

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Mécanique

THESE DE DOCTORAT D'ETAT

Option : Energétique

**STOCKAGE THERMIQUE PAR CHANGEMENT DE PHASE.
MATERIAUX ET APPLICATIONS**

Par

HAMID Abdelkader

Devant le jury composé de :

Mr Y. Benkedda	Professeur,	USD de Blida	Président
Mme N. Merzouk	Directeur de Recherche	CDER	Examineur
Mr. B. Benyoucef	Professeur,	U. Tlemcen	Examineur
Mr. A. Khellaf	Directeur de Recherche	CDER	Examineur
Mr S. Hanini	Professeur,	C.U. Médéa	Examineur
Mr. N.Ait Messaoudene	Professeur,	USD de Blida	Rapporteur

Blida, le 27 décembre 2008

RESUME

Cette étude vise à fournir une synthèse des développements dans le champ du stockage thermique par changement de phase identifiant les principaux paramètres de recherche et de développement dans ce domaine. Des listes des matériaux candidats potentiels pour les différentes applications de stockage sont mentionnées. L'état de recherche entrepris par des universités et des laboratoires est aussi cité, fournissant aux chercheurs et décideurs des connaissances de base des matériaux de changement de phase (MCP).

Pour l'élaboration des propriétés thermo physiques des matériaux, nous proposons une méthode simple (*T-history*). Elle permet de déterminer non seulement la température de changement de phase, la surfusion, les chaleurs spécifiques (solide et liquide), chaleur latente et les conductivités thermiques de chaque état à l'aide des courbes de températures qu'on peut les obtenir facilement avec simple manipulation.

La seconde partie concerne une des applications prometteuses des MCP dans le bâtiment. L'incorporation des matériaux à changement de phase dans l'enveloppe des bâtiments reste la solution la plus rapide et la moins coûteuse qui permet de diminuer la consommation d'énergie de chauffage/climatisation tout en assurant la qualité et le confort des occupants.

Un modèle mathématique basé sur les bilans thermiques a été développé pour simuler le comportement thermique d'une maison de référence et voir l'impact de l'incorporation des matériaux à changement de phase dans l'enveloppe. Une série de simulations thermiques et des analyses comparatives dans des conditions proches de plusieurs régions du pays ont montré les avantages d'employer la chaleur latente, basse température pour la conception passive des bâtiments.

Une maison munie de wallboard gypse/PCM de 8 cm d'épaisseur permet de stocker l'électricité sous forme de chaleur ou de froid pendant les heures creuses et maintenir la température intérieure dans des conditions satisfaisantes de confort thermiques pendant 18 heures.

Nous avons aussi procédé à une analyse du stockage thermique dans des capsules sphériques remplies d'un matériau à changement de phase.

Un modèle théorique unidimensionnel à deux phases séparées a été proposé. Nous avons aussi étudié l'influence de certains paramètres sur le comportement thermique du stockage.

SUMMARY

The objective of this study is to provide a synthesis for development of phase change energy thermal field and identifies the principle parameters in research and development in this field. Lists of potential materials candidate for the various applications of storage are mentioned. The state of research undertaken by universities and laboratories is also given, providing the researchers and decision makers with basic knowledge of phase change material. For the development of the physical properties of materials, we propose a simple method (*T-history*). It makes it possible to determine not only the temperature of phase shift, super cooling, the specific heats (solid and liquid), latent heat and thermal conductivities of each state using the temperature curves which one can easily obtain them with simple handling. The second part relates to one of the most promising applications of the MCP in the building. The incorporation of materials with phase change in the envelope of the buildings remains the fastest solution and least expensive which makes it possible to decrease the consumption of energy of heating and cooling while ensuring the quality and comfort of the occupants.

A mathematical model based on the heat balance was developed to simulate the thermal behaviour of a reference house and see the impact of incorporating of PCM in the envelope. A series of thermal simulations and comparative analyses under conditions close to several climatic zones of the country showed the advantages of employing the latent heat, low temperature for the passive design of the buildings.

A house provided with wallboard of 8 cm thickness Gypsum/PCM makes it possible to store electricity in the form of heat or cold during the off-peak hours and maintains the interior temperature under satisfactory conditions of thermal comfort for 18 hours. We also carried out an analysis of thermal storage in spherical capsules filled with a PCM. A one-dimensional ideal model with two separate phases was proposed. We also studied the influence of certain parameters on the thermal behaviour of storage.

ملخص

تحتوي هذه الدراسة على ملخص لتطورات في ميدان التخزين الحراري مع تغير الأطوار مع تعريف العوامل الأساسية للبحث و التطوير في هذا الميدان ذكرت قوائم لمواد مرشحة لاستعمالها في عدة تطبيقات في التخزين الحراري. قمنا كذلك بذكر حالة البحث في المخابر والجامعات الجزء الأول يتطرق إلى كيفية استخراج خصوصيات هذه المواد.

أما الجزء الثاني يتطرق إلى إحدى التطبيقات الموعودة لمواد متغيرة الأطوار في العمران. إدخال هذه المواد في جدار المنازل يعتبر حل سريع و اقتصادي (اقل كلفة) يسمح لنا من تقليص الطاقة المستهلكة في التبريد و التسخين مع ضمان الرفاهية.

لقد قمنا بإعداد نموذج رياضي من اجل معرفة السلوك الحراري لمنزل مرجعي مع إظهار تأثير مواد التخزين على المناخ الداخلي.

سلسلة من الدراسات و المقارنات في ظروف مناخية مشابهة لعدة مناطق بينت لنا محاسن استعمال هذه المواد في العمران.

منزل مع صفيحة من جبس زائد مواد متغيرة الأطوار بسمك 8 سم سمحت لنا من تخزين الكهرباء على شكل حرارة أو برودة في أوقات يكون فيها استهلاك الكهرباء قليل مع الحفاظ على شروط رفاهية السكان مدة 18 ساعة.

كما قمنا بدراسة التخزين الحراري داخل علب على شكل كروي مملوءة بمواد متغيرة الاطوار .
النموذج النظري سمح لنا بمعرفة السلوك الحراري داخل الخزان.

REMERCIEMENTS

Ce travail sur le stockage thermique par changement phase a été réalisé au sein du laboratoire inter établissement TREFLE de l'école nationale des Arts et Métiers (ENSAM de Bordeaux).

Il a été mené sous la direction de Madame **ELENA PALOMO DEL BARRIO**, Professeur au TREFLE de Bordeaux, et de monsieur **N. AIT MESSAOUDENE**, Professeur au Département de mécanique université de Blida. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ces deux professeurs pour leurs conseils bénéfiques et leur soutien qu'ils n'ont cessés de m'apporter tout au long de mon travail.

Mes remerciements s'adresse également à Monsieur **Y. BENKEDDA**, Professeur à université de Blida, pour avoir manifesté un grand intérêt pour le sujet en acceptant d'être Président de Jury.

Je voudrais également exprimer toute ma reconnaissance à messieurs le **B. BENYOUCEF**, Professeur à l'université de Tlemcen et **S. HANINI**, Professeur à l'université de Médéa pour avoir accepté d'être des membres de jury.

Mes remerciements s'adresse également à Madame **N. MERZOUK** et **A. KHELLAF** Directeurs de Recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER.) qui m'ont fait honneur de participer au jury et examiner mon travail.

Dans ces remerciements, je ne peux oublier mon épouse **NADHERA** qui, malgré ses lourdes activités, a sacrifié ses moments précieux pour contribuer à la réalisation de ce travail.

Enfin, je souhaite remercier messieurs **D. SEMMAR** Chef de département adjoint responsable de la post graduation, **D. TOUMI** Chef de département de mécanique, et **N. BACHA** Vice Recteur responsable de la post graduation et tous les enseignants du département de mécanique qui ont contribué, chacun à leur façon,

au bon déroulement de cette étude, que ce soit de manière technique, scientifique, administrative ou amicale

TABLE DES MATIERES

RESUMES.....	01
REMERCIEMENTS.....	
TABLE DES MATIERES.....	
LISTES DES TABLEAUX ET DES FIGURES.....	
NOMENCLATURE	
INTRODUCTION.....	01
1. MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE.....	04
1.1 Introduction.....	04
1.2 Classification des matériaux à changement de phases.....	04
1.2.1 Propriétés thermodynamiques.....	04
1.2.2. Propriétés cinétiques	05
1.2.3 Propriétés chimiques.....	05
1.3. Matériaux à changement de phases utilisés dans le stockage.....	05
1.3.1. Les composés minéraux	05
1.3.2. Les substances organiques.....	07
1.3.3. Les eutectiques	07
1.3.4. Les acides gras.....	07
1.4. Limitations des procédés à chaleur latente de fusion.....	10
1.4.1. La surfusion.....	10
1.4.2. Fusion non congruente.....	10
1.4.3. Cinétiques de cristallisation.....	14
1.4.4. Résistance thermique au transfert.....	14
1.5. Conclusion.....	14
2. ETAT DE L'ART.....	15
2.1 Introduction.....	15
2.2. Développement des matériaux à changement de phases.....	15
2.3. Détermination des caractéristiques thermo physiques.....	17
2.4. Applications des matériaux à changement de phase dans le stockage.....	18
2.5. Wallboards.....	25
2.6. Conclusion.....	29

3. CARACTERISATION DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE.....	30
3.1. Introduction.....	30
3.2. Calorimétrie différentielle à balayage.....	30
3.3. Méthode T-history.....	32
3.3.1. Calcul des chaleurs spécifiques solide, liquide et chaleur latente	34
3.3.2. Calcul de la conductivité thermique.....	35
3.3.3. Résultats.....	37
3.4. Adaptation de la méthode T-history pour les hautes températures.....	38
3.4.1. Description du banc d'essai réalisé.....	38
3.4.2. Matériaux à changement de phase.....	41
3.4.3. Matériau de référence.....	41
3.4.4. Résultats.....	42
3.5. Analyse des sels par calorimétrie à balayage.....	50
3.5.1 Analyse du sel $\text{NaCl} - \text{CaCl}_2$	51
3.5.2. Analyse du sel $\text{Li}_2\text{CO}_3 - \text{Na}_2\text{CO}_3$	52
3.6. Conclusion.....	53
4. APPLICATION DES MCP DANS UN SYSTEME PASSIF.....	55
4.1 Climat en Algérie.....	56
4.2. Situation de l'habitat en Algérie.....	57
4.3. Modélisation.....	58
4.3.1. Habitat de référence.....	58
4.3.2. Hypothèses simplificatrices.....	59
4.4 Résultats.....	61
4.4.1 Méthode de résolution et validation du modèle.....	61
4.4.2 Simulation thermique.....	64
4.5. Conclusion.....	73
5. APPLICATION DES MCP DANS UN SYSTEME ACTIF.....	74
5.1 Modélisation.....	74
5.1.1. Présentation du système physique.....	74
5.1.2. Hypothèses simplificatrices.....	75
5.1.3. Mise en équations.....	79

5.1.4. Résolution des équations.....	77
5.2. Caractéristiques géométriques du stockage	82
5.2.1. Diamètre de la capsule.....	82
5.2.2. Porosité.....	82
5.2.3 Longueur caractéristique.....	82
5.2.4. Surface de contact.....	82
5.2.5. Taux de surface de contact.....	83
5.2.6. Coefficient d'échange thermique fluide capsule.....	83
5.3. Résultats.....	84
5.4. Conclusion.....	87
CONCLUSION GENERALE.....	88
REFERENCES.....	90

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Les matériaux minéraux potentiellement candidats pour le stockage thermique..	06
Tableau 1.2. Les composés organiques candidats au stockage thermique.....	08
Tableau 1.3. Les eutectiques candidats au stockage thermique.....	09
Tableau 1.4. Les eutectiques potentiellement candidats pour le stockage thermique.....	10
Tableau 1.5. Les acides gras potentiellement candidats pour le stockage thermique.....	11
Tableau 1.6. Les matériaux a changement de phases commercialisés.....	12
Tableau 1.6. Les matériaux a changement de phases commercialisés (suite).....	13
Tableau 3.1. Caractéristiques de l'acétate de sodium obtenues par T-history.....	37
Tableau 3.2. Caractéristiques de la paraffine obtenues par T-history.....	37
Tableau 3.3. Caractéristiques de l'acide laurique obtenues par T-history.....	38
Tableau 3.4. Caractéristiques thermo physiques du cuivre.....	42
Tableau 3.5. Contenus des tubes	44
Tableau 3.6. Données et contenus des tubes.....	48
Tableau 3.7. Résultats obtenus du sel NaCl-CaCl ₂ pour deux vitesses différentes.....	52
Tableau 3.8. Résultats obtenus du sel Li ₂ CO ₃ -Na ₂ CO ₃ pour deux vitesses différentes.....	53
Tableau 4.1. Caractéristiques thermo physiques des composants du bâtiment.....	61

