

3.1. Généralités :

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant de transférer la chaleur entre un ou plusieurs fluides ayant une température différente. Généralement, le transfert de chaleur se fait par l'intermédiaire d'une paroi solide sans que les fluides ne se mélangent. De nombreuses applications nécessitent l'utilisation d'un échangeur de chaleur par exemple le radiateur d'une automobile, un condenseur, un évaporateur, etc.

Il existe en gros trois classes d'échangeurs de chaleurs :

1. Echangeurs a transferts directs.
2. Echangeurs de stockage thermique.
3. Echangeurs a contacts directs.

3.2. Classification et Description des échangeurs de chaleur :

La classification des échangeurs de chaleur par type de construction comprend quatre principales constructions : tubulaire, à plaques, à surface augmentée et régénératifs. Il existe d'autres types de constructions disponibles, mais ceux-ci sont les principaux et les seuls abordés dans ce chapitre.

Les échangeurs tubulaires et à plaques utilisent seulement la surface primaire pour échanger la chaleur entre les fluides. Leur efficacité est normalement de 60 % ou moins et la surface de transfert de chaleur inférieure à $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Dans certaines applications, une efficacité de plus de 95 % est essentielle afin de limiter le volume et la masse. Les échangeurs de chaleur entre gaz et certains liquides ont un coefficient de transfert de chaleur très bas. Ceci implique une surface d'échange très grande. Une méthode afin d'augmenter la surface d'échange est d'ajouter des ailettes sur un ou les deux côtés. Cet ajout permet d'augmenter de 5 à 12 fois la surface d'échange. Les échangeurs à plaques et ailettes et les échangeurs à tube et ailettes sont les plus communs.

3.2.1. Échangeurs à plaques avec ailettes :

Ce type d'échangeur de chaleur consiste à ajouter des ailettes ondulées entre des plaques parallèles. Les ailettes sont généralement de forme triangulaire ou rectangulaire. La figure 3.1 montre un exemple. Parfois, les ailettes sont incorporées dans un tube plat avec des arrondis, ce qui élimine le besoin de barres de soutien.

D'autres géométries sont possibles selon le type d'échangeur de changeur à plaques. Dans des applications gaz-liquide, les ailettes sont généralement utilisées seulement du côté gaz de l'échangeur.

Les échangeurs à plaques avec ailettes sont regroupés en trois catégories : ailettes non coupées, comme triangulaires ou rectangulaires, ailettes non coupées avec courbe et ailettes interrompues.

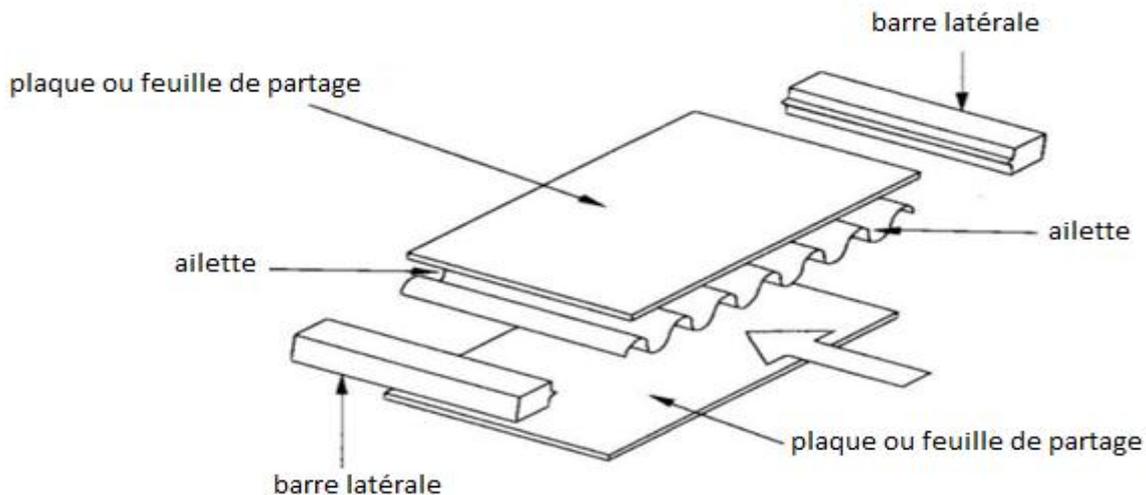


Figure 3.1 : Composantes de base d'un échangeur de chaleur à plaques avec ailettes.

3.2.2. Échangeurs tubulaires avec ailettes :

On retrouve deux catégories de tubes à ailettes : les tubes conventionnels et les tubes de spécialité.

