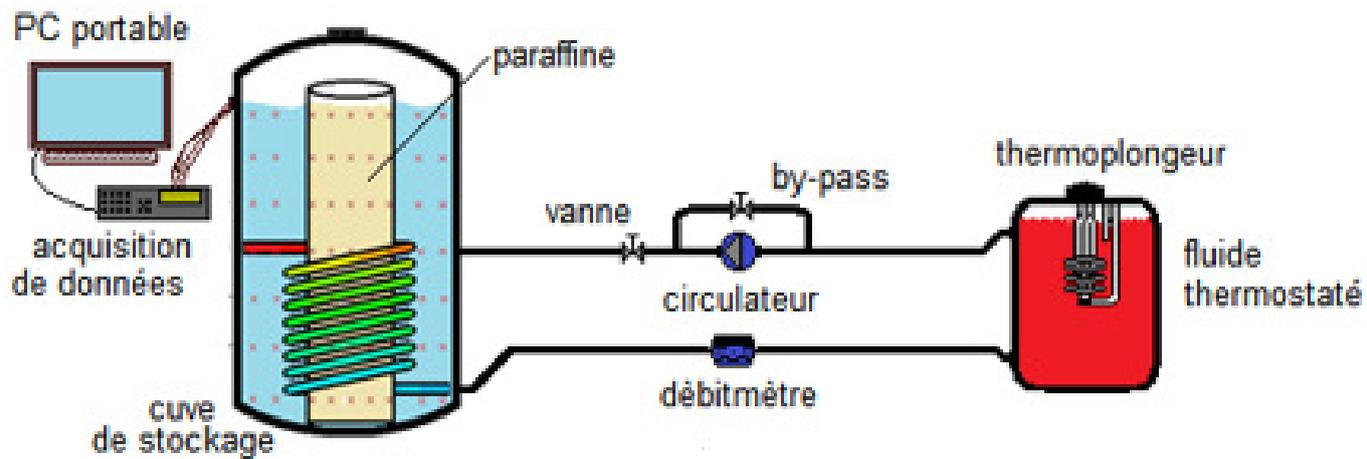


Figure III.4 : Dispositif expérimental

III .3 Instrumentation :

La cuve expérimentale est instrumentée avec des thermocouples de type T. Dans la configuration (eau – échangeur- paraffine) où la paraffine est placée au centre de la cuve de stockage, elle est instrumentée par 35 thermocouples situés à différentes positions axiales et radiales du MCP et dans l'eau 49 thermocouples sont mis en places (figure III.5).

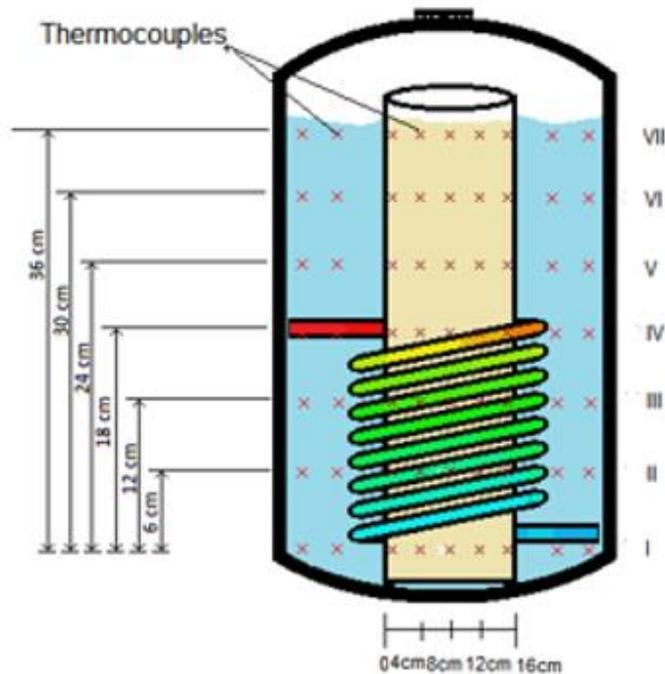


Figure III .5: La disposition des thermocouples dans la cuve

III .3.1 Mesure de débit :

Il a placé un débit mètre digital (Figure III.6) de type électromagnétique pour faible débit pour la mesure du débit du fluide qui circule dans le circuit primaire. Il est caractérisé par :

- Température maximale du liquide : 90 °C
- Pression max. : 16 bars
- Temps de réponse : <500 ms.
- Plage de débit : 1 à 20 l/min
- Précision : ± 2 % de la lecture



Figure III .6 Débitmètre à électromagnétique

III .3.2 Mesure de température :

Les capteurs de température sont des thermocouples de type T. Ils permettent un suivi de la température dans les systèmes de stockage.

Des acquisitions de données sont de marque FLUKE et des micro-portables récupèrent et enregistrent toutes les mesures issues des différents capteurs.

Les thermocouples utilisés nécessitent un étalonnage. La sonde d'étalonnage à résistance de platine utilisée et le thermomètre associé permettent d'atteindre une incertitude sur la température mesurée par les thermocouples de l'ordre de $0,1^{\circ}\text{C}$. Les erreurs effectivement corrigées au cours de l'étalonnage sont de l'ordre de $0,3^{\circ}\text{C}$.

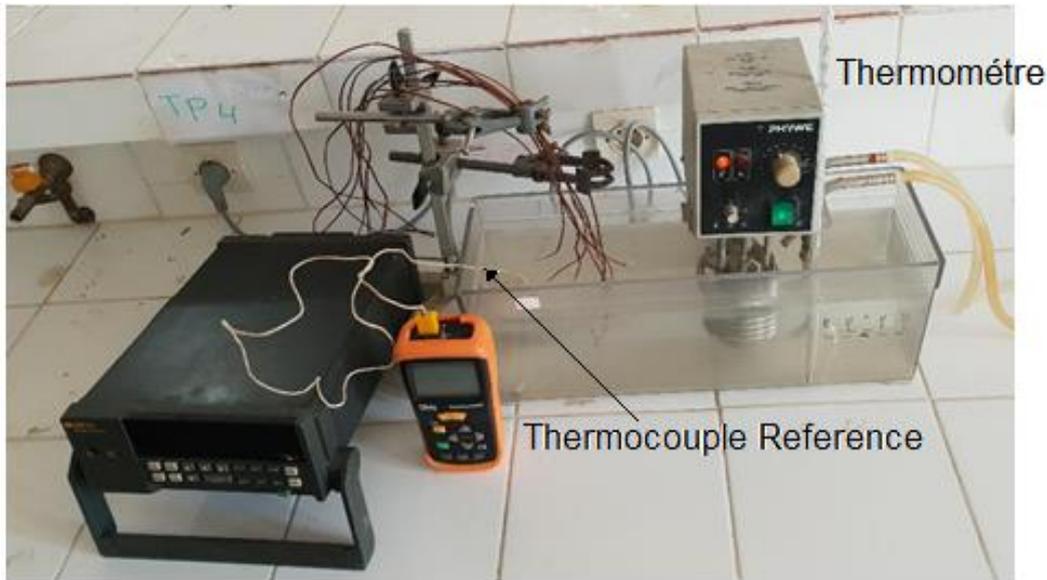


Figure III.7 : Le dispositif d'étalonnage des thermocouples

Concernant le déphasage des mesures, le diamètre de la gaine des thermocouples est de $0,5\text{ mm}$ et le temps de réponse associé est estimé à $0,025\text{ s}$. Cette incertitude est négligeable devant le temps d'acquisition donnée : $2,5\text{ s}$ (pour les 60 voies). Concernant l'acquisition de donnée, son incertitude sur la mesure de tension est inférieure à $0,01\%$.

III .4 Résultats et discussion :

Avant le démarrage des tests, La cuve est maintenue à une température initiale ($T_i=28^\circ\text{C}$). Elle est alimentée en chaleur à l'aide d'un circuit primaire ou le fluide caloporteur est fixé à la température de 68°C avec un débit de 0.012 l/s . Les mesures sont relevées avec un pas de temps de 120 secondes.