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1. Schéma de l'accumulateur forme parallélépipédique.....	19
Figure 2.2. Changement de phase dans un accumulateur cylindrique.....	20
Figure 2.3 Capsules sphériques.....	21
Figure 2.4. Schémas détaillé de la capsule.....	21
Figure 2.5. Schéma d'une cuve verticale et horizontale.....	21
Figure 2.6. Stockage dans des capsules sphériques.....	22
Figure 2.7. Grains de MCP et type de wallboard.....	26
Figure 2.8 Autres types de wallboards.....	28
Figure 3.1. Principe de fonctionnement d'un DSC à flux de chaleur.....	31
Figure 3.2. Schéma de l'expérience	33
Figure 3.3 Evolutions des températures dans les matériaux.....	33
Figure 3.4 Changement de phase à l'intérieur du tube.....	35
Figure 3.5. Schéma du banc essai.....	38
Figure 3.6. Schéma des tubes a essais avec isolation.....	40
Figure 3.7. Photos du banc d'essai réalisé.....	40
Figure 3.8. Procédure d'étalonnage des thermocouples.....	43
Figure 3.9. Courbes d'étalonnage des thermocouples.....	43
Figure 3.10 Conditions extérieures d'expérimentation.....	45
Figure 3.11. Courbes des températures durant le stockage (1 ^{er} cycle).....	45
Figure 3.12. Courbes des températures durant le stockage (2eme cycle).....	46
Figure 3.13. Courbes des températures durant la solidification (1 ^{er} cycle).....	46
Figure 3.14. Courbes des températures durant la solidification (2eme cycle).....	47
Figure 3.15. Etalonnage des thermocouples dans l'intervalle 290-310°C.....	47

Figure 3.16. Conditions d'expérimentation.....	48
Figure 3.17. Courbes des températures durant la fusion.....	49
Figure 3.18. Courbes des températures durant la cristallisation.....	49
Figure 3.19. Courbes des températures durant la fusion.....	50
Figure 3.20. Courbes des températures durant la cristallisation.....	50
Figure 4.1 Consommation électrique journalière (Août 2005)	55
Figure 4.2 Différents échanges thermiques dans la maison	58
Figure 4.3. Composition du mur.....	58
Figure 4.4. Différents noeuds.....	58
Figure 4.5. Différentes fonctions proposées pour chaleur apparente.....	59
Figure 4.6. Chaleur apparente du MCP/gypse utilisé dans le modèle.....	60
Figure 4.7. Prototype réalisé.....	62
Figure 4.8. Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux.....	63
Figure 4.9. Variation des épaisseurs du wallboard.....	63
Figure 4.10. Evolution des températures des différents noeuds pour 5 jours de simulations (wallboard avec MCP)	65
Figure 4.11. Evolution des températures des différents noeuds pour 5 jours de simulations (wallboard sans MCP).....	65
Figure 4.12. Profils des températures pour une maison sans wallboard.....	66
Figure 4.13. Profils des températures pour une maison avec wallboard sans MCP.....	67
Figure 4.14. Profils des températures pour une maison avec wallboard sans MCP.....	67
Figure 4.15. Comparaison des températures internes.....	68
Figure 4.16. Comparaison des températures des parois internes.....	68
Figure 4.17. Profils de température durant le chauffage (maison sans wallboard).....	70
Figure 4.18. Profils de température durant le chauffage (maison avec PCM).....	70

Figure 4.19. Profils de températures durant le chauffage (maison sans wallboard).....	71
Figure 4.20. Comparaison des températures de l'air intérieur.....	71
Figure 4.21. Comparaison des températures des parois internes.....	72
Figure 5.1. Schéma du réservoir de stockage.....	75
Figure 5.2. Différentes tranches du réservoir.....	76
Figure 5.3. Élément de longueur du stock.....	77
Figure 5.4. Variation de C_p en fonction de température.....	78
Figure 5.5. Profils des températures du MCP de quelques nœuds.....	85
Figure 5.6. Evolution des températures des noeuds pour différents temps.....	85
Figure 5.7. Profils des températures durant le déstockage.....	86
Figure 5.8. Profils des températures durant le déstockage en fonction de la distance.....	86

NOMENCLATURE

A_c	: Surface d'échange du tube	(m ²)
A_m	: Surface d'échange mur air intérieur	(m ²)
a	: Taux de surface	(m ⁻¹)
C_p	: Chaleur spécifique à pression constante	(kJ/kg°K)
d	: Diamètre de la capsule	(m)
D	: Diamètre de la cuve de stockage	
$(m)e$: Epaisseurs des composants du mur	
(m)		
h	: Coefficient d'échange par convection naturelle tube fluide	(W/m ² °K)
h_{ex}	: Coefficient d'échange par convection naturelle mur air extérieur	(W/m ² °K)
h_{in}	: Coefficient d'échange par convection naturelle mur air intérieur	(W/m ² °K)
h_{cf}	: Coefficient d'échange par convection naturelle capsule / fluide	(W/m ² °K)
h_{inf}	: Débit d'infiltration	(m ³ /h)
H_m	: Chaleur latente de fusion	(kJ/kg)
k	: Coefficient d'échange par conduction	(W/m°K)
m	: Masse	(kg)
R	: Rayon du tube	(m)
r	: Rayon du tube	(m)
T	: Température	(°C)
T_{ca}	: Température des capsules	(°C)
T_o	: Température initiale	(°C)
T_m	: Température de changement de phase	(°C)
T_F	: Température du fluide	(°C)
T_s	: Température de surfusion	(°C)
T_r	: Température de fin de l'expérience	(°C)
TP	: Température de la paroi (mur)	(°C)
TBR	: Température de la brique	(°C)
TGY	: Température du gypse	(°C)
TPL	: Température du plâtre	(°C)
TCE	: Température du ciment	(°C)
t	: Temps	(s)
Q_s	: Eclairement solaire	(W/m ²)

Q_{APP} : Apports internes (W)

U : Vitesse du fluide (m/s)

V : Volume de la maison (m³)

Lettres grecques

α : Diffusivité thermique (m²/s)

ε : Porosité

ρ : Masse volumique (kg/m³)

Indices:

ai : Air intérieur

app : Apparent

B : Brique

C : Ciment

ca : Capsule

ent : Entrée

ex : Externe

in : Interne

wal : Wallboard

re : Référence

o : Etat initial

∞ : Ambiante

l : Liquide

mcp : Matériaux à changement de phase

s : Solide

tb : Tube

INTRODUCTION

Le décalage en temps entre la production (voire la récupération) d'énergie et son utilisation, ainsi que la nature souvent intermittente de la disponibilité et de la demande, est à la base de l'intérêt qu'a toujours suscité le stockage d'énergie thermique. Que se soit dans le secteur industriel (récupération de rejets thermiques) ou dans celui de la production d'énergie électrique (filiales classiques ou renouvelables), le stockage de courte durée est essentiel dans la plupart des applications.

L'énergie solaire est disponible seulement pendant le jour, et par conséquent son application exige un stockage d'énergie thermique efficace de sorte que la chaleur excessive rassemblée pendant les heures de soleil puisse être stockée pour l'usage postérieur pendant la nuit. Des problèmes semblables surgissent aussi dans des systèmes de rétablissement de la chaleur où les périodes de disponibilité et d'utilisation de chaleur perdue sont différentes. En outre, la consommation d'énergie électrique change de manière significative pendant le jour et la nuit, particulièrement dans les pays qui possèdent des climats extrêmement chauds ou froids. De plus en plus, ces dernières années on assiste fréquemment dans ces pays à des pics de consommations électriques dues à l'utilisation massive des systèmes de chauffage et de climatisation. Cette situation exige des producteurs d'électricité de se doter d'installations capables de répondre à toute éventualité. Malheureusement si ces infrastructures existent ne sont pas utilisées à leur plein rendement. Pour cette raison, les producteurs ont intérêt à uniformiser la consommation pour ainsi maximiser le rendement de leurs équipements. De cette manière, ils diminuent la consommation en période de pointe et retardent la construction de nouvelles centrales électriques, avec tous les impacts économiques, sociaux et environnementaux que cela impliquent. Une meilleure gestion de la production d'électricité peut être réalisée si une partie de cette charge maximale est emmagasinée sous forme de chaleur ou de froid durant les heures creuses pour

ensuite la récupérer pendant les heures de pointes. Cela constituerait une économie pour le client pour les compagnies d'électricité qui pourraient produire à moindre coût.

La méthode la plus généralement utilisée dans toutes les applications mentionnées ci-dessus est le stockage thermique par chaleur sensible. Dans les systèmes de chauffage solaire, l'eau est encore employée pour les systèmes solaires qui utilisent les liquides comme fluide caloporteur, alors qu'un lit de roche est employé pour les installations solaires à air. Le stockage thermique se fait par la simple augmentation de la température du matériau. Toutefois, afin de parvenir à stocker une quantité appréciable d'énergie, cette technique doit faire intervenir des températures élevées. Ceci provient du fait que les chaleurs spécifiques de la plupart des matériaux sont relativement faibles. Par ailleurs, il faut beaucoup plus d'énergie pour faire fondre un matériau sans pour autant que sa température augmente. L'énergie est alors stockée sous forme de chaleur latente (chaleur de fusion). L'importance de l'énergie impliquée peut être démontrée en comparant la capacité de chaleur sensible du béton (1.0 kJ/kg K) avec la chaleur latente d'un matériau de changement de phase (MCP) comme hexa hydrate de chlorure de calcium $\text{CaCl}_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$ (193 kJ/kg). Il est évident que les systèmes de stockage incorporant les MCP comporteront des volumes sensiblement plus petits comparés aux matériaux stockant seulement par chaleur sensible. En ce qui concerne le stockage par évaporation, cela correspond à des capacités thermiques considérables (600 kWh m^{-3} d'eau contre $1.16 \text{ kWh K}^{-1} \text{ m}^{-3}$ en chaleur sensible) mais aussi à des expansion de volume beaucoup plus considérable (1 litre d'eau liquide occupe 1700 litres de vapeur sous 1 atmosphère). Il est donc difficile de contenir cette vapeur.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux derniers développements dans le champ du stockage thermique d'énergie par changement de phase en identifiant les principaux axes de recherche et de développement dans ce domaine.

Des listes des matériaux candidats potentiels pour les différentes applications de stockage sont mentionnées. L'état de recherche entrepris par des universités et des laboratoires est aussi cité, fournissant aux chercheurs et décideurs des connaissances de base des matériaux de changement de phase.

Pour l'élaboration des propriétés thermo physiques des matériaux, nous proposons une méthode simple (*T-history*). Elle permet de déterminer non seulement la température de changement de phase, la surfusion, les chaleurs spécifiques (solide et liquide), chaleur latente et les conductivités thermiques de chaque état à l'aide des courbes de températures qu'on peut les obtenir facilement avec simple manipulation.

La seconde partie concerne une des applications prometteuses des MCP dans le bâtiment. Ce dernier est considéré actuellement parmi les plus grands secteurs consommateurs d'énergie et responsables des émissions des gaz à effet de serre. L'incorporation des matériaux à changement de phase dans l'enveloppe des bâtiments reste la solution la plus rapide et la moins coûteuse qui permet de diminuer la consommation d'énergie de chauffage/climatisation tout en assurant la qualité et le confort des occupants. Le wallboard de gypse ou plâtre contenant du MCP peut être installé dans les nouvelles constructions ou la réadaptation d'anciennes bâtisses. Pour cela, nous analyserons l'impact du MCP sur le confort thermique durant la période hivernale et estivale.

La dernière partie est consacrée à la modélisation d'un réservoir rempli de capsules sphériques contenant des MCP. Un modèle théorique unidimensionnel à deux phases séparées est proposé pour décrire le comportement thermique du stockage par chaleur latente.

CHAPITRE 1

Matériaux à changement de phase

1.1. Introduction

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont les matériaux latents de 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 du solide en liquide ou liquide en solide. Ceci s'appelle un changement d'état ou de phase.

Le choix du MCP pour le stockage thermique est effectué en fonction de considérations thermodynamiques, cinétiques, chimiques, économiques, de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux [1].

