

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB –BLIDA- 1-
FACULTE DE TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté au DEPARTEMENT des ENERGIES RENOUVELABLES

Par : **SEFRANI KHADIDJA**

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN ENERGIES RENOUVELABLES

OPTION : ENERGIES RENOUVELABLES et HABITAT BIOCLIMATIQUE

**THEME : INTEGRATION DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE
DANS LE BATIMENT**

Soutenu le : 25/09/2017.

Devant le jury composé :

Pr	SEMMAR Djaaffar		président
Mme	W.GUEBLI	MAB	examineur
Mr	DJ.LAFRI	MAA	examineur
Pr	A.HAMID		promoteur

2016-2017

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la préparation d'un mémoire de master en Energie Renouvelables, option ENERGIES RENOUVELABLES et HABITAT BIOCLIMATIQUE au Département des Energies Renouvelables de l'université Saad Dahlab de Blida 1, sous la direction du **Pr. A.HAMID** que je remercie vivement pour toute l'aide qu'il m'a apportée durant toute la durée de préparation du présent mémoire.

Je tiens également à remercier le Dr Bendjebbas Hichem Pour l'aide et les conseils qu'il m'apport du présent travail.

Tout comme je remercie l'ensemble du personnel de l'Unité de Développement d'Energie Solaire (UDES) pour l'aide qu'ils ont apportée durant la préparation du présent travail.

Mes plus vifs remerciements vont au Pr SEMMAR DJAAFFAR et Mm W.GUEBLI Mr DJ.LAFRI pour m'avoir fait l'honneur de présider le jurée de soutenance du présent mémoire.

Le remercie vivement Mme W.GUEBLI Mr DJ.LAFRI pour l'honneur qu'ils m'ont fait en participant au jury en qualité d'examineurs.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma gratitude à l'ensemble des enseignements personnes qui ont largement contribué à son aboutissement.

Dédicace

J'ai, le grande plaisir de dédier ce modeste travail à :

Mes chers parents, qui m'ont toujours soutenu dans mes études

Toute ma grande famille de proche ou de loin ;

*Mes meilleurs amis, **Soraya, Fatiha, Nour el Imane ;***

*Mes sœurs **IBTESSEM, SANAA** et frères **ABIL, ZINO ;***

Tous mes enseignants chacun son nom ;

Tous mes collègues de Département des Energies Renouvelables ;

*Chaque personne qui m'a aidé dans ce travail, **Dr BENDJEBBAS HICHEM, Dr***

HAMID ABDELKADER ;

RÉSUMÉ

المخلص

تخزين الطاقة في جميع أشكالها دائما ضروري لتكوين اي جهاز للطاقة ، وخاصة في المنشآت الشمسية حيث مراحل توافر الطاقة واستخدامها لا تزال متقطعة . التخزين الحراري للطاقة الشمسية باستخدام مواد تغيير المرحلة هي واحدة من أنواع التخزين التي تعتمد عليها مذكرتنا.

كجزء من مشروعنا ، درسنا تخزين الطاقة الحرارية مع محاكاة رقمية باستخدام برنامج كومسول، أجرينا العديد من المحاكاة مع درجات حرارة مختلفة عبر الأرض والمقارنة بين درجات الحرارة المختلفة وتغير في سمك وكذلك تغيير المواد.

Résumé

Le stockage d'énergie dans toute ces formes a toujours été une nécessité pour toute installation énergétique, surtout dans les installations solaire où les phases de disponibilité d'énergie et l'utilisation de cette dernière reste en intermittence. Le stockage thermique de l'énergie solaire en utilisant des matériaux à changement de phase est l'une des types de stockage dont notre mémoire se base.

Dans le cadre de notre projet, nous avons étudié le stockage d'énergie thermique avec une simulation numérique à l'aide de logiciel **COMSOL**, nous avons effectué plusieurs simulations avec des températures différentes à travers le plancher. Une comparaison entre les différentes températures et un changement de l'épaisseur ainsi que un changement de matériaux.

Abstract

Energy storage in all these forms has always been a necessity for any energy installation, especially in solar installations where the phases of energy availability and the use of energy remain intermittent. Thermal storage of solar energy using phase change materials is one of the types of storage that our memory relies on.

As part of our project, we studied the thermal energy storage with a numerical simulation using COMSOL software; we performed several simulations with different temperatures across the floor. A comparison between the different temperatures and a change in thickness as well as a change of materials.

NOMENCLATURE

Q : Quantité d'énergie stockée	[J]
m : La masse du matériau	[kg]
dT : Variation de température	[K]
C_p : Chaleur Spécifique	[J. Kg ⁻¹ .K]
η : Rendement	[%]
I_g : L'éclairement intégré	[w. m ⁻²]
ρ : Masse volumique	[Kg .m ⁻³]
dt : le temps	[S]
A : la surface ouvrante	[m ²]
λ : la conductivité thermique	[w/m.k]

Indices et exposants :

Sens : sensible.

lat : latente.

SOMMAIRE

REMERCIEMENT.

-الملخص - RESUMER -ABSTARCT.

LISTE DES FIGURES.

LISTE DES TABLEAUX.

NOMECLATURE.

INTRODUCTION GÉNÈRALE.....01

ETAT DE L'ART.

CHAPITRE 1 : LE STOCKAGE THERMIQUE.

1.1-Introduction.....	02
1.2- Intérêt de stockage dans les systèmes solaire.....	02
1.3- Mode de stockage en durée	03
1.4- Le Stockage Thermique par chaleur sensible	04
1.5- Le stockage par chaleur latente	08
1.6 -Stockage d'énergie thermique par réaction chimique.....	10
1.7- Avantages et Inconvénients des trois types de stockage	12
1.8- Conclusion	13

CHAPITRE 2 : LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASES.

2.1 - Matériaux à changement de phase.....	14
2.2 -Propriétés des matériaux à changement de phase.....	15
2.3 - Les Matériaux à Changement Phase utilisés dans le bâtiment.....	17
2.4- Les applications des MCP dans le bâtiment	24
2.5 -Façade couplant effet de serre et MCP	30
2.6- Principe du plancher solaire directe.....	30
2.7- Avantages et inconvénients du plancher chauffant	32
2.8 - Caractéristiques du plancher chauffant.....	34
2.9-Conclusion.....	35

SOMMAIRE

CHAPITRE 3 : PRESENTATION DE LOGICIEL ET LES EQUATIONS.

3.1- Introduction.....	36
3.2- Description du logiciel.....	36
3.3 -Procédure de simulation.....	36
3.4- Présentation générale du logiciel.....	37
3.5 -L'interface graphique (le navigateur de modèle).....	37
3.6 -Equation réagissant la chaleur dans la paraffine.....	44
3.7 –Conclusion.....	46

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION.

4.1- Introduction.....	47
4.2 -Le problème étudié	47
4.3 -Résolution du problème.....	49
4.4 –Résultats.....	52
4.5- Discussion des résultats.....	54
4.6- Conclusion.....	62
CONCLUSION GENERALE	63

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 : LE STOCKAGE THERMIQUE

Tableau 1.1 : Propriétés thermo-physiques de quelques matériaux pour le stockage par chaleur sensible.....	7
Tableau 1.2 : Les réactions chimiques étudiées pour l'utilisation de stockage thermiques	11
Tableau 1.3 : Les Avantages et les inconvénients des types de stockage.....	12

CHAPITRE 2 : LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE

Tableau 2.1 : Avantages et inconvénients des différents types changements d'état.....	16
Tableau 2.2: Comparaison entre différents milieux de stockage de l'énergie.....	18
Tableau 2.3 : Différents types d'hydrates salins.....	19
Tableau 2.4 : Exemples de propriétés physiques de paraffines.....	21
Tableau 2.5 : Température de fusion et chaleur latente de quelques acides gras.....	22
Tableau 2.6 : Quelques propriétés physiques de certain composé organique non paraffinique.....	23
Tableau 2.7 : Une liste de quelques Eutectiques.....	24
Tableau 2.8 : Applications potentielles de stockage de l'énergie thermique par les matériaux à changement de phase	26

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

Tableaux 4.1 : Les caractéristiques des matériaux utilisée.....	48
Tableaux 4.2 : Les caractéristiques du paraffine.....	59

LISTE DES FIGURES

ETAT DE L'ART :

Figure 1 : schéma du lit de stockage.

Figure 2 : Détaillé vue croix d'un groupe du réservoir de la chaleur cylindrique s'associé avec MCP.

Figure 3 : un système de stockage.

Figure 4 : Système solaire de changement de phase

Figure 5 : Composition des murs avec et sans MCP.

CHAPITRE 1 : LE STOCKAGE THERMIQUE

Figure1.1 : Représentation des besoins d'eau chaude et de chauffage d'une maison et des apports solaire.3

Figure1.2 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.....5

Figure.1.3: Système de stockage par solide6

Figure 1.4 : Système de stockage par liquide.....6

Figure 1.5 : Equivalence entre la chaleur latente nécessaire pour fondre 1 kg de glace et la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau liquide8

Figure 1.6 : Comparaison des volumes nécessaires au stockage d'une même quantité d'énergie.....9

CHAPITRE 2 : LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE

Figure 2.1 : représente le stockage d'énergie dans un matériau de construction.....14

Figure 2.2: représente l'isolation thermique.....15

Figure 2.3 : Les différents types de MCP.....17

Figure2.4:Structure chimique des paraffines et de la poudre.....20

Figure 2.5: Température de fusion des paraffines en fonction du nombre d'atomes de la molécule.....20

Figure 2.6: La zone du confort maximal.....25

Figure 2.7: Installation de plancher solaire dans le sol des bâtiments.....27

Figure 2.8: Distribution de la chaleur dans une pièce28

Figure 2.9: Capsules coniques contenant un MCP appliquées au chauffage par le sol29

Figure 2.10: Chauffage par le sol utilisant les MCP.....29

Figure 2.11: Façade vitrée couplée à un MCP.....30

Figure 2.12: La répartition de la température dans une chambre chauffée par plancher Solaire.....31

Figure 2.13 : Schéma d'une installation de chauffage solaire par le plancher et l'eau chaude sanitaire.....31

Figure 2.14 : La répartition de température dans 2 types différents de chauffage d'habitat.....32

Figure 2.15 : La différence esthétique entre deux modes de chauffage.....33

CHAPITRE 3 : PRESENTATION DU LOGICIEL ET LES EQUATIONS

Figure 3.1 : affichage au démarrage.....37

Figure 3.2 : pour sélectionner les dimensions d'espace (2D).....38

Figure 3.3 : pour sélectionner les dimensions d'espace.....38

Figure 3.4 : pour ajouter une physique.....39

Figure 3.5 : la géométrie de notre modèle.....39

Figure 3.6 : Choix des matériaux.....40

Figure 3.7 : Introduction des conditions aux limites.....41

Figure 3.8 : Procède de maillage.....42

LISTE DES FIGURES

Figure 3.9 : Résolution du problème.....	43
Figure 3.10 : Résultat final.....	44
 CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION	
Figure 4 .1 : La géométrie représente les trois couches	47
Figure : 4. 2 : les différents points étude.....	48
Figure : 4.3: L'évolution de la température dans les différents points à t=0,5h.....	49
Figure : 4.4: Les lignes de la transformation de la chaleur à t=0,5h.....	49
Figure 4.5 :L'evolution de la température dans les différents points à t=5h.....	50
Figure 4.6 : Les lignes de la transformation de la chaleur à t=5h.....	50
Figure 4.7: L'évolution de la température dans différentes points à t=15h.....	51
Figure 4.8: Les lignes de la transformation de la chaleur à t=15h.....	51
Figure 4.9 : Les courbes de la température en fonction du temps à température=40C°.....	52
Figure 4.10 : Les courbes de la température en fonction du temps à température=50C°.....	53
Figure 4.11 : Les courbes de température en fonction du temps à température=60C°.....	53
Figure 4 .12 : Les courbes de la température en fonction de temps à température=80C°.....	54
Figure 4.13: La transformation de la chaleur à t=0,5h de e=2cm.....	55
Figure 4.14: La transformation de la chaleur à t=5h de e=2cm.....	55
Figure 4.15: La transformation de la chaleur à t=15h de e=2cm.....	56
Figure 4.16 :Les courbes de la température en fonction du temps à température =40C°.....	56
Figure 4.17 :Les courbes de la température en fonction de temps à température=60C°.....	57
Figure 4.18 :Les courbes de la température en fonction de temps à température=80C°.....	57
Figure 4 .19 :Graphe représent la température en fonction de la capacité à pression constant.....	58
Figure 4.20 :Les courbes de la température en fonction du temps du paraffine 1 à température=40C°.....	59
Figure 4.21: Les courbe de la température en fonction du temps du paraffine 1 à température=80C°.....	60
Figure4.22 :Les courbes de la température en fonction du temps du paraffine 2 à température=40C°.....	60
Figure 4.23: Les courbes de la température en fonction du temps du paraffine 2 à température=80C°.....	61

L'utilisation des matériaux à changement de phase MCP en vue du stockage de chaleur dans les bâtiments a été l'une des premières applications pour ces matériaux.

Plusieurs travaux de recherches ont été effectués pour étudier et développer une grande variété des MCP et pour leur application dans les matériaux de constructions. Ces produits pourraient être utilisés pour diminuer les fluctuations de température dans les bâtiments existants rénovés et dans de nouveaux bâtiments légers.

YOUNSI et COLL (2009)

Ils ont étudié expérimentalement le comportement thermique d'un matériau à changement de phase (sels hydratés) par l'intégration des éléments dans des parois de murs solaires passifs. La formulation enthalpie est utilisée pour les simulations numériques effectuées en 1D et 2D. Il s'agira à terme d'introduire ce modèle dans un outil global de simulation de composants solaires.

Benmansour et hamdan (2001)

A étudié numériquement du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente à basses températures (0 °C à 100 °C) dans un lit cylindrique rempli de sphères uniformes, disposées au hasard et contenant chacune un matériau à changement de phase 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.

Le modèle développé 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.

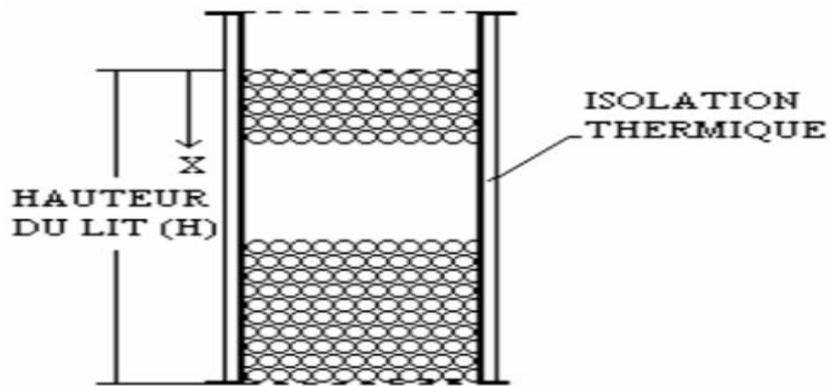


Figure 1 : schéma du lit de stockage.

Suat Canbazog̃lu (2004)

A présenté les variations temporelles des températures d'eau au milieu d'un réservoir de stockage de la chaleur avec un système solaire passif combiné avec les MCP.

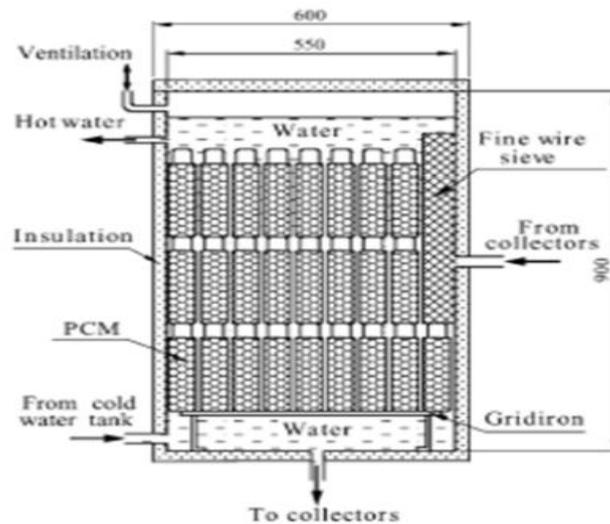


Figure 2 : Détaillé vue croix d'un groupe du réservoir de la chaleur cylindrique s'associé avec MCP.

Le modèle montré que les MCP peuvent être utilisés pour le stockage de l'énergie thermique solaire, il a été observé que le réservoir a diminué régulièrement la température de changement de phase.

Le stockage de la chaleur combiné avec MCP a été effectuées pendant la période d'hiver, C'est évident que les systèmes solaires passifs s'associé avec MCP sera capable d'exposer une meilleure performance dans les saisons de l'été à cause de la plus haute intensité de absorbé radiation solaire et les pertes de la chaleur inférieures du système.

Abdul Jabbar N (2012)

A étudié un stockage d'un collecteur solaire qui consiste des tubes en cuivre relié en série est intégré avec un arrière récipient de paraffine solide pour montrer la possibilité du stockage l'énergie solaire pour un chauffage d'eau.

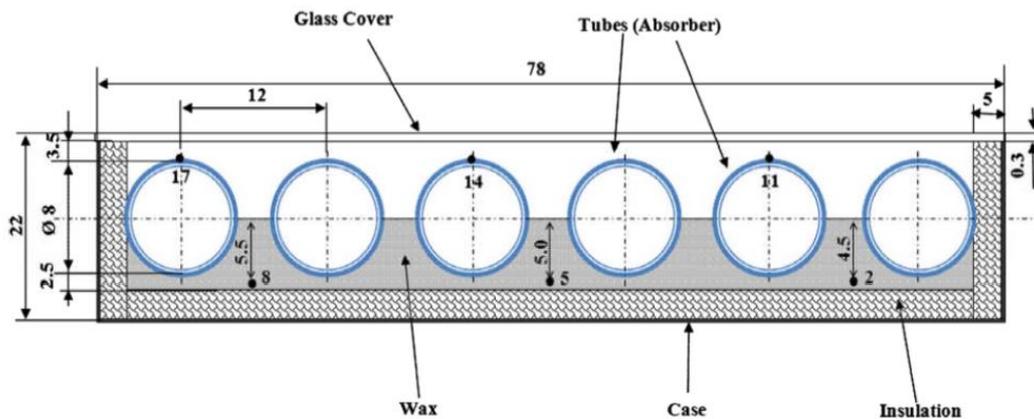


Figure 3 : un système de stockage.

Ce modèle a montré un système de refroidissement. Le MCP liquide va transférer la chaleur de l'eau jusqu'à ce que le MCP devienne solide, après le coucher de soleil le MCP joue le rôle d'une source de la chaleur. La variation des températures avec le temps a montré une tendance semblable pour les jours clairs de janvier et février, la température pour les jours semi-nuageux peut être plus grand que la température de l'amortisseur qui signifie la capacité du stockage du MCP et une variation presque stable dans le système.

Kouskso (2007)

A présenté un système consiste un collecteur solaire chauffé l'air qui associé avec un réservoir cylindrique contient des capsules sphériques rempli d'un MCP.

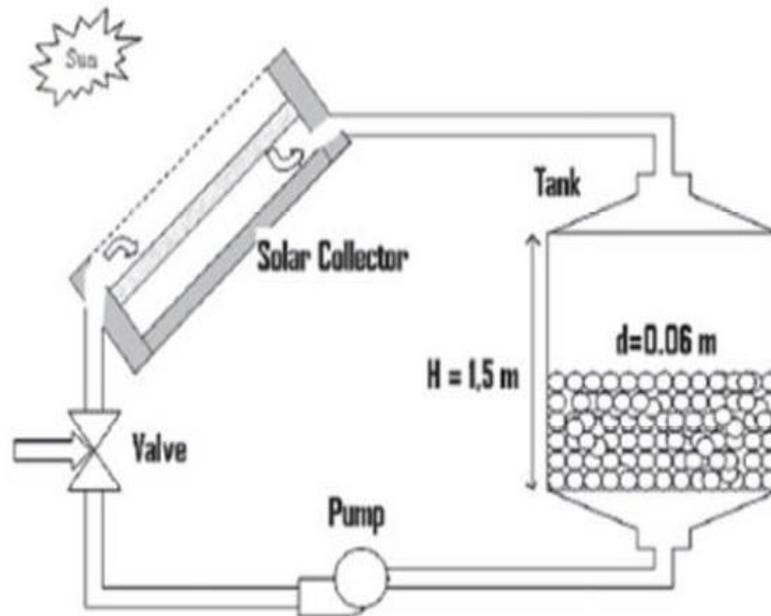


Figure 4: Système solaire de changement de phase.

Ce modèle numérique a montré que l'efficacité thermique du système peut améliorer la température fondante du MCP, et peut réduire aussi l'irréversibilité à l'intérieur du système qui utilise MCP multiple. Le processus de la sélection pour le MCP devra être établi basé sur les conditions d'usage. Ce serait raisonnable de faire cette étude pour la période saisonnière réaliste et pas seul pour les jours typiques choisis.

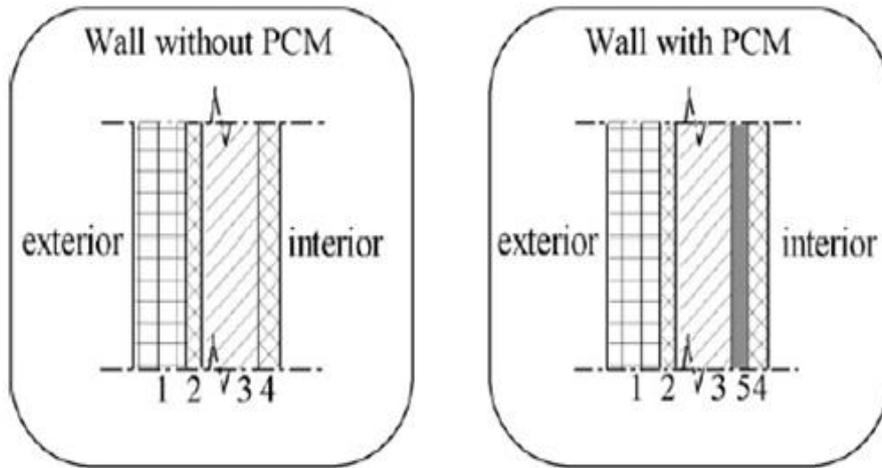


Figure 5: Composition des murs avec et sans MCP.

Au cours des dernières années, de nombreuses études se sont intéressées à l'utilisation des MCP avec du plâtre en réalisant des parois composites [38-39]. Il a été conclu que le MCP peut être intégré au plâtre avec un pourcentage qui peut atteindre les 45% lorsque la structure est renforcée par des additifs. Le matériau MCP peut être aussi intégré à des parois composites légères avec un pourcentage de 60%.

Le MCP avec le plâtre a été utilisé comme une solution passive pour augmenter la capacité thermique des parois, ce qui engendre l'amélioration des performances thermiques des bâtiments en réduisant l'amplitude de la température intérieure. Dans l'expérimentation, il a été utilisé souvent une étude comparative entre deux chambres soumises aux mêmes conditions climatiques, l'une réalisée avec des parois en plaques de plâtre incorporant des MCP et l'autre réalisée avec des plaques de plâtre ordinaires. L'influence des MCP est évaluée par la diminution de l'amplitude de la température intérieure.

INTRODUCTION GENERALE

Le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie parmi les secteurs économiques en Algérie. Donc il est nécessaire de minimiser la consommation d'énergie et de réduire l'impact environnemental de ce secteur en promouvant le concept des bâtiments économes en énergie.

Pour diminuer les besoins énergétiques d'un bâtiment est la conception d'une enveloppe économe en énergie, limitant les déperditions thermiques et récupérant au maximum les apports calorifiques. Le stockage thermique est une solution pour une meilleure gestion de l'énergie thermique, il permet en effet d'adapter la production aux besoins et de réaliser une bonne relation entre l'énergie demandée et l'énergie fournie. De plus l'énergie solaire est intermittente, par conséquent son application exige un stockage thermique efficace de sorte que la chaleur excessive rassemblée pendant les heures de soleil puisse être stockée pour l'usage postérieur pendant la nuit.

Pour cela, l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment, par une isolation renforcée et un meilleur traitement des ponts thermiques qui introduit une diminution des besoins thermiques en climatisation et en chauffage doit être envisagée. En outre la recherche doit porter sur des systèmes de chauffage du bâtiment performants afin de maîtriser les ambiances habitables à un moindre coût énergétique. En effet le maintien de l'ambiance est confié au système de chauffage dont la qualité dépend fortement de la conception, du dimensionnement et de la mise en œuvre de l'installation. En même temps, le développement technologique dans le domaine du chauffage actuel doit aller dans le sens de la réduction de l'impact environnemental négatif par l'utilisation des sources d'énergies renouvelables pour assurer la sécurité de nos approvisionnements énergétiques face à l'épuisement des ressources d'énergie fossile.

Dans cette approche, le plancher chauffant occupe une place particulière sur le plan technologique. Il procure une distribution optimale de chaleur verticalement et horizontalement, parfaitement compatible avec les sources d'énergie renouvelable. Il fait partie des systèmes à basse température dont l'utilisation permet de réduire la consommation énergétique. Le schéma pompe à chaleur-plancher chauffant ou encore capteur solaire thermique- plancher chauffant se fait de plus en plus.

Le travail présenté dans ce mémoire est un système de stockage d'énergie en utilisant des matériaux à changement de phase par un plancher chauffant à l'aide de l'énergie solaire. Le principe de la technique du plancher solaire direct, est de faire circuler directement dans un plancher un fluide chauffé par des capteurs solaires sans utiliser des cuves de stockage intermédiaires. L'objet de ce travail est d'étudier les différents paramètres qui influent sur le confort d'une maison munie à des matériaux à changement de phase et système de chauffage solaire (plancher solaire),

Ce travail est composé essentiellement de 4 chapitres :

Dans le 1^{er} chapitre on s'est intéressé de stockage thermique de l'énergie solaire, Le 2^{ème} chapitre a été consacré à des matériaux à changement de phase, plusieurs matériaux qui utilisent dans le secteur du bâtiment, Le 3^{ème} chapitre est une présentation de logiciel est les différentes étapes suivies lors de la simulation, Dans 4^{ème} chapitre on présente les résultats obtenus à partir de la simulation avec **COMSOL MULTI PHYSIQUES 4.4.**

1.1-Introduction:

Le stockage d'énergie thermique est un élément essentiel de tout système solaire. Généralement le stockage d'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure.

L'énergie solaire est intermittente et irrégulière donc il est nécessaire de développer des systèmes de stockage permettant de gérer d'une façon efficace l'énergie produite.