Dans un tube conventionnel, le transfert de chaleur entre les fluides se fait par conduction à travers la paroi du tube. Dans un échangeur de spécialité, le transfert de chaleur se fait par l'intermédiaire d'un tube, dans lequel un liquide passe de gaz à liquide avec un effet convectif, on nomme ce tube caloduc.

3.2.2.1. Échangeurs tubulaires à ailettes :

Dans un échangeur liquide-gaz, le coefficient de transfert du côté du liquide est généralement plus grand que du côté du gaz. Afin d'obtenir une conductance balancée des deux côtés pour un échangeur de chaleur le plus petit possible, des ailettes sont ajoutées du côté gaz de l'écoulement. De plus, si la pression est haute pour un fluide, il est généralement économique d'utiliser des tubes.

Les tubes les plus communs sont ronds ou rectangulaires, par contre, des tubes elliptiques sont aussi utilisés. Les ailettes sont généralement placées sur l'extérieur du tube et sont fixées mécaniquement, collées, soudées, brasées ou extrudées.

Dépendamment du type d'ailettes, les échangeurs de chaleur tubulaires à ailettes sont regroupés dans les trois catégories suivantes : tube simple à ailettes, tubes à ailettes continues et tubes longitudinaux. Il existe également des tubes avec ailettes internes.

Un échangeur de chaleur refroidi à l'air consiste en un tube avec ailettes dans lequel un fluide chaud circule et l'air ambiant circule sur la surface externe.

3.2.2.2. Échangeurs de chaleur à caloducs :

Ce type d'échangeur est similaire à un tube à ailettes à l'exception que le tube est un caloduc. Le fluide froid circule d'un côté et le fluide chaud de l'autre. La figure 3.2 montre un échangeur de chaleur à caloducs. Le principe de fonctionnement d'un caloduc est que l'une des extrémités est chauffée par une source extérieure, laissant s'évaporer le fluide interne. La pression interne du caloduc augmente puis se dirige vers le côté froid où il se condense et se dépose sur les parois. Avec la hausse de pression, la condensation retourne vers l'évaporateur par capillarité lorsque le caloduc est bien dimensionné. La figure 3.3 illustre ce principe. Ce type d'échangeur est généralement utilisé pour des applications air-air dans la récupération de chaleur perdue.

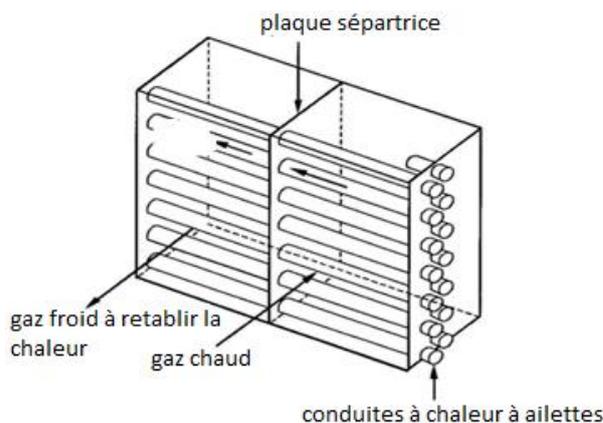


Figure 3.2 : Échangeur de chaleur à caloducs.

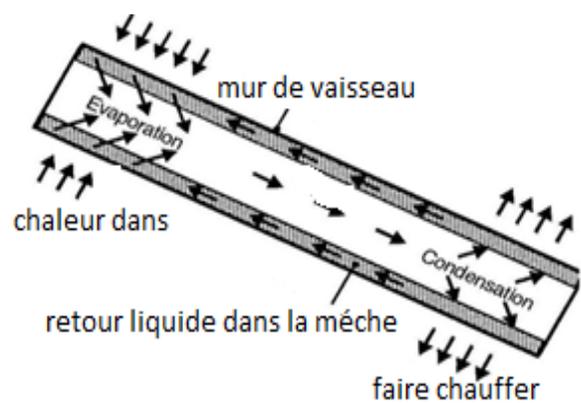


Figure 3.3 : Principe d'un caloduc.

3.3. Les technologies d'échangeurs avec PCM :

3.3.1. Définitions :

La charge d'un système de stockage s'accompagne de la fusion du MCP, tandis que la décharge s'accompagne de la solidification. Un système est dit totalement chargé ou déchargé si le MCP est entièrement fondu ou solidifié, respectivement. Une notion importante, qui va être utilisée dans la suite, est celle de distance caractéristique de solidification. Il s'agit de l'épaisseur maximale de la couche solide de MCP dans un système donné, lorsque celui-ci est complètement déchargé.