1.2. Classification et propriétés des matériaux à changement de phase

1.2.1. Propriétés thermodynamiques [1]

- 1- La température de fusion doit se situer dans la gamme de température de fonctionnement désirée.
- 2- Grande chaleur latente de fusion par volume unitaire de sorte que le volume exigé du récipient pour stocker soit moins encombrant.
- 3- Grandes chaleurs spécifiques à l'état solide et liquide pour fournir un stockage sensible additionnel.
- 4- Conductivités thermiques élevées des deux phases pour accélérer le stockage et le déstockage.
- 5- Petit changement de volume durant la transformation de phase et petite pression de vapeur

- 6- Fusion conforme du matériel de changement de phase pour une capacité de stockage constante avec chaque cycle fusion/solidification.

1.2.2. Propriétés cinétiques [1]

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

1.2.3. Propriétés chimiques [1]

- 1- Accomplissement réversible de la fusion et la solidification.
- 2- Aucune dégradation après un grand nombre de cycles fusion / solidification.
- 3- Non corrosif et non toxique.
- 4- Ininflammable et inexplusif.

1.3. Matériaux à changement de phase utilisés dans le stockage thermique.

Les matériaux qui ont été étudiés pendant les 40 dernières années sont des composés minéraux (ou inorganiques), les corps organiques, les acides gras et les eutectiques des composés organiques et non organiques.

1.3.1 Les composés minéraux

Parmi les composés minéraux, seuls les hydrates salins présentent des propriétés acceptables et notamment de fortes chaleurs latentes et des prix bas. Dans le tableau 1.1. Zalba [3] a rassemblé les substances inorganiques qui peuvent être utilisées comme MCP.

Tableau 1.1 Les Matériaux minéraux potentiellement candidats pour le stockage Thermique [3].

Composant	Température de fusion (°C)	Chaleur de fusion (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (Kg/m ³)
H ₂ O	0	333	0.612	998 (liquide,20°C) 996(30°C) 917(solide,0°C)
LiClO ₃ -3H ₂ O	8.1	253	n.d	1720
KF-4H ₂ O	18.5	231	n.d	1447(liquid,20°C) 1455(solid,18°C)
Mn(NO ₃) ₂ -6H ₂ O	25.8	125.9	n.d	1728(liquid,40°C) 1795(solid,5°C)
CaCl ₂ -6H ₂ O	29	190.8	0.540	1562(liquid,32°C)
LiNO ₃ -33H ₂ O	30	296	(liquid,38.7°C)	n.d
Na ₂ SO ₄ -10H ₂ O	32.4	254	n.d	1458(solide)
Na ₂ CO ₃ -10H ₂ O	33	247	0.544	1442
CaBr ₂ -6H ₂ O	34	115.5	n.d	1956(liquide 35°C)
			n.d	2194(solide 24°C)
Na ₂ HPO ₂ -12H ₂ O	35.5	265		1522
Zn(NO ₃) ₂ -6H ₂ O	36	146.9	n.d	1828(liquide 36°C)
Na ₂ S ₂ O ₃ -5H ₂ O	48	201	0.464(liquide 39.9°C)	1600 (solide)
Na(CH ₃ COO)-3H ₂ O	58	264	n.d	1450
NaOH	64.3	227.6	n.d	1690
Na ₂ P ₂ O ₇ -10H ₂ O	70	184	n.d	n.d
Na ₂ P ₂ O ₇ -10H ₂ O	78	265.7	n.d	1937(liquide,84°C)
Ba(OH) ₂ -8H ₂ O	89	162.8	0.653(liquide,85.7°C)	1550 (liquide,94°C)
Mg(NO ₃) ₂ -6H ₂ O	95	269	0.490(liquide, 95°C)	n.d
(NH ₄)Al(SO ₄) ₂ -6H ₂ O	117	168.6	n.d	1450(liquide,120°C)
MgCl ₂ -6H ₂ O	307	172	0.570(liquide,120°C)	2260
NaNO ₃	333	266	0.5	2110
KNO ₃	380	149.7	0.5	2044
KOH	714	452	0.5	2140
MgCl ₂	800	792	n.d	2160
NaCl	854	275.7	5	2.533
Na ₂ CO ₃	857	452	2	2370
KF	897	235.8	n.d	2.290
K ₂ CO ₃			2	

n.d : non disponible.

1.3.2. Les substances organiques

Les matériaux organiques présentent des propriétés thermiques spécifiques inférieures à celles des hydrates salins surtout de leur faible densité relative. Les paraffines sont des sous-produits du raffinage des huiles de pétrole. Elles sont composées essentiellement d'hydrocarbures saturés de masse moléculaire élevée (C_nH_{2n+2}) et présentent quelques avantages (pas de surfusion, réversibilité thermique parfaite) mais restent chères et ont surtout une conductivité thermique très faible, ce qui inhibe les cinétiques de changement de phase et diminue d'autant les puissances disponibles [58]. Le tableau 1.2. mentionne les composés organiques qui peuvent être utilisés dans le stockage thermique dans la gamme 0 °C à 100°C.

1.3.3. Les eutectiques

Un eutectique est un mélange de deux ou plusieurs corps purs (sels ou composants organiques) qui fond et se solidifie à température constante, contrairement aux mélanges habituels, il se comporte comme un corps pur du point de vue de la fusion (tableaux 1.3. et 1.4.)

1.3.4. Les acides gras

Les acides gras sont des acides carboxyliques à chaîne carbonée plus ou moins longue (de 4 à 18 atomes de carbone pour les plus courants). Ils diffèrent également entre eux par le type de liaisons qui réunissent leurs atomes de carbone : on dit qu'ils sont saturés lorsqu'ils ne contiennent que de simples liaisons carbone-carbone (les autres « sites » des atomes de carbone sont saturés par des atomes d'hydrogène), et insaturés lorsqu'ils comptent au moins une double liaison.

On connaît une quarantaine d'acides gras naturels, dont les plus importants sont l'acide butyrique (ou butanoïque), que l'on trouve dans le beurre, l'acide palmitique (huile de palme), l'acide stéarique (suif), l'acide linoléique (huile d'arachide) duquel est dérivé l'acide arachidonique, et l'acide linoléique (huile de bourrache). L'huile de tallol, un sous-produit du bois de pin utilisé pour la pâte à papier est une source grandissante d'acides gras (tableau 1.5.)

Tableau 1.2. Les composés organiques candidats au stockage thermique [3]

Composant	Température de fusion (°C)	Chaleur de fusion (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (Kg/m³)
Paraffine C14	4.5	165	n.d	n.d
Paraffine C15-C16	8	153	n.d	n.d
Poly glycol E400	8	99.6	0.182 (liquide, 38.6°C)	1125 (liquide, 25°C)
Dimethyl-sulfoxide (DMS)	16.5	85.7	n.d	1009 (liquide,solide)
Paraffine C16-C18	20-22	152		n.d
Poly glycol E600	22	127.2	n.d	1126 (liquide, 25°C)
Paraffine C13-C24	22-24	189	0.189(liquide,38.6°C)	0.760(liquide, 70°C)
Dodecanol	26	200	0.21 (solide)	0.900 (solide, 20°C)
Paraffine C18	28	244	n.d	n.d
Tetradecanol	38	205	0.148(liquide, 40°C)	0.774(liquide, 70°C)
Paraffine C20-C33	42-44	189	0.358 (solide)	0.814 (solide, 20°C)
Paraffine C22-C45	58-60	189	n.d	0.769 (liquide, 70°C)
Poly glycol E6000	66	190	0.21 (solide)	0.912 (solide, 20°C)
Paraffine C21-C50	66-68	189	0.21 (solide)	0.795 (liquide, 70°C)
Biphenyl	71	119.2	n.d	0.920 (solide, 20°C)
Propionamide	79	168.2	n.d	n.d
Naphtalène	80	147.7	0.21 (solide)	0.830 (liquide, 70°C)
Erythritol	118.0	339.8	n.d	0.930 (solide, 20°C)
			0.132(liquide, 83.8°C)	991 (liquide, 73°C)
			0.341 (solide,49.9°C)	1166 (solide, 24°C)
			0.326(liquide,140°C)	n.d
			0.733 (solide,20°C)	976(liquide, 84°C)
				1145(solide,20°C)
				1300(liquide, 140°C)
				1480 (solide,20°C)

Tableau 1.3. Les eutectiques candidats au stockage thermique [3]

Composant	Température de fusion (°C)	Chaleur de fusion (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (Kg/m ³)
66.6% CaCl ₂ -6H ₂ O + 33.3%MgCl ₂ -6H ₂ O	25	127	n.d	1590
48% CaCl ₂ + 4.3%NaCl + 0.4% KCl+47.3% H ₂ O	26.8	188	n.d	1640
47%Ca (NO ₃) ₂ -4H ₂ O + 33%Mg(NO ₃) ₂ -6H ₂ O	30	200.5	n.d	n.d
60% Na(CH ₃ COO)- 3H ₂ O + 40% CO(NH ₂) ₂	31.5	226	n.d	n.d
61.5% Mg(NO ₃) ₂ - 6H ₂ O + 38.5% NH ₄ NO ₃	52	125.5	0.494(liquid,65°C) 0.515(solid,88°C)	1515(liquid,65°C) 1596(solide,20°C)
58.7% Mg(NO ₃) ₂ - 6H ₂ O + 41.3% MgCl ₂ -6H ₂ O	59	132.2	0.510(liquid,65°C) 0.678(solid,38°C)	1550(liquid,65°C) 1630(solide,24°C)
53%% Mg(NO ₃) ₂ - 6H ₂ O + 47%Al(NO ₃) ₃ -9H ₂ O	61	148	n.d	n.d
53%% Mg(NO ₃) ₂ - 6H ₂ O + 47%Al(NO ₃) ₃ -9H ₂ O	72	180	n.d	n.d
14% LiNO ₃ + 86% Mg(NO ₃) ₂ -6H ₂ O	76	161	0.331(liquid,79.8°C) 0.649(solid,39°C)	1440(liquid,85°C) 0.515(solid,24°C)
66.6% urea + 33.4%NH ₄ Br				

Tableau 1.4. Les eutectiques candidats pour le stockage thermique [3],[4]

Composant	Température de fusion (°C)	Chaleur de fusion (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (Kg/m ³)
37.5% Urea + 63.5% acetamide	53	n.d	n.d	n.d
67.1% Naphtalène + 32.9% acide benzoïde	67	123.4	0.136(liquide,78.5°C) 0.282(solide,38°C)	n.d

1.4. Limitations des procédés à chaleur latente de fusion

1.4.1 La surfusion

La surfusion correspond au fait qu'un corps reste momentanément à l'état liquide à une température inférieure à son point de cristallisation. C'est un phénomène très courant puisque l'eau présente elle-même une surfusion de plusieurs degrés (3°C). Ce retard à la cristallisation peut être éliminé en ajoutant des agents nucléants .

1.4.2 Fusion non congruente

C'est un phénomène lié au fait qu'un sel en solution aqueuse peut avoir différentes formes hydratées solides stables. Ainsi, lors de la fusion du sel de Glauber, se forme le sel anhydre solide qui décante ainsi que sa solution saturée. Si on désire à nouveau refroidir le système, le sel anhydre précédemment formé ne se recombina pas et la solidification sera incomplète. Ce phénomène entraîne la non réversibilité du changement d'état.

Tableau 1.5. Les acides gras potentiellement candidats au stockage thermique [3]

Composant	Température de fusion (°C)	Chaleur de fusion (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (Kg/m³)
Proipyl palmiate	10	186	n.d	n.d
Isopropyl palmiate	11	95-100	n.d	n.d
Acides caprique + laurique (90:10)	13.3	142	n.d	n.d
Isopropyl stéarate	14-18	140-142	n.d	n.d
Acide caprylique	16	148.5	0.149(liquide 38.6°C)	901(liquide 30°C)
Acide caprique + laurique (65%mol - 35%mol)	18	148	n.d	n.d
Butyle stéarate	19	140	n.d	n.d
Acide caprique + laurique (45% -55%)	21	143	n.d	n.d
Diméthyle sabacate	21	123-135	n.d	n.d
34% acide Mystirique +66% acide caprique	24	147.7	0.164(liquide 39.1°C)	888 (liquide 25°C) 1018 (solide 1°C)
Vinyle stéarate	27-29	122	n.d	n.d
Acide caprique	32	152.7	n.d	878 (liquide 45°C)
Méthyle-12 hydroxy-stéarate	42-43	120-126	0.153(liquide 38.5°C)	n.d
Acide laurique	42-44	178	n.d	862 (liquide 60°C) 1007 (solide 24°C)
Acide myristique	49-51	204.5	0.147(liquide 50°C)	n.d
Acide palmitique	64	185.4	n.d	850 (liquide 65°C) 989 (solide 24°C)
Acide stéarique	69	203.4	0.162(liquide 68.4°C)	848 (liquide 70°C) 965 (solide 24°C)
			0.159(liquide 80.1°C)	

Tableau 1.6. Les matériaux à changement de phases commercialisés [3].