1.2- Intérêt de stockage dans les systèmes solaire:

Quelle que soit leur technologie, le fonctionnement des centrales solaires thermodynamiques est fortement contraint par le caractère intermittent de l'énergie solaire. Pour que la production d'électricité soit efficace et optimisée, il faut nécessairement développer une solution de stockage.

Les centrales solaires thermodynamiques présentent l'énorme avantage d'avoir la possibilité de stocker de l'énergie thermique, ce qui est a priori bien moins onéreux que le stockage d'énergie électrique.

Les installations solaires domestiques sont toujours accompagnées d'un système de stockage de chaleur. La raison en est simple : faire coïncider la disponibilité de l'énergie solaire avec les besoins en chaleur. Le problème est que l'énergie solaire n'est fournie que durant la journée et que la demande de chaleur est sur tout située en début de matinée et en soirée. Sans stockage de chaleur, on ne profiterait donc que très peu de l'énergie solaire. Son principe est simple: accumuler la chaleur en journée dans un système de stockage et la récupérer quand c'est nécessaire. Son rôle est donc de différer la disponibilité de l'énergie solaire.

On en distingue deux catégories: le stockage journalier et le stockage saisonnier. Le premier est celui qui vient d'être expliqué. Il permet de disposer de l'énergie accumulée à court terme. Cela peut être dans les minutes, dans les heures voire dans les quelques jours qui suivent le stockage. Il est indispensable pour profiter de l'énergie solaire au quotidien. Le stockage saisonnier est le stockage à long terme qui va permettre de différer l'apport en énergie solaire de plusieurs mois Figure (1-1). Il permet donc d'accumuler l'énergie solaire non exploitée en été pour en bénéficier durant l'hiver.

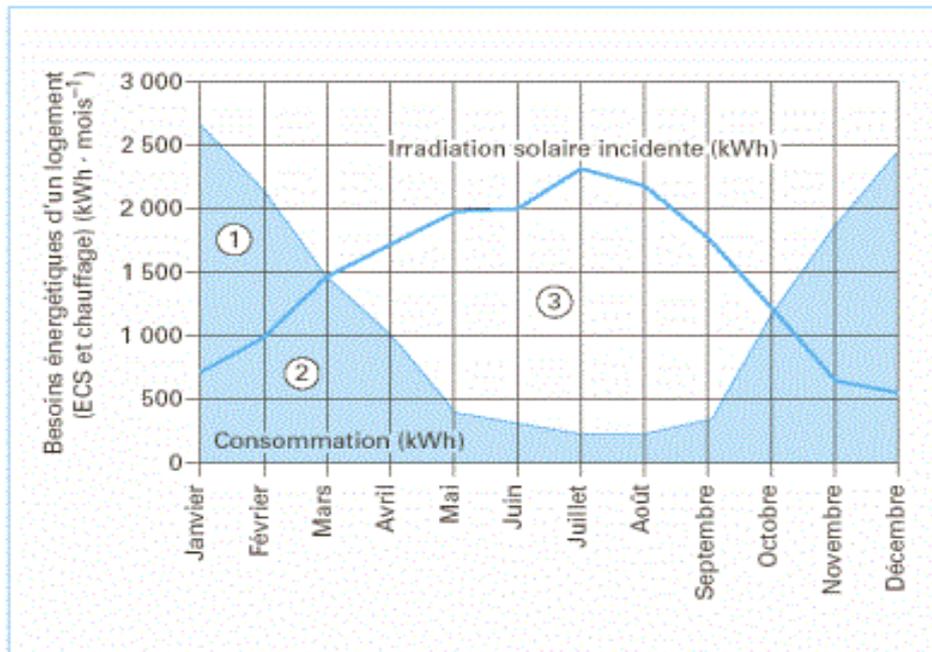


Figure 1.1 : Représentation des besoins d'eau chaude et de chauffage d'une maison et des apports solaires.

- 1-la consommation maximum d'énergie
- 2-la consommation d'énergie.
- 3-L'irradiation solaire période d'été (l'excédent).

1.3- Mode de stockage en durée :

Le stockage d'énergie thermique pour le réseau de chaleur peut se distinguer en deux catégories :

- **Stockage court-terme (journalier)**: intermittence de la ressource solaire et déphasage (jour/nuit).
- **Stockage moyen/long terme** : (inter-saisonnier) déphasage été/hiver.

- **Le stockage court terme** : est réalisé soit par le réseau lui-même, soit par des ballons tampons en eau technique de grand volume : il s'agit de technologie classique de stockage.
- **Le stockage inter-saisonnier** : n'est pas nécessaire pour installer du solaire thermique sur un réseau de chaleur mais le stockage d'une partie de la chaleur d'été pour l'utilisation lors de la saison de chauffage d'augmenter très fortement des taux de couverture possible des besoins annuels de chaleur par le solaire.

Il y a deux techniques principales de Stockage Thermique :

- Le stockage par chaleur sensible (Stockage Thermique Sensible, STS) dans lequel la température des matériaux de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée.
- Le stockage par chaleur latente (Stockage Thermique Latente, STL) qui utilise l'énergie emmagasinée ou restituée lorsqu'un corps change d'état (solide, liquide, gaz).

1.4- Le Stockage Thermique par chaleur sensible :

Dans le stockage par chaleur sensible, l'énergie thermique transférée fait varier la température du matériau (figure 1.2, zone sensible). Si h est l'enthalpie massique du matériau, la variation de la quantité de chaleur Q échangée par le matériau lorsqu'il passe d'un état initial noté avec l'indice i à un état final noté avec l'indice f est :

$$Q = m (hf - hi) \quad [\text{J}] \quad (1.1)$$

Où : m est la masse du matériau [kg].
 hi est l'enthalpie massique initiale [J kg⁻¹].
 hf est l'enthalpie massique finale [J kg⁻¹].

Si la capacité thermique massique du matériau cp (ou chaleur spécifique massique, J kg⁻¹ K⁻¹) est constante, l'expression de l'enthalpie massique permet d'écrire:

$$Q = m Cp (Tf - Ti) \quad [\text{J}] \quad (1.2)$$

Où : Ti est la température initiale [K].
 Tf est la température finale [K].

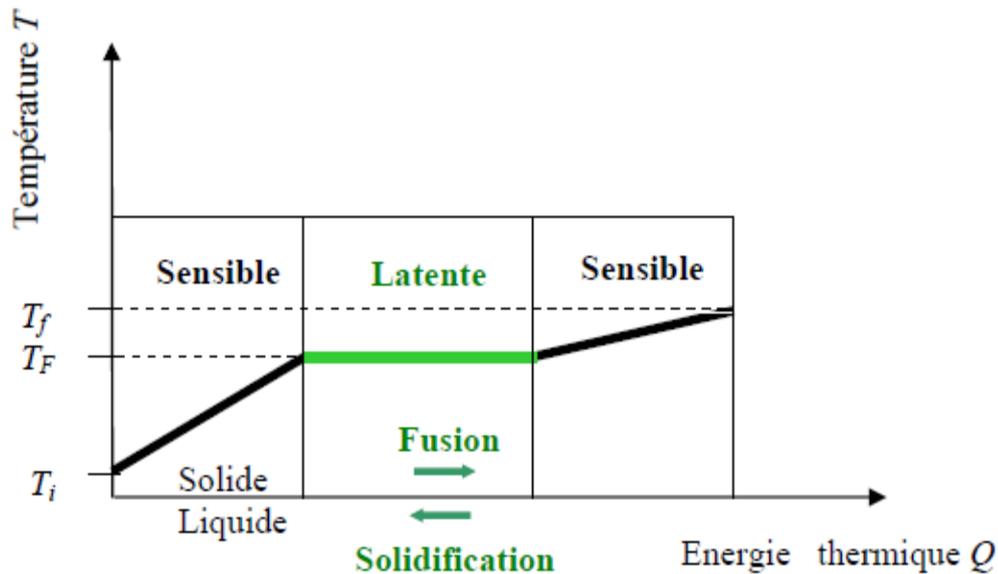


Figure 1.2: Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.

Le stockage par chaleur sensible peut être réalisé par un matériau solide (systèmes de stockage passifs) ou liquide (systèmes de stockage passifs ou actifs). Avec un matériau solide, le stockage a lieu dans un lit compact qui requiert un fluide caloporteur pour l'échange de chaleur.

Pour un matériau liquide (sels fondus, huiles naturelles et synthétiques, eau) le stockage se fait en général dans des thermoclines ou dans des réservoirs de stockage.

1.4.1- Milieu du stockage, solide ou liquide:

Ce choix n'est pas toujours facile et demande une étude et parfois expérimentation avant de l'appliquer à un cas réel.

- **Solide :**

Dans le passé, un béton résistant à haute température et une céramique réfractaire étaient utilisés dans un programme allemand (WESPE, 2001-2003) réalisé sur le site solaire espagnol à Almería. La centrale solaire était par concentration du type cylindro-parabolique (température 300-400°C). L'expérience a montré que la céramique réfractaire a une puissance de stockage/déstockage supérieure par rapport au béton. De plus le béton se dégrade après plusieurs cycles de stockage/déstockage à cause de la perte d'eau initialement contenue dans le béton.

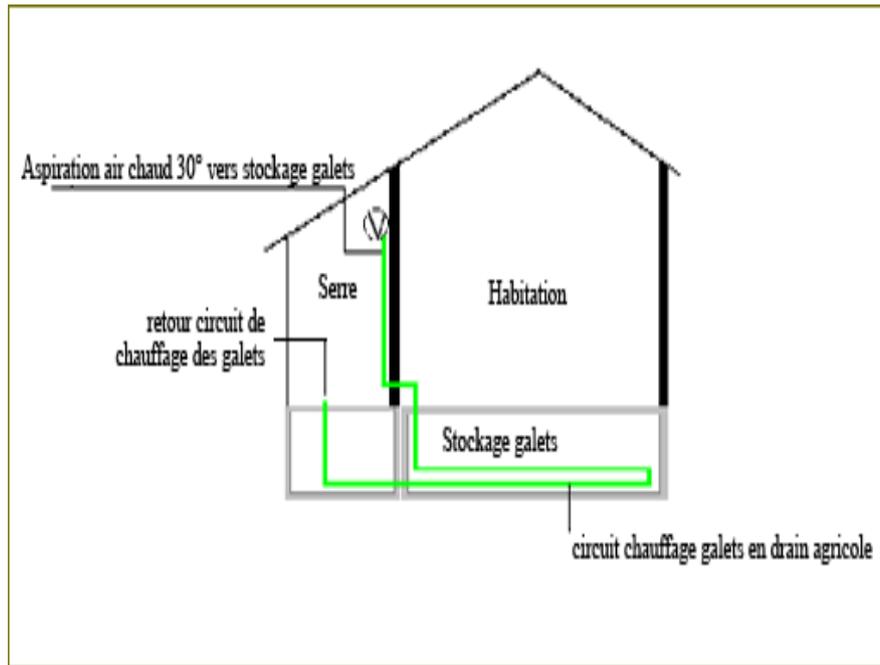


Figure 1.3 : Système de stockage par solide.

- **Liquide :**

L'eau est un très bon liquide pour le stockage car elle a une grande chaleur spécifique voir le Tableau (I-1). Cependant, les sels fondus (HITEC, DrawSalt) ou les huiles sont privilégiés car ils peuvent supporter des températures assez élevées par rapport à l'eau: 500°C pour HITEC, et 579°C pour Drawsalt.

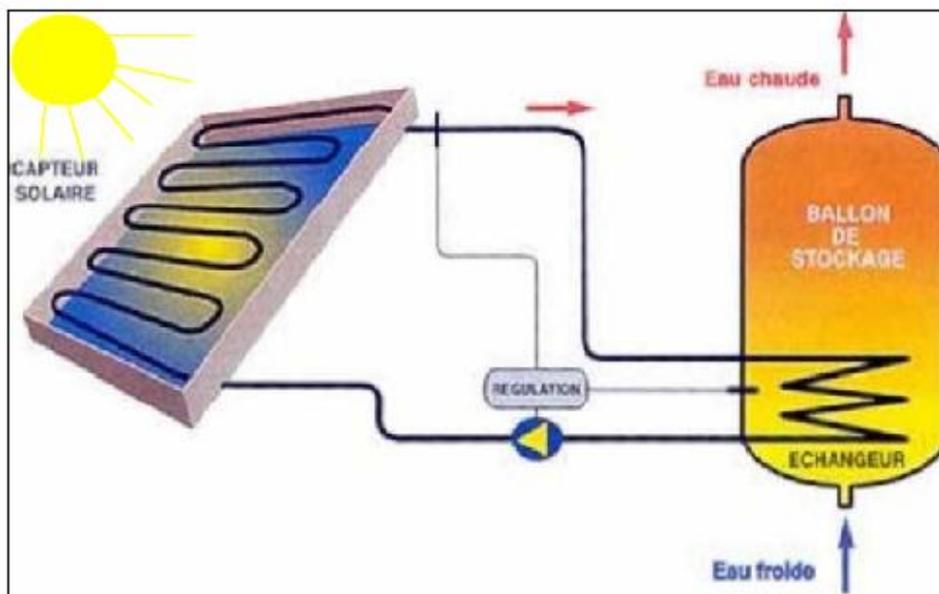


Figure 1.4 : Système de stockage par liquide.

1.4.2- Les matériaux utilisés pour le stockage par chaleur sensible:

Les matériaux à forte capacité thermique qui emmagasineront un maximum d'énergie peut utiliser. Mais ces matériaux doivent avoir d'autres propriétés comme une stabilité à long terme, la comptabilité avec le récipient de stockage et également un coût raisonnable.

La composition et les propriétés thermo physiques de certains matériaux mentionnés ci-dessus ont données dans le Tableau (1-1).

Tableau 1.1 : Propriétés thermo-physiques de quelques matériaux pour le stockage par Chaleur sensible.

	λ W / m.k	CP («350°C) J Kg ⁻¹ k	ρ Kg m-3
Eau liquide (0°C<T<100°)	0,6	4186	1000
Eau vapeur(T=300°)	0,04	2,026	0,365
Draw Salt :50 NaNo 3/50KNO3 (220°C<T<540°C)	0,4		1733
HITEC:40NaNO2 /7NaNO3/53KNO3 (142°C<T<540°C)	< 1		1680
Granite	2,79	775	2630
Céramique réfractaire (programme WESPE, T<400°C)	1,35	866	3500
Béton haute température (programme WESPE, T<400°C)	1	916	2250
Béton haute température (programme WESPE, T<400°C)	1,3	1100	

1.4.3- Le rendement (solaire sans puisage):

Dans ce type de stockage, le rendement est le rapport entre la quantité d'énergie stockée et le produit de la surface et l'irradiation solaire globale pendant un intervalle de temps donné.

L'équation du Rendement thermique du stockage est donnée par :

$$\eta = \frac{\Phi_{sens}}{\int_{t_{in}}^{t_{fin}} A I_g dt} \quad (1.3)$$

Q_{ses}: Quantité d'énergie sensible stockée.

t_{fin}: le temps final.

t_{in} : le temps initial.

A : la surface.

I_g : l'irradiation solaire.

dt : le temps.

1.5- Le stockage par chaleur latente :

Comme le stockage par chaleur latente permet de stocker une grande densité d'énergie, ce type de stockage est une technique attractive. De plus, il permet de stocker la chaleur sous la forme de chaleur latente de fusion à une température constante, cette température correspondant à la température de la transition de phase. Pour donner des ordres de grandeur, l'énergie demandée pour fondre 1 kg de glace est 80 fois l'énergie demandée pour augmenter la température de 1 kg d'eau de 1°C, autrement dit et pour chiffrer l'énergie nécessaire, alors que l'on a besoin d'une énergie de 4,2 kJ pour diminuer la température de 1 kg d'eau d'une température de 1 °C à 0°C, il faut 335 kJ pour compléter sa solidification en glace à $T = 0^{\circ}\text{C}$. Une autre image en est donnée figure (1.6).

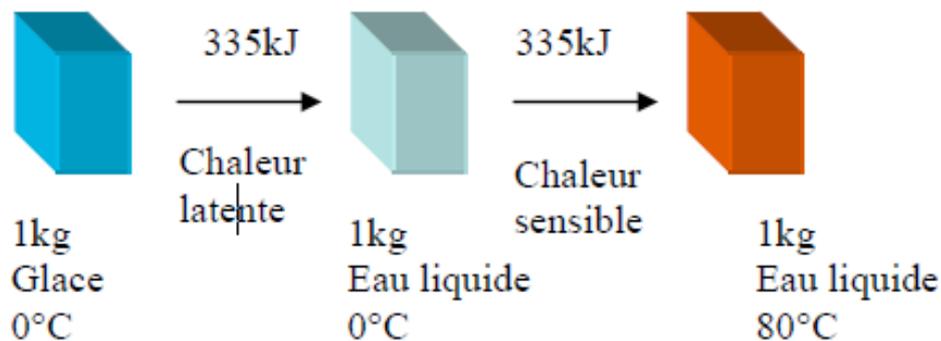


Figure 1.5 : Equivalence entre la chaleur latente nécessaire pour fondre 1 kg de glace et la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau liquide.

On remarque donc que:

- (i) - La chaleur latente est beaucoup plus importante que la chaleur sensible (pour un écart de température pas trop important).
- (ii) - Les points de fusion dépendent des corps utilisés; ce critère permet d'utiliser des matériaux différents en fonction des températures souhaitées. Ces matériaux sont les Matériaux à Changement de Phase (MCP).

Dans le cas d'un changement d'état (fusion), la quantité de chaleur mise en jeu s'écrit:

$$Q = m (hf - hi) = m \Delta hf \quad (\text{J}) \quad (1.4)$$

Où: Δhf est l'enthalpie spécifique de fusion.

Généralement, il faut porter le matériau initialement à T_i à sa température de fusion T_f et l'on écrit :

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_f - T_i) + m \Delta h_f + m \cdot c_p (T_f - T_{in}) \quad (J) \quad (1.5)$$

Q : la quantité d'énergie stocker.

m : la masse du matériau.

C_p : la capacité du matériau.

Les procédés de stockage d'énergie thermique par chaleur latente sont généralement des systèmes de stockage. Le fluide caloporteur passe dans le stockage uniquement pendant les phases de charge et décharge. Le matériau de stockage ne circule pas, il est séparé du fluide caloporteur pour assurer le transfert de chaleur entre les deux, des échangeurs de chaleur sont utilisés. La majorité des procédés utilisent des transitions solide/liquide. L'utilisation de stockage par chaleur latente permet de réduire les volumes de stockage par rapport au stockage par chaleur sensible et d'avoir des températures de travail isotherme en charge et en décharge. En revanche les technologies à utiliser pour le transfert de chaleur et la sélection des matériaux sont plus complexes, par exemple : les matériaux à changement de phase.

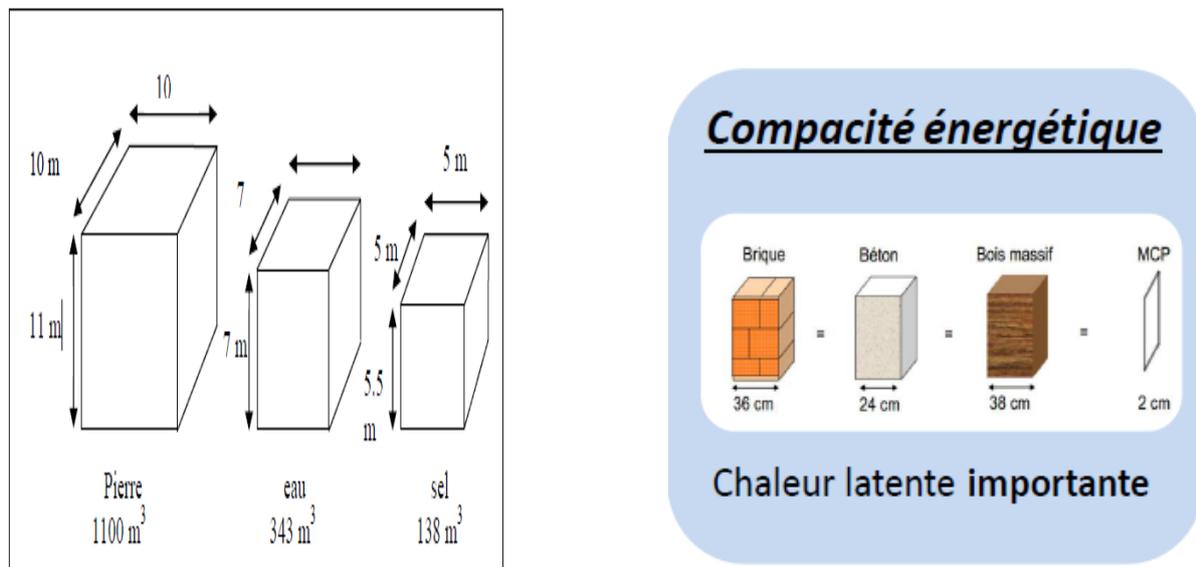


Figure 1.6: Comparaison des volumes nécessaires au stockage d'une même quantité d'énergie.

1.5.1- Le rendement (solaire sans puisage):

Pour le cas du stockage par chaleur latente, le Rendement thermique est donnée par :

$$\eta = \frac{\Phi_{\text{lat}}}{\int_{t_{\text{in}}}^{t_{\text{fin}}} A I_g dt} \quad (1.6)$$

Q_{lat} : Quantité d'énergie sensible stockée latente .

t_{fin} : le temps final.

t_{in} : le temps initial.

A : la surface.

I_g : l'irradiation solaire.

dt : le temps.

1.6 -Stockage d'énergie thermique par réaction chimique:

Le principe du stockage de chaleur par réaction chimique est :



La voie thermochimique exploite la réversibilité des réactions chimiques pour stocker l'énergie.

Enté, le composé AB est séparé en composants A et B par l'action de l'énergie solaire. A et B peuvent être stockés séparément pendant la phase de stockage. Pendant la phase d'hiver, A et B sont mis en contact pour la réaction, et AB est formé. La chaleur de réaction est libérée pour le chauffage des logements ou d'autres usages.

La capacité de stockage dépend de la chaleur de la réaction. Pour ce type de stockage, il est nécessaire que les réactions chimiques en jeu soient totalement renversables. La chaleur produite par le capteur solaire est utilisée pour exciter une réaction chimique endothermique. Souvent, des catalyseurs sont nécessaires pour libérer la chaleur. Cela est d'autant plus avantageux que la réaction peut alors être contrôlée par le catalyseur. Les avantages fréquemment cités du stockage d'énergie thermique par réaction sont leurs fortes densités de stockage de l'énergie et une durée indéfiniment longue de stockage à température ambiante.

Leurs inconvénients peuvent comprendre :

- La complexité des propriétés chimiques.
- Un coût élevé.
- La toxicité et l'inflammabilité.

Bien que le stockage d'énergie thermique par des réactions ait plusieurs avantages d'un point de vue thermodynamique, leur développement est à un stade très amont. À ce jour, aucun prototype viable n'a été construit. Le Tableau (I-2).présente plusieurs réactions qui ont été étudiées pour être utilisées comme matériaux de stockage chimiques [1].

1.6.1- Matériaux de stockage par réaction chimique :

Tableau 1.2 : Les réactions chimiques étudiées pour l'utilisation de stockage thermiques [1].

Medlum	Réaction	Energie densité	Réaction température
Ammonia	$NH_3 + \Delta H \leftrightarrow 1/2N_2 + 3/2H_2$	67kj /mol	400 500°C
Hydoxides	$Ca(OH)_2 \leftrightarrow CaO + H_2O$	3GJ/m ³	500°C
Calcium carbonate	$CaCO_3 \leftrightarrow CaO + CO_2$	4,4GJ/m ³	800-900°C
Iron carbonate	$FeCO_3 \leftrightarrow FeO + CO_2$	2,6GJ/m ³	180°C
Metale hydrides	Metal		
Magnesium oxide	$xH_2 \leftrightarrow metalYH_2 + (x-)H_2$	4GJ/m ³	200-300°C
	$MgO + H_2O \leftrightarrow Mg(OH)_2$	3,3GJ/m ³	250 400°C

1.6.2- Le rendement:

Le rendement de stockage thermique solaire sans puisage est le rapport entre la quantité d'énergie stockée et le produit de la surface et l'irradiation solaire globale pendant un intervalle de temps donné.

L'équation du Rendement thermique du stockage est donnée par :

$$\eta = \frac{\varphi}{\int_{t_{in}}^{t_{fin}} A I_g dt} \tag{1.7}$$

Q: Quantité d'énergie sensible stockée.

t_{fin}: le temps final.

t_{in} : le temps initial.

A : la surface.

I_g : l'irradiation solaire.

dt : le temps.

1.7- Avantages et Inconvénients des trois types de stockage :

Dans les installations de chauffage solaire actuelles on admet les trois types de stockage d'énergie thermique : par chaleur sensible, par chaleur latente et par réaction chimique. Chaque type de stockage admet des Avantages par rapport à d'autres types, dans le tableau Ci-dessous on va résumer les Avantages et les inconvénients de chaque type de stockage :

Tableau 1.3 : Les Avantages et les inconvénients des types de stockage.

STOCKAGE THERMIQUE PAR :	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Chaleur sensible	<ul style="list-style-type: none"> • Volume de stockage stable • Cout d'investissement et d'installation est relativement faible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puissance thermique stocké très limitée.
Chaleur latente	<ul style="list-style-type: none"> • L'énergie volumique stockée est plus importante, il en résulte des volumes de stockage réduits. • Une exploitation remarquable des matériaux de stockage conduit à la constitution d'une source de chaleur a température constante (cet avantage représente un facteur de confort important dans les applications de chauffage des bâtiments) • stockage est moins élevé lors de l'utilisation de matériaux à changement de phase et par conséquent, les dissipations thermiques vers l'extérieur sont moindres 	<ul style="list-style-type: none"> • Volume de stockage très importants dans le cas de stockage par chaleur de vaporisation, ce qui engendre des coûts d'investissement supplémentaire. • Isolation thermique importante dans le cas de stockage à haute températures (cas des sels fondus). • Pour une même quantité d'énergie stockée, la température de Volume de stockage très important dans le cas de stockage par chaleur de vaporisation, ce qui engendre des coûts d'investissement supplémentaires.
Réaction chimique	<ul style="list-style-type: none"> • Le volume occupé par ce type de stockage est nettement moins important que pour des technologies « classiques » (30 % de moins qu'un réservoir à eau). • L'énergie stockée n'est pas influencé par la température et donc le réservoir ne nécessite pas d'isolation thermique. Ce qui n'engendre aussi aucune perte thermique durant le changement de saison. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les produits utilisés actuellement pour le stockage est toxique • Toujours au stade de la recherche, ce procédé doit encore être amélioré pour une utilisation courante

1.8- Conclusion :

Dans ce chapitre on à étudier les types de stockage thermique soit par chaleur sensible, latente ou par réaction chimique. Pour chaque type de stockage on a parlé des avantages est des inconvénients, des modes est des gammes d'utilisation. Ce qu'on conclut c'est que le stockage par chaleur latente représente le meilleur type du coté rendement et investissement, la majorité des installations d'aujourd'hui utilisé le stockage thermique par chaleur latente vue leurs avantages cite précédemment.