Dans le paragraphe introductif, il est fait mention du facteur de capacité. Cette grandeur est définie comme étant le rapport du volume de MCP sur le volume total, interne, du système. Il s'agit donc uniquement du volume de MCP, du fluide caloporteur et de l'échangeur s'il y en a un. Il n'est pas tenu compte de l'épaisseur des parois externes, de l'isolant, des distributeurs. Cette variable a pour objectif de rendre possible une comparaison des technologies d'échangeur en terme de densité énergétique. A volume équivalent, elle permet de définir quel échangeur contient le plus de MCP. Mathématiquement, cette variable est définie telle que :

$$CF = \frac{V_{MCP}}{V_{MCP} + V_{\text{échangeur}} + V_{FC}} \quad (3-1)$$

La densité de puissance d'une installation correspond à la puissance moyenne du système divisée par le volume interne total de celui-ci (volumes du MCP, de l'échangeur et du fluide caloporteur).

La *mushy zone* est la zone du matériau qui est en train de fondre/se solidifier. Le passage de l'état solide à l'état liquide se fait progressivement et s'accompagne d'une variation d'enthalpie et de viscosité. Parfois, le changement d'état s'accompagne d'une modification optique : certains composés sont ainsi opaques et blancs à l'état solide et transparent à l'état liquide (Figure 3.4). La *mushy zone* est la zone intermédiaire (Figure 3.5).

Enfin, la conductivité thermique effective d'un matériau composite est une fonction complexe des conductivités thermiques des différentes phases, de leur géométrie, de leur répartition au sein du milieu, des contacts entre les phases. Cette grandeur sera utilisée pour rendre compte de la conductivité thermique du milieu composite constitué du MCP, solide et

liquide, de la structure de l'échangeur et des moyens d'intensification des transferts thermiques utilisés.

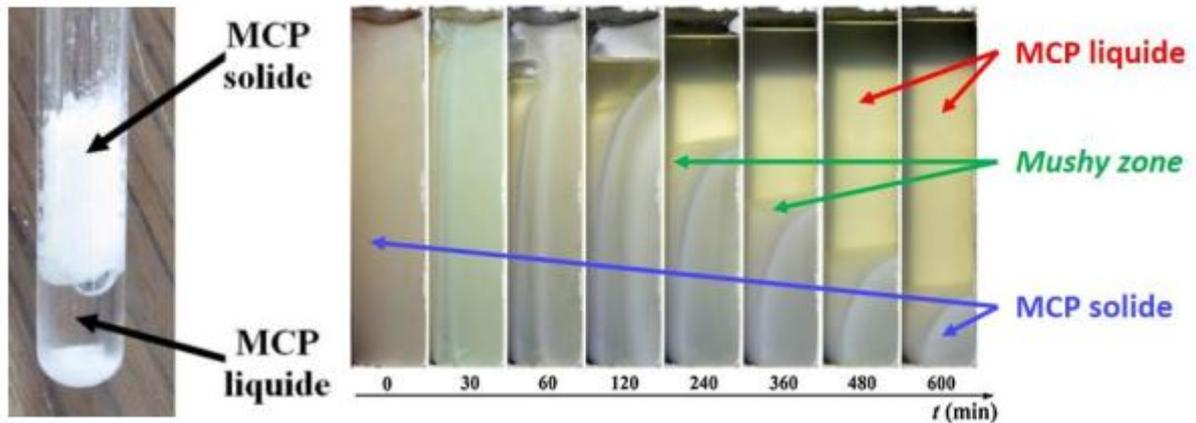


Figure 3.4 : Paraffine.

Figure 3.5 : Visualisation de la fusion d'une paraffine. La *mushy zone*, entre le solide et le liquide est nettement visible.

3.3.2. Les échangeurs « tubes et calandre » :

Cette technologie d'échangeur est bien connue : une calandre dans laquelle circule un fluide est parcourue par un faisceau de tubes dans lesquels un autre fluide s'écoule. Les deux fluides échangent de l'énergie par conduction à travers l'épaisseur des tubes. Dans le cas du stockage thermique cette technologie est adaptée (Figure 3.6), il n'y a plus d'échange entre deux fluides en mouvement, mais entre un fluide caloporteur qui circule dans les tubes et le MCP qui est fixe dans la calandre.