Nom du MCP	Type de produit	Température de fusion (°C)	Chaleur de fusion (kJ/kg)	Densité (kg/m ³)	Source
SN33	Sel	-33	245	1.24	[70]
TH-31	n.d	-31	131	n.d	[74]
SN29	Sel	-29	233	1.15	[70]
SN26	Sel	-26	268	1.21	[70]
TH-21	n.d	-21	222	n.d	[74]
SN21	Sel	-21	240	1.12	[70]
STL-21	Sel	-21	240	1.12	[75]
SN18	Sel	-18	268	1.21	[70]
TH-16	n.d	-16	289	n.d	[74]
STL-16	n.d	-16	n.d	n.d	[75]
SN15	Sel	-15	311	1.02	[70]
SN12	Sel	-12	306	1.06	[70]
STLN10	Sel	-11	271	1.11	[75]
SN10	Sel	-10	310	n.d	[70]
TH-10	n.d	-10	283	n.d	[74]
STL-6	Sel	-6	284	1.07	[75]
SN06	Sel	-6	284	1.07	[70]
TH-4	n.d	-4	286	n.d	[74]
STL-3	Sel	-3	328	1.01	[75]
SN03	Sel	-3	328	1.01	[70]
ClimSel C 7	n.d	7	130	n.d	[72]
RT5	Paraffine	9	205	n.d	[71]

Tableau 1.6. Les matériaux à changement de phases commercialisés (suite)

Nom du MCP	Type de produit	Température de fusion (°C)	Chaleur de fusion (kJ/kg)	Densité (kg/m ³)	Source
ClimSel C 15	n.d	15	130	n.d	[72]
ClimSel C 23	Sel	23	148	1.48	[72]
RT25	Paraffine	26	232	n.d	[71]
STL27	Sel	27	213	1.09	[75]
S27	Sel	27	207	1.47	[70]
RT30	Paraffine	28	206	n.d	[71]
TH29	Sel	29	188	n.d	[74]
ClimSel C 32	Sel	32	212	1.45	[72]
RT40	Paraffine	43	181	n.d	[71]
STL 47	Sel	47	221	1.34	[75]
ClimSel C 48	n.d	48	227	1.36	[72]
STL52	Sel	52	201	1.30	[75]
RT50	Paraffine	54	195	n.d	[71]
STL55	Sel	55	242	1.29	[75]
TH58	n.d	58	226	n.d	[74]
ClimSel C 58	n.d	58	259	1.46	[72]
RT65	Paraffine	64	207	n.d	[71]
ClimSel C 70	n.d	70	194	1.01	[72]
PCM 72	Sel	72	n.d	n.d	[74]
RT80	Paraffine	79	209	n.d	[2]
TH89	n.d	89	149	n.d	[72]
RT90	Paraffine	90	197	n.d	[71]
RT110	Paraffine	112	213	n.d	[71]

1.4.3 Cinétique de cristallisation

Les sels hydratés présentent des vitesses faibles de cristallisation ce qui limite la puissance thermique de stockage du procédé.

1.4.4. Résistance thermique au transfert

Au cours de la fusion et de la solidification, l'effet thermique se situe sur un front qui se déplace de la surface d'échange avec le fluide caloporteur vers le centre géométrique de l'élément de stockage. Ainsi la chaleur latente doit traverser plusieurs résistances en série: celle correspondant au matériau qui a déjà effectué son changement d'état (épaisseur variable dans le temps)

1.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une synthèse des derniers développements dans le domaine des matériaux à changement de phase qui peuvent être utilisés dans le stockage thermique. Les tableaux mentionnés présentent les différentes substances étudiées.

L'analyse de ces tableaux, nous montre que les paraffines et les acides gras possèdent des points de fusion entre 4°C à 80°C. Ils sont des candidats intéressants pour les applications résidentielles de chauffage et de climatisation et pour les systèmes solaires thermiques à basses températures.

Par contre, les composés minéraux présentent une gamme de changement de phase beaucoup plus large avec des points de fusion allant de 0°C jusqu'à 900°C et une conductivité thermique pour les sels hydratés relativement plus élevée par rapport aux paraffines. Malheureusement la majorité sont des matériaux corrosifs et parfois la réversibilité solidification - fusion n'est pas assurée.

CHAPITRE 2 ETAT DE L'ART

2.1. Introduction

Le stockage d'énergie thermique est un sujet dont la popularité croît avec le coût de l'énergie. Les matériaux qui ont été étudiés pendant les 40 dernières années sont les sels hydratés, les paraffines, les acides gras et les eutectiques des composés organiques et non organiques.

Selon les applications, les MCP sont choisis sur la base de leur température de fusion. Des matériaux qui fondent en dessous du 15°C sont employés pour stocker la fraîcheur dans les applications de climatisation alors que des matériaux qui fondent au dessus de 90°C sont employés pour la réfrigération par absorption. Tous les autres matériaux qui sont entre ces deux températures peuvent être appliqués dans le chauffage solaire et pour la mise à niveau de la charge thermique. Ces matériaux sont les plus étudiés par les chercheurs.

2.2. Développement des MCP

Des listes complètes de la plupart des matériaux possibles qui peuvent être employés pour le stockage thermique par chaleur latente ont été rapporté par Abhat [2]. Les derniers développements des MCP ont été mentionnés par Zalba [3] et Sharma [4]. Ils ont cité un grand nombre de candidats possibles pour le stockage thermique avec une liste des produits disponibles dans le commerce et les critères de sélection des MCP. Les facteurs les plus importants sont :

- la durée de vie,
- la stabilité à des milliers de cycles fusion / solidification,
- la température de changement de phase qui doit convenir à l'application souhaitée
- le prix du MCP qui influe sur le coût du système.

Khudhair et Farid [1] ont passé en revue les travaux précédents sur le stockage thermique par chaleur latente et fournit des perspectives de développer de nouvelles classes des matériaux de changement de phase.

Ils ont mentionnés que les paraffines commerciaux sont bon marché avec des densités thermiques de stockage modérées (200 kJ/kg ou 150 MJ/m^3) et une large gamme de température de fusion. La surfusion est négligeable, chimiquement inertes et sans ségrégation de phase. Cependant, leurs conductivités thermiques sont faibles ($0.2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)

Feldman et Shapiro [5] ont analysé les propriétés thermiques des acides gras (caprique, laurique, palmitique et stéarique) et leurs mélanges binaires. Les résultats ont prouvé qu'ils sont des matériaux intéressants pour le stockage d'énergie thermique par chaleur latente dans les applications de chauffage d'espace. La température de fusion des acides gras est entre 30°C et 65°C et la chaleur latente de fusion est de 153 à 182 kJ/kg .

Hasan [6] a entrepris une étude expérimentale sur l'acide palmitique comme MCP pour le stockage thermique. L'influence du temps de transition, de la température ambiante et de propagation de l'interface solide liquide ont été étudiés. Banu [7] à utilisé dans le bâtiment un mélange de bétyle de stéarate et l'acide palmitique connu sous le nom commercial EMEREST 2325 où sa température de fusion est de 20°C et sa chaleur de fusion 137 kJ/kg . Shilei [8] a expérimenté un autre MCP composé de 82% d'acide caprique et 18% d'acide laurique sa température de fusion est de 20°C et sa chaleur latente de 150 kJ/kg .

L'analyse de Farid [9] sur les MCP, montre que les sels hydratés sont des matériaux attrayants pour l'usage dans le stockage thermique d'énergie dû à leur densité volumique élevée de stockage (350 kJ/m^3), à la conductivité thermique relativement élevée et leurs bas coûts.

Les travaux de Palomo [10] et de l'équipe de recherche du laboratoire TREFLE de l'université de Bordeaux ont porté sur l'élaboration de sels et des mélanges de sels potentiellement utilisables pour le stockage à hautes températures (200°C à 600°C). Outre les températures de transition d'état, la valeur des enthalpies de changement

de phase (≥ 100 kJ/kg) a été un critère de choix important auquel se sont rajoutés des critères de coût, de dangerosité, d'agressivité, d'hygroscopicité, de disponibilité sur le marché. Dans la plage de 200°C à 400°C, ils ont retenu les systèmes binaires de nitrates alcalins et les systèmes nitrates/chlorures alcalins. Entre 400 et 600 °C, les sels étudiés sont des systèmes binaires de chlorures alcalins.

2.3. Détermination des caractéristiques thermo physiques

La détermination des propriétés thermo physiques des matériaux se fait souvent à l'aide de la calorimétrie différentielle à balayage (DSC). Cette technique est en général appréciée pour l'exactitude dans les mesures de la chaleur latente de fusion. Malheureusement et malgré la précision des résultats qu'elle présente, cette méthode a montré des limites. Yinping et Yi [11] ont relevé les points suivants:

- Utilisation des petites quantités (1à10mg) pour les analyses, alors que le comportement dépend de leur quantité.
- L'analyse expérimentale est complexe et coûteuse.
- Le changement de phase n'est pas visualisé.

Ils ont proposé une nouvelle technique expérimentale simple appelée *T-history*, elle est basée sur l'analyse de la courbe transitoire de la température lors de son changement d'état. Elle permet non seulement la détermination de la température de changement de phase, la surfusion, les chaleurs spécifiques et la conductivité thermique de chaque état. Les courbes de températures sont obtenues avec une simple manipulation.

Hiki [12] a remarqué qu'il y a deux gros problèmes dans le processus d'analyse dans la méthode *T-history* qui diminuent la précision et dans certain cas qu'il était impossible d'obtenir la chaleur de fusion pour plusieurs MCP. Il a amélioré la méthode en modifiant les points suivants:

- La fin du changement de phase est différente de la température de surfusion et dépend de la nature du matériau (3°C pour les acétate de sodium et 10°C pour les acides lauriques).
- La prise en compte de la chaleur sensible durant la période de changement de phase.
- La surface d'échange du MCP dans les tubes varie durant le processus de solidification

Peck [14] a adapté la méthode *T-history* pour les tubes horizontaux. Il a supposé que le transfert thermique sous la couche de vapeur du tube est négligeable pendant le changement d'état et qu'il y a deux points d'inflexion au début et la fin de la période latente.

2.4. Application des MCP pour le stockage thermique

Le stockage par chaleur latente est un mode de stockage d'énergie thermique qui consiste à utiliser des matériaux à changement de phase. L'énergie est alors emmagasinée sous forme de chaleur latente grâce à la fusion de ces matériaux. Puis restitue cette chaleur au milieu ambiant grâce à leur solidification.

Le choix d'un MCP est basé sur une chaleur latente élevée, la température de changement de phase doit être proche de la température désirée ce qui permet à la fois de réduire considérablement l'encombrement de l'installation et les pertes thermiques pendant la période de stockage.

Cependant ces systèmes de stockage ne sont pas très répandus car leur conception est freinée par la complexité des phénomènes de transferts thermiques qui se déroulent en leur sein.

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

a/ Accumulateur forme parallélépipédique a une ou plusieurs couches de MCP.