2.1 - Matériaux à changement de phase :

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux appelés latents qui sont utilisés pour le stockage de chaleur. Ils emploient leurs propriétés chimiques pour stocker et libérer de la chaleur. Le transfert d'énergie thermique se produit quand un matériel change de l'état solide à l'état liquide ou liquide en solide. Ce phénomène s'appelle « changement d'état ou de phase ».

Le choix du MCP pour le stockage thermique est effectué en fonction de plusieurs considérations : thermodynamique, cinétiques, économiques, de stabilité, et de compatibilité avec les autres matériaux.

❖ Quelles sont les utilisations actuelles des MCP ?

Les principales applications industrielles des matériaux à changement de phase sont les suivantes :
Isolation des bâtiments,

- La climatisation passive et le chauffage,
- Le stockage de l'énergie thermique,

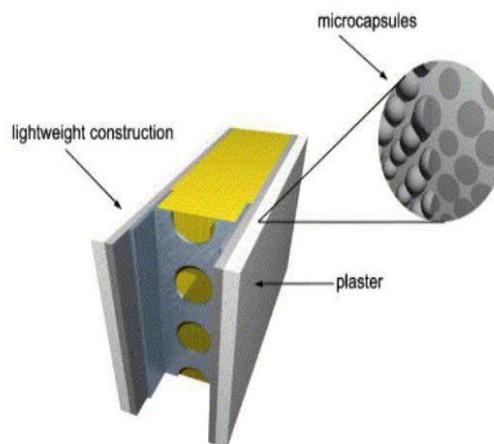


Figure 2.1 : représente le stockage d'énergie dans un matériau de construction.

- Les échangeurs de chaleurs,
- Le textile,
- Refroidissement des composants électroniques
- Le transport de produits alimentaires

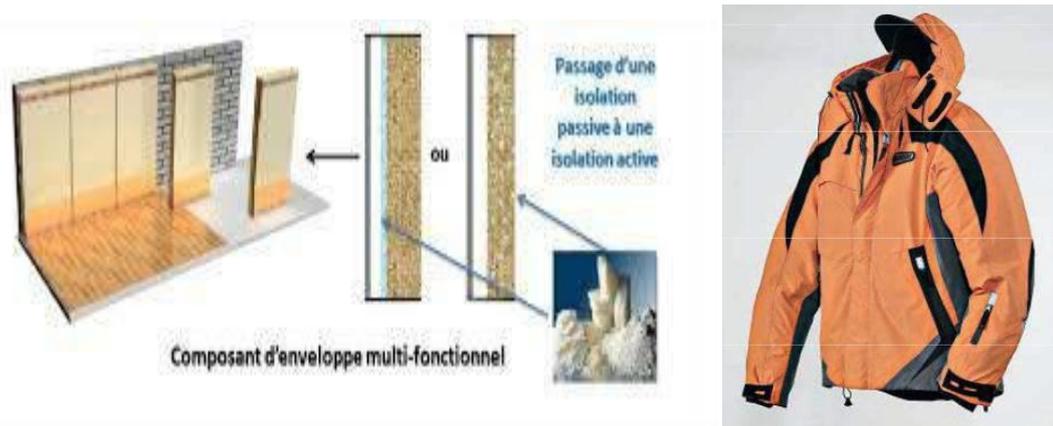


Figure 2.2 : représente l'isolation thermique.

2.2 -Propriétés des matériaux à changement de phase :

La première question qui peut se poser concerne l'utilisation de l'eau comme MCP. En effet, l'eau a d'excellentes propriétés de chaleur latente. Cependant, avec l'eau, nous sommes limités aux températures de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ qui est sa température de solidification ou $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ qui est sa température d'ébullition (à pression atmosphérique) et de nombreuses applications nécessitent d'autres niveaux de températures. Des critères vont donc être définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée.

2.2.1- Propriétés thermodynamiques :

- La température de fusion doit se situer dans la gamme de température de fonctionnement désirée.
- Grande chaleur latente de fusion par volume unitaire de sorte que le volume exigé du récipient pour le stockage soit moins encombrant.
- Grandes chaleurs spécifiques à l'état solide et liquide pour fournir un stockage sensible additionnel.
- Conductivités thermiques élevées des deux phases pour accélérer le stockage et le déstockage.
- Petit changement de volume durant la transformation de phase et petite pression de vapeur.
- Fusion conforme du matériel de changement de phase pour une capacité de stockage constante avec chaque cycle fusion /solidification.

2.2.2 -Propriétés cinétiques :

- Taux de nucléation élevé pour éviter le refroidissement brusque de la phase liquide.
- Taux élevé de croissance en cristal de sorte que le système de puisse satisfaire la demande de rétablissement de la chaleur du système de stockage.

2.2.3 – Propriétés chimiques :

- Accomplissement réversible de la fusion et la solidification.
- Aucune dégradation après un grand nombre de cycles fusion/solidification.
- Non corrosif et non toxique.
- Ininflammable et in explosif.

2.2.4- Propriétés économiques :

- Un coût raisonnable,
- Une bonne disponibilité.

Suivant les propriétés des phases obtenues, les niveaux de températures et les valeurs des chaleurs latentes, chaque type de changement de phase (solide/liquide, solide/solide ou liquide/gaz) présente des avantages et des inconvénients. Ces derniers sont résumés dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Avantages et inconvénients des différents types de changements d'état.

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

❖ **Ces constatations amènent aux remarques suivantes [11]:**

Le changement de phase liquide/gaz assure les plus grandes chaleurs de changement d'état mais il présente un grand changement volumique, ce qui rend les applications peu pratiques et pose un problème de stockage qui peut être crucial. Pour contourner ce problème, la phase gaz peut être stockée par absorption (H₂O/Li Br.), adsorption (H₂O/zeolite, CO₂/ carbone activé) ou réaction (NH₃/ sels).

Ces stockages présentent quelques intérêts spécifiques tels que le fonctionnement de à température ambiante. Mais ils ont des inconvénients comme la complexité, la toxicité, la corrosion avec le conteneur et le besoin d'une grande efficacité d'échange thermique.

Dans le cas d'un changement de phase solide/solide, le matériau absorbe et cède la chaleur comme dans le cas solide/liquide, mais ne devient jamais liquide sous les conditions normales, il devient alors plus ou moins dur. Cet avantage est largement compensé par les faibles chaleurs latentes et par la difficulté de trouver des niveaux de températures de changement d'état compatibles avec les applications.

Le changement de phase solide/liquide met en jeu des chaleurs latentes d'importance moyenne mais ne présente pas de changements de volumes incompatibles avec un stockage facile. De plus, il existe un choix important de matériaux dont les niveaux de températures de changement d'état ont des valeurs compatibles avec de nombreuses applications.

2.3 - Les Matériaux à Changement Phase utilisés dans le bâtiment :

Les MCP décrits seront donc uniquement des corps avec changement d'état solide/liquide dans la gamme de températures considérée. On peut classer les MCP utilisés selon trois catégories :

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

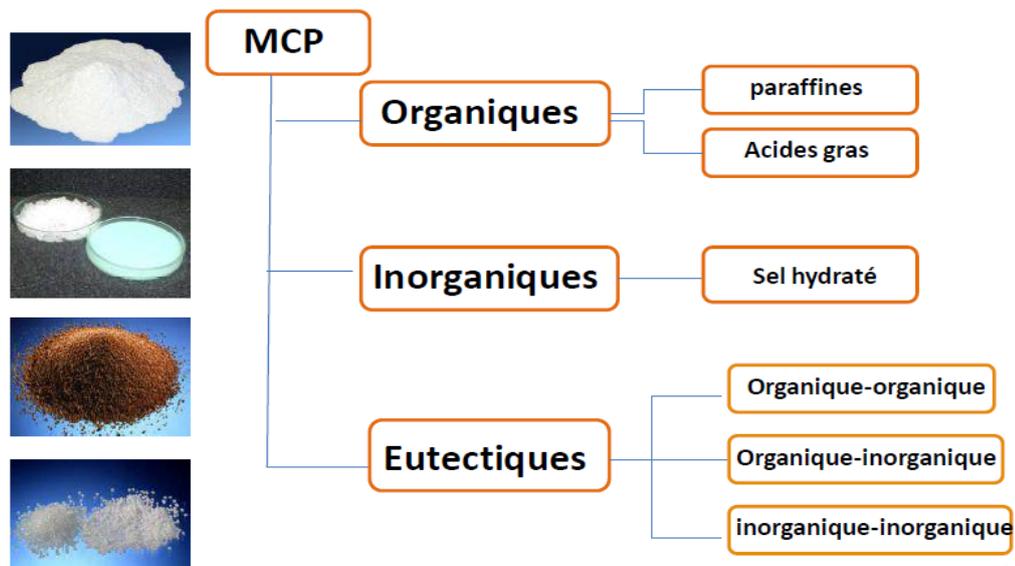


Figure 2.3 : Les différents types de MCP.

CHAPITRE 2 LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASES

Cette classification est effectuée en comparant les ordres de grandeur des énergies spécifiques pouvant être stockées. Comme il est présenté sur le tableau 2.2.

Tableau 2.2: Comparaison entre différents milieux de stockage de l'énergie [11].

Propriétés	Les matériaux de stockage de la chaleur			
	Le stockage par la chaleur sensible		Les matériaux à changement de Phase	
	Pierre	Eau	Organique	Inorganique
Chaleur latente de fusion [kJ/kg]	*	*	190	230
Capacité thermique massique [kJ/kg K]	1,0	4,2	2,0	2,0
Masse volumique [kg/m ³]	2 240	1 000	800	1 600
Masse relative **	15	4	1,25	1,0
Masse nécessaire au stockage de 106 kJ [kg]	67000	16000	5300	4350
Volume nécessaire au stockage de 106 kJ [m ³]	30	16	6,6	2,7
Volume relatif **	11	6	2,5	1,0

Energie stocker = 106 kJ = 300 kWh; $\Delta T = 15K$

*La chaleur latente de fusion n'est pas concernée par le stockage par chaleur sensible.

**La masse et le volume relatifs sont basés sur la chaleur latente de stockage des MCP inorganiques.

2.3.1 - Les hydrates salins :

Ce sont des composés obtenus par mélange d'un sel et d'une quantité d'eau en principe parfaitement définie. Un des plus connus est celui obtenu par mélange de chlorure de sodium et d'eau et qui forme l'hydrate $\text{NaCl} \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$. Ils représentent un groupe important de MCP et sans doute les plus étudiées.

Ils ont les caractéristiques suivantes:

- Une grande chaleur de fusion par unité de volume,
- Une grande conductivité thermique (environ le double de celle des paraffines organiques),
 - o Une faible variation de volume pendant le changement de phase,
 - o Une bonne compatibilité avec le plastique,

- Une certaine toxicité,
- Une certaine corrosivité,
- Trois comportements lors de la fusion : fusion congruente, semi-congruente et non – congruente
- Un coût variable.

Pour ce dernier point, la règle générale est que les hydrates à fusion congruente qui ont une grande chaleur de fusion et des points de fusion convenant aux applications du stockage thermique ont des coûts élevés contrairement aux hydrates à fusion non – congruente.

Tableau 2.3 : Différents types d’hydrates salins [11].

Hydrates salins	La température de fusion [°C]	La chaleur de fusion [kJ/k]
Sel de Glauber (Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O)	32 ,4	252
Chlorure de calcium, hexa hydrate CaCl ₂ .6H ₂ O	27-30	190
Acétate de sodium tri hydrate Na CH ₃ COO.3H ₂ O	58	170 à 264
Hydroxyde de Barium octahydrate Ba(OH) ₂ .8H ₂ O	78	301
NH ₄ .Al(SO ₄) ₂ .12 H ₂ O	95	238 ,5
Phosphate de sodium dodécahydrate Na ₃ .PO ₄ .12 H ₂ O	77	213
Pyrophosphate de sodium déca hydrate sous forme de Capsules (Calortherm 70)	70	184
Carbonate de sodium déca hydrate Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O	32-35	247
Nitrate de calcium tétra hydrate Ca (NO ₃) ₂ .4H ₂ O	40-43	140

2.3.2 - Les paraffines :

Les paraffines sont des matériaux organiques, constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés qui eux-mêmes sont des alcanes de formule générale C_nH_{2n+2}. Elles sont soit fabriquées à partir du pétrole brut soit synthétisées à l'aide du procédé Fischer-Tropsch. Après raffinage, elles sont inodores, non toxiques et sans saveur. Les molécules de ces hydrocarbures saturés peuvent se présenter sous la forme de chaînes rectilignes (hydrocarbures n-paraffiniques) ou peuvent présenter plusieurs branches (hydrocarbures iso-paraffiniques) (figure 2.4). Pour des applications de stockage thermique les n–paraffines sont les plus utilisées à cause de leur capacité de stockage plus importante.

Les paraffines utilisées pour le stockage thermique sont celles qui sont sous forme solide aux températures usuelles et elles sont nommées « cires paraffiniques ».

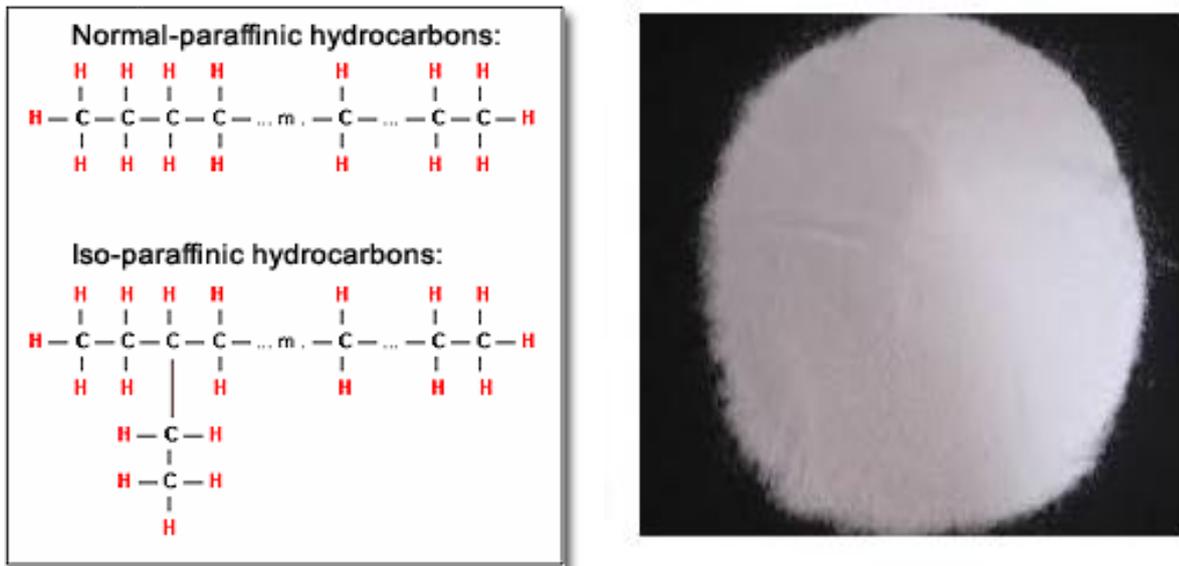


Figure 2.4: Structure chimique des paraffines et de la poudre de paraffine.

L'augmentation du nombre d'atomes le long de la chaîne carbonée augmente le poids moléculaire, ce qui donne une température de fusion et une chaleur latente plus élevée. Par exemple, l'augmentation du nombre des atomes de carbones de C1 à C100 augmente la température de fusion de 90,68 à 388,40 K et la chaleur de fusion de 58 à 285 kJ/kg respectivement (figure2.5).

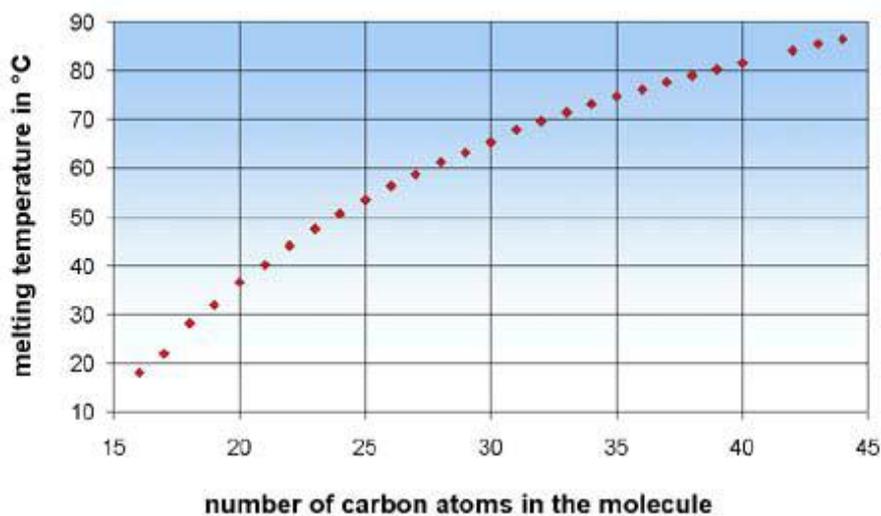


Figure 2.5: Température de fusion des paraffines en fonction du nombre d'atomes de la molécule [11].

On peut donner la liste des principales propriétés des cires paraffiniques comme il est illustré sur le tableau ci-dessous :

Tableau2.4 : Exemples de propriétés physiques de paraffines.

	Paraffines			
	Tétradécane	Hexadécane	Octadécane	Eicosane
Formule	C14H30	C16H34	C18H38	C20H42
Température de fusion [°C]	5,5	16,7	28	36,7
Enthalpie de fusion [kJ/kg]	226	237	244	247
Conductivité thermique [W/m. °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/m ³]	825	835	814	856
Masse volumique liquide [kg/m ³]	771	776	774	778
Retard à la solidification [°C]	Aucun	Négligeable	Négligeable	Aucun
Pression de vapeur [Pa]	133à75C°	133à105C°	133à75C°	133à100C°
Tension superficielle [N/m]	27,4 .10 ⁻³	3,4	27,4 .10 ⁻³	-
Viscosité [C _p]	2,1	-	3,4	-

2.3.3 - Les composés organiques non –paraffiniques :

Les composés organiques non–paraffiniques incluent plusieurs matériaux organiques comme les acides gras, les esters, les alcools et les glycols. Abhat *et al.* [35] a recensé au moins 70 composés organiques non–paraffiniques qui ont des points de fusion entre 7 et 187 °C. Ces composés ont une grande chaleur de fusion et une faible conductivité thermique.

➤ **Acides gras :**

Les acides gras sont des matériaux ayant pour origine les huiles végétales ou animales. Les acides gras ont la formule chimique générale suivante : CH₃ (CH₂)_{2n}COOH. Comme il est facile de les imprégner ou de les incorporer directement dans les structures conventionnelles, ils sont considérés comme de bons candidats pour les applications concernant la structure des bâtiments. Sur le tableau 2.5 on donne les caractéristiques des acides gras les plus courants sont présentés.

Tableau 2.5 : Température de fusion et chaleur latente de quelques acides gras.

Composant	Le domaine de fusion [°C]		La chaleur latente [kJ/kg]		Chaleur massique du solide (C_{ps}) [kJ/kg°C]	Chaleur massique du liquide (C_{pL}) [kJ/kg°C]
	Mesuré	Littérature	Mesurée	Littérature		
Acide caprique	-	31,3	-	163	-	-
Acide laurique	40 –43	42 – 44	167-171	178	-	-
Acide myristique	50,4-53,6	54 ou 58	189	190 ou 200	-	-
Acide palmitique	57,8-61,8	62 ou 63	201ou	164 ou 212	2,20	1,70
	60-61	-	194 - 198	-	-	-
	55-63	-	193	-	-	-
Acide stéarique	62,2-68,5	69 ou 70	210	199 ou 209	-	-
	55-71	-	191	-	2,07	1,90

On remarque que dans le tableau 2.5, il y a plusieurs valeurs de la température de fusion ou de la chaleur latente dans la colonne littérature. Les publications référencées ne fournissent pas toujours des valeurs identiques.

➤ **Les esters d’acides gras :**

Ces matériaux sont produits par une estérification directe des acides gras séparés des huiles végétales. Les esters d’acides gras comme le stéarate de butyle, le stéarate de vinyle et le méthyl- 12 hydroxystéarate peuvent être utilisés pour le stockage passif de la chaleur. Le palmitate d’isopropyle ainsi que l’isopropyl stéarate peuvent être utilisés dans les pays chauds comme matériaux de stockage. Les esters d’acides gras dans leur phase liquide ont une tension surfacique de l’ordre de 20 -30 dyne/cm. Cette tension est assez grande pour que ces matériaux restent dans la structure. Ils ont une grande chaleur latente et une grande chaleur spécifique (1,9 – 2,1 kJ/kg K) pour absorber la chaleur sensible.

Le changement de volume est négligeable. Ils sont stables chimiquement, non corrosifs et non – toxiques. Ils ont d’excellentes caractéristiques de fusion/solidification sans sous-refroidissement. Ce dernier point leur donne un avantage important en tant que MCP [10]. Leurs points de fusion les rendent aptes aux applications de chauffage.

Les composés organiques paraffiniques et non-paraffiniques semblent offrir plus d'avantages que les hydrates salins. Leur principal inconvénient est d'avoir une faible conductivité thermique. Sur le tableau 2.6 sont résumées quelques propriétés physiques de composés organiques non paraffiniques.

Tableau 2.6 : Quelques propriétés physiques de certain composé organique non paraffinique.

	Composés organiques		
	Polyéthylène Glycol (PEG)	Acide Citrique	Tristéarine
Formule	HOCH ₂ (CH ₂) _n OH	CH ₃ COOH	(C ₁₇ H ₃₅ CO ₂) ₃ C ₃ H ₅
Température de fusion [°C]	20-25	16,7	56
Enthalpie de fusion [°C]	146	187	191
Conductivité thermique [W/ m.C°]	0,16	0,18	
Capacité thermique massique [Kj /kg.C°]	2,26	2,04	
Masse volumique liquide [g/cm ³]	1,1	1,05	0,862
Retard à la solidification [°C]	Aucun	15	Aucun
Pression de vapeur [Pa]	0,7 .10 ⁻³ à 100C°	1520 à 20C°	133 à 105C°
Tension superficielle [N/m]	44,3	27,42 .10 ⁻³	
Viscosité (C _p)	11,5	1,31	18,5

2.3.4- 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 congruente.

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, eutectiques organiques et eutectiques organiques –inorganiques. Sur le tableau 2.7, on donne quelques eutectiques déjà utilisés pour les applications de stockage thermique.

Tableau 2.7 : Une liste de quelques Eutectiques [11].

Eutectiques Inorganiques	Point de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [kJ/kg]
49,3% MgCl ₂ .6H ₂ O + 50,7% Mg(NO ₃).6H ₂ O	58	132,3
Na ₂ SO ₄ (32,5%)H ₂ O(41,4%), NaCl(6,66%), NH ₄ Cl(6,16%)	13	146
61,5%Mg(NO ₃)6H ₂ O + 38,5%NH ₄ NO ₃	51	131,1
58,3%Mg(NO ₃)6H ₂ O +41,7%MgCl ₂ .6H ₂ O	58	106
CaCl ₂ .6H ₂ O + CaBr ₂ .H ₂ O	14	140
Eutectiques Organiques		
Acides Caprique –Laurique	18	120
Acides Palmitique – Laurique	33	145
Acides Stéarique – Laurique	34	150

2.4- Les applications des MCP dans le bâtiment :

2.4.1- La notion de confort thermique :

Le « confort thermique » est un besoin évident et toutes les structures bâties (secteur de l'habitat) ou autres (secteur des transports) sont équipées de systèmes permettant de réchauffer ou de refroidir le climat intérieur. De nombreuses études physiques ou psychophysiques ont montré des relations entre l'intensité de la sensation et celle du stimulus.

La sensation augmente en fonction « puissance » de l'intensité du stimulus, ou de l'écart entre le stimulus et un seuil. Pour les aspects thermiques, la sensation résulte souvent de l'activité concomitante des capteurs au froid et au chaud. La sensation globale ainsi générée donne ou non naissance à l'inconfort. Pour certaines personnes, le confort sera senti dans une zone de ni chaud – ni froid, pour d'autres dit « frileuses » dans une zone plutôt chaude et, pour le reste, dans une zone un peu fraîche. Alors, le confort thermique dépend de l'état physiologique désiré où les gens peuvent ressentir la sensation de chaud ou de froid.

Cette sensation de confort est contrôlée par les échanges thermiques entre le corps et l'environnement. Ces échanges sont, en dehors des parties du corps couvertes par les vêtements, essentiellement des échanges convectifs et radiatifs. Il ne suffit donc pas que la température de l'atmosphère ait une valeur ressentie comme confortable mais il faut que la peau ne transmette pas la sensation de trop chaud ou de trop froid. Ceci peut être vrai si le rayonnement des parois sur le corps crée cette sensation. Il est donc important d'avoir des parois dont les températures ne sont pas trop éloignées de la température ambiante. On définit ainsi une zone de confort dans un diagramme : Température de paroi – Température ambiante (figure 2.6). La zone du confort maximal [11].

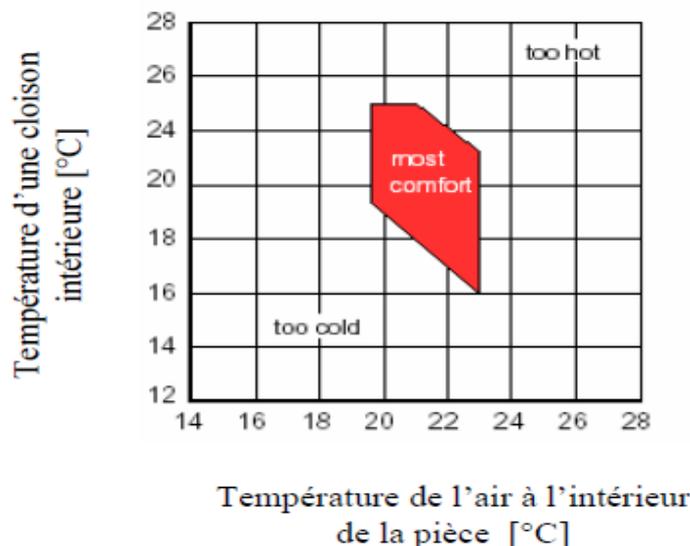


Figure 2.6: La zone du confort maximal [11].