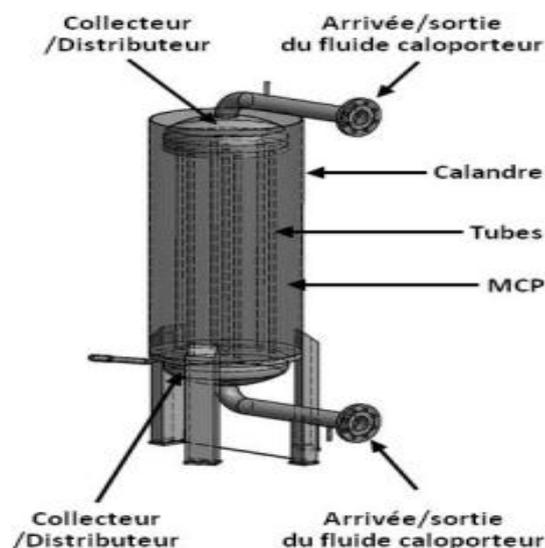


Figure 3.6 : Exemple de système de stockage de type tubes & calandre.

Lors de la charge, le fluide caloporteur arrive à une température supérieure à la température de fusion du MCP et cède de l'énergie à celui-ci, ce qui entraîne sa fusion ; lors de la décharge, le fluide caloporteur pénètre dans l'échangeur à une température inférieure à la température de fusion du MCP et récupère l'énergie précédemment stockée, ce qui entraîne la solidification du MCP.

Un des problèmes majeurs de cette technologie réside dans la faible conductivité thermique de la majorité des MCP. Lors de la phase de solidification, une couche de MCP se forme sur les parois du tube et dégrade considérablement les transferts thermiques entre le fluide caloporteur et le MCP encore liquide. Au cours de la fusion, bien que la convection naturelle qui se met en place dans le MCP soit bénéfique aux transferts thermiques, les échanges thermiques restent médiocres.

La cinétique de changement de phase est trop lente pour que le système puisse fournir des puissances de décharge acceptables industriellement et nombreux sont les auteurs à dire qu'il faut remédier à ce problème. Deux solutions s'offrent alors : soit il faut utiliser un grand nombre de tubes de petites dimensions afin de conserver des distances caractéristiques de solidification faibles, soit il faut améliorer la conductivité thermique effective du MCP.

3.3.3. Les échangeurs à plaques :

Comme les systèmes à tubes et à calandre, les échangeurs à plaques traditionnels sont modifiés pour pouvoir être utilisés comme système de stockage. Au lieu d'être parcourus par deux fluides caloporteurs, il n'y a plus qu'un fluide caloporteur qui s'écoule dans l'échangeur à plaques et qui vient échanger de l'énergie avec le MCP (un canal sur deux). En première approche, ce système peut être assimilé à de la macro encapsulation de MCP dans les plaques d'un échangeur.

Il est indispensable d'adapter les systèmes existants à une application MCP, sans quoi les fractions massique et volumique de MCP dans l'échangeur seront extrêmement faibles : 2 % et 9 % respectivement pour l'échangeur T2-BFG de Alfa Laval testé par Medrano et al. La conception de ces systèmes a pour difficulté principale la gestion des pressions dans l'échangeur à plaques. Comme pour la macro encapsulation, il s'agit de plaques rigides et l'expansion volumique du MCP lors de la fusion est absorbée par un gaz, ce qui implique de

remplir partiellement les plaques de gaz. Une autre solution consiste à utiliser des plaques déformables, qui absorbent le changement de volume en réduisant la section de passage du fluide caloporteur. La plasticité des plaques doit alors être considérable étant donné que certains MCP subissent des changements de volume de plus de 10 %.

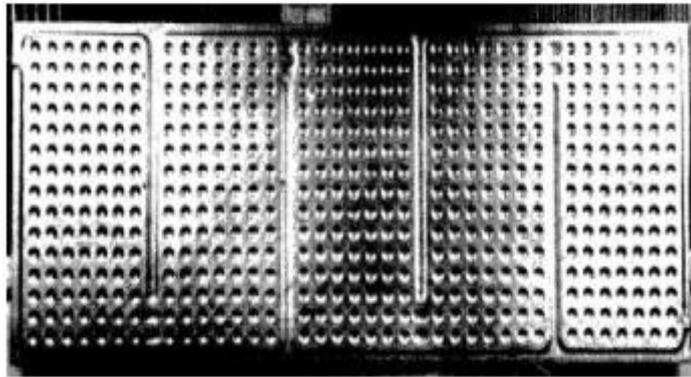


Figure 3.7 : Plaque d'échangeur utilisée par Bricard.