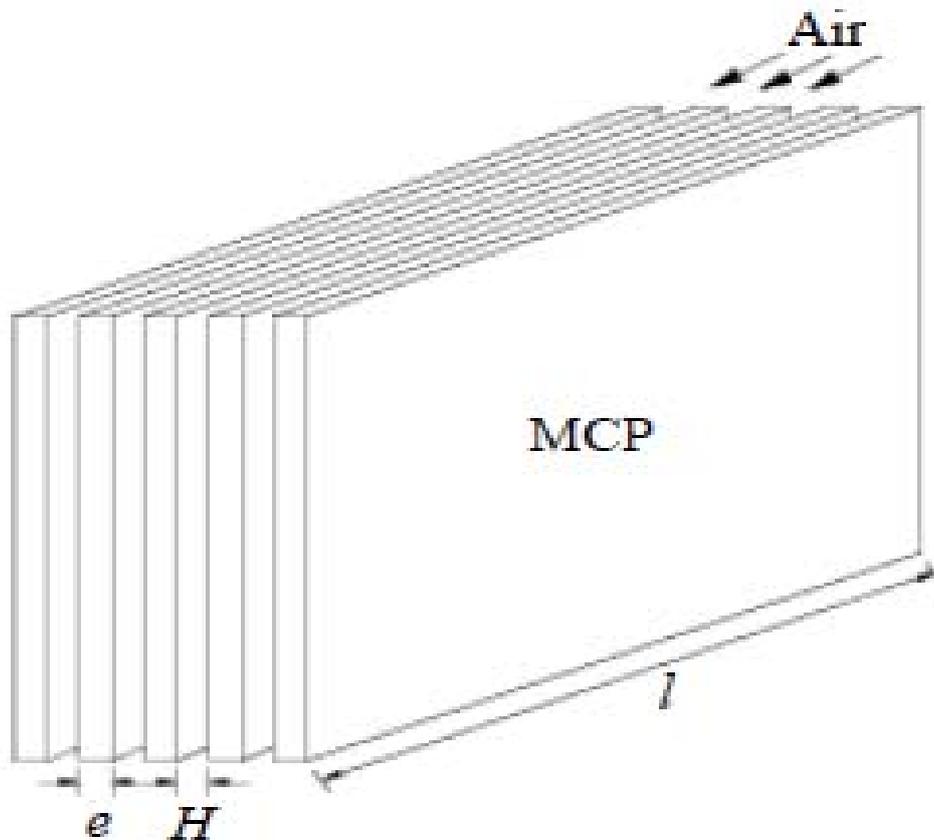


Figure 2.1: Schéma de l'accumulateur forme parallélépipédique

Il consiste en un ensemble de plaques planes parallèles de longueur l et séparées par une distance (H) entre lesquelles circule l'air à refroidir. Les plaques d'épaisseur (e) sont constituées d'un MCP à bas point de fusion complètement solidifié avant l'utilisation. L'air circule entre les plaques froides et le MCP absorbe ou cède la chaleur.

b/ Les accumulateurs cylindriques (cylindres concentriques ou échangeurs de chaleur a tubes et calandre.

Plusieurs dispositions possibles sont également étudiées: verticale et horizontale. Appareils destinés à être placés contre un mur, au plafond et dans le plancher ... Des études comparatives (performances, compacité, etc ...) avec d'autres types d'accumulateurs sont aussi abordées.

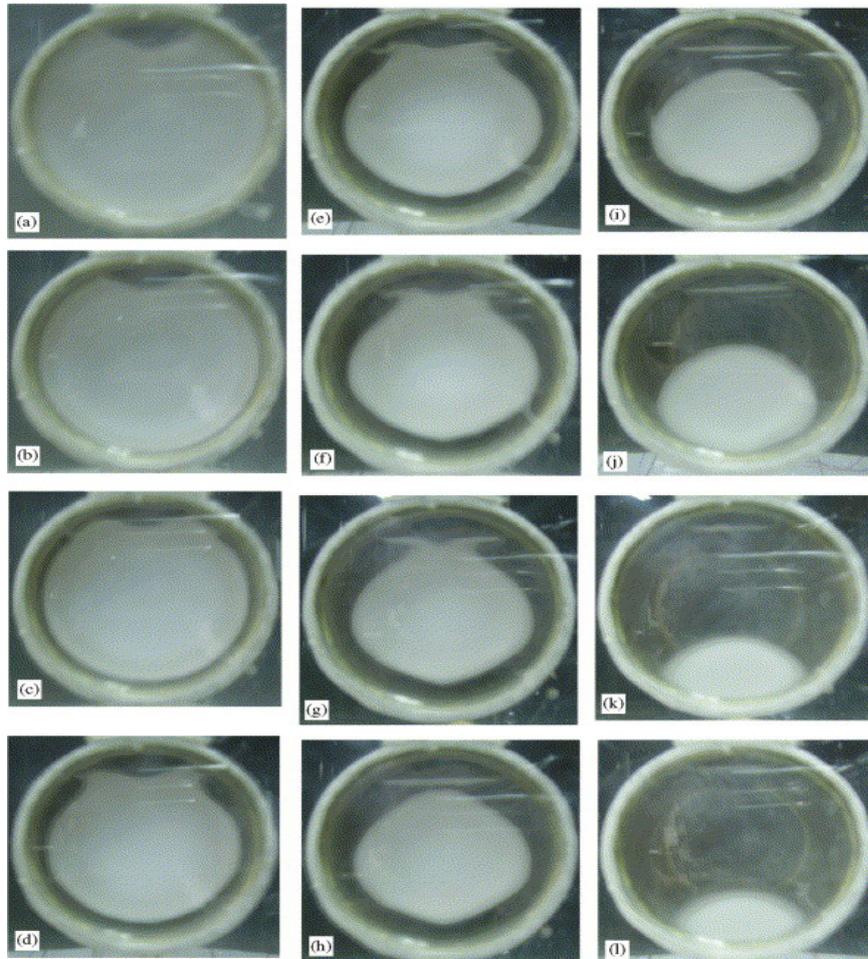


Figure 2.2. Changement de phase dans un accumulateur cylindrique.

c/ Nodules encapsulés.

Le principe de ce stockage est d'utiliser un MCP confiné dans des récipients étanches de petites dimensions.

Sur un plan plus industriel, notons principalement l'utilisation de nodules sphériques. De tels nodules remplissent une cuve qui peut être traversée par un fluide caloporteur tel que de l'eau ou l'air.

Lorsqu'on fait circuler dans la cuve de stockage un fluide suffisamment chaud, le MCP à l'intérieur des nodules se fond, stockant l'énergie par chaleur latente. Si la cuve est, plus tard, parcourue par un fluide froid (température inférieure à la température de fusion), l'énergie est déstockée.



Figure 2.3 Capsules sphériques

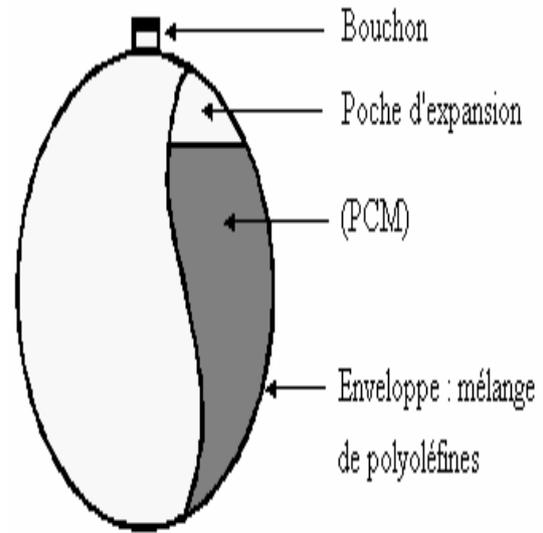


Figure 2.4. Schémas détaillé de la capsule

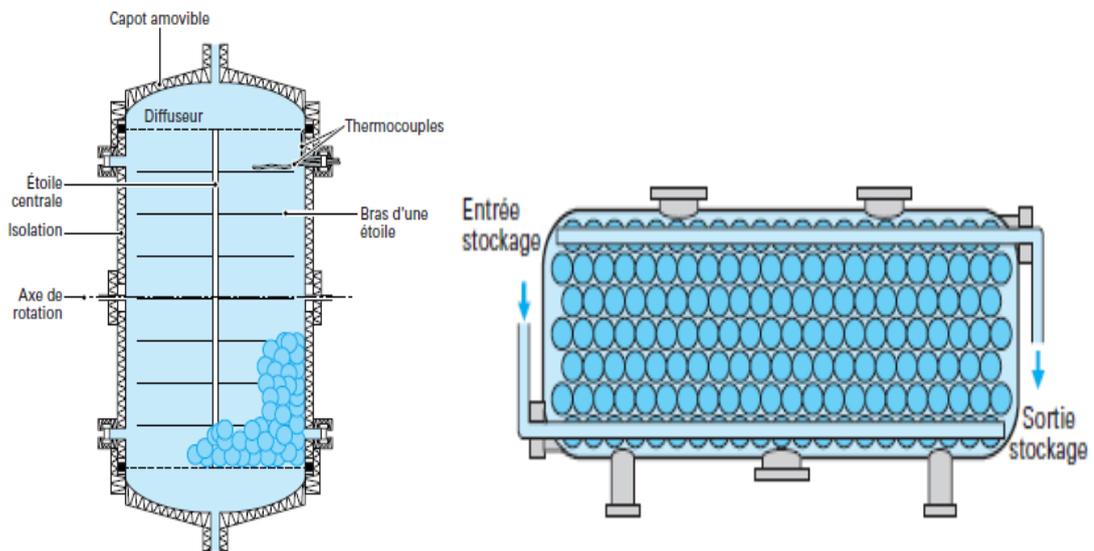


Figure 2.5. Schéma d'une cuve verticale et horizontale

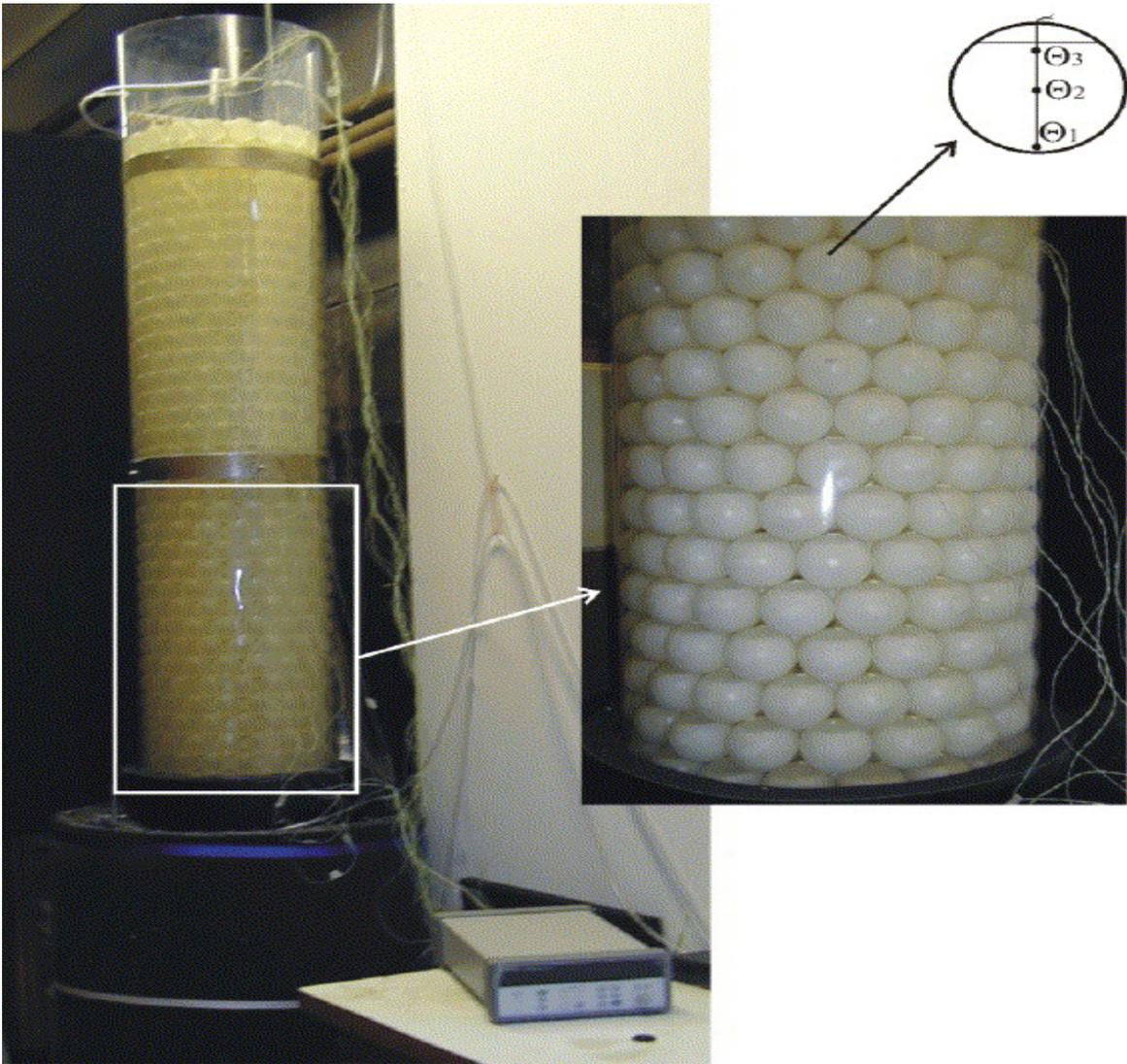


Figure 2.6. Stockage dans des capsules sphériques

Sparrow [16] dans son étude expérimentale d'un élément de stockage cylindrique à chaleur latente disposé verticalement a mis en évidence le rôle important joué par la convection naturelle lors de la fusion du MCP. Il a montré qu'au début de la fusion le mode de transfert de chaleur dominant est la conduction mais qu'après un certain temps la convection naturelle devient dominante :

- l'interface solide liquide s'incline de plus en plus par rapport aux parois du cylindre au fur à mesure de l'évolution de la fusion.