D'autre part, l'atmosphère dans une pièce est ressentie comme confortable quand il y a peu de variations de température dans l'espace, d'un endroit à l'autre, ou dans le temps soit pendant la journée soit d'une saison à l'autre. Pour ces raisons, les maisons ayant des murs très épais sont plus confortables: un certain refroidissement est assuré pendant l'été et un certain chauffage pendant l'hiver. La façon de créer cette sensation de confort avec un minimum de construction massive est l'utilisation de matériaux contenant des MCP.

Ils peuvent avoir les mêmes propriétés que des murs épais par absorption de la chaleur dans la journée et par décharge pendant la nuit, en évitant, dans certains cas, la climatisation. Les MCP à utiliser seront des matériaux changeant de phase aux températures de confort de l'équilibre thermique.

❖ Obtention du confort thermique par l'utilisation des MCP :

Le confort thermique peut être obtenu par des moyens passifs ou actifs. Les moyens passifs sont liés essentiellement au stockage thermique dans la structure des bâtiments. Ils sont décrits par ailleurs. Les moyens actifs concernent le transfert de l'énergie stockée par ailleurs par les MCP. Sur le tableau suivant (tableau 2.8) on résume les applications potentielles du stockage thermique à l'aide de MCP [11].

Tableau 2.8 : Applications potentielles de stockage de l'énergie thermique par les matériaux à changement de phase [11].

Méthode d'utilisation du MCP	Application	Objectif	Secteur
Stockage par MCP réparti dans la cloison (plâtre, ciment, PVC, mousse, verre, nids d'abeille)	Chauffage et conditionnement d'air des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Tous
Chauffage électrique avec stockage MCP	Chauffage des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Résidentiel, commercial et institutionnel
Stockage MCP dans les gaines aérauliques pour le chauffage et la climatisation	Chauffage et conditionnement d'air des locaux	Consommation heures creuses	Commercial, institutionnel et industriel
Préchauffage d'air à MCP pour Pompe à chaleur	Chauffage des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Résidentiel, commercial et institutionnel
Murs rideaux	Chauffage des locaux	Conservation	Commercial, industriel et institutionnel
Chauffe-eau avec le stockage par les MCP 1	Chauffage de l'eau	Consommation heures creuses	Résidentiel, commercial et institutionnel

2.4.2 - Le chauffage par le sol [11] :

Comme le plancher est une partie importante de l'enveloppe du bâtiment, il était intéressant de développer un système de plancher chauffant. Actuellement, un tel système est le mode de chauffage le plus pratique et le plus confortable qui émet une chaleur douce et agréable, silencieusement, sans occuper de l'espace et avec toute la sécurité désirée.

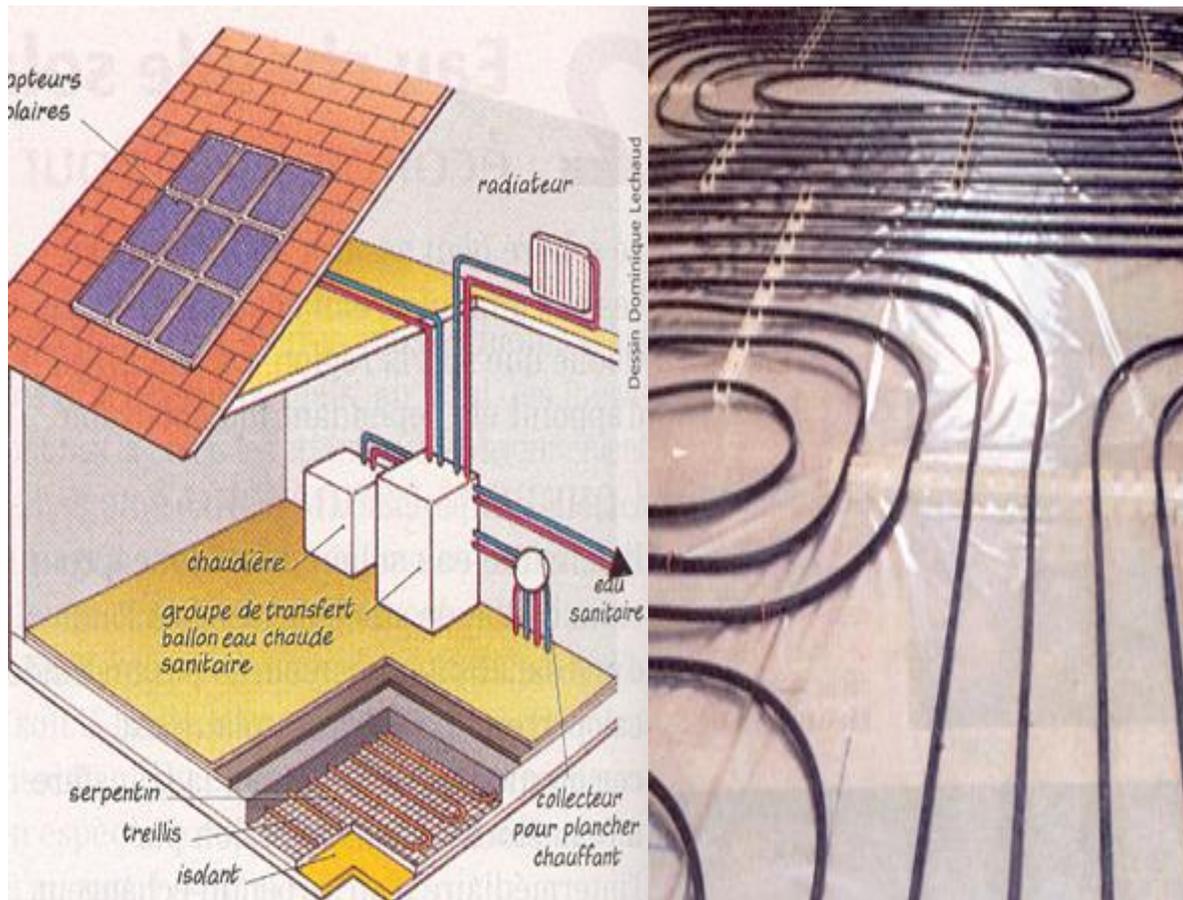


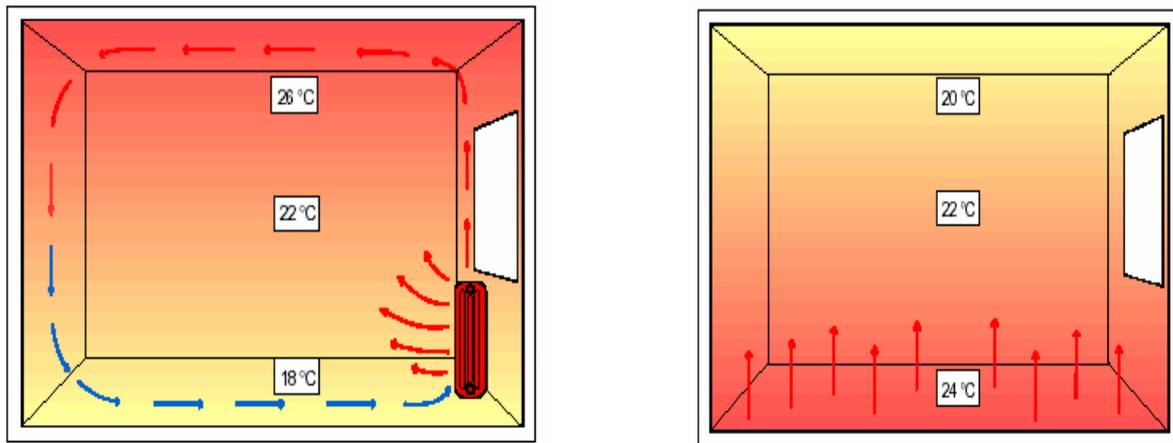
Figure 2.7: Installation de plancher solaire dans le sol des bâtiments.

2.4.3- Les conditions de confort :

Le sol est utilisé à cause de sa grande surface de chauffage, les conditions de confort thermique sont plus faciles à réaliser. En effet, avec un tel chauffage les gradients de température dans une pièce peuvent être minimisés.

Dans le sens horizontal, il est plus confortable d'avoir une source de chaleur uniformément distribuée que d'avoir une source locale de température élevée et de distribuer la chaleur par convection ou rayonnement (figure2.8).

Dans le sens vertical, il a été démontré que la température idéale au niveau du plancher étant 24 °C et à 19 °C à une hauteur de 1.7 m. Ces conditions sont plus faciles à obtenir à l'aide d'un chauffage par le sol qu'à l'aide de radiateurs ou convecteurs placés sur les parois qui peuvent créer une surchauffe de l'atmosphère près du plafond (figure2.8). D'autre part, il est plus rentable de produire la chaleur à des niveaux de températures désirées plutôt que d'essayer à la diminuer pour la distribuer. De plus des températures de faible valeur permettent d'avoir des conditions de sécurité accrue.



a- le chauffage par un radiateur

b- le chauffage par le sol

Figure 2.8: Distribution de la chaleur dans une pièce en utilisant.

a- le chauffage par un radiateur conventionnel

b- le chauffage par le sol

Les systèmes traditionnels de chauffage par le sol utilisent soit des fluides chauds circulant à l'intérieur de tubes soit des résistances électriques incorporées à la dalle. Ils présentent deux inconvénients : la température au cœur de la dalle doit être de l'ordre de 30° C et pour le chauffage électrique il est difficile de profiter des tarifs « heures creuses » puisqu'une dalle traditionnelle ne permet que de stocker la chaleur sensible. Un système à MCP permet de remédier à ces deux inconvénients puisqu'en choisissant la température de changement on réalise une température de surface idéale (22 à 26 °C) et puisque l'on peut stocker la chaleur latente pendant les heures creuses. Un plancher à MCP aura de plus un caractère autorégulateur puisque si la température de la pièce dépasse la valeur prévue, l'émission de chaleur par le sol diminuera.

2.4.4 - Technologies existantes :

Une des technologies existantes est celle d'utiliser un MCP injecté dans des capsules de formes coniques. Ces capsules sont en polyéthylène haute densité/ PVC thermoformé et sont thermiquement scellées avec une feuille de polyéthylène / PVC/ polyester aluminées. Ce système permet une manipulation aisée et combine à la fois une bonne conductivité thermique et une grande surface d'échange pour une quantité de MCP donnée (figures 2.9. (a) et (b)). Des capsules sont fournies sous la forme d'une bande qui est posée directement sur l'isolant, ce dernier peut être omis dans les dalles intérieures.

Les tubes ou les câbles passent e d'énergie choisie (chaudière, chauffage solaire, électrique, récupération de chaleur perdu, ...). Ce système semble présenter un certain nombre d'avantages : le coût, la disponibilité, une manipulation et un entretien aisés, la possibilité d'utilisation dans le neuf ou l'ancien. Le MCP utilisé est un hydrate salin minéral dont la température de changement d'état est de 29 °C.

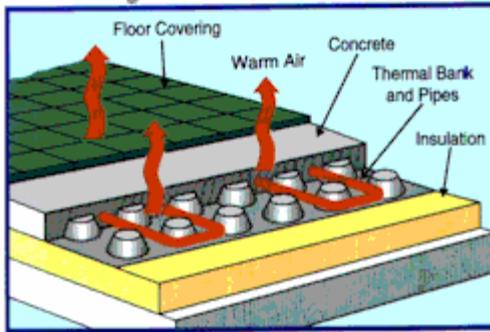


Figure 2.9. (a)

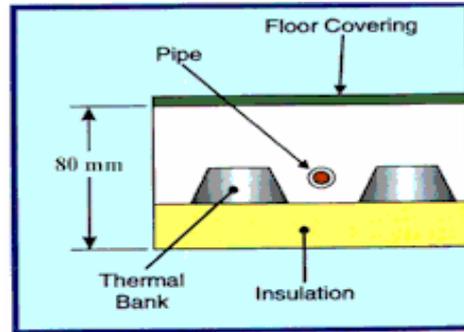


Figure 2.9. (b)

Figure 2.9: Capsules coniques contenant un MCP appliquées au chauffage par le sol [11].

Un deuxième système utilise des MCP encapsulés se présentant sous la forme de granulats. Le MCP utilisé est une paraffine. Le système est conseillé pour le chauffage électrique. Les câbles chauffants sont disposés sur l'isolant et une couche de granulat est disposée par-dessus. L'ensemble est recouvert d'une fibre plastique et d'une dalle de béton de faible épaisseur (~ 2 cm) figure (2.10) [11].

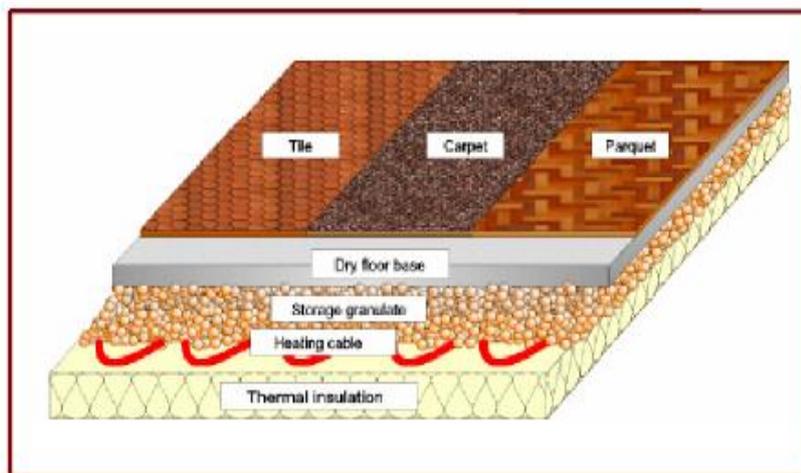


Figure 2.10: Chauffage par le sol utilisant les MCP [11].

2.5 -Façade couplant effet de serre et MCP :

La façade vitrée est constituée de plusieurs vitrages placés devant des briques en polypropylène contenant du MCP. La lumière solaire est absorbée par le MCP après passage à travers de trois vitres (figure 2.11). Le MCP fond pendant la journée et se refroidit durant la nuit. La présence de plusieurs vitrages évite les pertes vers l'extérieur. De même, une vitre dont la surface est constituée de prismes limite les surchauffes du MCP en renvoyant la lumière lorsque le soleil est haut sur l'horizon ($> 40^\circ$). De plus, compte tenu des propriétés du MCP les éléments sont translucides.

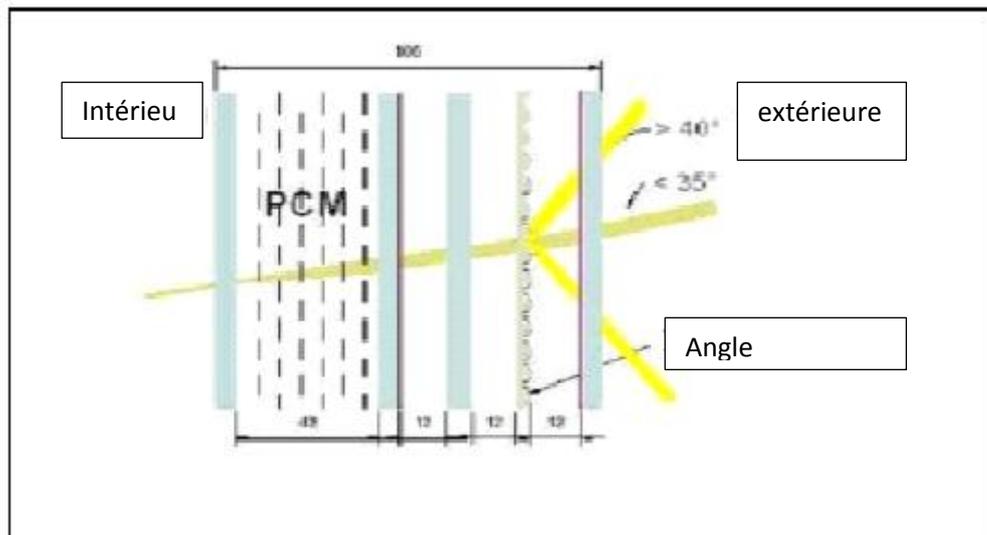


Figure 2.11: Façade vitrée couplée à un MCP.

2.6- Principe du plancher solaire directe [3] :

Cette technique de chauffage est simple, économique, éprouvée et préservatrice de l'environnement.

Les différents éléments constituant un plancher solaire direct sont les suivants :

- Des capteurs solaires qui transforment l'énergie solaire en chaleur. Dans l'hémisphère nord les capteurs sont orientés plein sud et leur inclinaison est optimisée (en général $\alpha \geq 45^\circ$).
- Une dalle dans laquelle circule le fluide caloporteur chauffé par les capteurs. La dalle sert simultanément à stocker la chaleur apportée par les capteurs et à la restituer de la même façon qu'un plancher chauffant classique basse température, mais avec un certain décalage dans le temps.
- Un groupe de transfert qui gère le chauffage de la maison et la production d'eau chaude sanitaire. Le chauffage du plancher se fait à basse température (27-29°C).

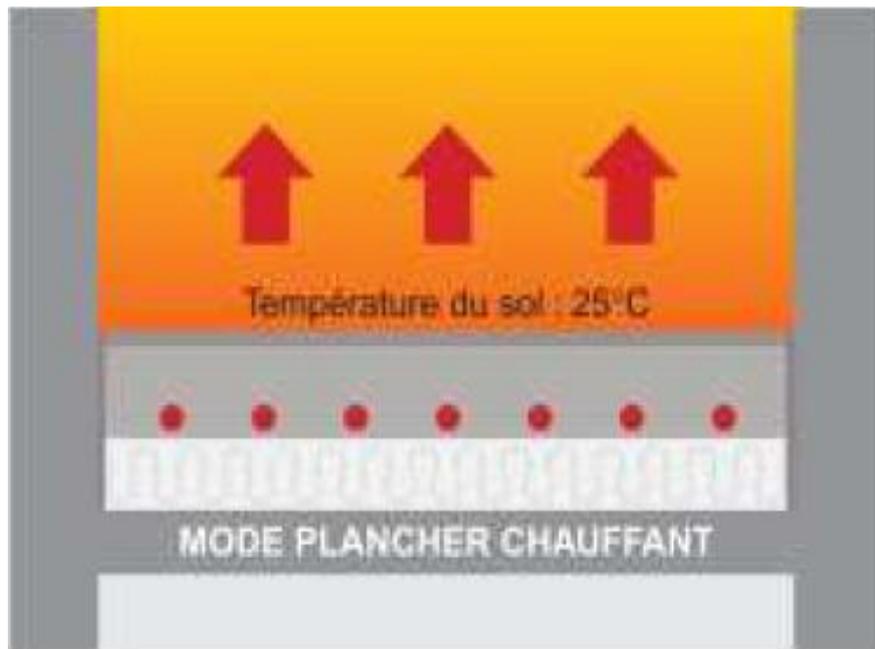


Figure 2.12: La répartition de la température dans une chambre chauffée par plancher Solaire.

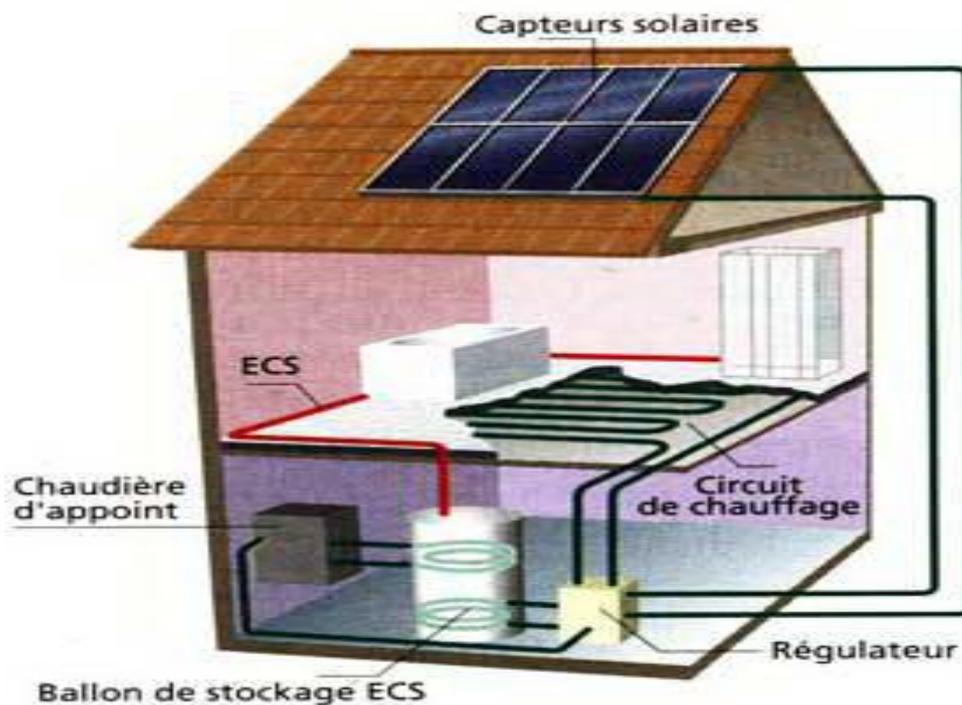


Figure 2.13 : Schéma d'une installation de chauffage solaire par le plancher et l'eau chaude sanitaire [3].

2.7- Avantages et inconvénients du plancher chauffant :

2.7.1- Avantages :

Le plancher chauffant utilise des techniques de fabrication récentes : des tubes en matériaux de synthèse et un niveau d'isolation réglementaire. Ces procédés offrent de nouvelles possibilités de chauffage par le sol. La courbe de température obtenue par ce genre de procédé est la plus proche de la courbe de chauffage idéale. On peut aussi parler de phénomène de conduction. En effet, la perte de chaleur par conduction se manifeste si notre corps est en contact avec un autre corps qui se trouve à une température inférieure au notre. C'est pour cette raison que nous constatons un grand certain degré de « confort » en marchant sur des sols froids. Ainsi, le fait que le plancher chauffant produit une chaleur homogène, cela empêche la formation de zones froides dans l'habitation.

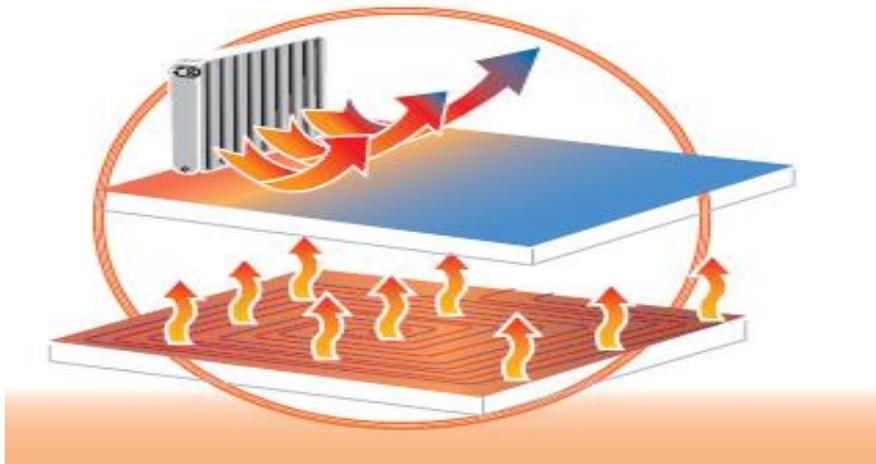


Figure 2.14 : La répartition de température dans 2 types différents de chauffage d'habitat.

➤ L'esthétique :

Le chauffage au sol présente l'avantage qu'il n'y ait aucune emprise au sol et par conséquent plus de surface occuper. L'absence de corps de chauffe sur les murs permet d'utiliser une plus grande surface de plancher estimée à environ 5 %. Ce système permet d'agencer les pièces comme l'utilisateur le souhaite. Finalement l'effet radiatif évite les traces noires sur les murs.



Figure 2.15: La différence esthétique entre deux modes de chauffage.

➤ **L'Economie :**

Le système du plancher chauffant permet une température ambiante inférieure de 2 à 3 C° par rapport à un émetteur de chaleur traditionnel. En effet la température du fluide chauffant (30 à 40C°) diminue de manière significative les pertes en ligne. Tous ces éléments font que le coût d'utilisation d'un plancher chauffant est nettement inférieur aux systèmes de chauffage traditionnels. Ceci diminue considérablement l'impact de la consommation d'énergie sur l'environnement.

➤ **La Réversibilité :**

Si l'utilisateur le souhaite, il existe des systèmes mixtes de chauffage-rafraichissement qui procure le confort d'un chauffage basse température en hiver et l'efficacité d'un rafraichissement agréable en été.

2.7.2- Inconvénients :

Le plancher chauffant ne peut être installé sur certains planchers en bois et est parfois déconseillé avec de la moquette. Ce système de chauffage au sol peut être installé sans souci lors de la construction d'une maison neuve, mais est plus coûteux lors de la rénovation d'une maison existante. Par ailleurs, ce système rehausse votre plancher de quelques centimètres et peut poser des problèmes pour l'ouverture des portes dans le cas d'une rénovation.

2.8 - Caractéristiques du plancher chauffant :

Pour définir les principales caractéristiques des nouveaux planchers chauffants basse température, - température de départ de l'eau : **50°C** maximale, ce qui donne une température moyenne, avec une chute de **10°C, de 45°C**. Afin de ne pas risquer de dépasser la température superficielle du sol, les températures moyennes généralement utilisées sont : **35, 40 et 45°C** ce qui permet aussi d'abaisser le coût d'exploitation. Ces températures ne sont pas des obligations, il est tout à fait possible de baser une étude sur une température de départ de **36°C** (généralement ça ne doit pas descendre en dessous **35°C**) et d'adopter une chute de **8°C** ceci donne alors une température moyenne de **32°C**. Il faut savoir qu'en moyenne la température de la peau chez l'homme est d'environ **31°C** il est donc difficile, par simple contact, de détecter la présence d'un sol chauffant, on peut tout au plus constater que le sol n'est pas relativement froid.

Une boucle minimum par pièce, ce qui permet d'avoir une indépendance et donc une possibilité d'adapter chaque pièce au confort souhaité. Dans la mesure du possible il faut essayer de ne pas avoir de boucle commune à plusieurs pièces car sinon il y a interdépendance, ce qui génère des problèmes d'équilibrage pour obtenir la température d'équilibre thermique.

La plus grande partie des émissions se font par le sol car la pose d'un isolant sous les tubes est systématique ce qui évite l'interdépendance verticale. Plus l'isolant est épais, plus les émissions hautes seront élevées et donc, plus les émissions basses seront faibles.