Un prototype d'échangeur à plaques a été conçu au CEA de Grenoble par Bricard en 1982. Le système étudié est un réservoir contenant 525 kg d'anhydride phtalique (MCP) dans lequel sont plongées quatre plaques d'échangeurs (Figure 3.7), de 12 mm d'épaisseur et espacées de 60 mm, disposées horizontalement dans le sens de la longueur et verticalement dans le sens de la largeur. Le coefficient d'échange global de l'échangeur pendant la fusion est faible ($\sim 60 \text{ W/m}^2/\text{K}$). Une telle technologie peut facilement être améliorée afin de rajouter des ailettes sur les plaques, par exemple. Les performances globales affichées sont néanmoins bonnes : le facteur de capacité est de 85 % ; la densité énergétique est de l'ordre de 55 kWh/m^3 ; la densité de puissance est de $16,5 \text{ kW/m}^3$.

3.4. Transferts thermiques dans les MCP :

3.4.1. La conduction de la chaleur :

La conduction de la chaleur est le phénomène physique lié au changement de température dans un matériau homogène et non en mouvement. La conduction thermique correspond à l'agitation des molécules et se transmet de proche en proche comme une onde vibratoire. Elle intervient avant et après le changement d'état du matériau. On parle de chaleur sensible, comme expliqué dans le chapitre précédent. Ce phénomène est modélisé par l'équation de la chaleur (Biot en 1804 et Fourier en 1822), qui s'exprime de la façon suivante, dans sa version

la plus simple (sans génération de chaleur interne), avec des propriétés physiques considérées

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(-k\nabla T) = 0 \text{ avec } h = \rho C_p T \quad (3-2)$$

Dans cette relation, k désigne la conductivité thermique ($W/(m.K)$), ρ la masse volumique (kg/m^3), et C_p la capacité calorifique du PCM ($J/(kg.K)$). La fonction h (J/m^3) est la fonction d'enthalpie associée à l'élévation de la température par conduction dans le matériau.

3.4.2. Le changement d'état solide-liquide avec l'équation de la chaleur :

Dans le cas où le matériau absorbe ou libère de la chaleur (c'est le cas lors de la fusion), il faut ajouter un terme source à l'équation de la chaleur pour respecter le bilan énergétique. La relation ci-dessous n'est plus nulle mais devient :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T + \nabla(-k\nabla T) = Q \quad (3-3)$$

Le terme source Q (W/m^3), est au cœur de la description mathématique du changement d'état du PCM. Dans la littérature, le modèle enthalpique est le plus couramment utilisé pour décrire Q , mais il introduit une discontinuité que nous proposons de contourner par une autre formulation.

3.4.2.1. Description du changement d'état avec le modèle enthalpique :

Le modèle enthalpique a été introduit dans l'objectif de simplifier l'écriture du problème de Stefan en partant du principe que les mêmes équations régissent les transferts de chaleur dans les phases liquide et solide. Il est alors question de distinguer une zone appelée

« mushy » en anglais, que l'on pourrait traduire par « détrempée », en référence au solide mou en cours de fusion. Cette zone est source d'instabilités numériques et doit par conséquent être de fine épaisseur et parfaitement maillée pour le calcul numérique. Les équations du modèle enthalpique sont données par Voller (Voller 2008) en fonction de l'évolution de la fraction totale de liquide dans le volume du PCM.

$$Q = -\rho L \times \frac{df_L(T,t)}{dt} \quad (3-4)$$

Avec L la chaleur latente de fusion du PCM (J/kg) et f_L la fraction de liquide. Dans le cas d'un changement d'état isotherme, la fraction de liquide $f_L(T,t)$ est donnée par l'expression discontinue suivante :

$$f_L(T, t) = \begin{cases} 0 & \text{solide} & T < T_{fusion} \\]0,1[& \text{mushy} & T = T_{fusion} \\ 1 & \text{liquide} & T > T_{fusion} \end{cases} \quad (3-5)$$

Cette méthode décrit parfaitement la théorie du changement d'état d'un PCM mais pose des problèmes de résolution numérique car elle ne permet pas d'exprimer la continuité entre les différentes valeurs attribuées à la fraction de liquide en fonction de la température. C'est la raison pour laquelle une autre formulation est étudiée.

3.4.2.2. Modèle retenu pour décrire le changement d'état :

Une formulation mathématique continue de l'évolution de la fraction de liquide est proposée. En partant du principe que le changement d'état est apparenté à une transformation de type cinétique chimique, l'expression 3.6 est le produit d'une constante, qui pilote la vitesse de transformation, d'un facteur mettant en jeu la température, et d'un facteur mettant en jeu la fraction de liquide.

$$\frac{df_L}{dt} = Cst \times (T - T_{fusion}) \times (1 - (2f_L - 1))^2 \quad (3-6)$$