- La partie solide diminue de hauteur et s'amincit de plus en plus à sa partie supérieure pour rassembler de plus en plus à un cône au sommet légèrement arrondi.

D'autre part. Saito et al [17] ont étudié expérimentalement et analytiquement le comportement d'un élément de stockage cylindrique vertical avec de l'eau comme fluide caloporteur. La variation du flux de chaleur, l'évolution de l'interface solide liquide ainsi que le temps nécessaire pour le stockage d'énergie sont mesurés pour différentes hauteurs de l'élément. La convection naturelle est mise en évidence et visualisée. Un modèle analytique tenant compte de la convection naturelle a été développé et les résultats de ce modèle sont en bonne concordance avec les mesures.

Hirata et al [18] ont effectué des travaux expérimentaux et analytiques dans lesquels ils ont considéré un élément de MCP contenu dans un cylindre horizontal chauffé à travers la paroi par de l'eau à température constante circulant tout autour. L'analyse numérique des phénomènes de transfert thermique a été faite à l'aide d'une conductivité thermique équivalente de la phase liquide.

Farid et Husian [19] ont étudié expérimentalement et analytiquement un élément planaire qui consiste en plusieurs couches de MCP indépendantes. Le stockage de la chaleur dans le MCP est fait par l'intermédiaire des éléments électriques chauffants, et de l'air circulant entre les couches permet le déstockage.

Le transfert de chaleur à travers le MCP est supposé unidimensionnel ce qui est justifié par le fait que l'épaisseur des couches est très faible devant leur hauteur.

Laouadi, Lacroix et Galanis [20] ont développé et utilisé un modèle basé sur la conduction unidimensionnelle pour étudier les performances d'un accumulateur de chaleur plan qui consiste en une couche de MCP de deux centimètres d'épaisseur isolée thermiquement d'un côté. Le stockage de chaleur s'effectue grâce à des résistances électriques chauffantes placées dans le MCP juste au dessous de l'isolant. Le déstockage vers l'environnement se fait par radiation et/ou par convection

Un modèle numérique pour la prédiction du comportement thermique d'une unité multicouches de stockage d'énergie par chaleur latente a été développé par Brousseau et Lacroix [21]. Des sources de chaleur électriques sont distribuées uniformément dans les couches de MCP de cette unité et fournissent la puissance nécessaire pour le stockage de chaleur. Le déstockage est effectuée par une circulation d'air autour des éléments de MCP.

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

- stockage par chaleur sensible dans le MCP solide.

- stockage par chaleur latente au début de la fusion.

- stockage simultané par chaleur sensible et par chaleur latente dans le MCP liquide.

Par ailleurs Henze et Humphrey [22] ont présenté un modèle numérique simplifié pour la prédiction de la fraction de MCP fondu et la forme de l'interface solide liquide en fonction du temps. Les résultats du modèle qui sont en bonne concordance avec les résultats expérimentaux montrent que pour obtenir des flux élevés avec une certaine quantité de MCP et de métal qu'il est préférable d'avoir des ailettes fines et serrées plutôt que des ailettes épaisses et plus écartées.

L'effet des ailettes sur le phénomène de la fusion et des cycles de fusion et de solidification dans le cas d'un cylindre vertical a été traité aussi par Benmadda [23]. Des expériences ont été faites sur une cavité rectangulaire avec le même MCP dans le cas sans ailettes et dans le cas avec ailettes pour mettre en évidence l'effet de la convection naturelle par A. Hamid et M. Lacroix [24].

Arkar et Medved [25] ont conçu un système de stockage de chaleur latente dans lequel le MCP est encapsulé dans des sphères, formant ainsi un milieu poreux. L'ensemble est placé dans le système de ventilation d'un local. Des résultats de simulations pour différentes conditions climatiques réelles ont été étudiés.

Farid et Stretton [26] ont étudié expérimentalement un nouveau chauffe eau incorporant un MCP. Ce nouveau système est modifié en plaçant des tubes plastiques remplis de MCP et stockant l'énergie électrique sous forme de chaleur à coût réduit durant la nuit.

Al Qarnia [27] a effectué une étude sur chauffe-eau solaire avec un stockage par chaleur latente. L'unité de stockage est composée d'une série de tubes placés dans le MCP. Durant la charge, un fluide caloporteur (eau) provenant du système de captation circule dans les tubes et transfère l'énergie solaire collectée au MCP. Le type et la masse du MCP, le nombre des tubes et le débit de circulation ont été analysés.

Ismail et Henriquez [28] ont présenté une étude numérique de la solidification d'un matériel inclus dans un récipient sphérique. La résolution est effectuée par grille mobile avec la méthode de différence finie. L'effet de la convection est pris en compte. L'influence de la taille, de l'épaisseur du matériel du récipient et de la température interne sont discutées.

Kousksou [30] a analysé l'effet de la position du réservoir (verticale ou horizontale) et le mode d'écoulement du fluide caloporteur à l'intérieur d'un réservoir composé de capsules sphériques remplis de MCP.

2.5. Wallboard

Avec l'intégration de la chaleur latente dans le stockage d'énergie thermique dans le bâtiment, l'énergie solaire et le refroidissement de l'air ambiant est devenu efficace. Son utilisation permet de réduire l'énergie consommée pour le chauffage et le refroidissement tout en assurant un niveau de confort. Le principe de fonctionnement est le suivant : le MCP absorbe la chaleur pendant qu'il fond à 23° C en général. La chaleur est stockée dans le mur jusqu'à ce que la température plonge au-dessous d'une température de confort. Alors le MCP se solidifie en libérant la même quantité de la chaleur qu'il avait précédemment absorbée. Le wallboard imbibé d'un matériel de changement de phase semble être près de commercialisation, et pourrait s'avérer être un outil de gestion puissant d'une demande maximale pour des utilités,

en particulier dans le secteur résidentiel. Car avec un poids léger, un support de stockage thermique idéal et peut être facilement installé, le wallboard avec MCP pourrait convenir aux applications de nouvelles constructions et la restauration des anciennes bâtisses.



Figure 2.7. Grains de MCP et type de wallboard

Khudhair et al [1] ont présenté une synthèse sur les utilisations des MCP encapsulés dans le béton et le wallboard de gypse utilisé dans le plafond et le plancher pour la conservation de l'énergie dans le bâtiment. Une étude expérimentale et numérique sur une salle d'essai extérieure complète a été réalisée par Athienitis et al [33]. Pour la doublure interne, ils ont placé des panneaux de gypse avec du butyle - stéarate (BS) comme matériau à changement de phase. Le poids du MCP représente environ 25% du poids du panneau. Un modèle numérique a été développé pour simuler le comportement thermique de la salle. Ils ont montré que l'utilisation du panneau de gypse avec MCP peut réduire la température ambiante maximum par 4°C environ pendant le jour et peut réduire la charge thermique de manière significative pendant la nuit.

Neeper [34] a examiné la dynamique thermique d'un wallboard de gypse imbibé d'acides gras et de cires de paraffine comme MCP. Le wallboard est soumis à la variation journalière de la température ambiante mais n'est pas directement illuminés par le soleil. Les températures de fusion de ces MCP sont ajustées en adaptant le mélange des composants MCP. Il a examiné trois paramètres du wallboard avec MCP qui peuvent influencer la quantité d'énergie pouvant être passivement absorbée et libérée pendant un cycle quotidien :

- a) la température de fusion du MCP ;
- b) l'excédent de température ambiante par rapport à la température de fusion;
- c) la capacité de chaleur latente par unité de surface du wallboard.

Les résultats obtenus ont montré que le stockage journalier maximum d'énergie se produit à une valeur de la température de fusion du matériau à changement de phase encapsulé qui est près de la température ambiante de confort moyen dans la plupart des circonstances.

Il a aussi optimisé la conception d'un tel type de murs et étudié l'énergie absorbée et libérée quotidiennement par un mur contenant des MCP sollicité par un cycle quotidien de température ambiante de forme sinusoïdale et carrée.

Maha [35],[36] a réalisé et expérimenté des cellules de test en incorporant des MCP couplés à l'utilisation d'un super isolant VIP (Vacuum Insulation Panel). L'étude des propriétés thermiques des parois et du comportement de deux cellules tests isolées par un VIP a été présentée. Le bien fondé du concept de couplage MCP et super isolant pour réaliser des enveloppes légères de faible épaisseur avec une bonne isolation et une inertie significative est mise en évidence. Le code commercial TRANSYS a été utilisé pour la simulation numérique.

L'évaluation analytique et expérimentale de deux genre de gypse avec MCP (un mélange aléatoire et l'autre stratifié) de Darkwa [37],[38] et [39] a montré que le composé stratifié présente des performance améliorées de 18% par rapport au composé mélangé aléatoirement.

Shilei et al [40] ont expérimenté une pièce dans le nord de la Chine. La pièce est constituée de murs contenant 18% de MCP composé d'acides caprique et laurique. Ils ont comparé les mesures avec celles d'une pièce adjacente avec des murs conventionnels.

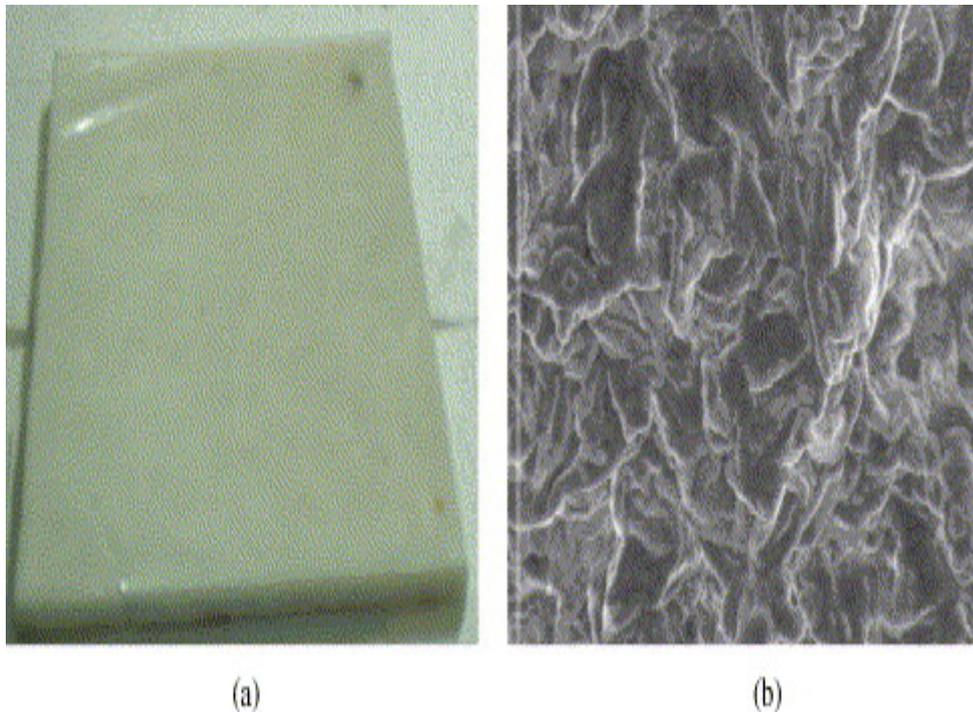


Figure 2.8 Autres types de wallboards

Huang et al [41] récapitulent une recherche et une analyse numériques des effets de régulation de la température résultant de l'incorporation des matériaux de changement de phase dans un mur de bâtiment en utilisant un modèle validé. Le comportement thermique de stockage d'énergie et de commande de température des murs de cavité de MCP en utilisant les différentes températures de transition de phase et des conditions de fonctionnement ont été aussi abordées.

Zhang et al [42] ont présenté un matériau de changement de phase (MCP) de forme stabilisée. Il possède les propriétés suivantes: Une grande chaleur spécifique apparente pour la région de la température de changement de phase, la conductivité thermique appropriée, maintient la forme stabilisée dans le processus de changement de phase et aucun besoin de récipients. Les propriétés thermophysiques ont été mesurées. Quelques applications d'un tel matériel dans les

bâtiments pour une efficacité énergétique ont été étudiées. Des modèles validés ont été utilisés pour analyser les comportements thermiques des systèmes de stockages.