La surface du plancher chauffant couvre toute la surface de la pièce (hormis les emprises éventuelles) ce qui permet d'abaisser la température de l'eau ou d'espacer plus les tubes (surface d'échange plus grande). Avec un pas maxi de **35 cm**, donc l'homogénéité de la température du sol est assurée.

Inertie thermique ("temps de réponse thermique", pour plus d'exactitude) relativement plus faible du fait de la faible épaisseur (de **6 à 8 cm** en règle générale) de la dalle chauffante (chape) bien isolée en sous face.

Tubes en matériau de synthèse plus facile à manœuvrer que les tubes en acier. Fournis en couronnes de différentes longueurs pour une plus grande commodité, ils évitent les raccordements dans le sol contrairement aux soudures qui étaient faite sur le tube acier.

Il faut savoir, qu'il n'est pas si facile de calculer un plancher chauffant, car une multitude de facteurs rentrent en ligne de compte dont il faut définir les valeurs manuellement comme par exemple, la température de départ du fluide qui est en général basée sur la pièce de référence, la chute de température entrée/sortie dans la boucle, le type de support, le diamètre du tube, Un outil informatique (à titre d'exemple le Comsol) est fortement recommandé pour faciliter l'obtention des résultats et surtout, pour faire des simulations afin d'obtenir les résultats les plus à même de donner par la suite toutes satisfactions.

Il ne faut pas non plus tomber dans l'excès car si la température de départ est trop basse, il y a le risque que les émissions thermiques ne puissent couvrir les déperditions des pièces et donc de devoir installer des appoints thermiques, ce qui risque d'augmenter le coût d'exploitation plus que le choix d'une température de départ plus élevée. Il en va de même pour les chutes de température du fluide. Si ces dernières sont trop faibles, elles entraîneront un débit d'eau important qui risque de créer des bruits si la vitesse du fluide dépasse les **0,75 à 0,85 m/s** et qui dit débit plus important dit circulateur plus puissant.

2.9 -Conclusion :

Dans ce chapitre, on a défini et présenté : Les matériaux utilisés et leur conditionnement, Les principales applications, Le cas particulier des applications dans le bâtiment. Les matériaux utilisés sont de plusieurs types et les principaux sont, Les hydrates salins, Les paraffines, Les composés organiques non-paraffiniques, Les mélanges de composition eutectique.

On a donné les principaux exemples d'expérimentation concernant l'étude de bâtiment. On a cité une expérience sur l'utilisation de MCP dans une maison existante. Toutes ces expériences ont conclu à l'intérêt d'utiliser les MCP pourvu que certaines conditions dans la définition des parois ou dans leur utilisation soient respectées.

3.1- Introduction :

La simulation numérique est un des moteurs de l'innovation scientifique et industrielle. Une meilleure appréhension des phénomènes physiques et leur prise en compte en amont du processus de la définition des produits ont abouti à l'amélioration des performances de la durée de vie.

Depuis 1998, le code de calcul COMSOL répond à ces attentes en apportant une solution innovante et plus disciplinaire. Elle combine la puissance et la souplesse pour simuler des applications impliquant une ou plusieurs phénomènes physiques.

3.2- Description du logiciel :

COMSOL Multi Physique est un logiciel d'analyse et solveur par éléments finis, qui a diverses applications en physique, Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, Une interface similaire est offerte par COMSOL, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin de géométries et l'affichage de résultats en post-traitement.

COMSOL a été lancé par les étudiants diplômés à Germund Dahlquist reposant sur des codes mis au point pour un cours universitaire à l'Institut royal de technologie (KTH), à Stockholm, en suède.

3.3 -Procédure de simulation :

Les étapes essentielles de conception d'un modèle en utilisant COMSOL Multi Physiques sont :

- ✓ Utilisation d'une physique prédéfinie
- ✓ Implémentation et résolution d'un modèle Multi Physiques
- ✓ Définition de propriétés physiques dépendant de la solution recherchée
- ✓ Analyse temporelle
- ✓ Les étapes de construction d'un modèle comprennent notamment :
- ✓ Définition de la géométrie
- ✓ Définition de la physique et des conditions aux limites
- ✓ Maillage
- ✓ Résolution
- ✓ Post-traitement et analyse des résultats

3.4- Présentation générale du logiciel :

Lancez le logiciel en double-cliquant sur l'icône *COMSOL Multiphysics*.



Figure 3.1 : affichage au démarrage.

3.5 -L'interface graphique (le navigateur de modèle) :

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. Celui-ci permettra de créer une nouvelle page de simulation, vérifier les physiques et bien entendu d'obtenir de l'aide. En choisissant **Assistant de modélisation** dans la section **modèle** de la fenêtre **nouveau**, Comsol nous demande par la suite choisir la dimension de l'espace dans laquelle nous voulant travailler.

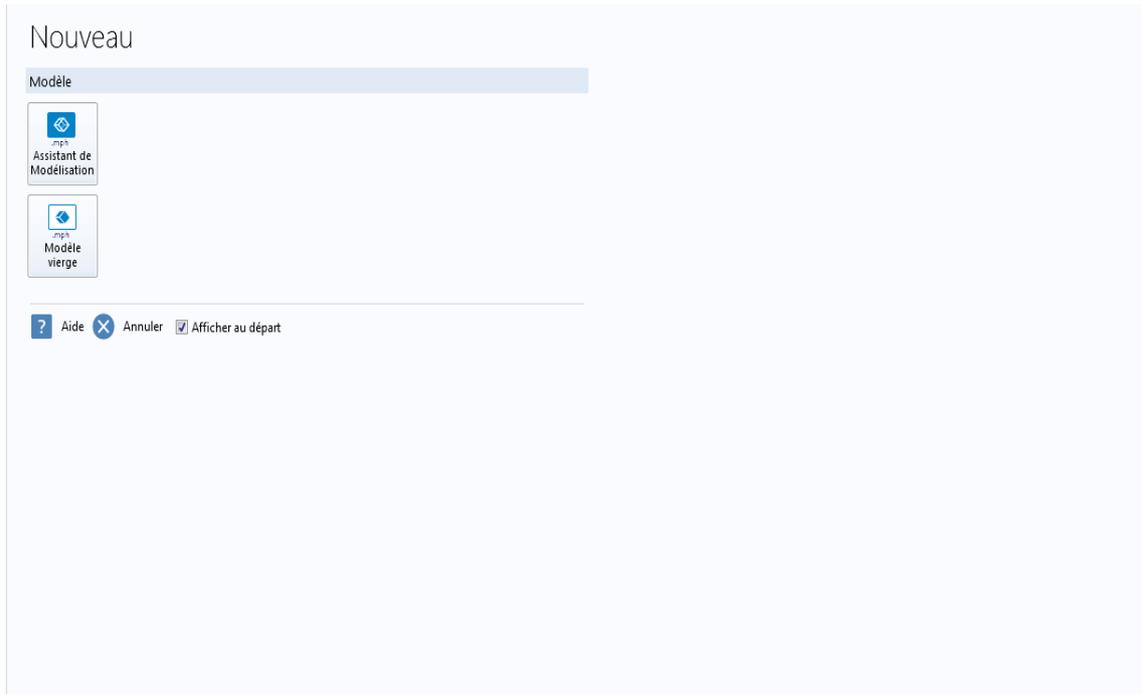


Figure 3.2 : pour sélectionner les dimensions d'espace (2D).

3.5.1- Choix du modèle :

Nous allons commencer par l'étude du champ de température. Lancez donc le module transfert de chaleur dans le navigateur de modèle. Nous allons ici nous limiter à une étude à 2 dimensions.

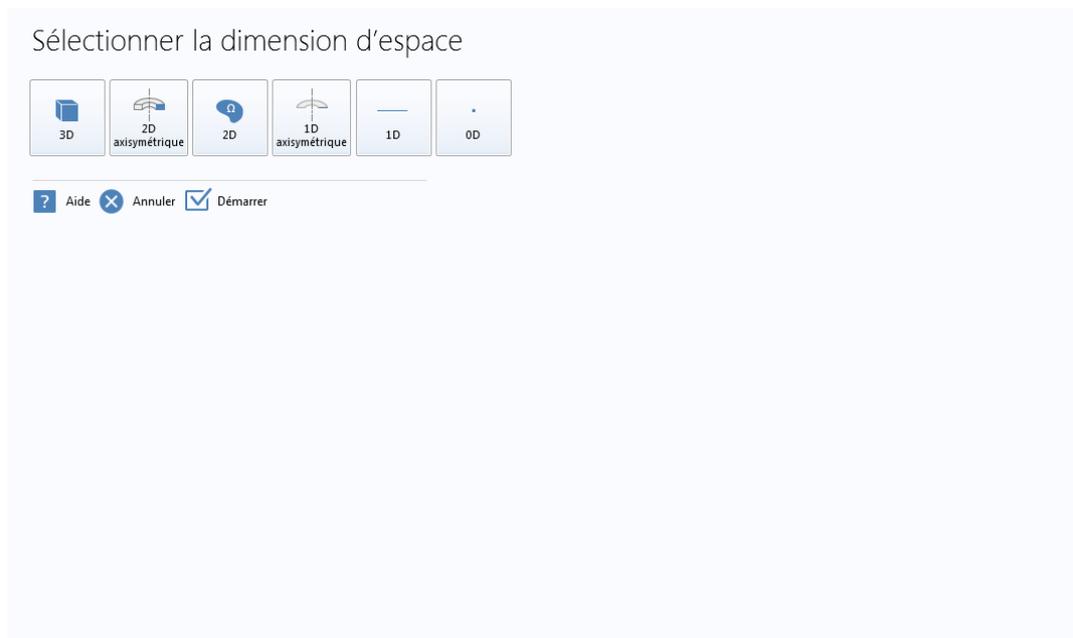


Figure 3.3 : pour sélectionner les dimensions d'espace.

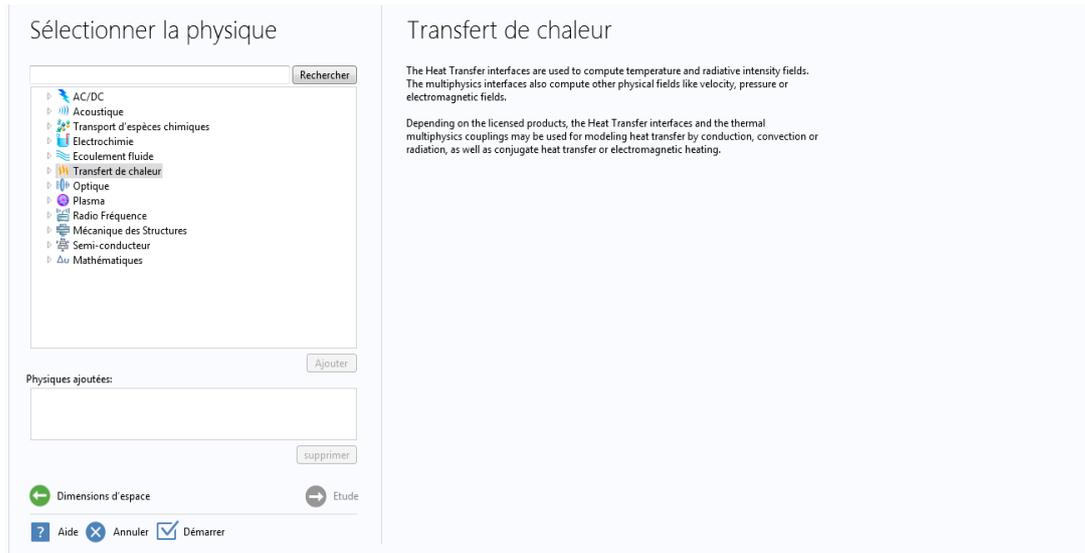


Figure 3.4 : pour ajouter une physique

3.5.2 -Définition de la géométrie :

Une fois le mode choisi, l'interface graphique s'ouvre. On doit d'abord commencer par déterminer la géométrie du problème qui définit concrètement l'espace où sont résolues les équations.

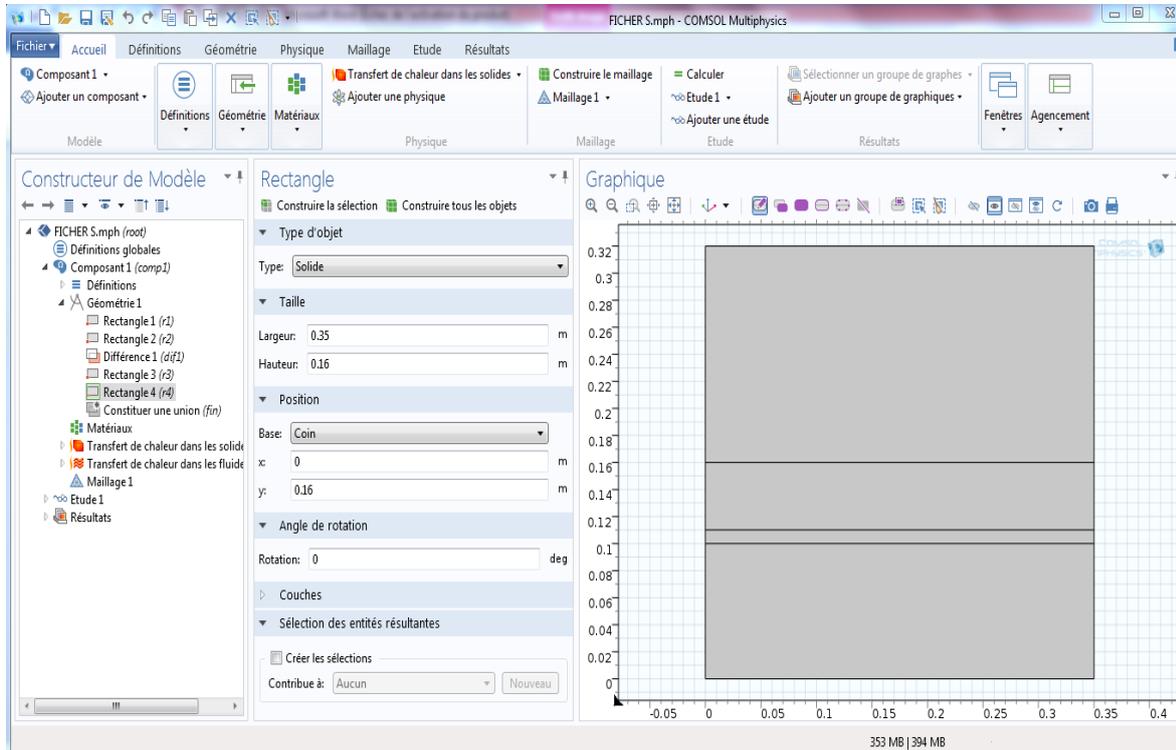


Figure 3.5 : la géométrie de notre modèle.

CHAPITRE 3 PRESENTATION DU LOGICIEL ET LES EQUATIONS

Une fois la géométrie créée, il existe pour le logiciel des sous domaines qui correspondent à des portions de l'espace initial. Dans l'exemple traité, l'espace initial est de dimension deux et les sous domaines définis par la géométrie sont l'espace compris à l'intérieur du milieu. Les équations et les conditions initiales sont définies sur les sous domaines de la géométrie, de même pour les conditions aux limites.

3.5.3 - Les propriétés des domaines :

Le but ici est de définir les paramètres physiques qui définissent le domaine : masse volumique, capacité calorifique, la conductivité thermique de chaque matériau. Les paramètres sont évidemment liés au modèle physique étudié. Il est également possible de changer un des domaines du modèle étudié.

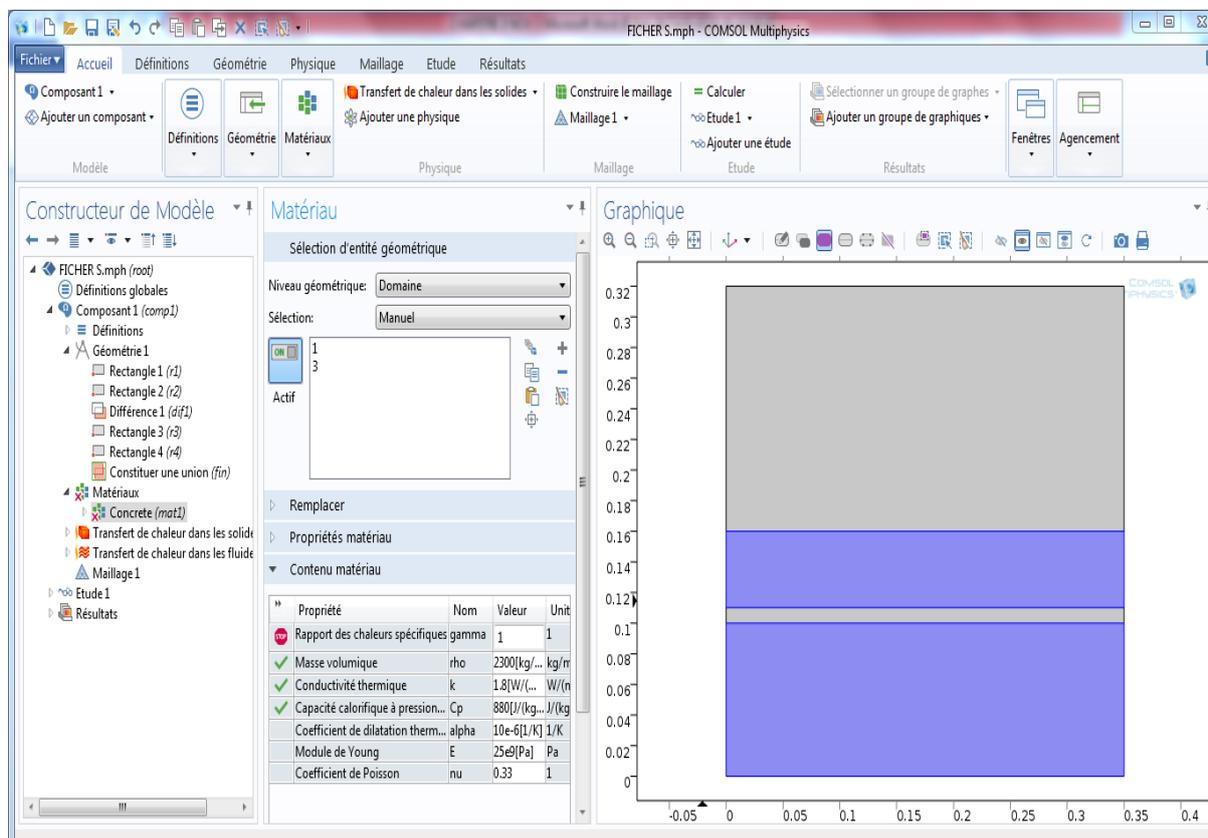


Figure 3.6 : Choix des matériaux

3.5.4- Les conditions aux limites :

Il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites pour résoudre le problème. A chaque frontière de domaine est associé un segment orienté. Il est possible de donner des valeurs de condition aux limites pour chacun de ces segments. Les options seront différentes suivant qu'il s'agisse ou non d'une frontière intérieure au système.

Choisissez de manière pertinente les différentes conditions aux limites (Température, isolation thermique, frontière ouvert, contact thermique). Vous pourrez les changer plus tard, de manière à voir leur influence sur le domaine.

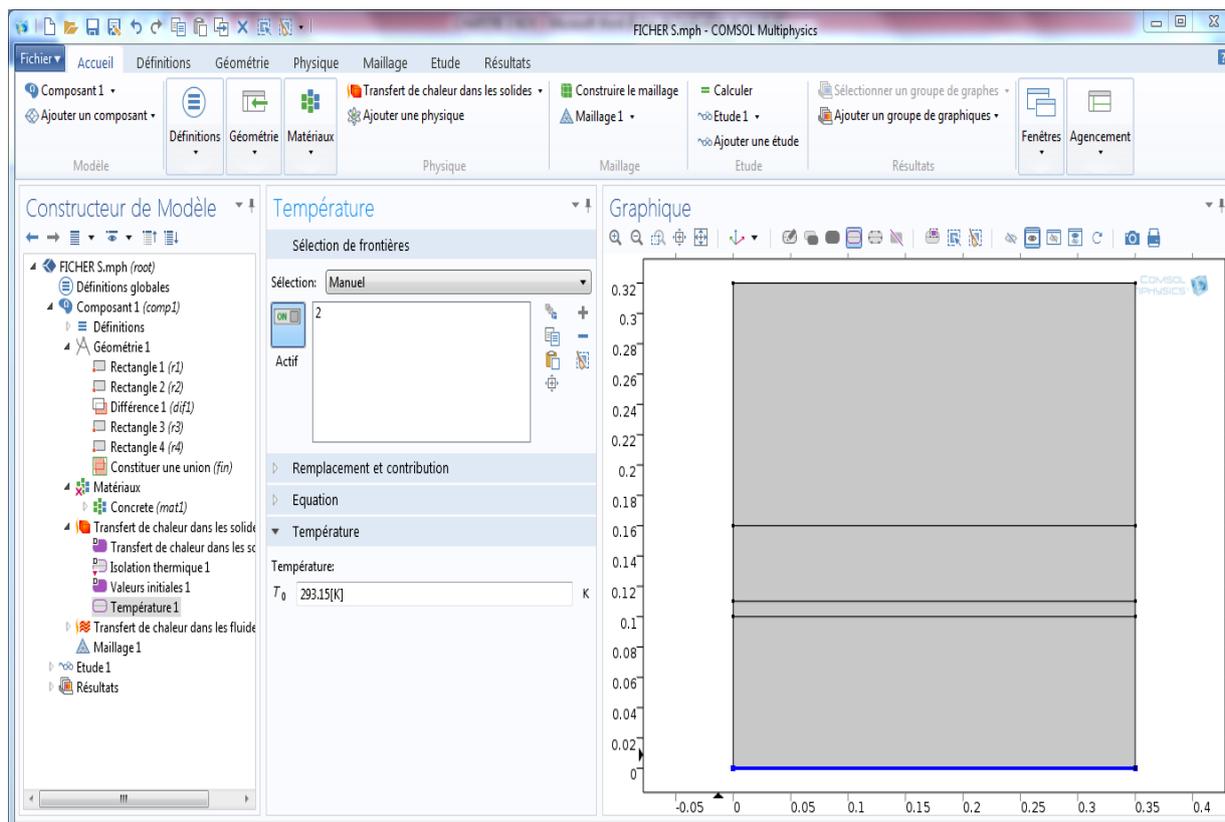


Figure 3.7 : Introduction des conditions aux limites

3.5.5-Maillage :

Le maillage correspond à la géométrie (appelés mailles) définis par des points (appelés nœuds). Ces nœuds constituent les connexions entre les mailles.

Le maillage est réalisé automatiquement par le logiciel. L'algorithme prend pour point de départ les éléments de la géométrie et crée des nœuds supplémentaires jusqu'à satisfaire des critères prédéfinis comme le nombre de mailles ou la taille maximale des mailles. On peut utiliser les tailles prédéfinies (extra grossier, grossier, normal, fine, extra fine...) par le logiciel ou agir sur les paramètres de génération du maillage.

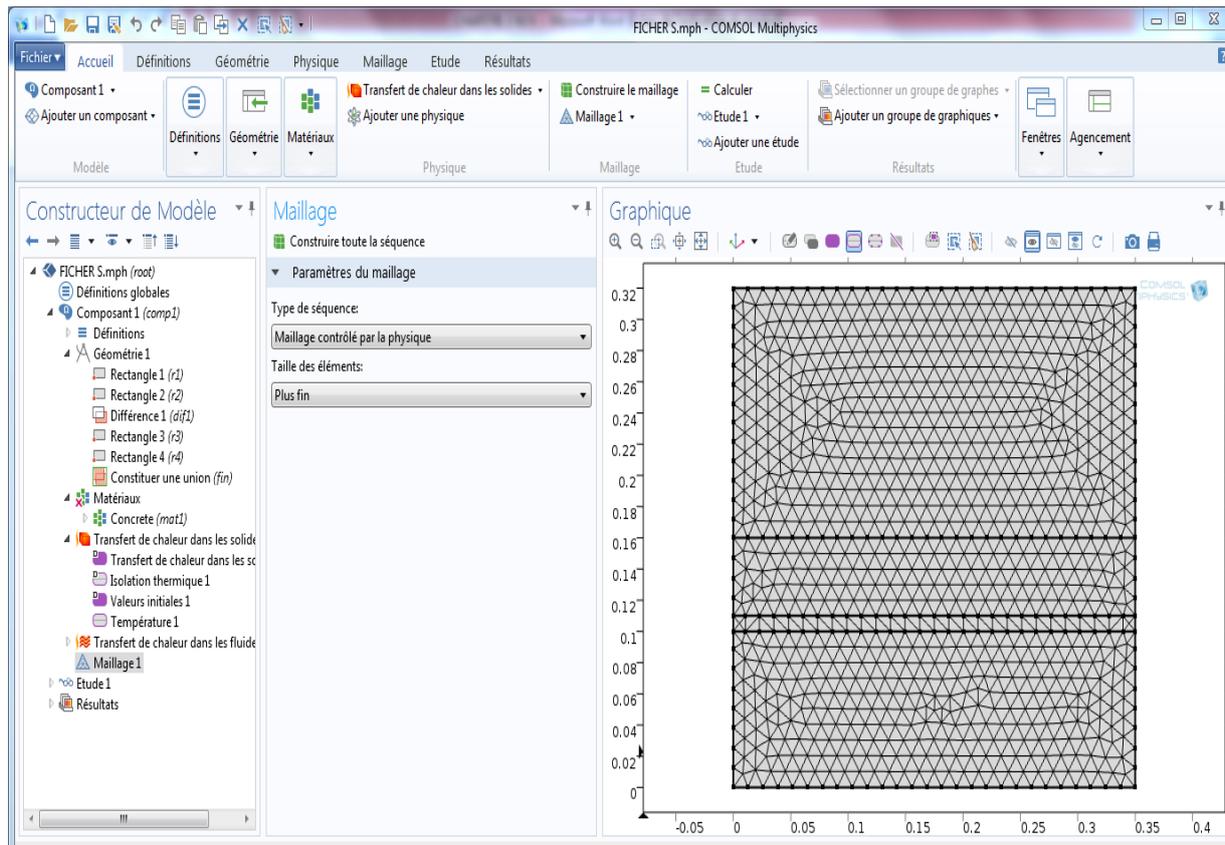


Figure 3.8 : Procède de maillage

3.5.6- Résolution du problème :

Lorsque le problème est complètement défini, il ne reste plus qu'à le résoudre. Il est possible d'accéder à des menus pour la résolution. De même, lors de la résolution d'un problème multi physique, il est possible de ne résoudre que pour une certaine partie des variables. S'il y a des problèmes de convergences, il est possible que le problème soit mal posé (conditions aux limites, ...).