3.4.3. La convection naturelle :

La convection naturelle est un phénomène entraînant des mouvements dans une phase fluide par différence de masse volumique (PCM liquide) et accélérant les transferts de chaleur. Elle est régie par les équations de Navier-Stokes. Ces équations sont très coûteuses numériquement parlant (temps de calcul très long) et c'est la raison pour laquelle la convection naturelle est négligée lorsque cela est possible. Afin de savoir si la convection naturelle joue un rôle important, il faut calculer la valeur du nombre de Rayleigh qui compare l'influence de la convection par rapport à la conduction. Il s'exprime de la façon suivante :

$$Ra = \frac{\alpha \rho g (T_{paroi} - T_{\infty}) R^3}{\mu \left(\frac{k}{\rho C_p} \right)} \quad (3-7)$$

Avec α l'expansion volumique (K-1), μ la viscosité dynamique du PCM (Pa.s), g la gravité et R la dimension caractéristique (m), souvent la largeur ou le rayon du compartiment de PCM. Selon Pal et Joshi (Pal 1996), la convection naturelle apporte une contribution non négligeable aux transferts thermiques dès que Ra dépasse la valeur critique de $9,1.10^6$.

$$Ra_{crit} = 9,1.10^6$$

En multipliant, par une constante, la conductivité thermique du PCM liquide, certains chercheurs comme Dolado *et al.* (Dolado 2011) s'affranchissent du calcul des équations de Navier-Stokes.

L'approche choisie pour la thèse fait le choix de maintenir les propriétés du PCM indépendantes de la température et de prendre en compte, si besoin, la convection naturelle. Le couplage de la convection naturelle avec l'équation de la chaleur se fait en ajoutant le terme :

$$\rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T \quad (3-8)$$

Ce terme est fonction de la vitesse u du fluide en mouvement. L'équation de la chaleur devient :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) + \nabla(-k \nabla T) = 0 \quad (3-9)$$

La vitesse est calculée par les équations de Navier-Stokes, ici écrites en considérant l'approximation de Boussinesq (la masse volumique ne dépend que de la température, et les forces hydrostatiques sont négligées) :

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} \quad \text{avec} \quad \vec{F} = \alpha \rho (T_{fusion} - T) \vec{g} \quad (3-10)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

Avec u la vitesse du fluide (m/s), μ la viscosité dynamique (Pa.s) et p la pression (Pa). Dans l'expression de la première équation de Navier-Stokes, le terme source F est ajouté. Il s'exprime comme le produit de l'expansion volumique α (K⁻¹), de la masse volumique, de la gravité g , et de la différence de température entre le liquide et la température de fusion qui est la température la plus froide à laquelle le liquide peut se déplacer. Cette formulation de F est la plus courante dans la littérature.

La deuxième équation correspond à la conservation de la quantité de mouvement. Cette équation permet d'assurer un équilibre entre le fluide chaud qui s'élève et le fluide froid qui descend un problème subsiste cependant. La convection naturelle n'est présente que dans la phase liquide du PCM. Or les équations de Navier-Stokes sont également présentes dans la phase solide (le logiciel utilisé ne permet pas de faire la distinction). La solution consiste alors à trouver un artifice de sorte que la vitesse calculée par les équations de Navier-Stokes dans le

solide soit nulle. Pour cela, la viscosité dynamique du PCM solide est fixée très grande (autour de 1000 Pa.s).

3.4.4. Conclusion sur les modes de transfert thermiques:

Les transferts thermiques dans les PCM correspondent au couplage de trois équations. Une pour les transferts de chaleur (conduction, convection), une pour le déplacement du PCM liquide (convection) et une pour la transformation du PCM de l'état solide vers liquide et inversement.

Elle est pour la première fois couplée à la convection naturelle. La viscosité dans le PCM solide est artificiellement élevée pour rendre négligeable l'influence de la convection naturelle. Le poids numérique (durée du calcul) des déplacements du PCM liquide est très important. Le calcul du nombre de Rayleigh permet de décider de l'importance de la convection naturelle en fonction de la dimension des compartiments de PCM.

3.5. Applications :

3.5.1. Amélioration de la stratification d'un ballon d'eau chaude sanitaire (ECS) solaire :

3.5.1.1. Stockage solaire thermique classique :

Le principal problème lié à l'utilisation de l'énergie solaire thermique concerne son stockage : la production d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) via la circulation d'eau au-travers de panneaux solaires est directement dépendante de l'ensoleillement. Cet apport énergétique à lieu que l'on en ait besoin (bénéfique) ou non (perte énergétique par surabondance). L'utilisation de MCP pour le stockage de cette énergie par chaleur latente permettrait de résoudre en partie ce problème :

- d'une part, la quantité d'énergie stockée dans un ballon de même volume sera plus grande avec un MCP qu'avec de l'eau seule ; il sera donc possible d'accumuler une plus grande quantité de chaleur que celle nécessaire à une seule journée d'occupation.
- par ailleurs, ne pouvant élever indéfiniment la température du volume de stockage (risque de vaporisation du fluide néfaste aux pompes de circulation), il est en revanche possible de stocker cette chaleur sous forme latente sans pour autant élever la température du matériau (en utilisant par exemple un MCP dont la température de

fusion se situe aux environs de 60°C ou 70°C). Cette chaleur supplémentaire accumulée sera cédée par la suite au réseau d'Eau Chaude Sanitaire.