III.4.1 Variation temporelle de la température du MCP suivant le diamètre à différentes hauteurs :

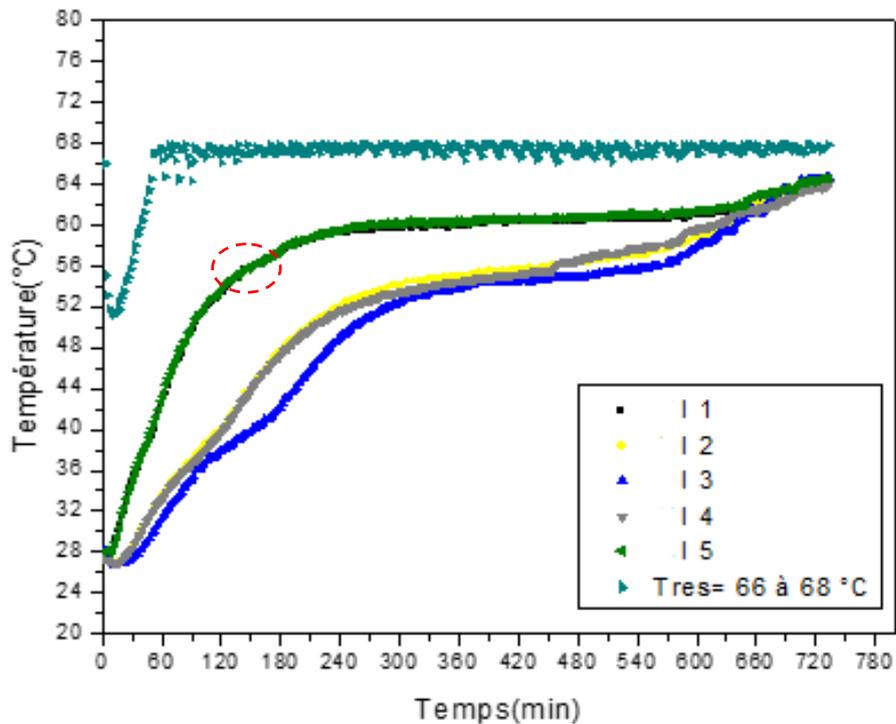


Figure III.8 : Variation temporelle à la température du MCP suivant le diamètre à la Hauteur H=0cm

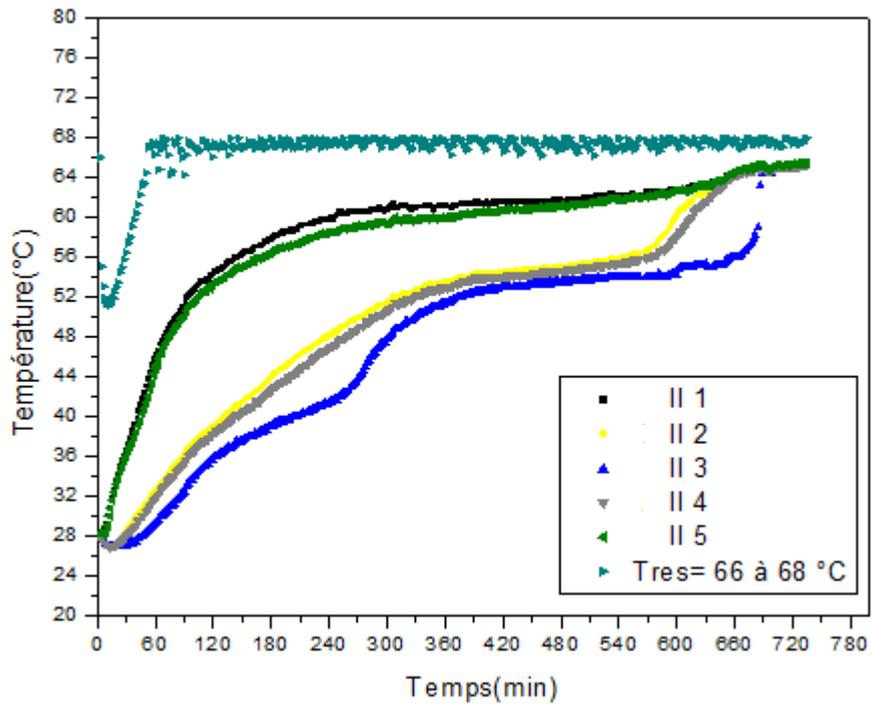


Figure III.9 : Variation temporelle à la température du MCP suivant le diamètre à la Hauteur H=6cm

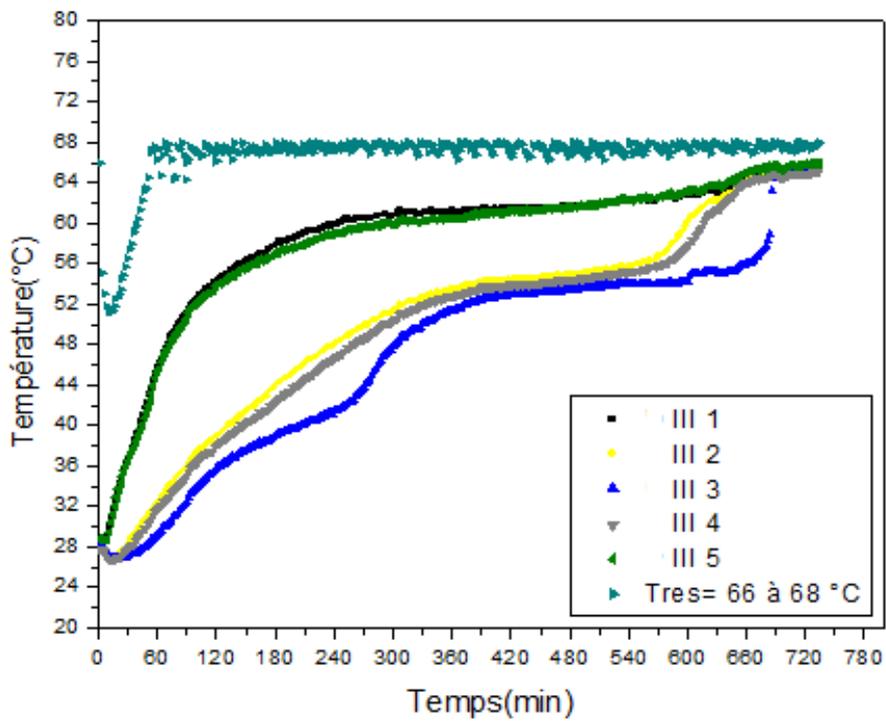


Figure III.10 : Variation temporelle à la température du MCP suivant le diamètre à la Hauteur H=12cm

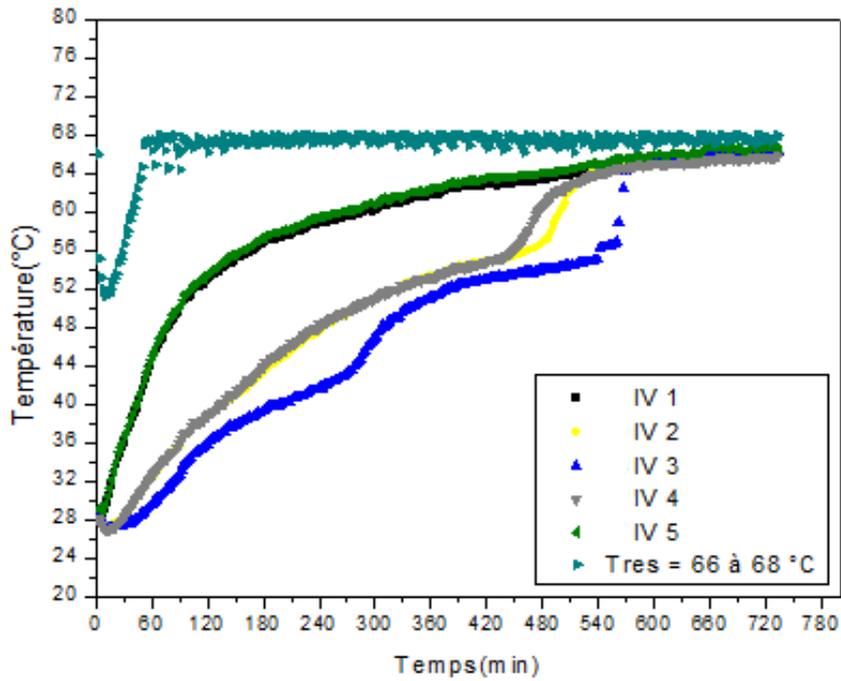


Figure III.11 : Variation temporelle à la température du MCP suivant le diamètre à la Hauteur H=18cm