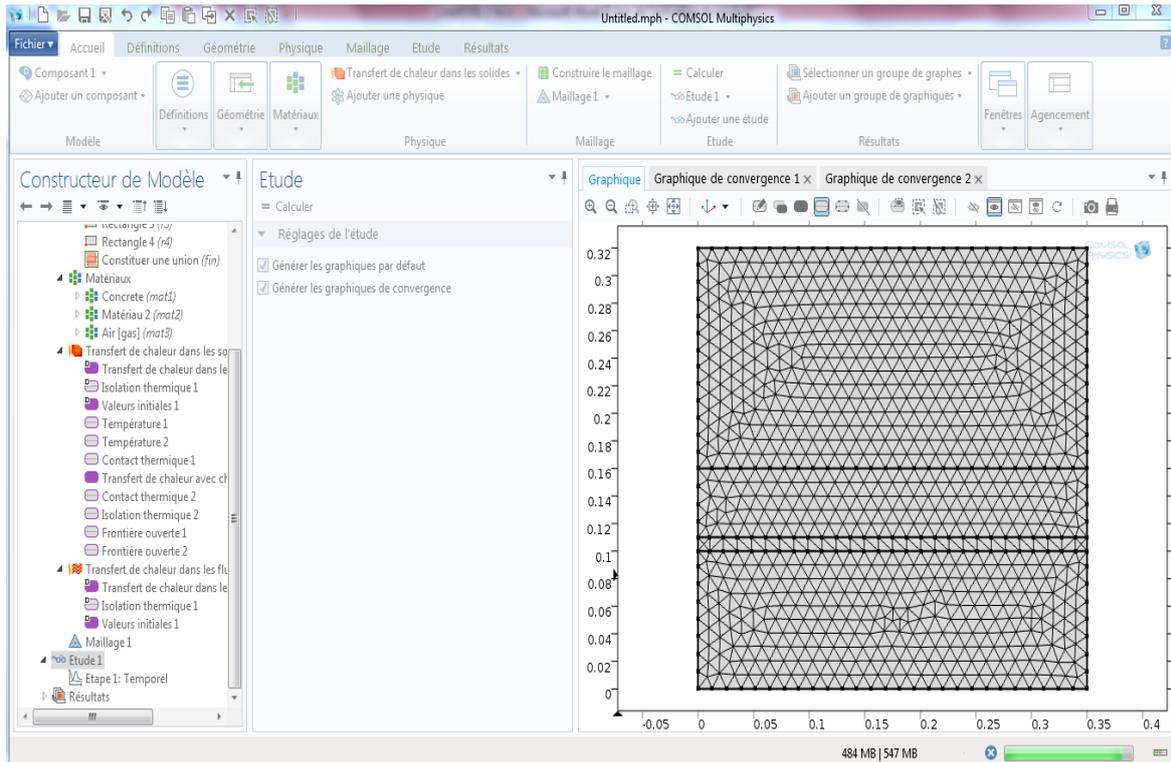


Figure 3.9 : Résolution du problème

La résolution est d'autant plus longue que le nombre de nœuds du problème est élevé. Sa vitesse dépend également du type de solveurs choisis. Il est possible de fixer une initialisation qui peut être une valeur, ou une solution précédemment enregistrée. On peut choisir les variables que l'on souhaite résoudre, dans le cas d'un problème multi physique que l'on peut découpler. Le jeu de données à créer pour la résolution numérique complète comprend le modèle de comportement, les propriétés physiques, conductivité du matériau, et les conditions aux limites imposées sur le maillage. Ces données sont saisies conventionnellement par l'interface de maillage et stockées sur un fichier texte. Ce fichier pourra être ultérieurement modifié par l'éditeur de texte. Il suffit à l'utilisateur d'ordonner au logiciel la résolution en désignant le fichier donné, précédemment créé et le fichier contenant le maillage.

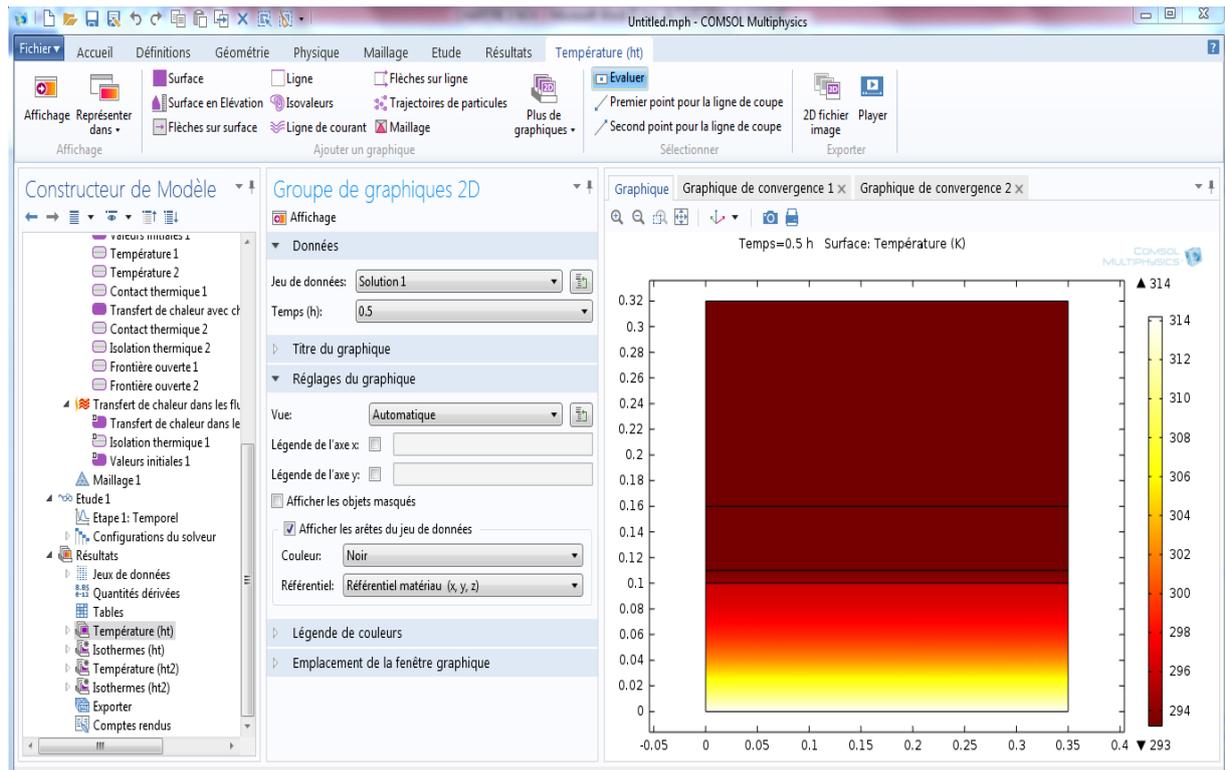


Figure 3.10 : Résultat final

3.6 -Equation réagissant la chaleur dans la paraffine :

Nous faisons l'hypothèse que le champ thermique dans la paraffine est bidimensionnel.

❖ Equation de la chaleur dans la phase solide :

Dans la phase solide, la conduction est le seul mode de transfert de la chaleur dans la paraffine. La seule équation à modéliser est l'équation de diffusion de la chaleur

$$\frac{\delta T}{\delta t} = Kps \Delta T \quad (3.1)$$

L'équation s'écrit :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = Kps \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \right) \quad (3.2)$$

❖ Equation de la chaleur dans la phase liquide :

La paraffine absorbant la chaleur qui vient de fluide caloporteur est complètement fondue, par conséquent le transfert thermique est dominé par la conduction.

L'équation à modéliser est l'équation de diffusion de la chaleur dans le liquide :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = Kpl \Delta T \quad (3.3)$$

L'équation s'écrit :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = Kpl \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \right) \quad (3.4)$$

H est une fonction discontinue à $T=T_f$. Cette discontinuité marque la séparation entre le liquide et solide est appelée interface diphasique pour que le matériau soit complètement solidifié, il faut lui enlever la quantité d'énergie ΔH suivant :

$$\Delta H = Cpl(Tl - Tf) + Ls + Cps(Tl - Ts) \quad (3.5)$$

Tl : Désigne la température du matériau à l'état liquide.

Ts : Désigne la température du matériau à l'état solide.

Tf : Désigne la température de solidification (fusion).

Cpl et **Cps** : sont les capacités thermiques du liquide et du solide.

Dans sa forme liquide, le matériau possède la chaleur latente **LS** par unité de masse plus la chaleur sensible représentée par la relation :

$$Cpl\Delta T \quad \text{pour } T > Tf \quad (3.5)$$

Pour l'enthalpie de matériau est reliée à la température :

$$\Delta H = \left\{ \begin{array}{l} Cpl\Delta T \\ Cps\Delta T \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \text{pour } T > Tf \\ \text{pour } T < Tf \end{array} \right\} \quad (3.6)$$

CHAPITRE 3 PRESENTATION DU LOGICIEL ET LES EQUATIONS

Pour un alliage, ou la solidification prend place à travers un intervalle de solidification (T_l - T_s), l'enthalpie est reliée à la température par :

$$\Delta H = \begin{cases} C_{pl} \Delta T + L_s & \text{pour } T \geq T_f \\ C_{ps} \Delta T + f_l L_s & \text{pour } T_s < T < T_l \\ C_{ps} \Delta T & \text{pour } T \leq T_f \end{cases} \quad (3.7)$$

Avec : T_f désigne la fraction liquide.

Dans la solidification ou de fusion, la température évolue dans chacune des phases et interfaces diphasiques se déplacent.

3.7 –Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les différentes étapes suivies lors d'une simulation d'une partie de matériau à changement de phase à l'aide du logiciel *Comsol Multiphysics*® 4.4, et les équations utilisées pour résoudre ce problème en simulant les phénomènes physiques étudiée.

4.1- Introduction :

Dans ce chapitre on va étudier deux paramètres pour voir leur influence sur le comportement d'une chambre munie d'un système de chauffage solaire et essayer de connaître les meilleures conditions qui donnent un confort à l'intérieur de la maison, le but est de stocker une quantité d'énergie pour l'utiliser dans un certain temps, les paramètres étudiés sont :

- Epaisseur du matériau à changement de phase (paraffine) : on va varier l'épaisseur de paraffine entre 0,01m et 0,02 m et une température entre $T=40^{\circ}\text{C}$ et $T=80^{\circ}\text{C}$.
- Changement de matériaux à changement de phase.

4.2 -Le problème étudié :

Pour simplifier le problème on a fait une étude en bidimensionnelle pour cela on a les couches suivants :

- Une couche du béton : $e = 0,1\text{m}$.
- Une couche de la paraffine : $e = 0,01\text{m}$ et $0,02\text{m}$.
- Une couche de revêtement : $e = 0,05\text{m}$.
- Une chambre à température ambiante (air).

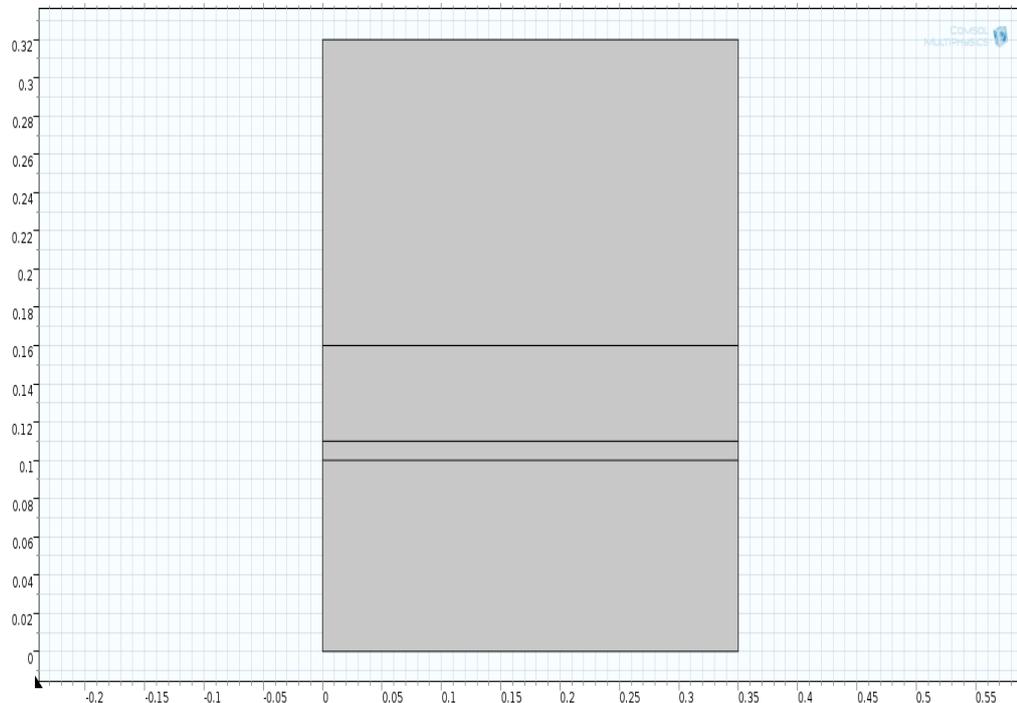


Figure 4.1 : La géométrie représente les trois couches.

On va étudier l'évolution de la température en fonction du temps dans différents points pour voir l'effet de la température sur les matériaux à changement de phase pour le stockage d'énergie.

Pour cela on à :

- La température de la partie supérieure est de $27C^{\circ}$.
- La température du fusion de la paraffine est de $23C^{\circ}$.
- La température de la partie inférieure est constant dans la paroi.

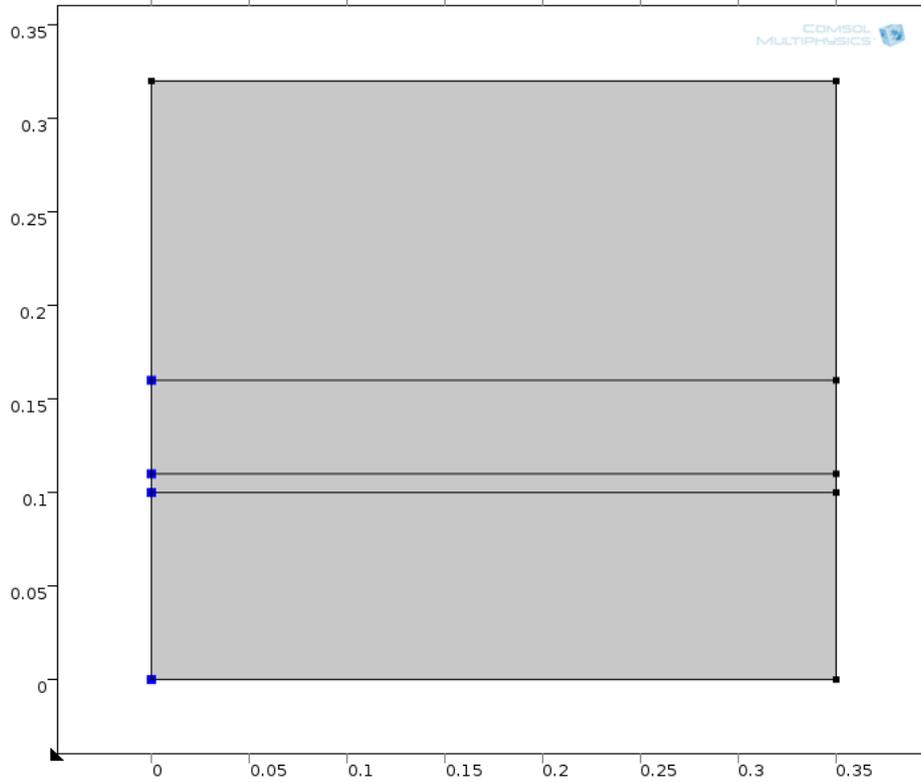


Figure 4.2: les différents points étudiés.

❖ Les propriétés thermiques utilisées dans la simulation :

Tableaux 4 .1 : Les caractéristiques des matériaux utilisée.

Propriétés	Béton	Paraffine
Masse volumique ρ (Kg /m^3)	2300	0,760(liquide) 0,900(solide)
Conductivité thermique λ (W /m.k)	1.75	0.15
Chaleur spécifique c_p (J/Kg.K)	1080	2800
Chaleur latent L (KJ /Kg)	-	189
Température de fusion $T_f(C^{\circ})$	-	23

4.3 -Résolution du problème :

Les figures ci-dessous montrent les résultats obtenus pour une épaisseur de 0,01m de paraffine et de température compris entre 40C°et 80C° dans un intervalle du temps (0.5h à 50h).

a)- Pour une épaisseur=0,01m.

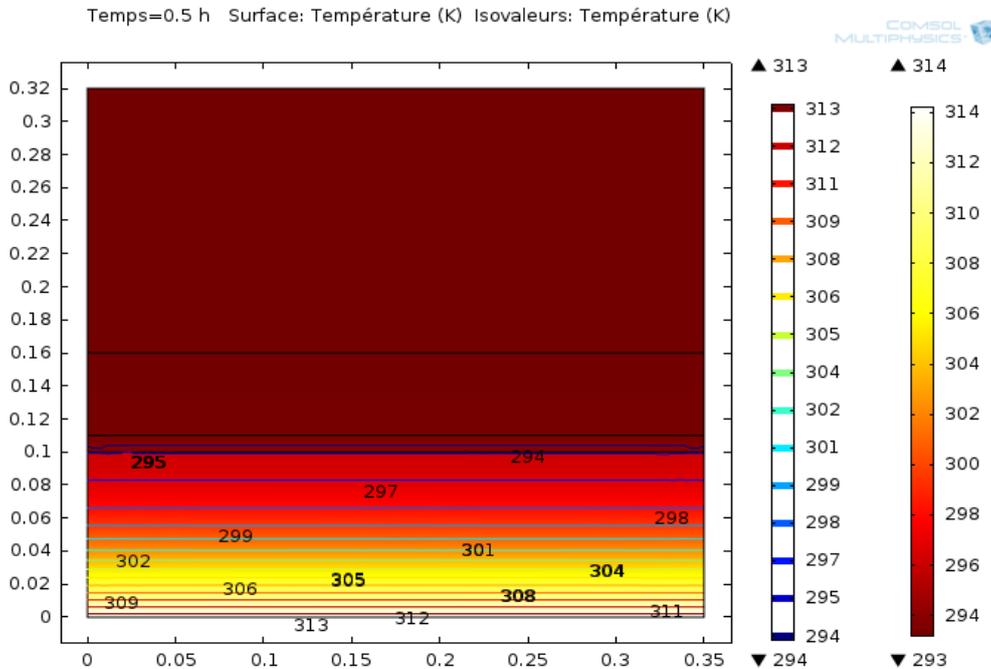


Figure 4.3 :L'évolution de la température dans les différents points à t=0,5h.

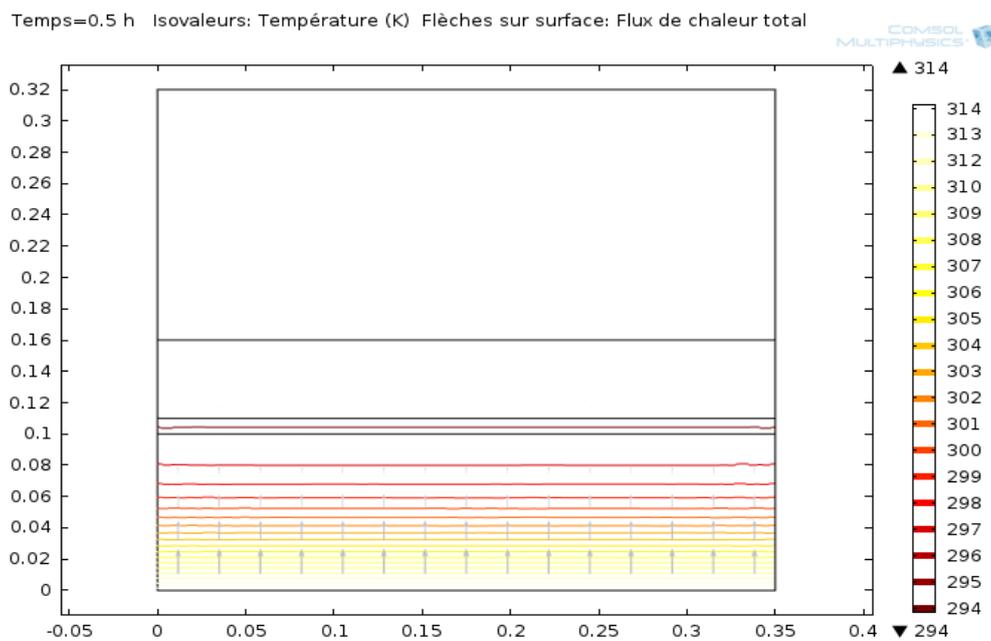
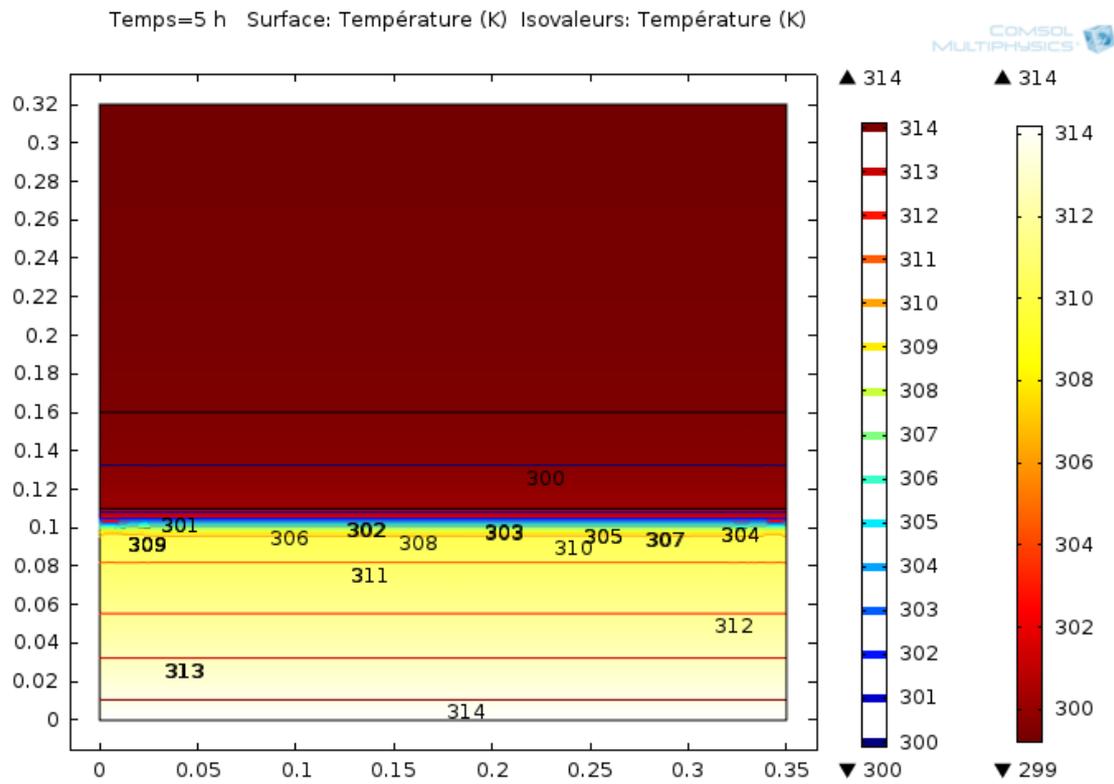


Figure : 4.4: Les lignes de la transformation de la chaleur à t=0,5h.



Figur 4.5 :L'evolution de la température dans les différents points à t=5h

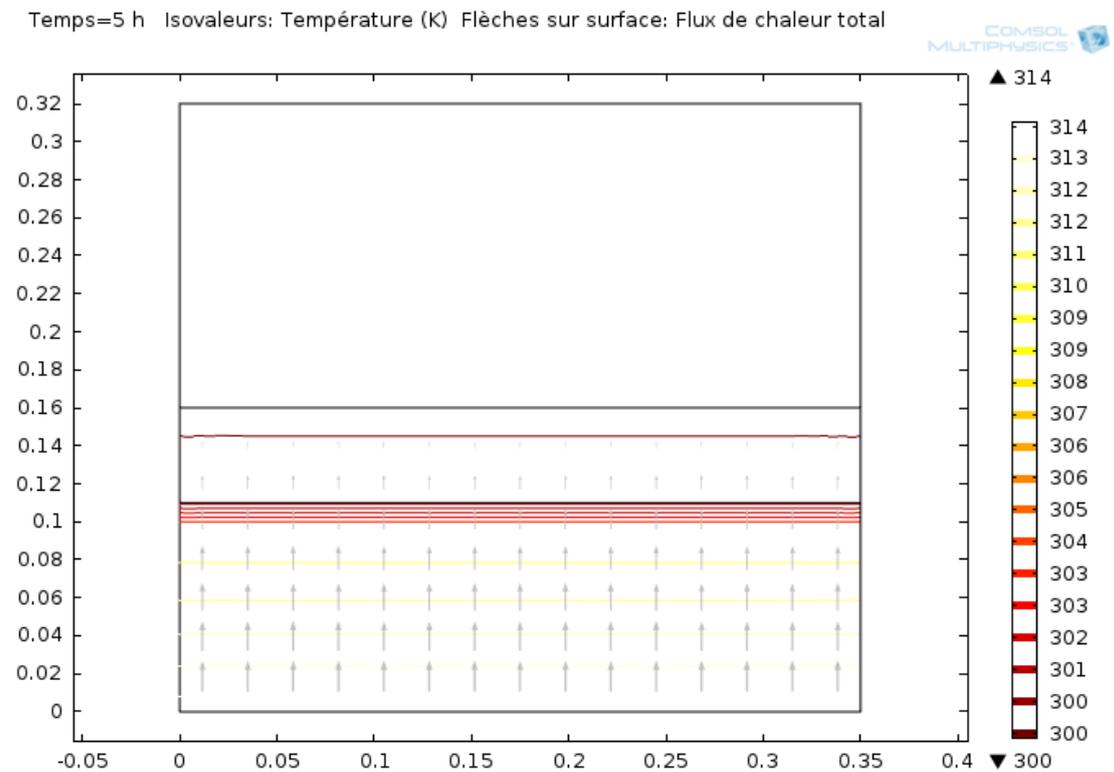


Figure : 4.6: Les lignes de la transformation de la chaleur à t=5h.

