

1.1.Introduction :

Le problème du stockage thermique se pose lorsqu'on envisage l'intermittence de la source de puissance, qui la rend inutilisable si on ne dispose pas d'un 'volant d'inertie thermique' permettant au minimum de s'affranchir des passages nuageux. Dans une situation idéalisée, on pourrait imaginer que dans ce type d'installation, et sous réserve d'un ensoleillement régulier, on puisse obtenir au une source de énergie thermique à puissance constante.

Les équations modélisant des échanges thermiques par convection en régime instationnaire sont écrites pour la première fois par **Profos**. Depuis, de nombreux auteurs ont poursuivi ces travaux avec des applications directes aux unités de stockage et aux échangeurs de chaleurs. L'analyse des problèmes de transfert de chaleur dans le procédé de fusion et de solidification, appelés problèmes avec limite déplaçant, est particulièrement compliqué en raison du fait que la limite solide-liquide se déplace en fonction de la vitesse à laquelle la chaleur latente est absorbée ou perdue au niveau cette limite, de sorte que la position de la limite n'est pas connue a priori, et forme une partie de la solution. Lorsque la substance qui se solidifie est pur, la solidification se produit à une température constante, tandis que dans le cas contraire, comme avec les alliages et les matériaux impurs, la solidification a lieu dans une plage de températures et donc il apparaît une zone diphasique (zône molle) entre la phase solide et liquide.

Dans ce dernier cas, il convient de considérer l'équation d'énergie en terme d'enthalpie, qui, si les mouvements d'advection à l'intérieur du liquide sont ignorés. La solution de cette équation nécessite la connaissance de la fonction reliant la température et l'enthalpie; même, il est nécessaire de connaître l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température. Le point fort de cette méthode c'est bien que l'équation est directement applicable aux trois phases, la température est déterminée en chaque point et la valeur des propriétés thermo-physiques peut être évaluée, et, enfin, en fonction de la valeur de la température, il est possible de déterminer la position des deux limites si on le souhaite, bien que, comme indiqué ci-dessus, ce n'est pas nécessaire. Shamsundar et Sparrow ont démontré l'équivalence entre l'équation de conservation de l'énergie appliquée dans les trois zones (solide, liquide et solide/liquide) et le modèle d'enthalpie. Ils ont analysé un problème spécifique associé à une unité de stockage de l'énergie solaire. Le changement de phase multidimensionnel est analysé via le modèle d'enthalpie utilisant un schéma de différence finie totalement implicite, à résoudre pour la solidification dans un récipient carré.

Dans l'unité de stockage par chaleur latente la conductivité des PCM est très faible, ce qui conduit à un faible transfert de chaleur pendant les processus de charge/décharge. Pour résoudre ce problème pendant chaque processus, l'injection des particules solides très fines dans le PCM est proposée. Khodadadi et Hosseinizadeh les premiers qui ont rapporté que le transfert de chaleur dans les matériaux à changement de phase (PCM) est amélioré à travers la dispersion des nanoparticules. [4]

Nous allons dans ce qui suit passer en revue certains de ces travaux publiés que nous avons classé selon les conditions transitoires imposées à la l'entrée des conduits et selon le type du matériau de stockage.

1.2. Stockage par chaleur sensible :

On distingue là aussi plusieurs types de conditions thermiques à l'entrée des conduits. En effet, le fluide peut subir des variations périodiques de température de toute forme sinusoïdale, carrée ou triangulaire de fréquence variable.

Kakaç et **Li** ont analysé de point de vue théorique et expérimental un écoulement fluide en convection forcée turbulente entre deux plaques parallèles. Le fluide est soumis à l'entrée du canal à des variations sinusoïdales de température. Le bilan d'interface inclut les caractéristiques thermiques de la paroi, considérée isotherme. Les mesures expérimentales mettent en évidence l'existence dans la section d'entrée d'un gradient de température transversal important. Ce profil d'amplitude de forme parabolique est, d'après l'auteur, la source des écarts importants enregistrés entre le modèle analytique et les mesures expérimentales. En injectant dans le modèle analytique ce profil de température dans la section d'entrée, ces écarts se réduisent énormément.