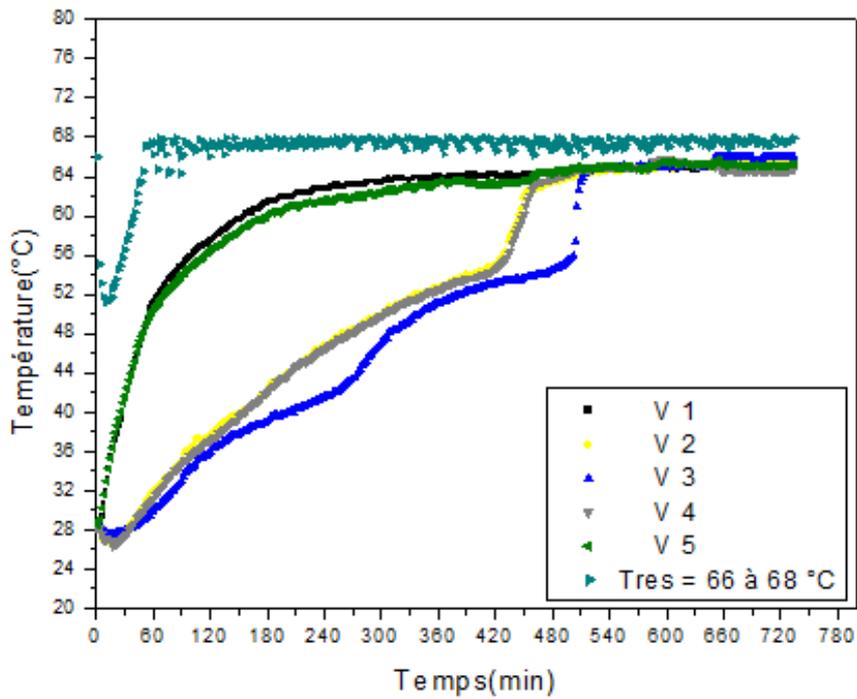


Figure III.12 : Variation temporelle à la température du MCP suivant le diamètre à la Hauteur H=24cm

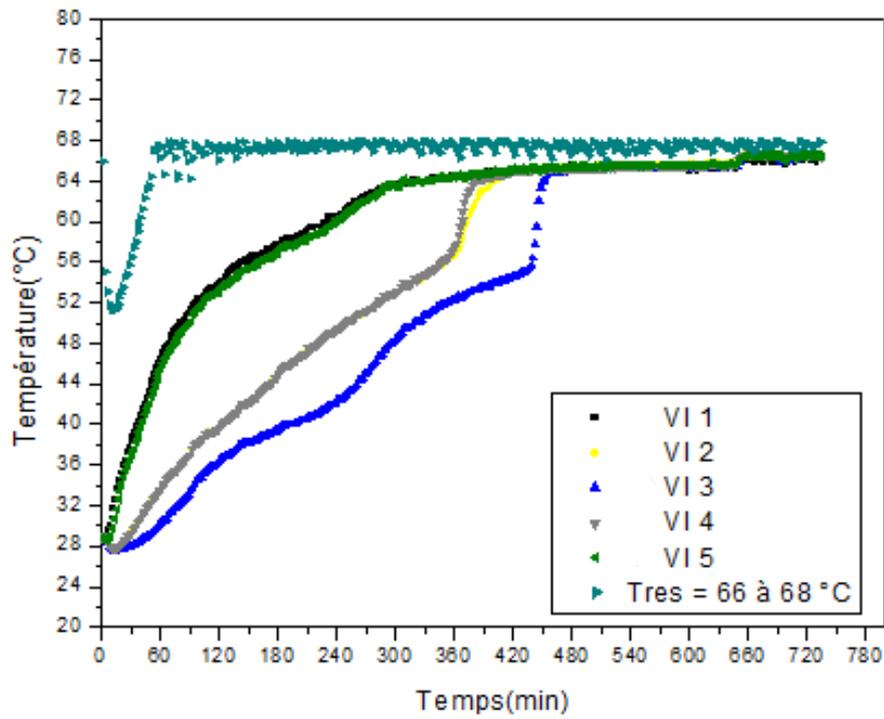


Figure III.13 : Variation temporelle à la température du MCP suivant le diamètre à la Hauteur H=30cm

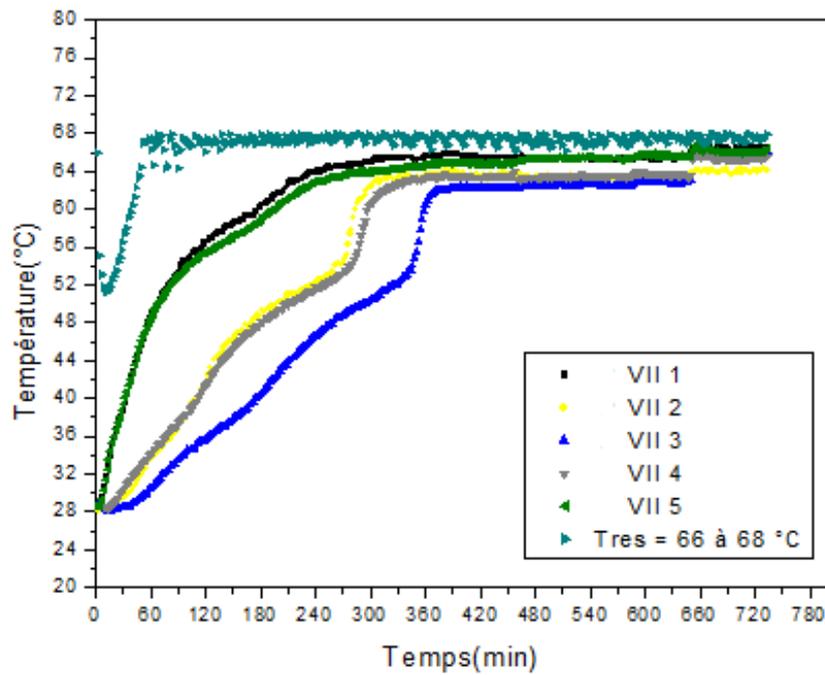


Figure III.14 : Variation temporelle à la température du MCP suivant le diamètre à la Hauteur H=36cm

Les résultats expérimentaux sont représentés sur les figures de (III.8) à (III.14). On remarque qu'au début de la phase de charge, la température augmente assez rapidement en suivant approximativement un profil parabolique, et qu'il y a une symétrie suivant l'axe du cylindre contenant le MCP.

L'augmentation est due au transfert de chaleur par conduction parce que le MCP est en état solide (chaleur sensible). Le MCP proche de la paroi inférieure fond plus rapidement (courbes en noires) et que le palier de changement de phase n'est pas apparent (la paroi qui joue le rôle d'une ailette).

Les écarts des courbes de température sont diminués pour des positions supérieures à cause de la stratification de l'eau dans la cuve. La température devient quasi constante dans l'intervalle de température de fusion (54°C et 56°C).

Pour les positions loin de la surface d'échange, la pente de la température est faible, alors que plus près de la paroi, la pente devient plus importante. Cette différence est due à la masse importante (inertie thermique) et la faible conductivité thermique du MCP.

Le temps de la fusion diminue à chaque fois que la hauteur augmente, ceci est dû à la convection qui déroule à l'intérieur du cylindre.

Une fois que la fusion est terminée, la température augmente à nouveau rapidement, cette augmentation correspond à la variation de la chaleur sensible (état liquide) jusqu'à la température de la source de chaleur.

III.4.2 Évolution des températures du MCP contenant dans la cellule cylindrique pour différentes hauteurs :

La figure (III.15) illustre l'évolution des températures du MCP pour différentes hauteurs au point 3. Tous les profils de températures suivent la même évolution, mais décalées dans le temps. Toutes les courbes atteignent le palier de fusion aux alentours de 56 °C.