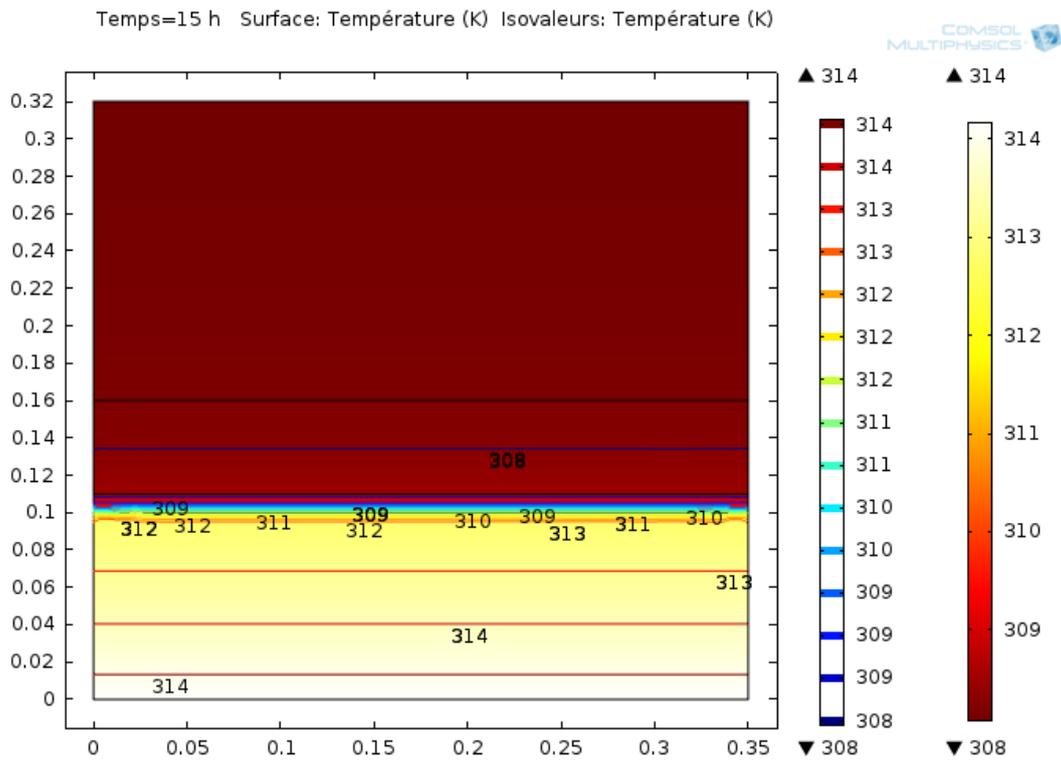


Figure 4.7 :L'évolution de la température dans différents points à t=15h.

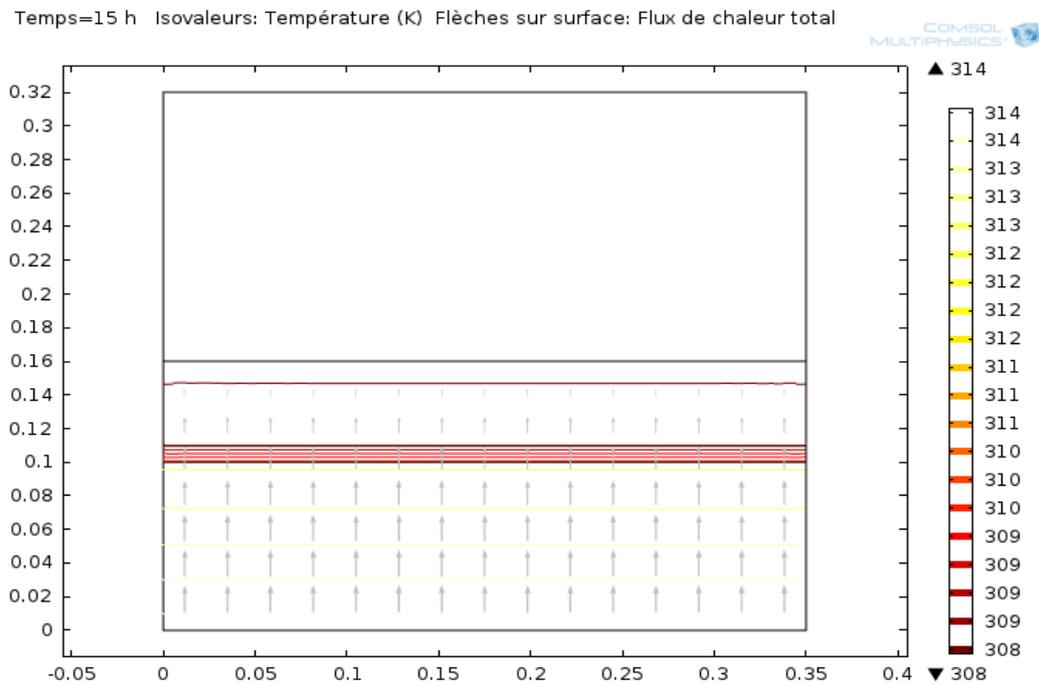


Figure 4.8: Les lignes de la transformation de la chaleur à t=15h.

Dans les figures (4.3 ,4.4, 4.5 ,4.6, 4.7, 4.8) on remarque l'évolution de la température en fonction du temps ainsi que les lignes de l'isotherme qui explique la transformation de la chaleur, donc dans 0,5h ,5h et 15h en a vu que la chaleur augmenter vers la paroi supérieure qui vient de fluide caloporteur.

4.4 -Résultats :

Afin d'avoir de bonne lecture des résultats on a mis des points de mesures sur la ligne de chaque matériau pour voir l'effet de la température sur le changement de phase du paraffine en fonction du temps.

Donc les résultats suivant montrent l'évolution de la température en fonction du temps avec des différentes températures (40C°,50C°, 60C°,80C°).

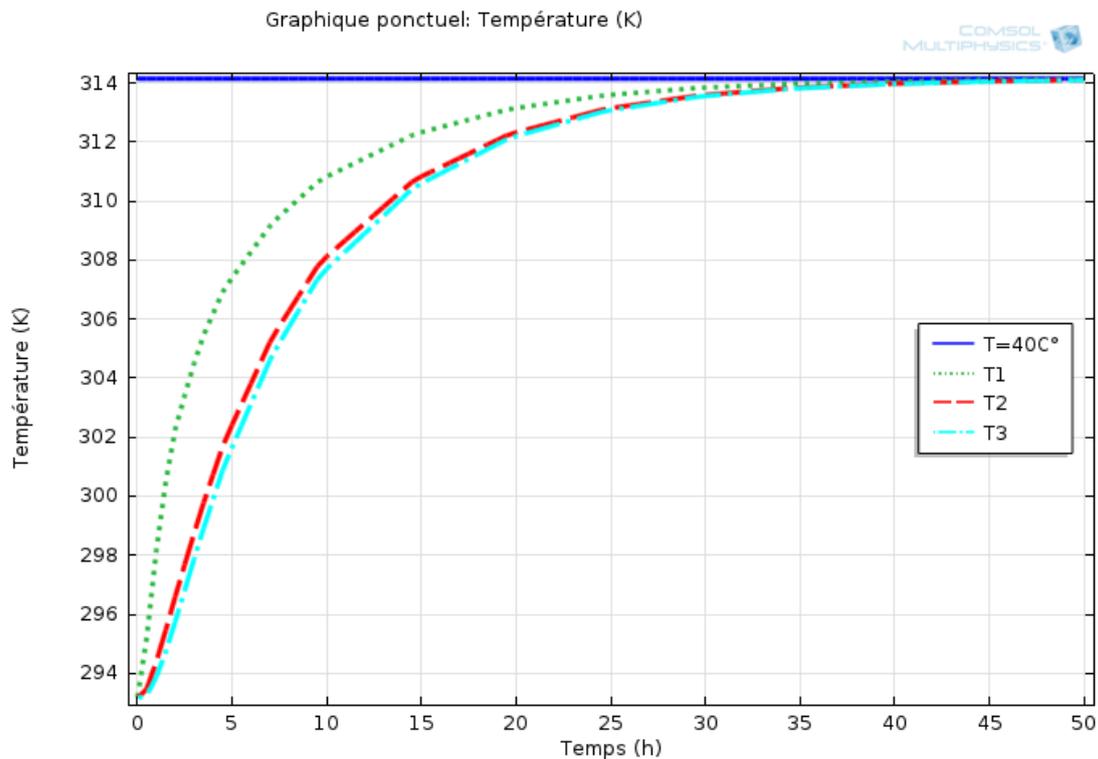


Figure 4.9 : Les courbes de la température en fonction du temps à température=40C°.

T : c'est la température imposé du fluide caloporteur.

T1 : c'est la température du premier point de la couche de paraffine.

T2 : c'est la température du deuxième point de la couche de paraffine.

T3 : c'est la température de la paroi supérieure.

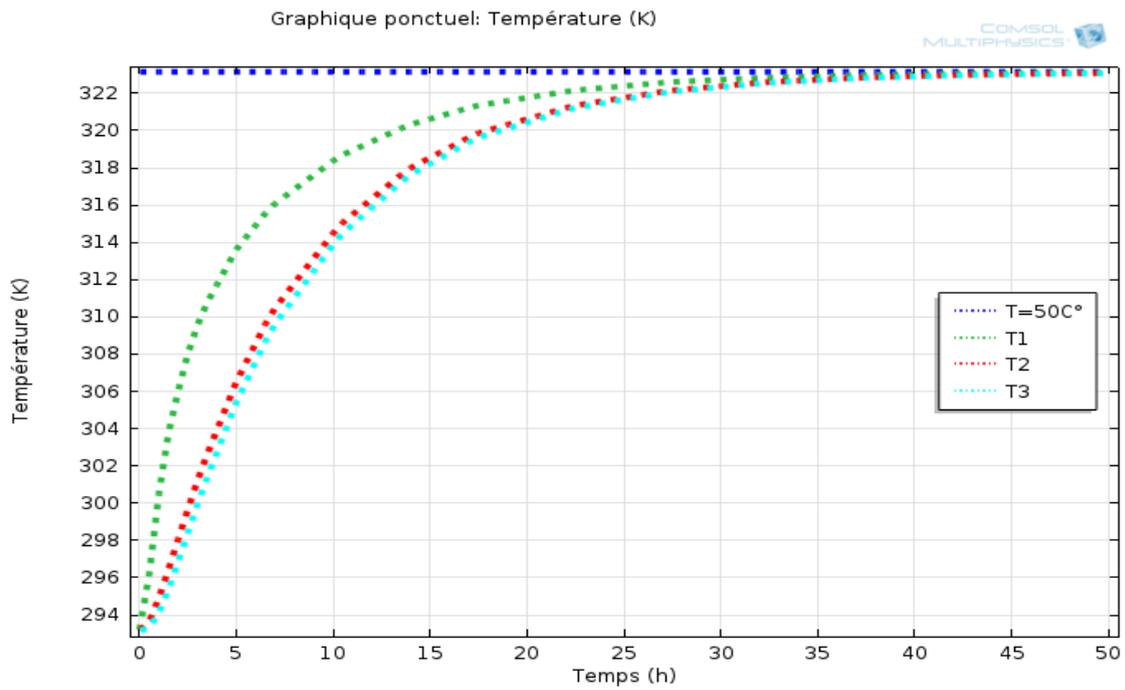


Figure 4.10 : Les courbes de la température en fonction du temps à température=50C°.

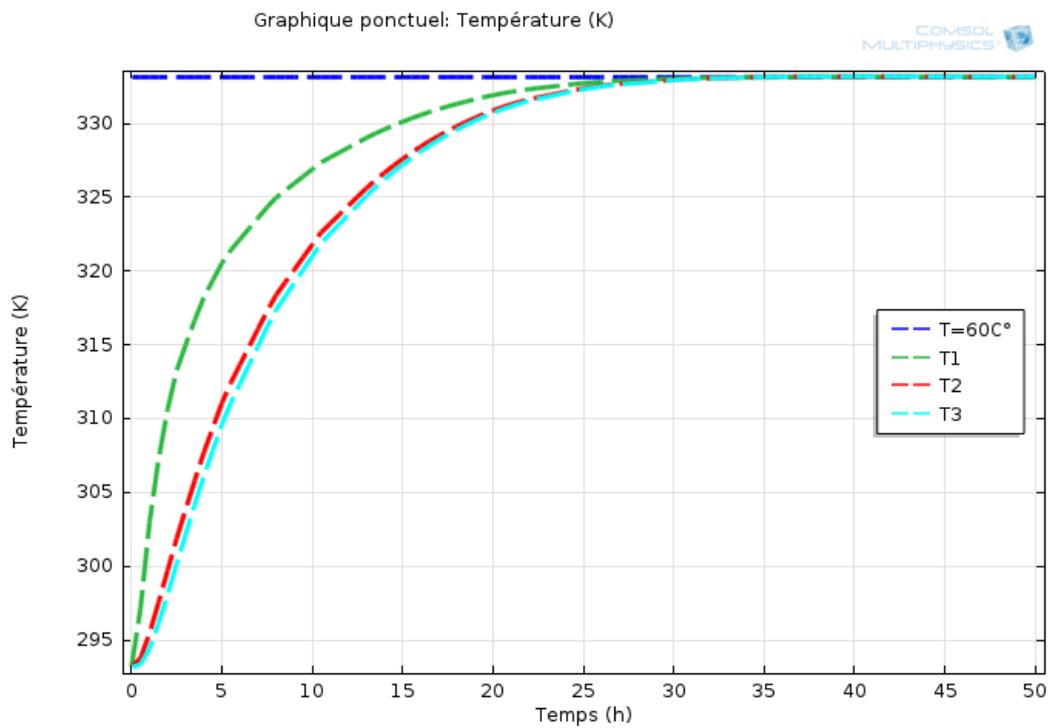


Figure 4.11 : Les courbes de température en fonction du temps à température=60C°

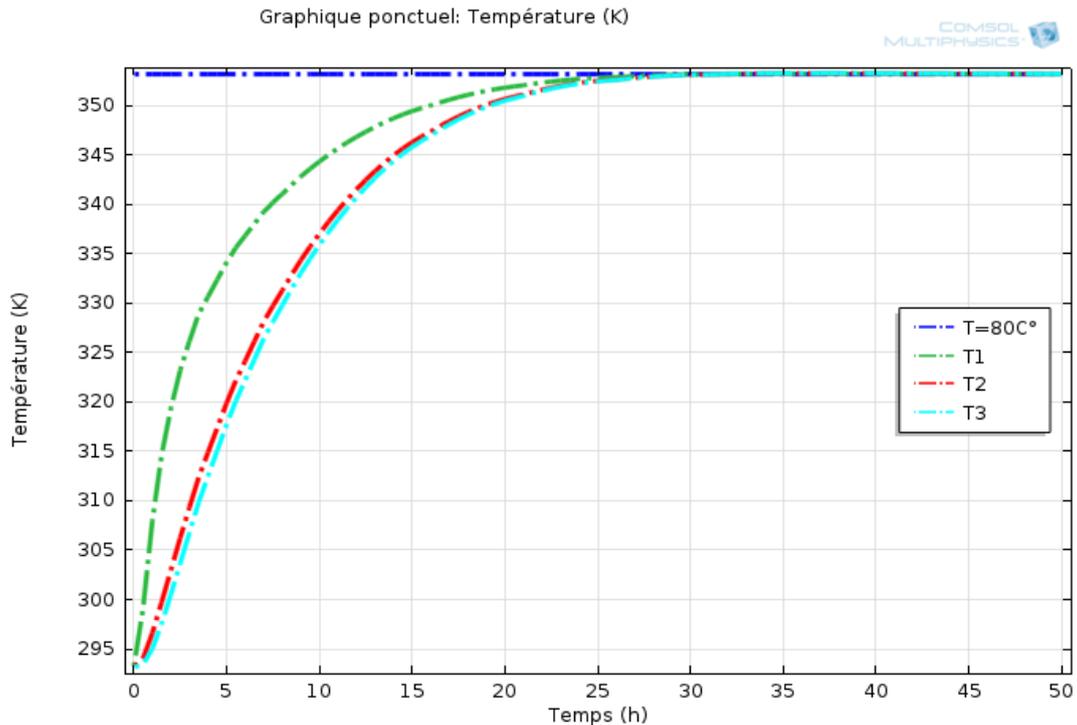


Figure 4.12 : Les courbes de la température en fonction de temps à température=80C° .

4.5- Discussion des résultats :

Les graphes présentés dans les figure (4.9, 4.10, 4.11, 4.12) montrent l'évolution des températures de Plusieurs points du paraffine en fonction du temps au cours de la charge, pour des températures différents (40C°, 50C°, 60C° et 80C°) de fluide caloporteur.

On remarque que les courbes **T2**, **T3** ont la même allure, il est converge vers la température de fluide caloporteur en fonction du temps.

La température **T1** augment de **21C°** jusque **39C°** pour transférer la chaleur qui vient de fluide caloporteur. **T** est fix à **27C°**.

La température de la paroi supérieure est de 27C° c'est la température ambient, le changement de phase **solide –liquide** au niveau de la paraffine est de **23C°**, c'est-à-dire l'écart de la température va faire transférer la chaleur vers la paroi supérieur .donc la température joue un rôle très important pour le stockage thermique de l'énergie solaire, on constate que le changement est rapide surtout pour les grandes températures.

L'épaisseur de la paraffine augment l'inertie thermique de plancher, la conductivité thermique est faible qui va empêcher la chaleur vers l'air ambient.

b)-Pour une épaisseur=0,02m :

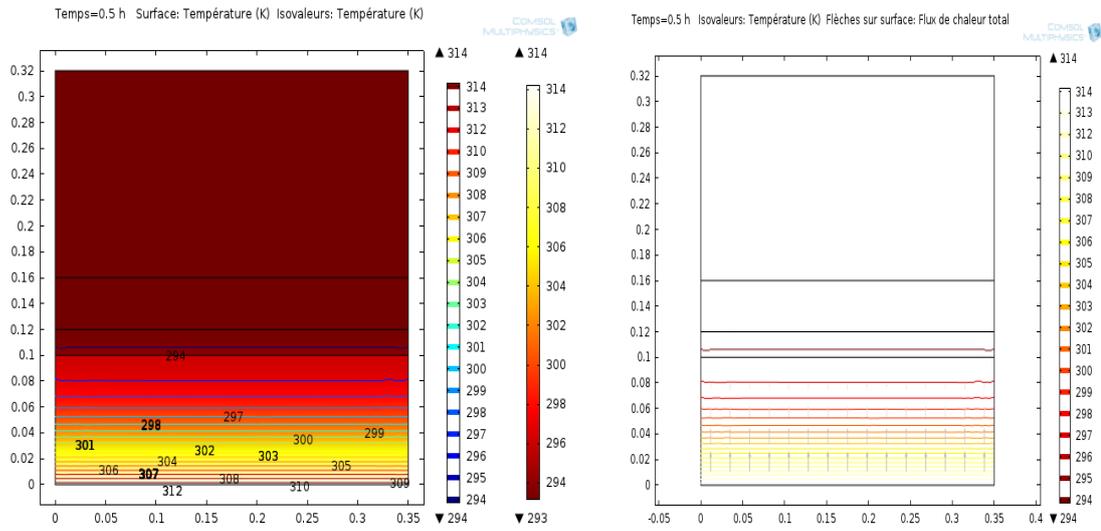


Figure 4.13: La transformation de la chaleur à t=0,5h de e=2cm.

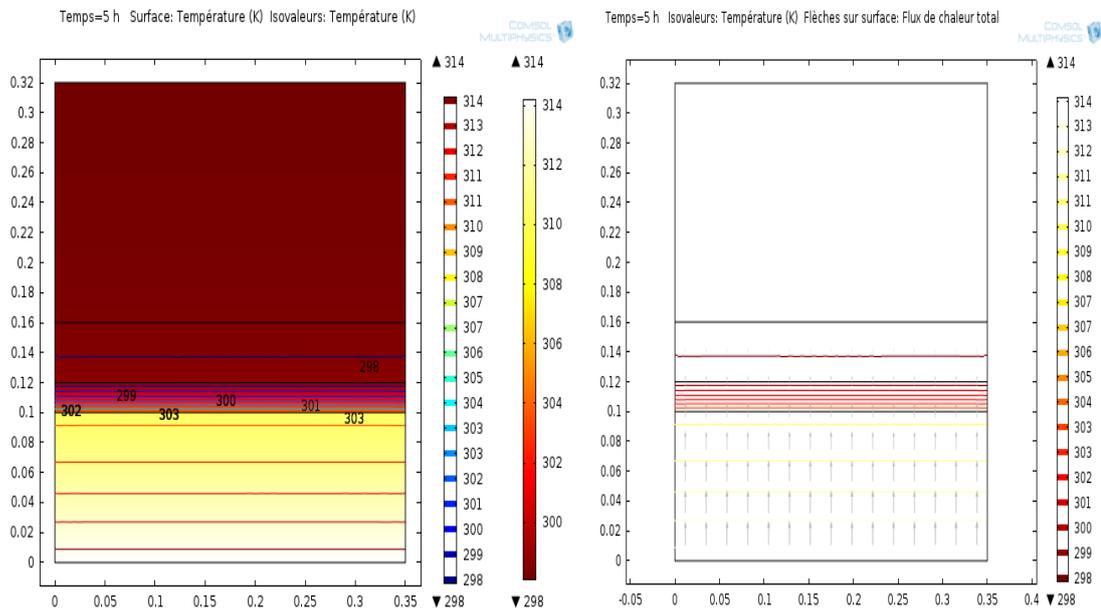


Figure 4.14: La transformation de la chaleur à t=5h de e=2cm.

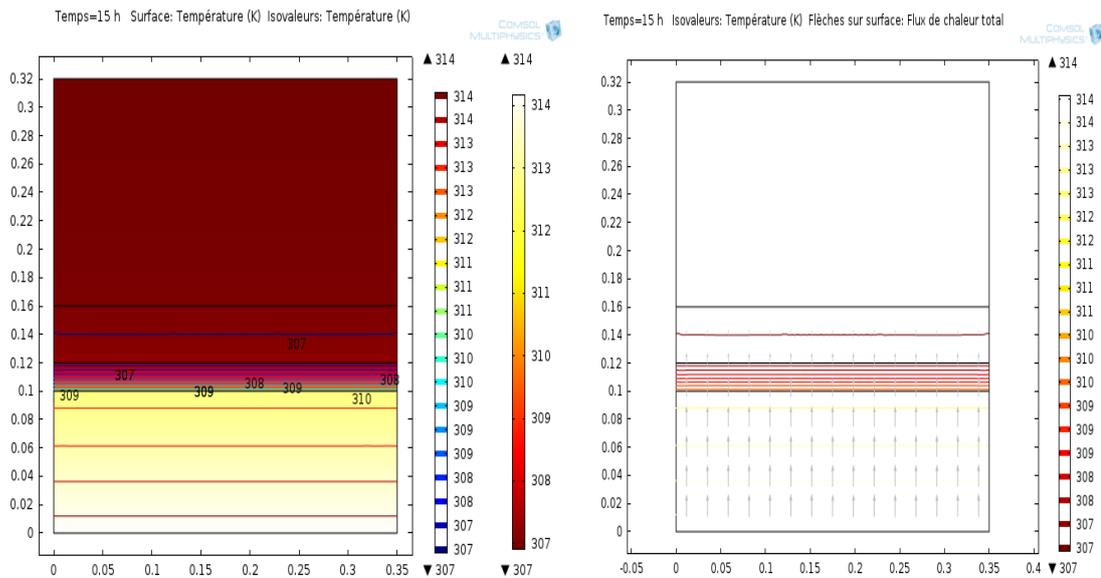


Figure 4.15: La transformation de la chaleur à t=15h de e=2cm.

Lorsqu'en change l'épaisseur de la paraffine à 2 cm on remarque que la chaleur augment dans la même façon que de la paraffine à 1 cm d'épaisseur.

❖ **Les résultats :**

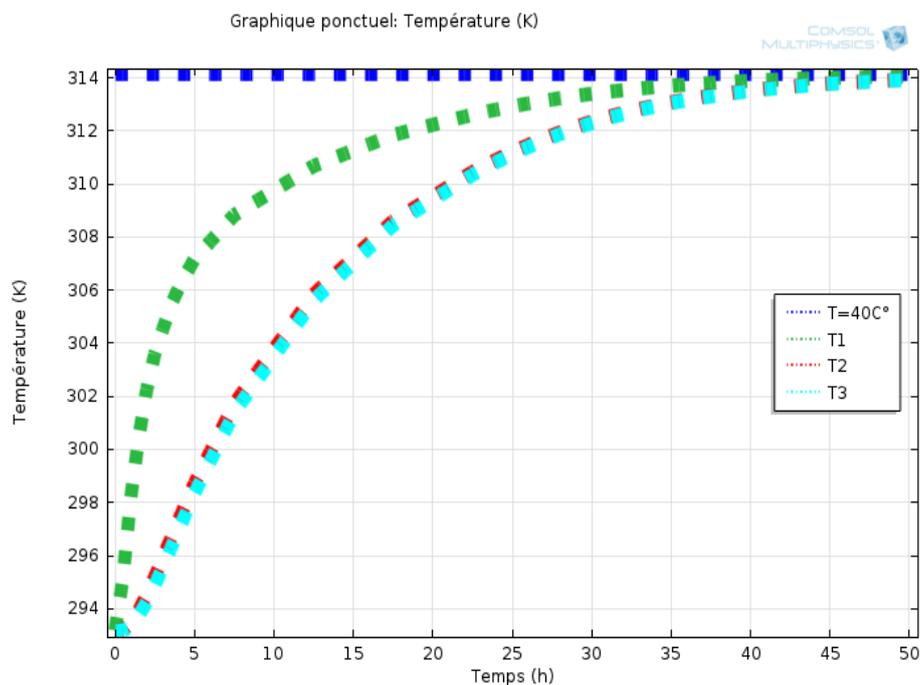


Figure 4.16 :Les courbes de la température en fonction du temps à température =40C°.

T : c'est la température imposé du fluide caloporteur.

T1 : c'est la température du premier point de la couche de paraffine.

T2 : c'est la température du deuxième point de la couche de paraffine.

T3 : c'est la température de la paroi supérieure.