2.6. Conclusion

La recherche bibliographique a démontré que le stockage thermique est un aspect important dans la conservation de l'énergie. Les matériaux sont choisis selon leur température de fusion qui doit être adaptée à la température désirée. Les différentes applications ont montré que les paraffines et les acides gras sont les plus utilisés dans la gamme 10°C à 80°C surtout dans le secteur résidentiel.

La caractérisation des MCP se fait souvent par calorimétrie différentielle par balayage. La méthode *T-history* est une technique simple qui permet de caractériser plusieurs échantillons de MCP au même temps.

Les différentes applications des MCP dans les différentes installations thermiques qui ont été réalisées ont pris en considération surtout des éléments de stockage cylindriques et plans. Dans la configuration cylindrique on trouve principalement, les éléments composés de deux cylindres concentriques contenant séparément le MCP et le fluide caloporteur. L'encapsulation des MCP dans des récipients de formes géométriques différentes (cylindriques, plats ou sphériques) à l'intérieur d'un réservoir de stockage calorifugé est aussi utilisée. Les capsules sphériques sont préférées pour des raisons de la facilité de l'emballage dans le réservoir de stockage avec une porosité uniforme.

L'incorporation des matériaux à changement de phase dans l'enveloppe des bâtiments reste la solution la plus rapide et la moins coûteuse qui permet de diminuer la consommation d'énergie de chauffage/climatisation tout en assurant la qualité et le confort des occupants.

CHAPITRE 3

Caractérisation des MCP

3.1 Introduction

La connaissance des principales caractéristiques thermo physiques des matériaux a changement de phase MCP est nécessaire pour une meilleure conception du système de stockage afin d'optimiser ces performances. La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) est la méthode la plus utilisée et le moyen disponible pour la détermination de la chaleur de fusion et les chaleurs spécifiques. Cette méthode est, en général appréciée pour l'exactitude dans les mesures de la chaleur latente de fusion. Malheureusement et malgré la précision des mesures qu'elle présente, elle a montré les limites suivantes :

- Utilisation des petites quantités (1 à 10 mg) pour les analyses, alors que le comportement dépend de leur quantité.
- L'analyse expérimentale est complexe et coûteuse.
- Le changement de phase n'est pas visualisé.

Yinping [11] a proposé une simple méthode (historique des températures) pour la détermination de la température de changement de phase, la surfusion, les chaleurs spécifiques (solide et liquide) et la conductivité thermique dans le cas solide et liquide à l'aide des courbes de températures qu'on peut les obtenir facilement avec une simple manipulation.

3.2. La calorimétrie différentielle à balayage

La calorimétrie différentielle à balayage différentiel (*DSC- Differential Scanning Calorimetry*) est devenue la technique de référence pour la caractérisation thermique de produits soumis au changement de phase. Parmi les propriétés mesurées par cette technique on cite l'évolution en fonction de la température de la chaleur

massique, de la température de changement de phase et de la chaleur latente de changement de phase [68]. Il y a deux types de calorimètres.

- Calorimètre à flux de chaleur (DSC à flux de chaleur)
- Calorimètre à compensation de puissance (DSC à compensation de puissance).

Le principe de fonctionnement d'un DSC à flux de chaleur est le suivant. L'évolution de la température d'un échantillon du matériau à étudié (T_{ech}) est comparée à celle d'un autre matériau de référence ($T_{réf}$) qui ne subit de changement de phase dans la plage de température étudiée. On enregistre la température la différence de température ($T_{ech} - T_{réf}$) lorsque le produit et la référence sont chauffés (et refroidis) par la même source de chaleur. En absence de changement de phase et en variation linéaire de la température de consigne (T_{con}) l'écart ($T_{ech} - T_{réf}$) reste constant. Dès que le produit d'étude subit un changement de phase l'écart ($T_{ech} - T_{réf}$) varie en fonction de l'absorption ou le dégagement de la chaleur latente. La courbe calorimétrique est représentée la figure 3.1.

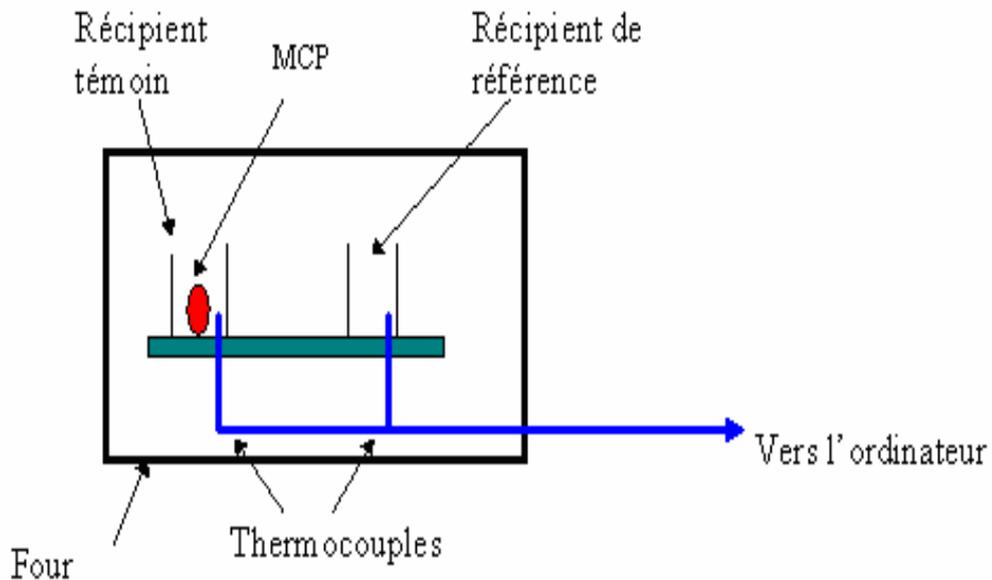


Figure 3.1. Principe de fonctionnement d'un DSC a flux de chaleur

Pour la DSC à compensation de puissance le produit étudié et le matériau de référence sont chauffés (et refroidi) par deux sources de chaleur individuelles. La consigne de la température est réalisée par deux systèmes. Le premier contrôle la température moyenne entre l'échantillon et le matériau de référence. Le second contrôle la puissance des deux échangeurs de façon à ce que l'écart de température entre l'échantillon et le matériau de référence soit nulle ($T_{éch} - T_{réf} = 0$) même en présence de changement de phase. La courbe calorimétrique est donnée sur la forme de différence de chaleur $\Delta Q = Q_{éch} - Q_{réf}$ en fonction du temps ou de température où de la température $T_{éch-réf}$: où $Q_{éch}$ et $Q_{réf}$ représentent la quantité d'énergie transmise à l'échantillon et au matériau de référence.

3.3. La méthode T-History

En 1999, Yinping et Yi [11] ont proposé une nouvelle technique expérimentale, appelée *T-history*, destinée à la détermination simultanée des propriétés thermophysiques de produits soumis au changement de phase (Solidification et / ou fusion) [68]. Elle a reçu ce nom car elle est basée sur l'analyse de la courbe transitoire de la température d'un produit lors de son changement de phase. Le dispositif expérimental est schématisé sur la figure 3.2. Il s'agit de deux tubes de mêmes dimensions en verre, un contenant l'échantillon et l'autre rempli d'un matériau de référence (généralement l'eau), qui sont initialement mis dans un bain chaud à température homogène T_{∞} et supérieur à la température de changement de phase T_m du produit en étude ($T_{\infty} > T_m$). Les deux tubes sont laissés dans le bain jusqu'à ce que la température d'échantillon et celle de l'eau deviennent égales à T_0 ($T_0 = T_{\infty}$). A l'instant $t=0$, les deux tubes sont retirés du premier bain et mis à l'air libre ou bien dans un deuxième bain d'eau à température T_a inférieure à la température de changement de phase du produit T_a (qui peut être soit constante soit variable avec le temps). Un thermocouple est placé dans chaque tube mesure l'évolution temporelle de la température et du matériau de référence.

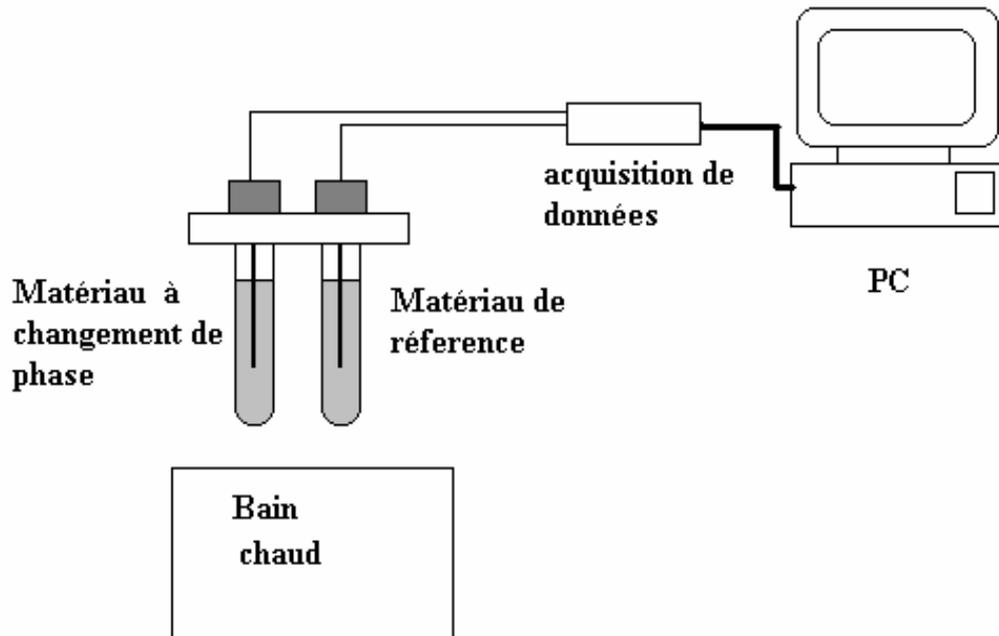


Figure 3.2. Représentation du dispositif expérimental.

La figure 3.1. Présente les courbes de refroidissement de l'échantillon et du matériau de référence. Pour $0 < t < t_1$ le produit est complètement liquide dans le tube, pour $t_1 < t < t_2$ les phases liquide et solide coexistent et pour $t_2 < t < t_3$ l'échantillon est complètement solidifié par contre le matériau de référence n'est pas soumis au changement de phase pendant l'expérience.

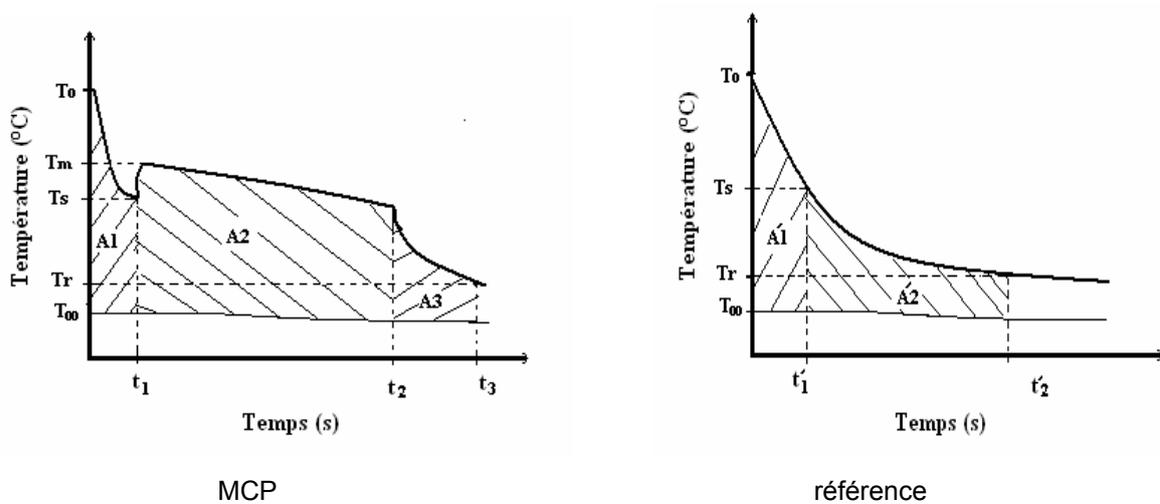


Figure 3.3. Evolutions des températures dans les deux matériaux

3.3.1. Calcul des chaleurs spécifique solide, liquide et chaleur latente

Yinping et Yi [11] supposent que pour les deux tubes le nombre de Biot ($Bi=h.R/k$) ou R est le rayon extérieur du tube et h coefficient d'échange par convection et k la conductivité thermique du matériau a changement de phase est très inférieur à 0.1 ($Bi \ll 0.1$), la distribution de température peut être considérée comme uniforme et à partir des bilans thermiques de chaque phases nous aurons les expressions suivantes :

Pour MCP

Le bilan thermique au niveau du tube avec le MCP en régime permanent.