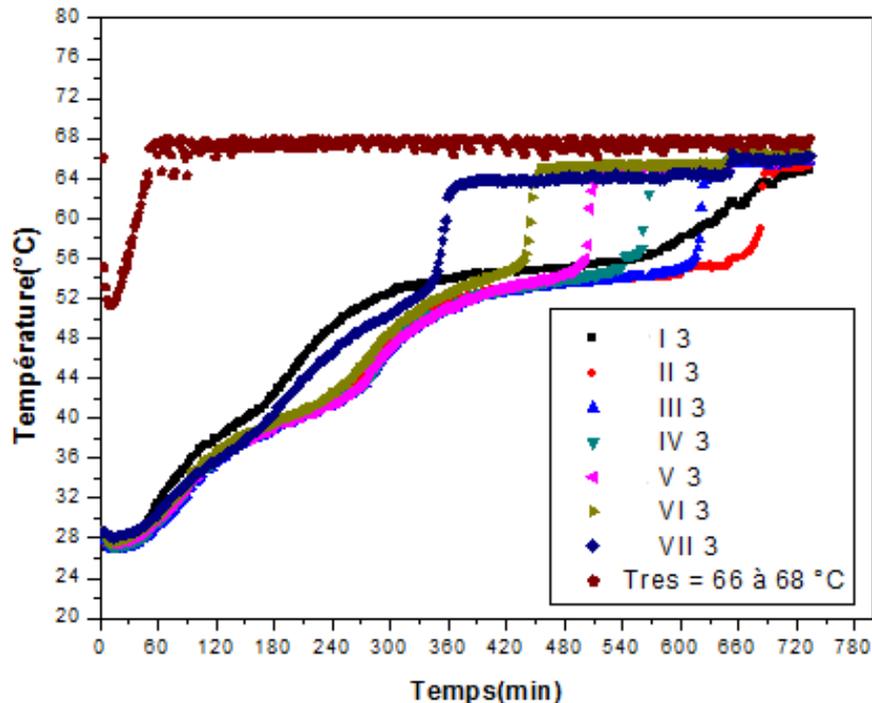


Figure III.15 : Évolution des profils de température du MCP suivant la Hauteur de milieu de la cellule cylindrique

La stratification thermique est observée, sauf que le point I3 qui se trouve dans la partie inférieure du fond de MCP dépasse tous les autres points, (courbe en noir) ; ceci est dû à la position du thermocouple près de la paroi inférieure du fond de la cuve de stockage qui assure le transfert de la chaleur par conduction (chaleur sensible). Les paliers de fusion sont autant plus longs pour les positions basses. La fusion totale du MCP est environ 720 min.

III.4.3 La variation de la vitesse de croissance de la température du MCP :

La figure illustre la vitesse de croissance de la température d'un thermocouple positionné à une hauteur dans la cuve est représentée sur la figure (III.16).

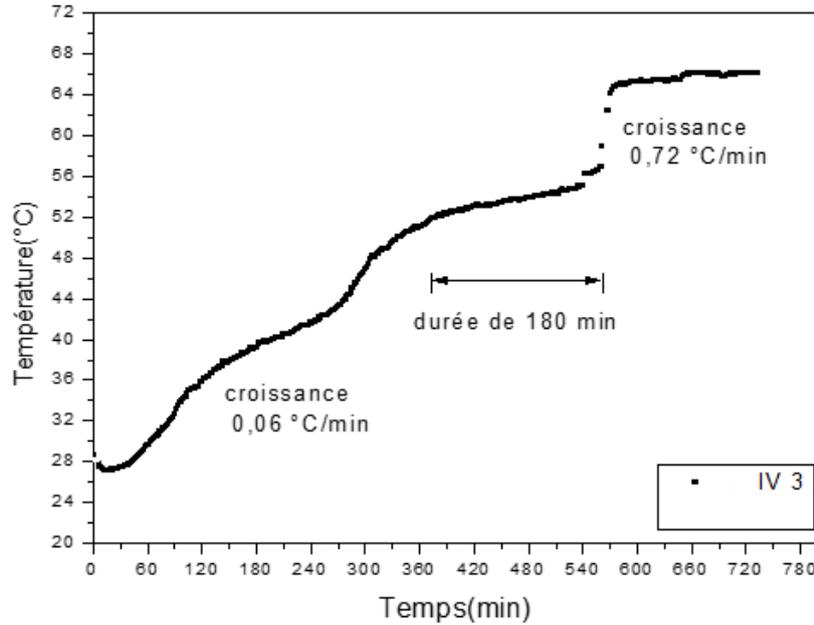


Figure III.16 : la vitesse de croissance de la température de MCP

On remarque que l'évolution présente trois étapes. Elles sont réparties de la façon suivante : la première étape est la phase solide (chaleur sensible), la deuxième étape est la partie de changement de phase et la troisième étape est la phase liquide (chaleur sensible).

- La phase solide : la vitesse de croissance de la température est (0.06 °C/min).
- La partie fusion : la durée de la fusion est (180min).
- La phase liquide : la vitesse de croissance de la température est de (0.72°C/min).

On constate que la vitesse de croissance dans la phase liquide croît plus vite dû à l'effet de la convection naturelle par rapport à celle de la partie solide où l'échange est purement conductif.

III.4.4 Position de l'interface solide-liquide :

La figure (III.17) montre les positions du front de fusion obtenue expérimentalement à différents temps.

La zone grise est la paraffine liquide et la zone blanche c'est la paraffine solide.

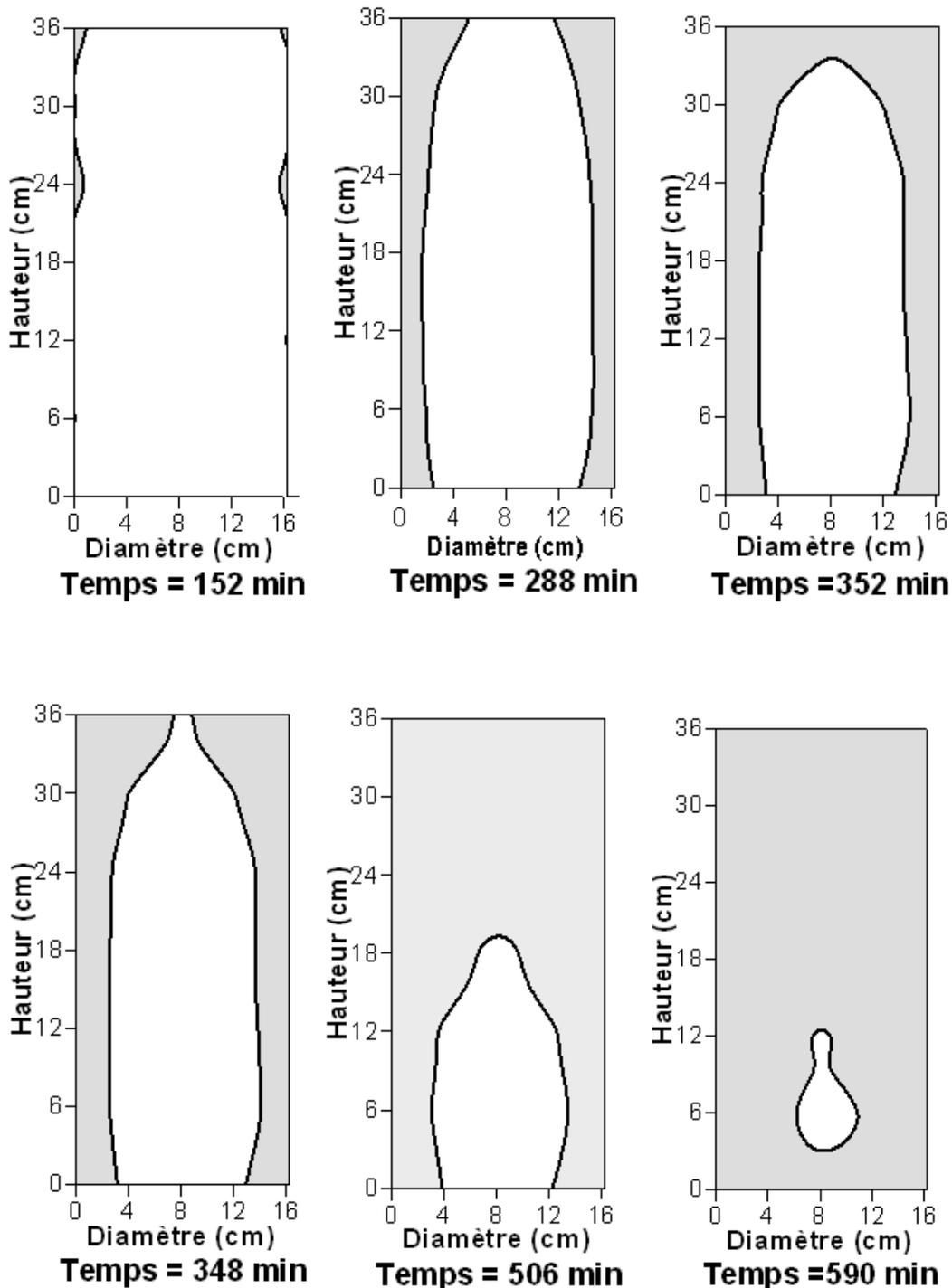


Figure III.17 : Position de l'interface solide –liquide pour des temps différents

Au début du phénomène, le front se déplace d'une façon presque parallèle car le transfert thermique est purement conductif. On observe qu'à $t = 352$ min, l'interface à une forme d'une cloche. Lorsque la convection naturelle s'établit, on a une fusion plus rapidement surtout dans la partie supérieure de l'enceinte. Quand le haut de l'enceinte est entièrement fondu, la convection naturelle commence à diminuer et le ralentissement de la vitesse de fusion sera vite observé.