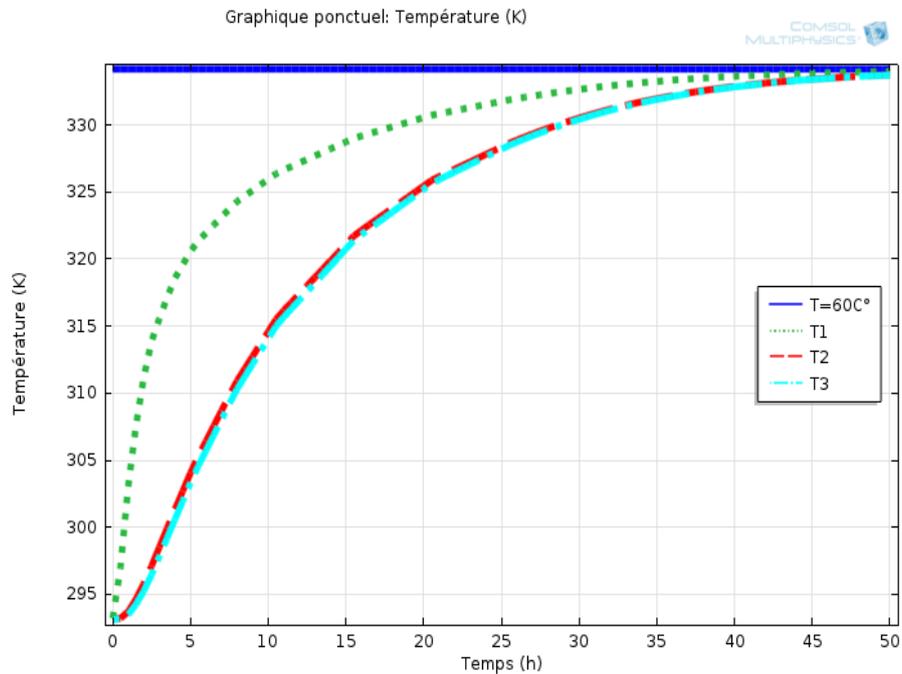


Figure 4.17 :Les courbes de la température en fonction de temps à température= 60C°.

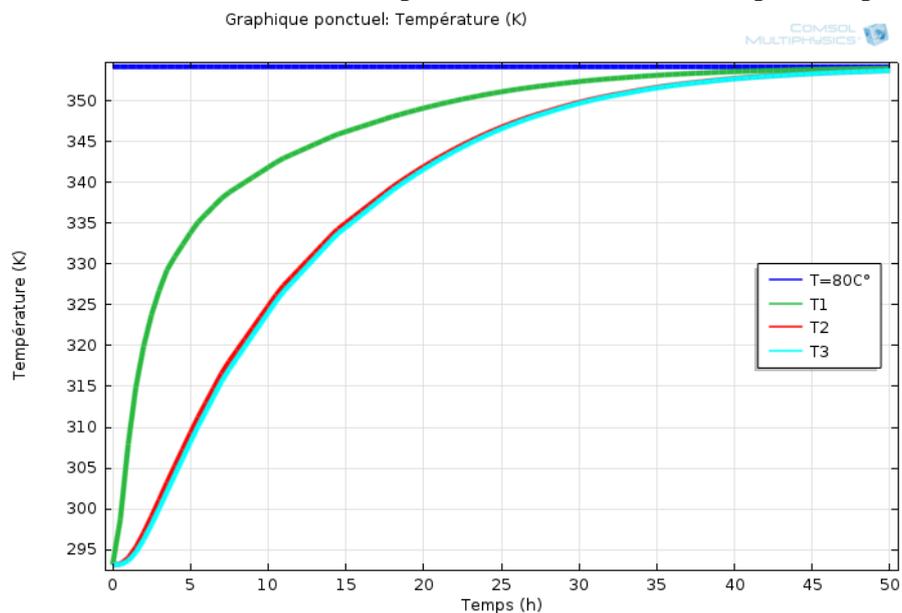


Figure 4.18 :Les courbes de la température en fonction de temps à température=80C°.

❖ Discussion :

On a varié l'épaisseur du paraffine($e=2\text{cm}$) et comme résultat on a trouvé que la température en fonction du temps influe sur l'évolution de la chaleur durant la phase de stockage, pour les résultats de la figure (4.16 ,4.17,4.18)on constate que le changement de phase est faible par rapport les résultats précédents.

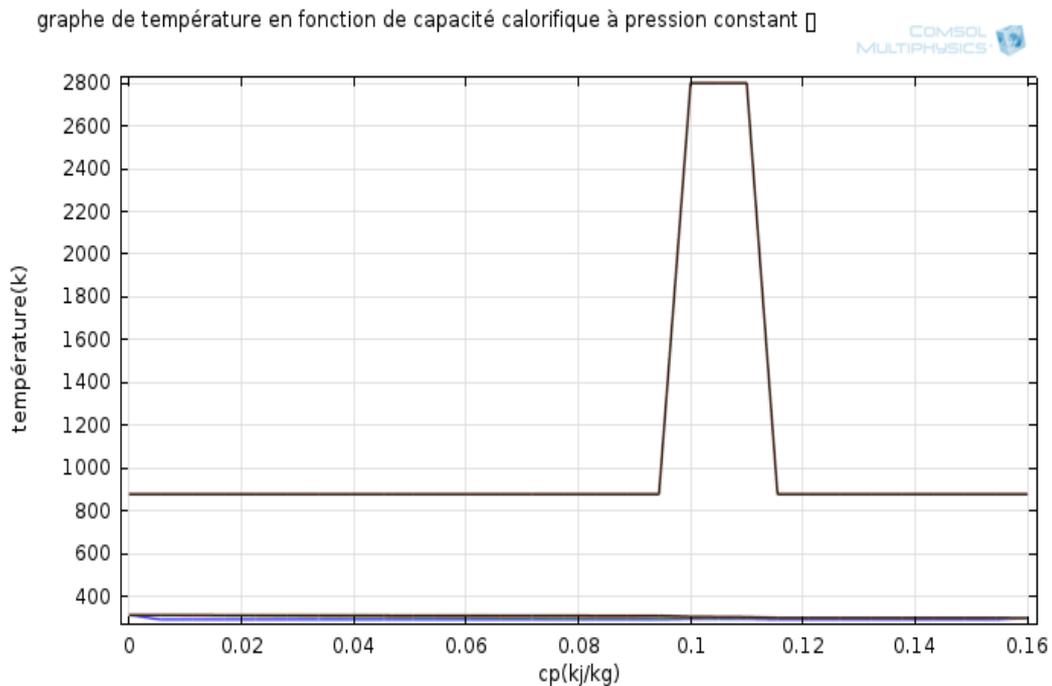


Figure 4 .19 :Graphe représente la température en fonction de la capacité à pression constant.

Le graphe représente la température en fonction de la capacité à pression constante donc on a trois zones la 1^{er} c'est la zone du solide c'est à dire que il n'y a pas de changement qui suit la zone de changement de phase solide- liquide la dernière c'est la zone de liquide .

➤ Effet de changement le matériaux a changement de phase :

On prendra deux autres matériaux à changement de phase de température de fusion différents pour voir le changement sur le transfert de la chaleur durant le stockage, leurs propriétés sont sur le tableau suivant.

Tableaux 4.2 : Les caractéristiques du paraffine.

Propriétés	Paraffine 1	Paraffine 2
Température de fusion(c°)	22	26
Chaleur latent(KJ /kg)	213	244
Conductivité thermique (W/m.c°)	0.15	0.15
Masse volumique solide (Kg/m ³)	835	814
Masse volumique liquide (Kg/m ³)	776	774

❖ Les résultats :

a) -Paraffine de température de fusion 22C° :

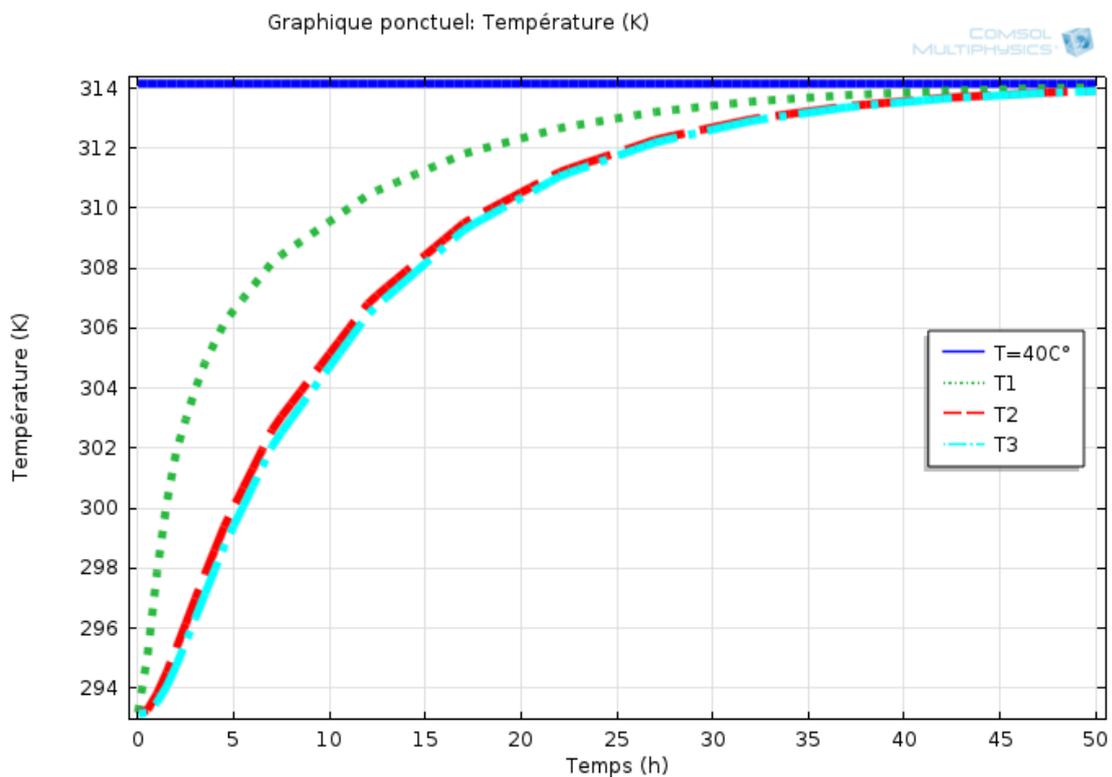
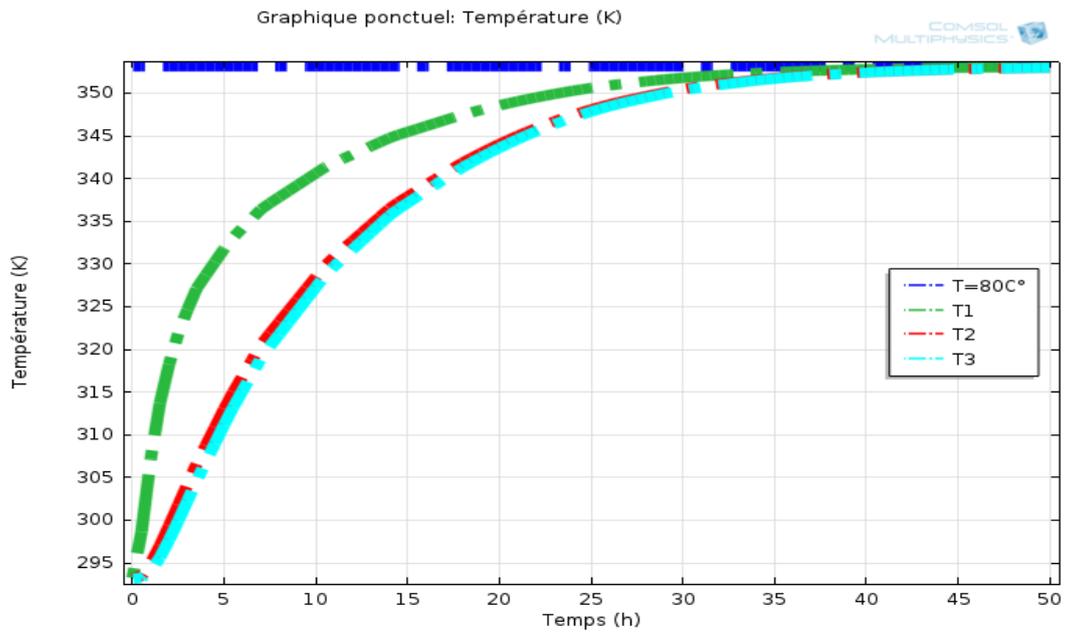


Figure 4.20 :Les courbes de la température en fonction du temps du paraffine 1 à température=40C°.



$T=80C^{\circ}$

Figure 4.21: Les courbe de la température en fonction du temps du paraffine 1 température=80C°.

b) -Paraffine de température de fusion 26C° :

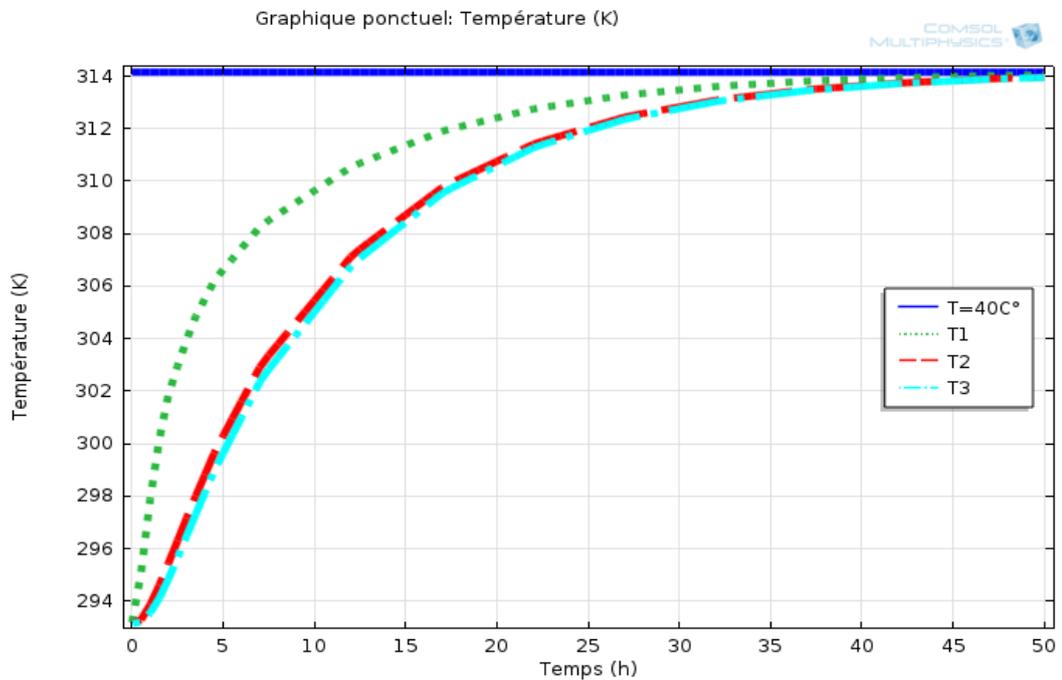


Figure4.22 :Les courbes de la température en fonction du temps du paraffine 2 à température=40C°.

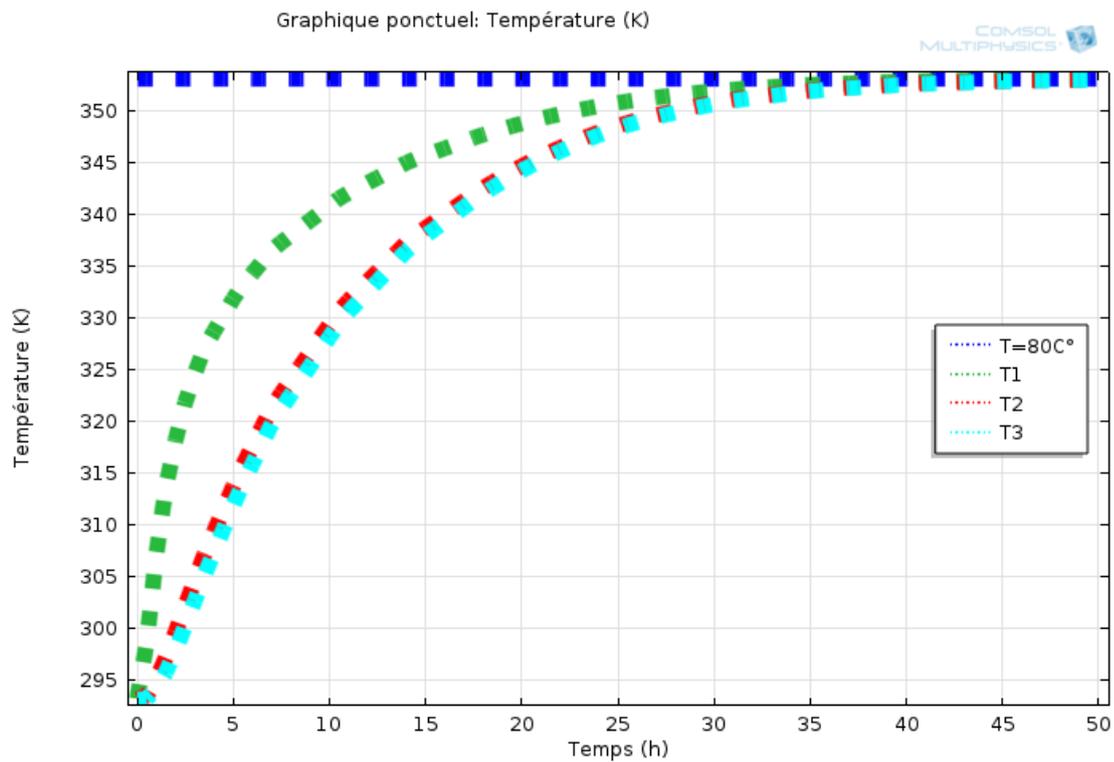


Figure 4.23: Les courbes de la température en fonction du temps du paraffine 2 à température=80C°.

❖ Discussion :

Les figures (4.20, 4, 21, 4.22, 4.23) montrent que la température de fusion de 23C° est rapide par rapport à 26C°, donc les caractéristiques du matériau utilisé jouent un rôle pour la transformation de la chaleur du milieu chaude vers le milieu froide.

4.6- Conclusion :

Dans le présent chapitre on a présenté les résultats obtenus qui s'expriment le comportement thermique de système de stockage.

L'intégration de la paraffine (MCP) dans le système de stockage est très importante pour l'énergie thermique stockée à partir de la comparaison de l'épaisseur.

- L'évolution de température à 1cm d'épaisseur de la paraffine est rapide par rapport à 2cm, en fonction du temps.
- La température de fusion de 23C° du paraffine est la plus utile, car en prendre en considération le facteur humain.

La simulation montre que la chaleur stockée dans la paraffine est une solution pour les installations solaire.

CONCLUSION GENERALE

L'énergie solaire reste la forme la plus exploitée dans le domaine du stockage. Il peut s'effectuer sous diverses formes, surtout sous forme de chaleur sensible (eau, huile, béton, céramique, etc.) ou sous forme de chaleur latente (eau, paraffines, sels, etc.).

Le stockage d'énergie sous forme de chaleur est beaucoup moins coûteux que sous forme électrique. Donc, vue l'importance d'énergie solaire, la place qu'elle peut occuper dans l'énergétique future, son stockage thermique économe et efficace, il est amplement justifié de concentrer les efforts de recherche pour améliorer le rendement du stockage des systèmes actuels et de chercher de nouvelles technologies de stockage.

Plusieurs autres nouvelles ressources sont étudiées et analysées pour pouvoir les utiliser dans les plus brefs délais tels que les énergies des mers, l'amélioration de l'énergie éolienne et nucléaire et le développement de nouvelles technologies de stockage et de transport pour faire face au déficit des ressources d'origine fossile.

Le principe du stockage de la chaleur repose sur trois voies : la chaleur latente, la chaleur sensible et la réaction chimique. Le choix étant en fonction des besoins économiques et techniques ainsi que de la durée du stockage désirée. Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée sous la forme d'un changement d'état du matériau de stockage (fusion ou vaporisation). L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente et de la quantité du matériau de stockage qui change d'état.

Après avoir mentionné les différents types de matériaux à changement de phase candidats au stockage thermique, les critères de sélection des matériaux et les techniques de caractérisation ainsi que les applications les plus répandues du stockage par chaleur latente. La recherche bibliographique a montré qu'il existe une grande variation dans le type, l'application et la façon d'élaboration des produits MCP qui conviennent aux différentes applications.

La simulation montre que la chaleur stockée dans la paraffine est une solution pour les installations solaire, et que l'évolution de température à 1cm d'épaisseur de la paraffine est rapide par rapport à 2cm, en fonction du temps ainsi que la température de fusion de 23C° du paraffine est la plus utile, car en prendre en considération le facteur humain.

REFERENCE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. **A.HAMID** « Stockage thermique par changement de phase, matériaux et application » Thèse de Doctorat, Blida ,2008.
- [2]. **L.DERRADJI** « Comportement thermique des bâtiments a parois incorporant les matériaux à changement de phase ». Thèse de Doctorat Blida, Avril 2015.
- [3]. **KHARCHI RAZIKA** « Etude expérimentale du comportement thermique d'unplancher solaire direct » Thèse de Magister, Blida, 2002.
- [4]. **Mirosław Zukowski** « Mathematical modeling and numerical simulation of a short term thermal energy storage system using phase change material for heating applications» 28April 2006.
- [5]. **J-S .Kim and K .Darkwa** « Simulation of an intgrated PCM-wallboard system» JUNE 2002
- [6]. **Vineet Veer Tyagi,D.Buddhi** « PCM thermal storage in buildings :Astate of art» .August 2005.
- [7]. **SUKHATME, S.P.** (1996) Solar energy: Principles of Thermal Collection and Storage. «Résumé d'une etude de cas Matériaux à changement de phase etude d'applications innovatrices dans l'environnement construit ».
- [8]. **Innovative PCM'S and Thermal Technology RUBITHERM FB** « Latent Heat Fibre Boards based on n-Paraffin's ».
- [9]. **Benjamin GAUME1, et al** « Réduction modale d'un plancher chauffant » Laboratoire de Mécanique et d'Energétique d'Evry ,40 rue du Pelvoux, CE 1455, Courcouronnes 91020 Evry CEDEX.
- [10]. **F. Boudali Errebai, et al** « Confort thermique d'un local d'habitation: Simulation thermo aéraulique pour différents systèmes de chauffage »Mars 2012.
- [11]. **Maha AHMAD** « Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux a changement de phase, super Isolation, apports solaires »Le 23 Novembre 2004 Thèse de Docteur de L'université Joseph Fourier.
- [12]. **M.Benmedda** « Etude numérique et expérimental de la fusion et de la solidification d'un matériau à changement de phase »Thèse de Doctorat (1996), CANADA.
- [13]. **A .Hamid et Lacroix** « Etude expérimentale de la fusion solidification cyclique de la paraffine dans un enceinte »CANADA (1994).
- [14]. **Benmansour .M.A.Hamdane et B.Jubran** « Stockage de l'énergie thermique dans un matériau à changement de phase» .Alger(2000).
- [15]. **H.Kazeoui et al** «Utilisation coupée l'énergie solair et des matériaux locaux dans le bâtiment » (2002).
- [16]. **Lidia Navarro et al** «Thermal energy storage in building integrated thermal systems» (2016).
- [17]. **Moussa Aadmi et al** «Heat transfer characteristics of thermal energy storage for PCM (phase change material) melting in horizontal tube: Numerical and experimental nvestigations» (2015).

REFERENCE

- [18]. **Damien DAVID** «Etude expérimentale de la convection Naturelle aux abords de parois contenant Des matériaux à changement de phase» (2010).
- [19]. **Anna BYKALYUK** «Contribution à l'étude des échanges convectifs à l'interface fluide paroi en présence de matériaux à changement de phase: application au bâtiment»(2014)
Thèse de Doctorat.
- [20]. **Juan Pablo Arzamendia Lopez** «Méthodologie de conception des matériaux architectur_es pour le stockage latent dans le domaine du bâtiment » (2013) Thèse de Doctorat.
- [21]. **Patrick Achard** «Recherches sur les matériaux à changement de phase pour l'inertie thermique des bâtiments ».
- [22]. **Frédéric Kuznik** «Stockage de Chaleur dans les Bâtiments à Basse Consommation ».
- [23]. **BUFLINO** « Les matériaux à changement de phase » .Septembre 2008.
- [24]. **M. Alipanah and A. Zahmatkesh** « Heat Transfer Modeling of Phase Change Materials in Multiple Plates Heat Exchanger » April 17, 2013.
- [25]. **X. Xiao, P. Zhang, M. Li** « Experimental and numerical study of heat transfer performance of nitrate/expanded graphite composite PCM for solar energy storage » (2015).
- [26]. **YASMIN KHAKPOUR** « Numerical and Experimental Study of Heat and Mass Transfer Enhancement using Phase Change Materials» May 2014 Thèse de Doctorat.
- [27]. **Alissar YEHYA** « Contribution to the experimental and numerical characterization of phase-change materials: Consideration of convection, supercooling, and soluble impurities » Thèse de Doctorat 14 Décembre 2015.
- [28]. **Jan Košny** « PCM-Enhanced Building Components An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures » Springer International Publishing Switzerland 2015.
- [29]. **Amy S. Fleischer** « Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials Fundamentals and Applications » Department of Mechanical Engineering Villanova University ,2015.
- [30]. **Alain Guiavarch et al** « Intégration d'un modèle simplifié de matériau à changement de phase dans une plate-forme d'aide à la conception énergétique de bâtiments ». IBPSA France 2008.
- [31]. **Laurent Cadet** « Etude du couplage convection-rayonnement en cavité démentiellement chauffée à haut nombre de Rayleigh en ambiances habitables » 28 Sep 2016.

REFERANCE

- [32]. **N. BELKACEM** « Simulation des charges thermiques dans une habitation pilote à plancher réversible » 15 Mars 2015.
- [33]. **Mohamed AMIR**. « Modélisation d'un élément de stockage d'énergie Destiné aux planchers chauffants » Juillet 1996
- [34]. **MEDDAHI Abdelkrim, REZIG Djamel** « Etude et conception d'un micro capteur de température et simulation sous COMSOL 4.3 » 2013 Thèse de fin d'étude.
- [35]. **Abhat, A. 1983**. « Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials ». *Solar Energy*, vol. 30, p. 313-332.
- [36]. **Mohamed Teggat, El al** « Numerical Investigation of a PCM Heat Exchanger for Latent Cool Storage » Laboratoire de Mécanique, Université Ammar Thelidji de Laghouat, B.P. 37G, 03000, Algérie. 2LRPCSI, Université de Skikda, B.P. 26, 21000 Skikda, Algérie (2013)
- [37]. **Axel Arnault, 2012** « Simulation et optimisation de l'intégration de matériaux à changement de phase dans une Zone thermique ».
- [38]. **Kuznik, F., Virgone, J. 2009**. « Experimental assessment of phase change material for wall building use ». *Applied Energy*, vol.86, p.2038–2046.
- [39]. **Shilei, L., Guohui, F., Neng, Z. 2006**. « Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter ». *Energy and Buildings*, vol.38, p.18–24.