En 2009, **Hadiouche** et **Mansouri** présentent une étude théorique de la convection forcée laminaire à l'intérieur d'un conduit cylindrique et plan, soumis à une température d'entrée périodique. La diffusion thermique dans la paroi du conduit et les conditions aux limites qui définissent la convection extérieure, sont pris en considération. Dans la première partie, ce problème est résolu en appliquant la Technique de Transformée Intégrale Généralisée(GITT).

Les valeurs et les vecteurs propres complexes sont écrits et comparés avec la littérature. Dans la deuxième partie, l'approche Quasi-stationnaire (QSA) qui utilise un coefficient du transfert thermique constant à interface fluide-paroi est aussi utilisée et comparée avec la solution(GITT).

La température moyenne, le nombre de **Nusselt**, le coefficient d'amortissement et de déphasage sont calculés.

La réponse transitoire d'une unité de stockage par chaleur sensible qui reçoit/fournit de la chaleur à un fluide caloporteur en écoulement est présenté par Schmidt et *al* [5]. Dans la référence [5], l'unité de stockage est composée de certain nombre de canaux de section rectangulaire, traversés par le fluide en écoulement, montés en parallèle et séparés par le matériau de stockage. L'équation de l'énergie pour le fluide et l'équation de la conduction transitoire pour le matériau de stockage, sont résolus en utilisant la méthode des différences finies. Les paramètres qui caractérisent le comportement transitoire de cette unité sont identifiés.

Des résultats convenables concernent la prédiction du taux de stockage et la température du fluide à la sortie de l'unité de stockage sont présentés en fonction des paramètres adimensionnels.

Dans l'article [6], l'auteur a cherché l'optimisation de la conception d'une unité de stockage de chaleur sensible initialement à une température uniforme. L'unité de stockage est composée de certain nombre de canaux de section transversale rectangulaire traversés par le fluide caloporteur, connectés en parallèle et séparés par le matériau de stockage. L'optimisation de la conception est basée sur exploitation maximale de l'unité de stockage pour un ensemble donné de conditions de fonctionnement. Ce résultat est obtenu en faisant varier la géométrie de l'unité de stockage, tout en imposant des contraintes sur la valeur maximale et minimale de la longueur de l'unité, la longueur du canal traversé par le fluide, l'épaisseur du matériau de stockage, la température maximale et minimale de fluide à la sortie, et la quantité minimale de la chaleur qui peut être stockée.

Dans l'expérience [7], la réponse transitoire d'un échangeur de chaleur, fonctionne avec deux fluides caloporteurs et conçu pour le stockage de la chaleur sensible à base solides, est étudiée. L'unité de stockage est composée d'une série de canaux rectangulaires destinés pour l'écoulement de fluides caloporteurs, séparés par des plaques de matériau de stockage. Les fluides chaud et froid circulent en mode à contre courant, dans des canaux alternés de sorte que chaque plaque de matériau de stockage est en contact avec les deux fluides. L'ensemble du système est considéré comme étant initialement à l'équilibre à une température uniforme, une variation de la température d'entrée de l'un des fluides est imposée, et la réponse thermique de l'unité est prédite jusqu'à ce que l'état d'équilibre soit atteint.

Bardon, et *al.* [8] Ont étudié la cinétique des transferts thermiques entre un fluide caloporteur et un matériau de stockage. En tenant compte de la conduction dans le matériau et de la durée limitée du cycle. Les résultats obtenus pour des éléments géométriques simples (plaque, cylindre, sphère) dans l'hypothèse d'un fonctionnement sinusoïdal sont présentés, en soulignant le rôle essentiel que jouent les groupes adimensionnels dont dépend l'énergie stockée, pour le choix optimal des caractéristiques des éléments

En suite les résultats sont examinés pour une plaque de grande étendue ainsi que pour une loi périodique non sinusoïdale.