On remarque à l'instant $t = 590$ min le front de fusion change de forme ; il prend la forme d'un bocal suspendue sur le support des thermocouples. La fusion de la partie inférieure est due à l'effet au fond de la cuve qui joue le rôle d'une ailette. (Si on opte pour une surface non conductrice au fond de la cuve on n'aurait pas observé une fusion à ce niveau-là)

III.4.5 Calcul de la quantité d'énergie stockée :

La quantité de chaleur stockée par un MCP qui passe de l'état solide à l'état liquide est composée de trois termes :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mc_{ps} dT + mL_f + \int_{T_f}^{T_s} mc_{pl} dT$$

Avec Q : la quantité d'énergie stockée ; m : la masse du matériau à changement de phase ; C_{ps} : chaleur spécifique du MCP à l'état solide ; C_{pl} : chaleur spécifique du MCP à l'état liquide ; L_f : Chaleur latente

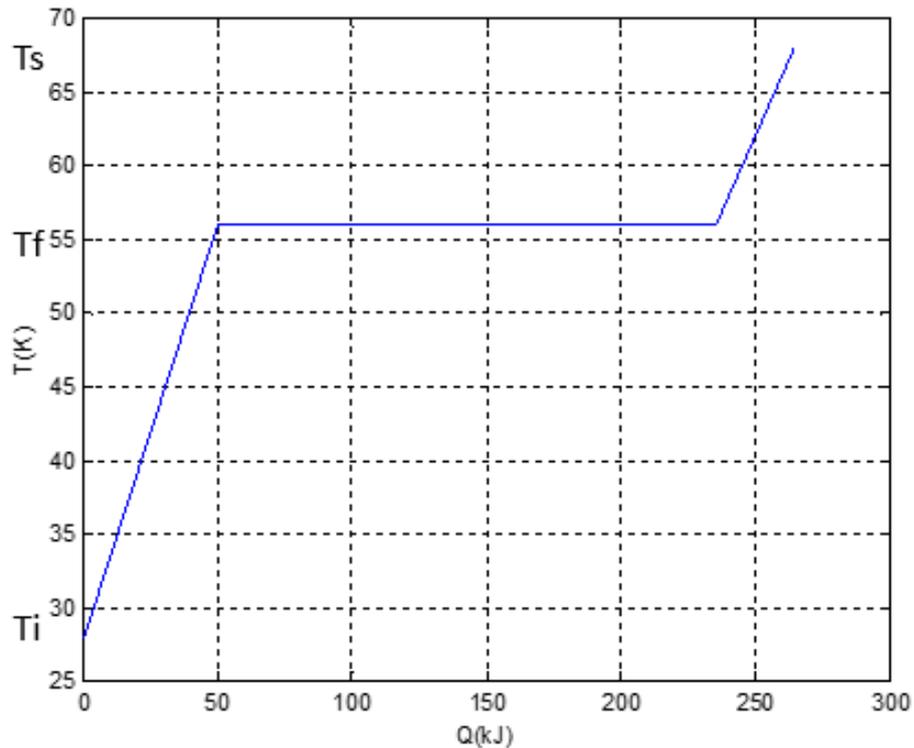


Figure III.18 : Evolution de la température du MCP en fonction de l'énergie stockée

L'application numérique a été effectuée sous MATLAB, en utilisant la méthode de TRAPEZE.

On obtient :

$$Q = 264.2000 \text{ kJ/kg}$$

Lorsque le matériau est chauffé, il accumule d'abord une quantité d'énergie sensible lui permettant d'atteindre la température de changement de phase, on observe une variation linéaire de la température. A ce stade, l'énergie apportée au matériau cesse de le chauffer et est utilisée à la place pour accomplir le changement de phase. La chaleur est stockée de façon isotherme sous forme de chaleur latente.

Une fois que la transformation est complète, la température augmente de nouveau proportionnellement à l'énergie apportée jusqu'à atteindre la température de la source de chaleur.

Il est donc impossible de ne stocker que la chaleur latente puisque pour arriver au point de changement de phase, le matériau doit subir une montée en température, stockant inévitablement une part d'énergie sensible.

III.5 Déroulement la solidification :

III.5.1 la décharge :

Le stockage thermique est généré par la chaleur sensible ; Une fois que la fusion est terminée, et la paraffine devient totalement à la phase liquide.

La température de l'eau pendant la décharge est prise de manière égale à la température au début de la charge ; elle est de 28°C environ. Le puisage de l'eau chaude de la cuve par le haut, et le remplissage par le bas de la cuve de stockage. Après le déclenchement du système de refroidissement, la phase de solidification est amorcée.

Le dispositif comporte essentiellement la cuve de stockage et les systèmes hydrauliques suivants : deux réservoirs de capacité de 5 litres, des circulateurs, des vannes et des tuyaux flexibles (voir la figure III.19).

Les circulateurs sont reliés chacun au sens de circulations du fluide froid ou chaud pour l'injection et le soutirage simultanément. Les systèmes de vannes permettent de contrôler et de garder le même débit.

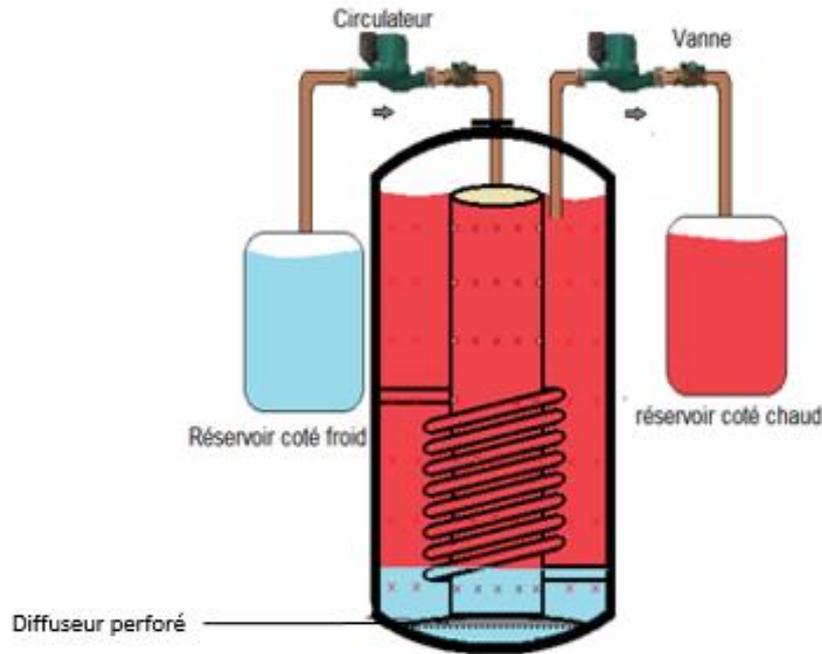


Figure III.19 : La boucle hydraulique expérimentale de la phase de décharge

III.5.2 Évolution de la température du MCP suivant le diamètre au cours d'une décharge :

La figure (III.20) montre les profils de températures pendant le processus de solidification (les courbes de la température de MCP suivant le diamètre).