3.5.1.2. Stockage solaire thermique avec utilisation de MCP :

Le principal problème de stockage de l'énergie au sein d'un ballon d'ECS solaire est l'absence de stratification (l'intégralité du volume d'eau chaude contenue dans le ballon n'est que rarement prélevée en une seule fois) : le volume d'eau à l'intérieur du ballon a tendance à homogénéiser sa température lors de son retour et de son départ vers les panneaux. Une fois une température trop basse atteinte (par exemple 40°C), il n'est plus possible d'utiliser cette eau pour le circuit d'ECS. Pourtant, il suffit que cette chaleur soit "mieux répartie" pour que l'on puisse encore puiser de l'eau à une température convenable (un ballon de 100L à 40°C contient la même quantité d'énergie que 2 ballons de 50L aux températures respectives de 30 et 50°C).

L'utilisation de MCP permet alors la création de "couches stratifiées" dont les températures se situeront aux environs des températures de fusion des différents matériaux utilisés. Ainsi, un puisage intermittent ou ponctuel d'ECS entraîne la baisse de température de la partie haute du ballon dépourvue de nodules (=capsules) de MCP. En revanche, un puisage plus long entraîne l'utilisation de l'énergie contenue dans les couches inférieures du ballon, c'est-à-dire de la chaleur latente contenue dans les nodules. Ceux-ci se solidifient si nécessaire et cèdent ainsi leur énergie à l'eau de ville en la réchauffant.

3.5.1.3. Climatisation passive :

Certaines entreprises comme Dupont de Nemours proposent d'ores et déjà des panneaux d'inertie thermique utilisant des MCP. Ceux-ci se présentent sous forme de panneaux rigides contenant un mélange MCP-polymère. Ces panneaux sont généralement recouverts d'une feuille d'aluminium afin d'apporter de la rigidité structurelle, et éventuellement jouer le rôle de pare-vapeur métallisé dans le cas où ces panneaux seraient utilisés dans l'enveloppe du bâtiment. L'utilisation de tels matériaux présente un double intérêt :

- Du fait de leur grande compacité, les MCP permettent au bâtiment d'acquérir une grande inertie thermique et donc d'être moins sensible aux variations quotidiennes de température. Selon les études [37] [38], il serait possible de réduire de 7 à 8°C maximum les pics de température dans un bâtiment en utilisant de tels isolants.

- Le phénomène de changement de phase permet, quant à lui, d'absorber une partie de la chaleur de la pièce dès que la température ambiante dépasse la température de fusion du matériau. Cet écart de température entre le matériau et la pièce (réserve énergétique) va être réduit et la température de la pièce va tendre vers celle du matériau : dans la mesure où l'échange énergétique qui a lieu entre les 2 systèmes se fait de manière quasi isotherme pour le MCP, c'est l'environnement qui va voir baisser sa température afin de permettre la fusion du MCP.

Ainsi, en choisissant un MCP dont la température de fusion est de 20 ou 21°C, et en précisant que la température de consigne de chauffage pour un logement individuel est de 19°C maximum, nous pourrions accumuler de la chaleur dans les panneaux de MCP grâce au rayonnement solaire traversant les ouvertures (fenêtres, baies vitrées), sans pour autant consommer davantage de chauffage ni élever la température de la pièce. Cette chaleur pourra ainsi être restituée durant la nuit, dès que la température du bâtiment descendra en dessous de la température de solidification du MCP.

3.5.1.4. Intégration aux textiles : régulation thermique corporelle

Développés depuis maintenant plusieurs années par la recherche spatiale aux États-Unis, les MCP font depuis peu leur apparition dans l'industrie textile. Le but recherché est de réguler de manière passive la température corporelle en fonction de la température du milieu ambiant. Il devient alors particulièrement important de trouver des matériaux dont les températures de fusion et de cristallisation sont très proches de la température superficielle du corps humain.