Dans le travail de **Bourouga** et **Fourcher**, L'analyse de comportement d'un système de stockage par chaleur sensible est abordée sous l'aspect de la réponse périodique. La température de sortie est obtenue après résolution de l'équation de transfert couplée à celle de diffusion dans le solide. Les résultats théoriques d'une comparaison des fonctions de transfert pour trois dispositions classiques du matériau sont présentés. Dans la première configuration, le fluide caloporteur circule dans des canaux rectangulaires disposés entre des plaques. Pour la seconde, le matériau occupe l'espace entre des tubes cylindriques équirépartis. Le dernier cas est un empilement de billes sphériques balayées par le fluide caloporteur.

L'étude a montré qu'à volume total égal, la qualité du filtrage d'une puissance thermique périodique discontinuées est liée à la porosité du module de stockage ce qui revient à dire qu'à même quantité de matériau de stockage, les trois géométries considérées donnent des réponses pratiquement équivalentes.

Sragovich a exploité une méthode pratique pour le calcul et la conception d'un dispositif de stockage d'énergie thermique sensible à haute température. Cette méthode permet l'évaluation de la performance du dispositif de stockage dans des conditions transitoires. Une configuration tubulaire pour l'unité de stockage a été utilisée. La méthode est basée sur deux modèles : le premier est quasi-stationnaire utile pour la simulation des paramètres de performance et la conception préliminaire de système, et le deuxième est transitoire permettant la vérification de ces paramètres. La géométrie, les paramètres thermiques et opérationnels résultant de la simulation ont été analysés.

En utilisant la technique de perturbation, Kuznetsov développe solution analytique pour le problème de stockage de l'énergie thermique sensible dans une enceinte rectangulaire balayée par un fluide caloporteur incompressible à température constante. Un modèle à deux

équations est utilisé pour simuler la différence de température entre le fluide et les parois de stockage.

Dans la centrale cylindro-parabolique de PSA, Espagne, **Tamme** et *al.* [9] ont développé et testé un système de stockage de l'énergie thermique sensible dans les milieux solides. Un outil de simulation pour analyser les performances transitoires de ce système est développé. Les résultats du calcul montrent l'influence des différents paramètres décrivant le système de stockage. Bien que les effets des propriétés du matériau de stockage soient limités, la géométrie sélectionnée du système de stockage est importante. L'évaluation d'un système de stockage nécessite l'analyse de la centrale électrique complète et non seulement de l'unité de stockage.

Ensuite, la capacité du système est définie par le travail électrique produit par la centrale, au cours de processus de décharge. Le choix de la stratégie de fonctionnement pour le système de stockage est essentiel pour l'optimisation économique.

Le stockage de l'énergie thermique à haute température a été étudié expérimentalement par **Vaivudh** et *al* [10]. Un échangeur de chaleur destiné au stockage de l'énergie thermique sensible à base liquide est utilisé pour séparer deux liquides (le milieu de stockage et le fluide caloporteur),

Prasad et **Muthukumar** traitent numériquement le comportement transitoire de la capacité de stockage thermique d'une unité de stockage de chaleur sensible, conçue pour le stockage de la chaleur dans la plage de température de 523K à 673 K. Une unité de stockage de forme cylindrique avec des tubes de charge intégrés a été conçue en utilisant trois matériaux de stockage, à savoir: le béton, l'acier et la fonte, Pour étudier leurs caractéristiques de stockage thermique, un modèle mathématique en 3D a été développé en utilisant COMSOL.

Multiphysics 4.2. Le nombre de tubes de charge incorporée a été optimisé sur la base du temps de stockage. Les performances de l'unité de stockage thermique ont été évaluées pour les trois matériaux de stockage précités. Les études paramétriques sont effectuées en faisant varier le nombre d'ailettes sur les tubes et le débit du fluide caloporteur (HTF) qui traverse les tubes. Si le béton est utilisé comme matériaux de stockage, la diminution de temps de charge est de 35,48 % (temps de charge 1307s) pour le cas de quatre ailettes, et de 41,41 % (temps de charge 1187s) pour le cas de six ailettes en comparant avec le cas de tubes lisses. Pour l'unité de stockage conçue par la fonte ou l'acier, l'augmentation de la vitesse du fluide caloporteur

provoque la diminution du temps de charge presque de même facteur, tandis que cet effet dans le béton est moins remarquable à cause de la conductivité thermique qui est relativement faible et la capacité calorifique qui est plus élevée.