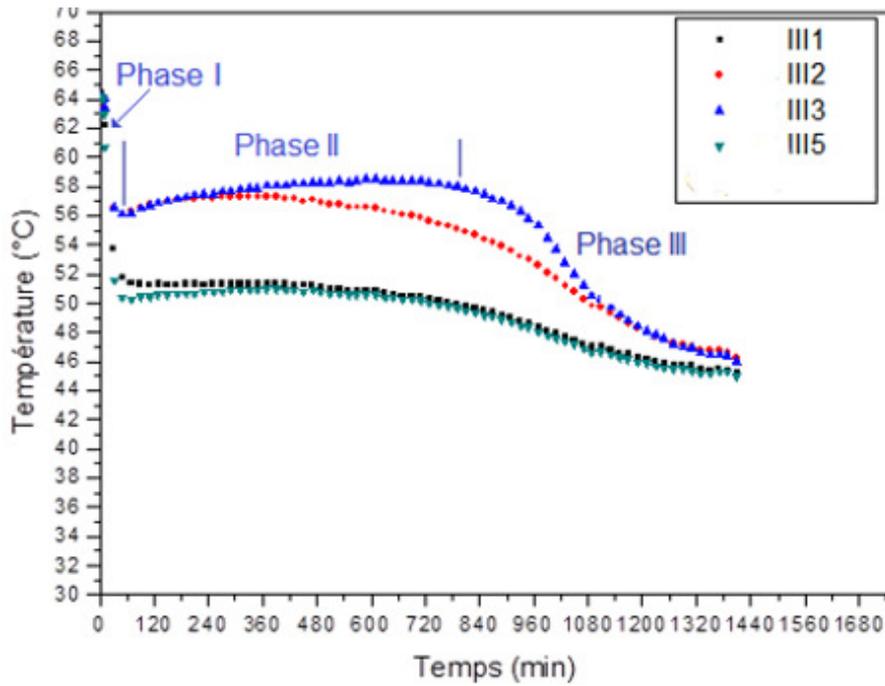


Figure III.20 : Évolution de la température du MCP suivant le diamètre au cours de décharge de capacité de 5 litres.

La forme caractéristique des courbes de températures qui se composent de trois phases principales :

1. un refroidissement rapide et quasiment-linéaire ceci est dû au fait que les thermocouples sont près de la paroi et correspondant à la libération de la chaleur sensible de MCP liquide.
2. une stabilisation de la température durant la solidification qui correspond au changement de phase.
3. Troisième phase le refroidissement du MCP solide représenté sur la courbe ou la pente est moins importante à la première phase (la température diminuée lentement). Ceci est dû au fait que la paraffine sur la paroi forme une couche solide qui empêche l'échange par convection et en plus la résistance thermique devient plus grande avec l'augmentation de l'épaisseur de la phase solide du MCP, ce qui implique également la paraffine à de faibles coefficients de conductivité thermique.

III.5.3 Évolution de la température du MCP suivant la hauteur pendant la décharge :

Les évolutions des températures du MCP en décharge suivant la hauteur de la cuve de stockage sont présentées dans la figure (III.21)

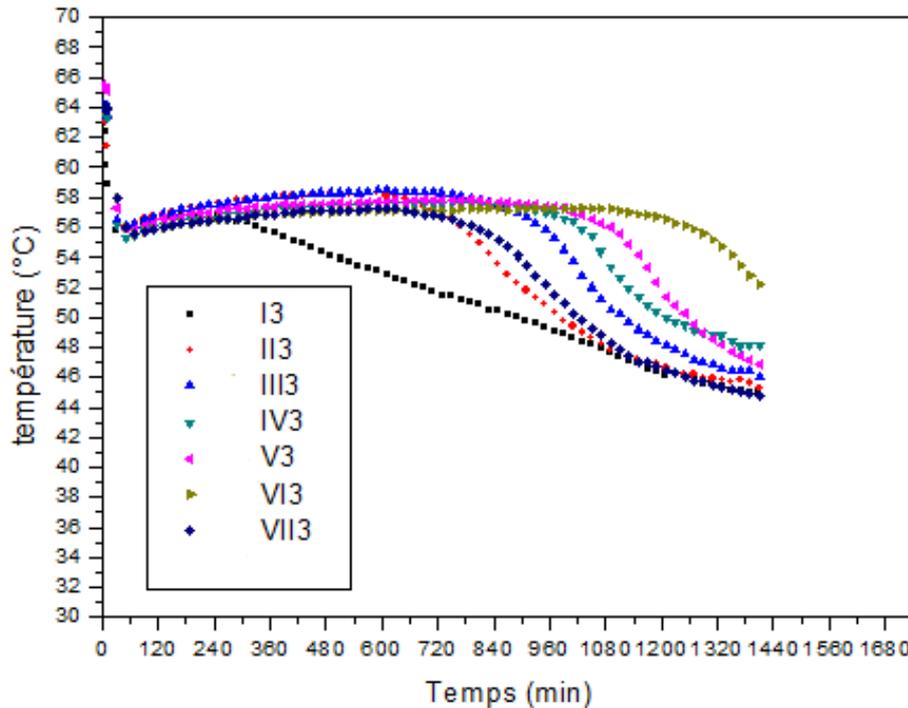


Figure III.21 : Évolution de la température du MCP suivant la hauteur au cours de décharge. Capacité de 5 litres

On observe que les températures chutent simultanément. Après 40 min, l'ensemble des courbes sont presque confondues à la température de solidification au voisinage de 56 °C. Ce phénomène s'explique par l'échange de chaleur qui est purement **conductif**.

Par la suite, on constate la superposition des courbes de chaque hauteur. A titre exemple, la durée de la solidification du bas est de 240 min (courbe en noir) et celle du haut est de 1080 min environ.

Le processus de la solidification dure beaucoup plus longtemps que la fusion vu que l'effet de la convection est négligeable et la conductivité thermique de la paraffine est faible (0.02W/mK) et que l'épaisseur de cette dernière augmente donc ça ralentit le

transfert thermique. Pour parvenir à ce problème, il faut prévoir une conception optimale du dispositif qui contient la paraffine pour réduire le **temps de décharge** (exemple de deux tubes concentriques, ou le matériau à changement de phase est dans l'espace annulaire et un fluide caloporteur à l'intérieur de tube)

III.5.4 Évolution de la position de l'interface liquide-solide :

La figure (III.22) illustre le profil de l'interface liquide- solide de la paraffine suivant le diamètre. Les positions du front de solidification sont représentées pour les temps suivants :

$t = 30\text{min}$, $t = 110 \text{ min}$, $t = 210 \text{ min}$, $t = 410 \text{ min}$, $t = 610 \text{ min}$, $t = 800 \text{ min}$ et $t = 1110 \text{ min}$.

La zone grise est la paraffine liquide et la zone blanche indique la paraffine solide.