Les matériaux utilisés pour ce genre d'applications sont généralement des paraffines, un matériau organique à chaîne carbonée linéaire, contenant une combinaison d'eicosane, d'octadécane, de non décane, d'heptadécane et d'hexa décane. Ces différents composés possèdent tous des températures de changement de phase différentes mais, une fois mélangés et encapsulés, ils se maintiennent à une température moyenne de 30-34°C, ce qui devient très confortable pour le corps humain.

L'utilisation de ces textiles peut se faire dans des domaines tels que :

- L'industrie automobile, dans laquelle le problème de la climatisation reste majeur : une intégration correcte de MCP à l'intérieur de l'habitacle permettrait une meilleure régulation des pics de chaleur, et donc une diminution de l'utilisation d'une climatisation nuisible à l'environnement.

- Les vêtements techniques : ceux-ci ne permettent généralement pas d'atteindre un équilibre entre la chaleur produite par le corps et celle transmise à l'environnement lors de la pratique d'un sport. Cet excès de chaleur non évacuée provoque généralement des situations de stress thermique néfastes à l'activité pratiquée. L'utilisation de vêtements régulateurs de chaleur pourrait alors permettre de diminuer cet inconfort et d'augmenter ainsi les capacités et l'efficacité des personnes lors d'activités physiques ou lors de situations de stress.
- L'aérospatial : certains produits aujourd'hui dans le commerce ont été à l'origine développés pour la création de combinaisons d'astronautes. Ils avaient pour but de les protéger des variations extrêmes de température présentes à l'extérieur des navettes lors des sorties.

3.6. Inconvénients :

3.6.1. Prix :

Bien que présents dans le commerce depuis quelques années maintenant, les MCP restent des technologies moins abordables que les isolants classiques, notamment en ce qui concerne leur utilisation dans l'habitat. Néanmoins, le surcoût généré à l'investissement peut se retrouver rapidement amorti grâce aux économies d'énergie réalisées, comme le démontre une étude de l'INSA de Lyon[39] sur un produit déjà commercialisé, dont le temps de retour sur investissement est d'environ 8 ans.

3.6.2. Surfusion :

La surfusion correspond à l'état liquide d'un corps alors que sa température est inférieure à la température de cristallisation. Elle n'apparaît que pour certains types de MCP comme les matériaux inorganiques. Les solutions pour remédier à ce problème sont multiples :

- incorporation d'additifs tensio-actifs
- faciliter la nucléation au moyen de cristaux solides stables autour de la température de cristallisation : ceux-ci servent de points d'accroche pour la cristallisation du matériau
- garder une zone froide à l'intérieur du matériau

La surfusion empêche l'utilisation de la chaleur latente de changement de phase à la température voulue.

3.6.3. Cinétique de cristallisation :

Les vitesses de cristallisation des MCP sont relativement faibles. S'il faut trop de temps au matériau pour accumuler ou libérer de l'énergie, celui-ci perd alors en efficacité dans les applications pratiques (incapacité à "lisser" les pics de températures par exemple).

Mais cette cinétique peut être améliorée par l'introduction de solvants à forte polarité et à forte constante diélectrique au sein du MCP. Ces solvants permettent d'abaisser les tensions superficielles au niveau des interfaces liquide/solide.

3.6.4. Résistance au transfert thermique :

Lors du changement de phase du MCP, l'échange thermique a lieu à l'interface solide/liquide. 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.

Malheureusement, les MCP ont une conductivité thermique assez faible (de l'ordre de 0,15 W/m.K) ce qui empêche d'ores et déjà un bon transfert thermique. Ce phénomène est alors amplifié par l'épaisseur de la phase à traverser. Il faut donc, si l'on souhaite limiter ces phénomènes de résistance dus au déplacement du front thermique, faire en sorte que l'épaisseur à traverser soit la plus petite possible. C'est pour cela que l'on utilise souvent des microcapsules sphériques qui changent facilement de phase sur l'ensemble de leur volume.

3.6.5. Confinement :

L'encapsulation semble être une bonne solution au confinement des MCP. En effet, lorsque ce dernier est à l'état liquide, il n'a plus de tenue physique et nécessite un contenant. La difficulté technologique consiste à maximiser les échanges thermiques par tous les moyens (en choisissant de bons conducteurs thermiques pour la fabrication des capsules par exemple).

3.6.6. Durée de vie :

Selon le CSTB [40], les MCP utilisés dans l'habitat auraient une durée de vie égale ou supérieure à celle des bâtiments actuels.

3.6.7. Aspects sanitaires et sécuritaires :

Les MCP étant très diversifiés et peu utilisés à l'heure actuelle, on comprend que peu d'études systématiques aient été faites au sujet de leur impact sanitaire et des risques qu'ils représentent.