Kuravi et *al* [11]. ont conçu un système de stockage l'énergie thermique sensible (TES) à haute température, pour être utilisé dans une centrale solaire. L'air est utilisé comme fluide caloporteur et la briques de haute densité est utilisée pour le stockage, Des expériences ont été réalisées en utilisant un système stockage prototype. La température d'air à l'entrée varie entre 300 °C et 600 °C, et le débit a été varié entre 50 à 90 pieds cubes par minute. L'expérience montre que le temps de charge diminue avec l'augmentation de débit massique. Un modèle 1D, validé par les résultats expérimentaux, a été utilisé pour simuler le comportement thermique du système. Les équations de conservation de l'énergie en régime transitoire ont été formulées pour la convection forcée conjuguée et résolues numériquement pour les cycles de charge/décharge.

Une étude paramétrique a été réalisée en faisant varier les dimensions de système de stockage, le débit de fluide, le rendement thermique global et le rapport de la capacité du système.

1.3. Stockage par chaleur latente :

Rieger et *al* [12]. Ont présenté une étude numérique de la fusion autour d'un cylindre horizontal noyé dans un matériau à changement de phase. La conduction et la convection thermique sont prises en compte pour traiter ce problème à frontière mobile. Les difficultés associées à la structure complexe (fusion au cours de temps) ont été surmontées avec succès en appliquant une technique de maillage numérique (coordonnées adaptées à la géométrie). Des solutions numériques ont été obtenues pour des nombres de Rayleigh allant jusqu'à 1.5×10^5 , des nombres de Stefan entre 0,005 et 0,008 et Prandtl $Pr = 50$. Les résultats sont discutés en détail montrant que l'influence de la convection naturelle n'est pas négligeable.

Lacroix [13] a développé un modèle théorique pour prédire le comportement transitoire d'une unité de stockage constituée de tubes cylindriques en matériau à changement de phase (PCM), avec un fluide caloporteur (HTF) circulant à l'intérieur des tubes en régimes laminaire et turbulent. Le problème stockage est traité avec la méthode d'enthalpie couplée avec le transfert de chaleur par convection dans le fluide caloporteur. Les prédictions numériques sont validées avec les données expérimentales. Une série d'expériences numériques est réalisée pour évaluer les effets de différents paramètres thermiques et

géométriques sur le processus de transfert de chaleur et sur le comportement du système de stockage. Les résultats montrent que le rayon du tube, le débit massique et la température d'entrée du fluide doivent être choisis avec soin afin d'optimiser les performances de l'appareil.

Cependant, l'effet de la convection naturelle dans le PCM liquide est inclus dans l'équation de conduction en utilisant la conductivité thermique effective pour le liquide k_e , à l'aide de la corrélation empirique suivante :

$$\frac{k_e}{k_l} = C_1 \text{Ra}^n \quad (1-1)$$

Dans la référence [13], des ailettes sont placées à la paroi intérieure du PCM. Les résultats montrent que les ailettes annulaires sont plus efficaces pour modérer les débits massiques du fluide caloporteur et la température d'entrée.

La contribution de **Zhang** et **Faghri**[14] dans le domaine du stockage par chaleur latente est très riche. Dans la référence [14] ils ont présenté une solution semi-analytique d'un système de stockage d'énergie par chaleur latente constitué d'un cylindre creux en matériau à changement de phase (PCM). La fusion du PCM a été étudiée en utilisant la méthode Intégrale Approximative, et le transfert de chaleur dans la paroi a été traité comme problème de conduction radiale monodimensionnelle. Les résultats montrent que le transfert de chaleur par convection forcée laminaire à l'intérieur du tube n'a jamais atteint le régime établi, même pour un tube très long. Pour un fluide à nombre de Prandtl modérée, la convection forcée laminaire à l'intérieur du tube doit être résolues simultanément avec le changement de phase du PCM. La résolution semi-analytique est utilisée une autre fois, mais en convection forcée turbulente.

Les constantes A_n et les valeurs propres L_n font la différence entre le régime laminaire et le régime turbulent. Les valeurs de j sont obtenues à partir de l'équation suivante :

$$j = \text{int} \left(\frac{X}{\Delta X} \right) + 1 \quad (1-2)$$

Ou 'int' est la valeur entière.