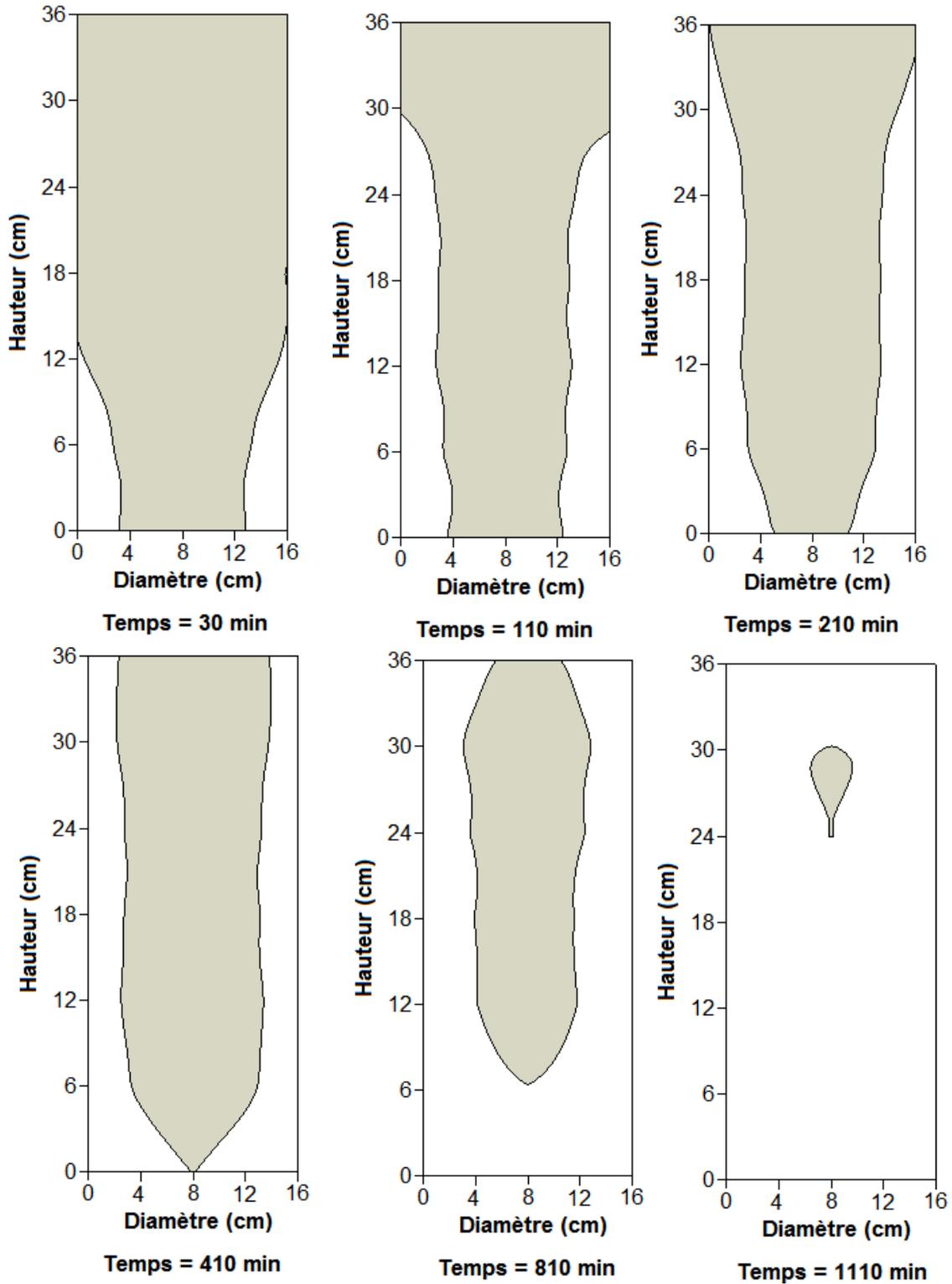


Figure III.22 : Position de l'interface liquide – solide pour des temps différents

On observe que le front est presque parallèle à la paroi d'échange de chaleur, ceci explique la prédominance de la conduction.

Au début du refroidissement, une couche de paraffine solide commence à se former sur la paroi. Cette dernière va isoler thermiquement la partie liquide de la paraffine, ce qui fait que la solidification continue lentement en raison de la mauvaise conductivité thermique de la paraffine solide. En plus la masse importante de la paraffine concentrée au milieu de la cuve avec une faible surface d'échange ralentit le transfert de chaleur.

On constate que le profil de la paraffine est influencé aussi non seulement par l'effet de la paroi du fond de la cuve et également par les pertes thermiques sur la partie supérieure. À la fin de la solidification à $t = 1110$ min une poche de paraffine reste sous forme liquide.

III.6 Conclusion :

A travers ce chapitre, les phénomènes qui se manifestent dans le processus de changement de phase solide- liquide (charge) et liquide-solide (décharge) a été suivi. Durant la fusion, le front se déplace parallèlement à la surface de la paroi, mais au fur et à mesure que la fusion se déroule, la convection naturelle dans le liquide provoque une augmentation de façon non uniforme du transfert de chaleur à l'interface. Donc l'augmentation de la vitesse de fusion qui influe sur le processus de changement d'état. Le phénomène de la stratification thermique a été observé.

Durant la solidification (décharge), la conduction est prédominante. La formation de MCP solide sur la surface d'échange ralentit le transfert de chaleur. Et que la plage de solidification n'est pas la même que la plage de fusion et que la solidification dure plus longtemps que la fusion.

Conclusion générale

Le stockage de chaleur est devenu aujourd'hui une nécessité qui s'impose au sein de l'industrie de l'énergie. L'énergie solaire reste la forme la plus exploitée dans le domaine du stockage. Il peut s'effectuer sous divers formes, surtout sous forme de chaleur sensible ou sous forme de chaleur latente. Le stockage d'énergie sous forme de chaleur est beaucoup moins couteux que sous sa forme électrique. Donc, vu l'importance de l'énergie solaire, la place qu'elle peut occuper dans l'énergétique future, il est amplement justifié de concentrer les efforts de recherche pour améliorer le rendement du stockage des systèmes actuels.

L'objectif du présent travail se situe dans le cadre d'une meilleure compréhension des phénomènes qui se manifestent durant le stockage thermique par chaleur latente.

Le travail entrepris dans cette étude consiste en trois chapitres essentiels. D'abord, nous avons exposé les fondements nécessaires à la compréhension du sujet. Une revue de la littérature sur les travaux antérieurs pour voir les progrès réalisés tant dans les études et la conception des divers systèmes de stockage de chaleur que dans le développement des connaissances en thermique et notamment dans l'analyse des phénomènes de convection et de conduction ainsi que les études en rapport sur les évolutions sur l'utilisation des MCP.

L'analyse des résultats obtenus en ce qui concerne l'étude des matériaux à changement de phase a permis de déduire que le choix des MCP pour le stockage thermique est effectué en fonction des critères. Mais peu de ces MCP peuvent satisfaire ces critères et donc beaucoup d'inconvénient au stockage de chaleur. Une classification de ces matériaux a été faite qui nous montre leur potentiel important pour les applications de stockage thermique ; de ce fait les applications principales des MCP en industrie sont nombreuses : industrie agroalimentaire en limitant les variations de température ; secteur médicale ; isolation des bâtiments ; stockage d'énergie thermique.

D'après l'étude de l'énergie thermique et selon le principe de fonctionnement de chaque type de stockage nous abordons à déduire que l'utilisation du stockage par chaleur latente permet de réduire les volumes de stockage par rapport au stockage par chaleur sensible, avoir des densités importantes de stockage et avoir des températures de changement de phase (cristallisation et fusion) quasiment constante. En revanche, les

technologies à utiliser pour le transfert de chaleur et la sélection des matériaux sont plus complexes.

La troisième partie qui consiste à une étude expérimentale dans le but d'étudier et de suivre les phénomènes de fusion et de solidification du MCP à l'intérieur d'une cuve de stockage. L'analyse a porté sur la distribution et les évolutions au cours du temps de la température à l'intérieur du MCP. Les expériences montrent que la plage de solidification n'est pas la même que la plage de fusion, le transfert de chaleur par conduction est prédominant durant la décharge et le temps de solidification est beaucoup plus important que la celui de la fusion.

REFERENCES

- [1] **Lane, 1993.** Solar Heat Storage: Latent Heat Material, volume 1: Background and scientific Principles .USA: CRC.
- [2] **Telkes.M, 1975.** Thermal storage for solar heating and cooling. Proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings. Charlottesville, Virginia, USA.
- [3] **Sari et autres 2000 Sari, A Kaygusuz, K 2000.** Energy and exergy calculations of latent heat storage systems Energy Sources22:117-126.
- [4] **El Dessouky et autres 1997 El-Dessouky, H, Al-Juwayhel, F 1997.** Effectiveness of a thermal energy storage system-using phase change materials. Energy Conversion and Management 38:601-617.
- [5] **Abhat 1983.** Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage. Heat storage Materials. Solar energy vol.30, No 4, pp.3 13-332.
- [6] **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.
- [7] **Bransier 1979** Stockage Périodique par chaleur Latente, Aspects Fondamentaux Liés à la Cinétique des transferts, In : J Heat Mass Transfer, vol 22 pp 875-883.
- [8] **Farid M Husian RM 1990.** An electrical storage heater using the phase change method of heat storage. Energy Conversion and Management 30(3): 219-230.
- [9] **Laoudi A Lacroix M Galanis,** Thermal performance of a planar latent energy storage unit with electric heat sources. Fundamentals of phase change: conf. organized by ASME. Chicago. Nov 13-18-1994.
- [10] **K. A. R. Ismail, O.C. Quispe, J. R. Henrõquez**« A numerical and experimental study on a parallel plate ice bank». Applied Thermal Engineering, Vol. 19, pp. 163-193, (1999)
- [11] **G. Hed et R. Bellander.** «Mathematical modeling of PCM air heat exchanger». Energy and Buildings, Vol. 38, pp. 82–89, (2006).
- [12] **Zouhir Younsi, Annabelle Joulin, Laurent Zalewski, Stéphane Lassue, et Daniel Rouse,** «Analyse numérique de la fusion de matériaux à changement de phase dans une enceinte rectangulaire chauffée par une paroi latérale », Faculté des Sciences Appliquées de l'Université d'Artois, Canada, 2009, Lille.
- [13] **HOUSSEYNATOU BAH (2010)** Etude des effètes de l'épaisseur de la paraffine sur les performances d'un chauffe-eau solaire à changement de phase. Laboratoire d'énergie

appliquée, école supérieure polytechnique université cjeikh anthadiop B.P :5085, DAKAR
FAN SENAGAL