Ismail et *al.* [15] 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.

Ismail et **Abugderah** ont étudié le changement de phase transitoire d'un système de stockage thermique de type 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. Le schéma SIMPLE est utilisé pour résoudre les champs de pression et de vitesse dans l'HTF. La répartition radiale de la température, la position de l'interface solide/liquide et les variations de la chaleur latente et sensible accumulées, sont présentés pour différents nombres de Reynolds et de Stefan, et pour différente température de fusion/solidification et pour différente période.

Dans le travail de **Zivkovic** et **Fujii**, un modèle de calcul simple pour le changement de phase isotherme d'un matériau à changement de phase (PCM) encapsulé dans un seul récipient rectangulaire est présenté. Le modèle mathématique est basé sur une formulation d'enthalpie, les équations sont exprimées sous forme que la seule variable inconnue est la température du PCM. Le modèle théorique a été vérifié avec une expérience réalisée afin d'évaluer la validité des hypothèses du modèle mathématique, avec une très bonne concordance entre les données expérimentales et numériques. Les résultats montrent que le récipient rectangulaire nécessite près de la moitié de temps de fusion que le récipient cylindrique de même volume et de même surface échange.

Le comportement transitoire d'un système de stockage d'énergie thermique a été étudié numériquement par **H. El Qarnia**. Le système de stockage est composé d'un certain nombre de canaux rectangulaires, traversés le fluide caloporteur (HTF), séparés par un matériau à changement de phase (PCM). Avec l'utilisation de la méthode d'enthalpie, la fusion du PCM est résolue. Le transfert de chaleur par convection forcée à l'intérieur des canaux a été analysé par la résolution de l'équation d'énergie, qui a été couplée avec l'équation de la conduction

dans la paroi. Le profil de vitesse pour le canal rectangulaire est donné par une solution analytique exacte. Un code numérique basée sur la méthode des différences finies a été élaboré et validé en comparant les prédictions numériques avec des solutions analytiques exactes disponibles dans la littérature. Les paramètres qui contrôlent le comportement thermique ont été identifiés. Plusieurs simulations numériques ont été réalisées pour évaluer les effets de nombre de Reynolds sur le processus de transfert de chaleur lors de la fusion du PCM.

Akgün et al [16]. Présentent une analyse purement expérimentale afin d'étudier les processus de fusion et de solidification de la paraffine comme un matériau à changement de phase (PCM), entre deux tubes coaxiaux et verticaux. L'objectif de cette étude est de concevoir et construire une nouvelle unité de stockage répondant aux caractéristiques de fusion/solidification de la paraffine. Le PCM est placé dans l'espace annulaire vertical entre un tube interne, à travers lequel le fluide caloporteur (l'eau) s'écoule, et une enveloppe concentrique externe. Cette étude focalise sur la possibilité d'améliorer le transfert de chaleur dans la géométrie de stockage de chaleur. L'amélioration est obtenue en inclinant la surface extérieure du récipient de stockage, c'est à dire la surface de l'enveloppe externe avec un angle d'inclinaison de 5° . La paraffine (P1) est utilisée en tant que PCM. Dans un premier temps, les propriétés thermo-physiques de la paraffine utilisée sont déterminées par un calorimètre différentiel à balayage (DSC). Une série d'expériences sont menées pour étudier l'effet de l'augmentation de la température d'entrée et le débit massique de l'HTF à la fois sur les processus de charge et de décharge (fusion et solidification). La figure ci-dessous présente les résultats de l'analyse DSC de la paraffine (P1).

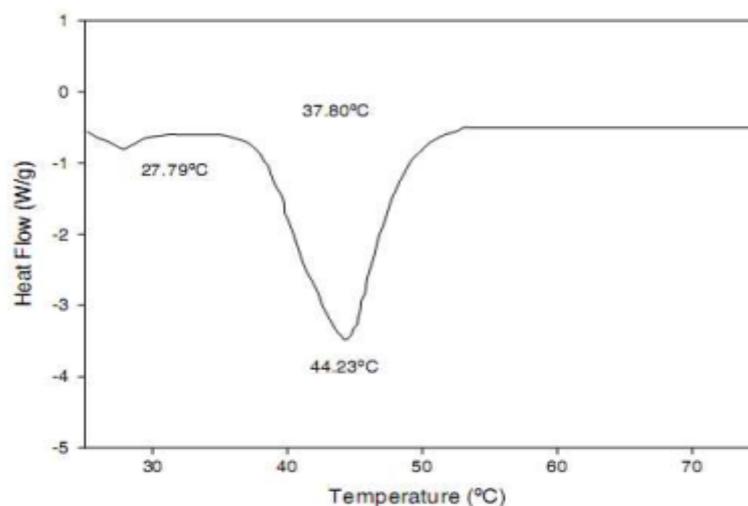


Figure 1.1 : Résultat de l'analyse DSC de la paraffine (P1).

Erek et Dincer traitent l'efficacité exergetique d'un système de stockage de chaleur latente (autour d'un tube cylindrique) pendant le processus de charge. Tout d'abord, un modèle numérique est développé et résolu par les équations régissant le fluide caloporteur (HTF), la paroi de la conduite et le matériau à changement de phase pour différents paramètres géométriques et physiques. Deuxièmement, de nombreuses études paramétriques sont menées pour étudier la façon de laquelle l'interface solide/liquide, la chaleur emmagasinée, le taux de transfert de chaleur, la génération d'entropie et l'efficacité exergetique se changent avec le temps. Troisièmement, les résultats du modèle sont comparés à des données expérimentales, et un bon accord est obtenu pour différents paramètres. Les résultats montrent que la génération d'entropie est cruciale dans le système de stockage et doit être réduite au minimum afin d'augmenter l'efficacité énergétique et donc les performances du système.

Fang et Chen présentent un modèle théorique pour évaluer un système de stockage d'énergie thermique latente (LTES), en utilisant différents matériaux à changement de phase (MCP) à la fois (Fig. 1.2). Le modèle est basé sur la méthode d'enthalpie. Des simulations numériques sont réalisées pour étudier les effets de différents PCM sur la fraction liquide, l'énergie thermique stockée et la température du fluide à la sortie de l'unité (LTES). Les résultats numériques indiquent que les fractions des PCM et les températures de fusion jouent un rôle important dans la performance de l'unité (LTES). En conséquence, les choix appropriés des différents PCM est très important pour l'amélioration de la performance de l'unité (LTES).

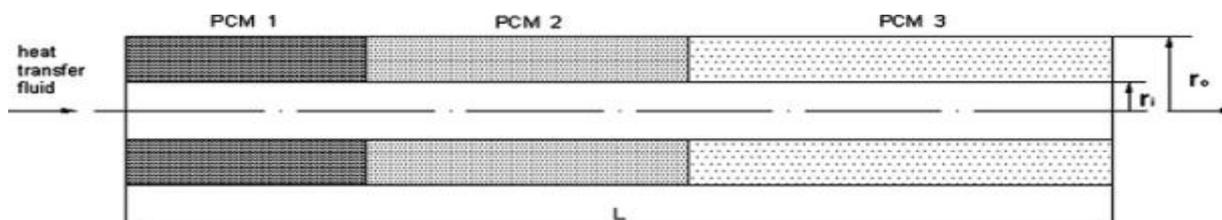


Figure 1.2 : Schéma de l'unité LTES avec différents PCM.

H. El-Qarnia a développé un modèle théorique basé sur les équations de l'énergie pour prédire le comportement thermique et les performances d'une unité de stockage par chaleur latente solaire (LHSU) constituée par une série de tubes identiques noyées dans le matériau à changement de phase (PCM). Pendant le mode de charge, un fluide caloporteur (eau chaude) part de collecteur solaire et passe à travers les tubes et transfère la chaleur, collectée de rayonnement solaire, au PCM. La chaleur stockée dans le PCM liquide est ensuite transférée à l'eau pendant le mode de décharge pour produire de l'eau chaude. Un programme de simulation basé sur la méthode des volumes finis a été également mis au point pour évaluer numériquement la performance thermique de l'unité (LHSU). Le modèle a été

validé en comparant les résultats des simulations numériques aux données expérimentales. Une série de simulations numériques ont été réalisées pour trois types de PCM (n-octadécane, la cire de paraffine et l'acide stéarique) pour trouver la conception optimale pour des conditions climatiques estivales données de la ville de Marrakech: le rayonnement solaire et la température.