- [14] **S.BOUADILA 2011** Study of storage thermal energy of latent heat application to the solar collector mars TUNISIA.
- [15] **Farid M et Kanzawa A 1989** Thermal Performance of a Heat Storage Module using PCM's with Different Melting Temperatures: Mathematical Modeling ASME J Solar Energy Eng, vol 1 11, pp 152-157.
- [16] **Farid, M Kim, et Kanzawa, A 1990** Thermal Performance oh a heat Storage Module using PCM's with Different Melting Temperatures. Experimental ASME J Solar Energy Eng vol 1 12; pp 125-132.
- [17] **Y. Zhang, A. Faghri** «Semi-analytical solution of thermal energy storage system with conjugate laminar forced convection». Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39, N° 4, pp. 717-724, (1996).
- [18] **ESEN 1995** cold storage with PCM spinger Verlag 308 page.
- [19]**K. A. R. Ismail, M. M. Abugderah.** «Performance of a thermal storage system of the Vertical tube type». Energy Conversion and Management, Vol. 41, pp. 1165-1190, (2000).
- [20] **HAMID EL QARNIA (2005)** Analyse de transfert de chaleur dans un système de stockage. Marrakech MAROC.
- [21]**A. Trp & al.** « Analysis of the influence of operating conditions and geometric parameters On heat Transfer in water-paraffin shell-and-tube latent thermal energy storage unit», Applied Thermal Engineering, 26 (2006) 1830-1839.
- [22] **T .ANICA & al.** « Analysis of the influence of operating conditions and geometric parameters on heat transfer in water-paraffin shell-and-tube latent thermal energy storage unit», Applied Thermal Engineering, 26 (2006) 1830-1839.
- [23] **H. Ait Adine, H. El Qarnia.** « Numerical analysis of the thermal behaviour of a shell-and-tube heat storage unit using phase change materials». Applied Mathematical Modelling, Vol. 33, pp. 2132–2144, (2009).
- [24] **Prashanth Sridharan** .«Aspect ratio effect on melting and solidification during thermal energy storage graduate theses and dissertations», florida 3 juillet 2013.
- [25] **Radouane El Bahjaoui, Hamid El Qarnia et El Khadir Lakhel** « Etude numérique d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion chauffé par un fluide en

écoulement pulsé », Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences Semlalia, Département de physique, 2013.

[26] **Yaghi 1995**. Storage of thermal energy for effective use of waste heat from industries. Journal of material processing technology, 48, pp 739-804.

[27] **Bédécarrats J. P., F. Strub, B. Falcon and J. P. Dumas**, «Phase change thermal energy storage using spherical capsules performance of a test plan», International Journal of Refrigeration, 19, pp. 187-196, 1996.

[28] **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, 28 th August – 1 st September, 2000, Stuttgart, Germany, 1: 375-380

[29] **A. Benmansour et M.A. Hamdan** « Simulation du Stockage de l'Energie Thermique dans un Lit Fixe de Sphères Contenant un Matériau à Changement de Phase », Département de Chimie, Faculté des Sciences, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran 2001.

[30] **Ismail K., J. R. Henriquez**, « Solidification of pcm inside a spherical capsule », Energy Conversion & Management, 41, pp. 173-187, 2000.

[31] **ARKAR et S. Medved (2005)** Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with spheres.

[32] **T. Kouskso, F. Strub, J. Castaing Lasvignottes, A. Jamil, J.P. Bédécarrats**, **Second law** « analysis of latent thermal storage for solar system », Laboratoire de Thermique et Procédés, Avenue de l'Université', 2007 .

[33] **BENMANSOUR (2009)** Réponse dynamique d'un lit fixe pour le stockage de l'énergie thermique utilisant un matériau à changement de phase, ORAN-ALGERIE

[34] **WALID FOU DHIL et all (2012)** « Simulation numérique du stockage thermique par chaleur sensible et latente dans un local poreux » : Analyse des performances et comparaison.

[35] **Laura Solomon, Ali F. Elmozughi, Alparslan Oztekin, Sudhakar Neti** « Effect of internal void placement on the heat transfer performance –Encapsulated phase change material for energy storage » Lehigh University, Bethlehem, PA 18015, USA, 438-447, (2015).

[36] **Peng et al (2014)** Thermal energy storage for direct steam generation

[37] **Shobo A. B, Mawire A, Okello D** “Experimental thermal stratification comparison of two storage systems” Energy Procedia 142 (2017) 3295-3300.

- [38] **L.O.salyer** and **a.k.sircar** «phase change materials for heating and cooling of residential building, proceeding of the 28th intersociety energy conversion engineering conference», reno, nevada.12-17 aout 1990
- [39] **Armand ERB**, utilisation des MCP dans le batiment 3E Aout 2011
- [40] **WALID FOU DHIL, Sadok Ben Jaballah, Belgacem Dhifaouin, Yvan Dutil, Daniel Rouse** «simulation numérique du stockage thermique par chaleur sensible et latente dans un canal poreux analyse des performances et comparaison» 2eme Congres de l'association Marocaine en thermique, tunisie.
- [41] **MONSIEUR JEAN-PIERRE Bédécarrats** Maitre de conférences «utilisation rationnelle de l'énergie par les techniques de stockage et de transport du froid par chaleur latente « L'université de Pau et des pays de l'Adour 2010.
- [42]. **A. F. Regin, S.C. Solanki et J.S. Saini** «Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews», Vol. 12, pp. 2438-2458, 2008.
- [43]. **M. Pierre Pedro** «développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique». Institut national polytechnique de Toulouse, le lundi 9décembre 2013.
- [44] **CHEIK SECK** «analyse et modélisation du comportement thermique d'un système de préchauffage d'air neuf pour l'habitat» intégrant un matériau à changement de phase, univesité d'Artois.
- [45] **C.K Jotshi ,goswami and j tomlinson et al (1992)** «solar thermal energy storage in phase change materials » in proc 1992 ASES Annual Conf USA 1992
- [46] **M. Nadjiba** «stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide» Thèse de doctorat, Univesité Mohamed Khider – BISKRA 2016
- [47] **Amina Akrouche** «Etude de stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase » Université de Pau des pays de l'Adour 2010-2011.
- [48] SHARMA A, TYGI V, Chen C R, BUDDHI D 2009. Review on thermal Energy Storage with phase change Materials and Applications. Rnewable ans sustainable Energy Reviews.
- [49] **C.K Jotshi D,Y Goswami ana J J Tomlinson** “Solar thermal energy storage in phase change materials, in proc. 1992 ASES Annual Conf USA, 1992.
- [50] **Sari,A 2004** “Form-stable paraffi/high density polyethylene composite as solid-liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties” Energy conversion and Management 45: 2033-2570.

- [51] **MARINE J.M, ZELBA B, CABEZA L.F, MEHKING H 2005**. Improvement of a thermal energy Storage Using Plates with Paraffin-Graphite Composite. International journal of heat and Mass Transfer 48: 2561-2570.
- [52] **AHMED MAHA 2005 et all** “Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. Energy and building vol 38, issue 6 .
- [53] **X.Py R olives S mauron 2001** Paraffine/ porous- graphite matrix composite as high and constant power thermal storage material international journal heat and mass transfer vol 44 pp 2727-2737
- [54] **BUDDHI D, SAWHNEY R.L 1994** Proceeding of thermal energy storage and energy conversion. School of energy and environmental studies. Devi Ahilya University Indore, India Ferbruary 24-25
- [55] **S.M Hasnian** Review on sustainable thermal energy storagetechologies Part 1 : Heat storage materials and techniques, Energy research vol 39(11) No 03, pp 201-205.
- [56] **I.O Salyer and A.K Sircar 1990** phase change materials for heating and cooling of residential buildings, proceedings of the 28th intersociety energy conversion engineering conference 12-17 Aout, NEVADA
- [57] **I.O Salyer and A.K Sircar 1993** : Development of phase change technology for heating and cooling of resedential builings ans other applications, proceedings of 28th intersociety energy convesion engineering conférence 8-13 Aout, Atlanta.
- [58] **Hawlder et all 2002**. Micro encapsulated phase change materials in procceding of 9th APCCHE congress ans Chemaca, new Zealand.
- [59] **B. DJAOUED BEKKOUCHE Ismail** simulation numérique du stockage de l'énergie solaire par chaleu latente mémoire pour l'obtention du diplôme de MASTER Université abou baker belkaid telemcen 2014.
- [60] **DJ.LAFRI et all (2019)** Experimental investigation on combined sensible and latent heat storage in two different configurations of tank filled with PCM.