L'optimisation de l'unité (LHSU) implique la détermination de la masse du PCM, le nombre de tubes, et le débit de l'eau dans le collecteur solaire qui maximisent l'efficacité de stockage thermique. Plusieurs simulations ont été également faites pour étudier l'effet de débit d'eau sur sa température de sortie, pendant le mode de décharge

Ait Adine et El Qarnia 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), la paraffine P116 et le n-octadécane, avec des températures de fusion différentes (50°C et 27,7°C, respectivement). Un fluide caloporteur (eau) circule par convection forcée à travers le tube intérieur, et transfère la chaleur au PCM. Afin de comparer les performances thermiques de l'unité de stockage de chaleur latente en utilisant deux matériaux à changement de phase (LHSU2) et un seul PCM (LHSU1), un modèle mathématique basé sur les équations de conservation de l'énergie a été développé et validé avec les données expérimentales. Plusieurs investigations numériques ont été réalisées afin d'examiner l'impact des principaux paramètres: la température d'entrée de l'HTF (varie de 50 à 60 °C), le débit massique de l'HTF et les proportions massiques des PCM, sur les performances thermiques de l'unités de stockage utilisant deux PCM et un seul PCM, pendant le processus de charge (fusion). Cette étude paramétrique fournit des directives pour la performance du système thermique et l'optimisation de la conception.

En 2012, **Tao** et al. [17] ont étudié avec température constante à l'entrée du tube et un matériau PCM avec une température de fusion très élevée (les sels fondus).

Plus récemment en 2013, **Mosaffa** et al. [18] présentent une investigation numériques pour l'amélioration des performances d'un système de refroidissement en utilisant une unité (TES) composée de plusieurs matériau à changement de phase (PCMs). L'unité est composée d'un certain nombre de canaux rectangulaires, traversés par un fluide caloporteur, séparées par des plaques de PCM. En utilisant la méthode de capacité calorifique effective, la fusion et la solidification du PCM sont étudiées. Le transfert de chaleur par convection forcée à l'intérieur

des canaux est analysé par résolution de l'équation d'énergie qui est couplée avec l'équation de conduction de la chaleur dans la paroi.

M.J. Hosseini[41] Une étude expérimentale et numérique combinée a été conçue pour étudier le comportement thermique et le transfert de chaleur Caractéristiques de Paraffine RT50 en tant que matériau de changement de phase (PCM) pendant la fusion et la solidification contraintes Traite à l'intérieur d'un échangeur de chaleur à coquille et à tube. Une série d'expériences sont menées pour enquêter sur les effets D'augmenter la température d'entrée du fluide de transfert de chaleur (HTF) sur les processus de charge et de décharge de Le PCM. Les calculs sont basés sur une procédure numérique itérative et de volume fini qui incorpore un Formulation d'enthalpie à un seul domaine pour la simulation du phénomène de changement de phase. Le front fondu à différents moments du processus a été étudié par une simulation numérique. Les résultats expérimentaux montrent qu'en augmentant la température d'entrée du HTF de $T_H = 70^\circ\text{C}$ à 75 et 80°C , l'efficacité théorique en charge et Les processus de décharge augmentent de $81,1\%$ à $88,4\%$ et de $79,7\%$ à $81,4\%$ respectivement.

1.4. 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 apport aux approches analytiques. Du point de vue analytique, ces travaux portent sur le développement des méthodologies "simple" de résolution,

Les systèmes de stockage par chaleur sensible est une option intéressante de point de vue coûts d'investissement et d'entretien. Le nombre de travaux traitant le stockage par chaleur sensible en écoulement laminaire est beaucoup plus important que celui consacré aux turbulents.

La performance des systèmes de stockage par chaleur latente est limitée par la faible conductivité thermique des PCM utilisés. L'ajout de nanoparticules à haute conductivité est une des techniques prometteuses pour l'amélioration des performances des systèmes de stockage.