1-Phase liquide

$$(m_{tb}.Cp_{tb} + m_{mcp}.Cp_{mcp,l}).(T_0 - Ts) = h.A_c \cdot \int_{t_0}^{t_1} (T - T_\infty).dt = h.A_c.A_1 \quad (3.1)$$

2-Durant le changement d'état

$$m_{mcp}.H_m = h.A_c \cdot \int_{t_1}^{t_2} (T - T_\infty).dt = h.A_c.A_2 \quad (3.2)$$

3- Phase solide

$$(m_{tb}.Cp_{tb} + m_{mcp}.Cp_{mcp,s}).(Ts - Tr) = h.A_c \cdot \int_{t_2}^{t_3} (T - T_\infty).dt = h.A_c.A_3 \quad (3.3)$$

Pour le matériau de référence

1-Durant la période liquide

$$(m_{tb}.Cp_{tb} + m_{re}.Cp_{re}).(T_0 - Ts) = h.A'_c \cdot \int_{t_0}^{t_1} (T - T_\infty).dt = h.A'_c.A'_1 \quad (3.4)$$

2- Durant le changement de phase

$$(m_{tb}.Cp_{tb} + m_{re}.Cp_{re}).(Ts - Tr) = h.A'_c \cdot \int_{t_1}^{t_2} (T - T_\infty).dt = h.A'_c.A'_2 \quad (3.5)$$

Après combinaison des équations de (3.1) à (3.5) nous aurons :

$$Cp_l = \frac{m_{tb} \cdot Cp_{tb} + m_{re} \cdot Cp_{re} \frac{A_c}{A_c'} \frac{A_1}{A_1'}}{m_{mcp}} - \frac{m_{tb}}{m_{mcp}} Cp_{tb} \quad (3.6)$$

$$Cp_s = \frac{m_{tb} \cdot Cp_{tb} + m_{re} \cdot Cp_{re} \frac{A_c}{A_c'} \frac{A_3}{A_2'}}{m_{mcp}} - \frac{m_{tb}}{m_{mcp}} Cp_{tb} \quad (3.7)$$

$$H_m = \frac{m_{tb} \cdot Cp_{tb} + m_{re} \cdot Cp_{re} \frac{A_c}{A_c'} \frac{A_2}{A_1'}}{m_{mcp}} (T_o - T_s) \quad (3.8)$$

Les A_1 , A_2 , A_3 , A_1' et A_2' sont des surfaces en (K.S) indiquées sur la figure 3.3.

3.3.2. Calcul de la conductivité thermique

Pour la détermination de la conductivité thermique moyenne de l'échantillon dans la phase solide k_s , l'hypothèse d'un transfert de chaleur par conduction monodimensionnel radiale dans le produit est adopté. (la longueur du tube est quinze fois supérieure a son diamètre) . La figure 3.3

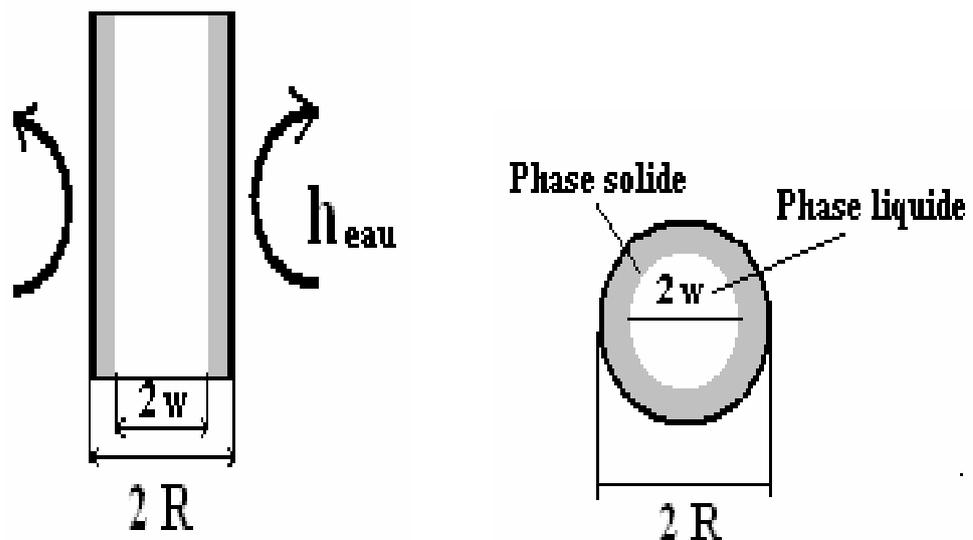


Figure 3.4 Changement de phase à l'intérieur du tube

L'équation de chaleur en coordonnées cylindriques monodimensionnels

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \quad (w < r < R, \quad t > 0) \quad (3.9)$$

Avec les conditions aux limites

$$k_s \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h_{eau} (T_\infty - T) \quad t > 0 \quad (3.10)$$

Et les conditions initiales

$$T(r = R) \cong T_m \quad t = 0$$

(3.11)

Pour l'interface solide liquide

$$T(r = w) = T_m \quad (3.12)$$

$$k_s \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=w} = \rho_{mcp} H_m \frac{dw}{dt} \quad (3.13)$$

Yinping et Yi [11] ont résolu l'équation différentielle de conduction et ont trouvé l'expression suivante de la conductivité thermique moyenne en phase solide.

$$k_s = \frac{\left[1 + \frac{Cp_s (T_m - T_\infty)}{H_m} \right]}{4 \left(\frac{t_f (T_m - T_\infty)}{\rho_{mcp} R^2 H_m} - \frac{1}{h_{eau} R} \right)} \quad (3.14)$$

Selon Yinping et Yi [11], la démarche pour l'obtention de l'équation de la conductivité thermique moyenne de l'échantillon dans la phase liquide k_l est similaire à celle employée pour la détermination de k_s . Cependant le phénomène de surfusion n'est pas pris en compte.

3.3.3. Résultats obtenus

Les résultats expérimentaux obtenus par la méthode *T-history* pour trois types de MCP à savoir : L'acétate de sodium, la paraffine n-docosane et de l'acide laurique sont rapportés dans les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3. [12]

Acétate de sodium CH₃COONaH₂O

Tableau 3.1. Caractéristiques de l'acétate de sodium obtenues par *T-history*

Echantillon	Cpl (kJ/kg K)	Cps (kJ/kg K)	Hm (kJ/ kg)
1	2.86	2.17	262
2	3.35	2.19	242
3	3.71	2.42	237
4	4.29	2.29	242
5	3.93	2.44	240
6	4.29	2.22	244
moyenne	3.74 ± 0.59	2.26 ± 0.13	245 ± 9
DSC	-	-	253
Littérature	3.68	2.11	263

Paraffine C₂₂H₄₆

Tableau 3.2. Caractéristiques de la paraffine obtenues par *T-history*

Echantillon	Cpl (kJ/kg K)	Cps (kJ/kg K)	Hm (kJ/ kg)
1	1.89	5.50	141
2	2.83	5.09	127
3	1.79	5.96	126
4	2.35	4.75	143
5	2.50	4.88	138
6	1.75	4.49	132
moyenne	2.19 ± 0.19	5.11 ± 0.56	135 ± 8
DSC	-	-	130
Littérature	-	-	156.8

Acide lauriqueTableau 3.3. Caractéristiques de l'acide laurique obtenues par *T-history*

Echantillon	Cpl (kJ/kg K)	Cps (kJ/kg K)	Hm (kJ/ kg)
1	2.16	3.01	171
2	2.10	1.98	191
3	1.93	2.50	192
4	2.45	3.70	186
5	2.16	2.81	197
6	2.17	2.85	184
Moyenne	2.14 ± 0.46	2.81 ± 0.60	186 ± 10
DSC	-	-	179
Littérature	2.38	1.80	183

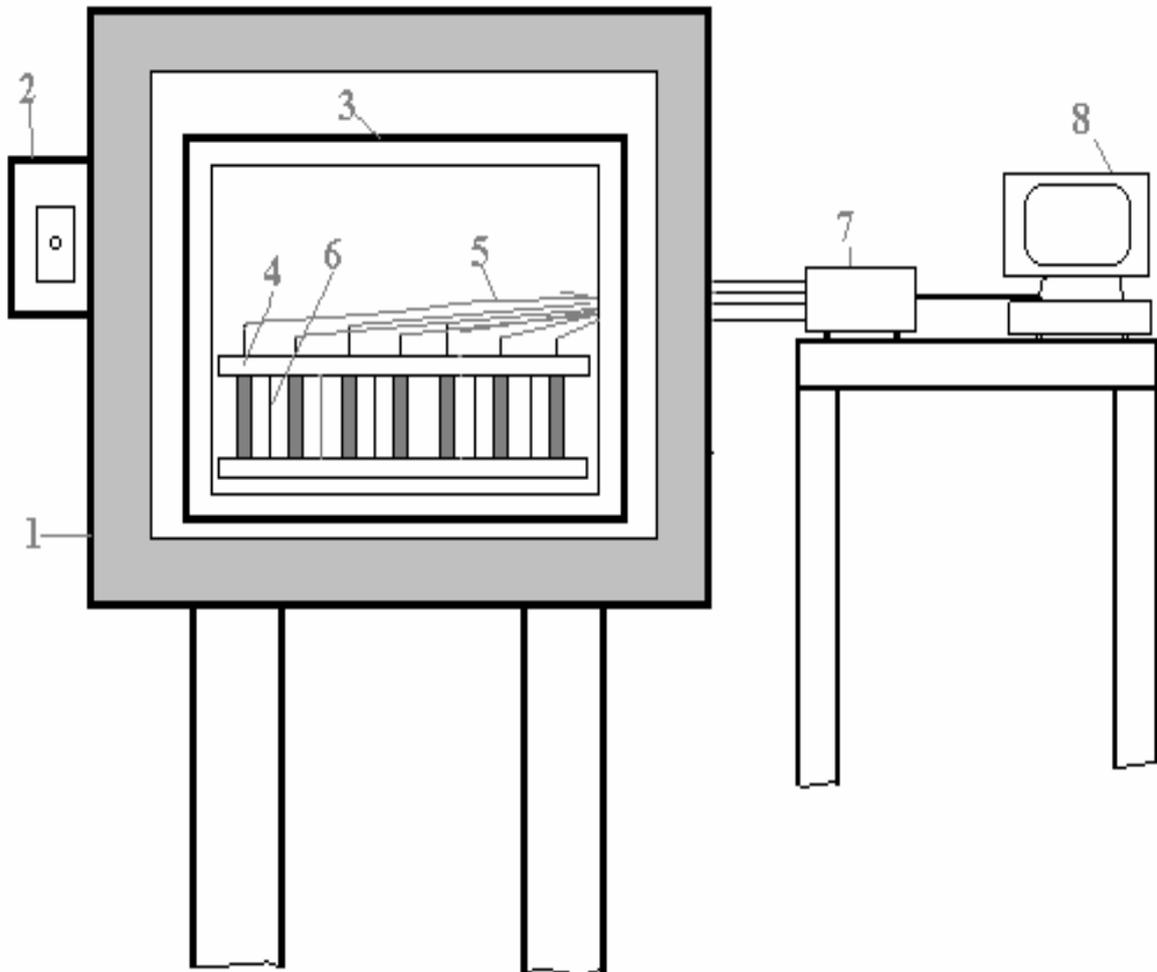
Les résultats sont obtenus pour six échantillons de chaque matériau montre que cette méthode donne la valeur de la chaleur de la fusion avec une erreur moyenne de 4 % comparativement avec les mesures avec DSC [12].

3.4. Adaptation de la méthode T-history pour les hautes températures**3.4.1. Description du banc d'essai réalisé**

Le montage expérimental réalisé est composé d'un four à haute température (600°C) et d'une enceinte cubique composée d'une épaisseur de 2 cm d'isolant aggloméré. Elle sert d'une part à enlever les différentes vibrations causées par le fonctionnement du four et d'autre part à éviter la convection forcée due au jet de chaleur du four durant son fonctionnement.

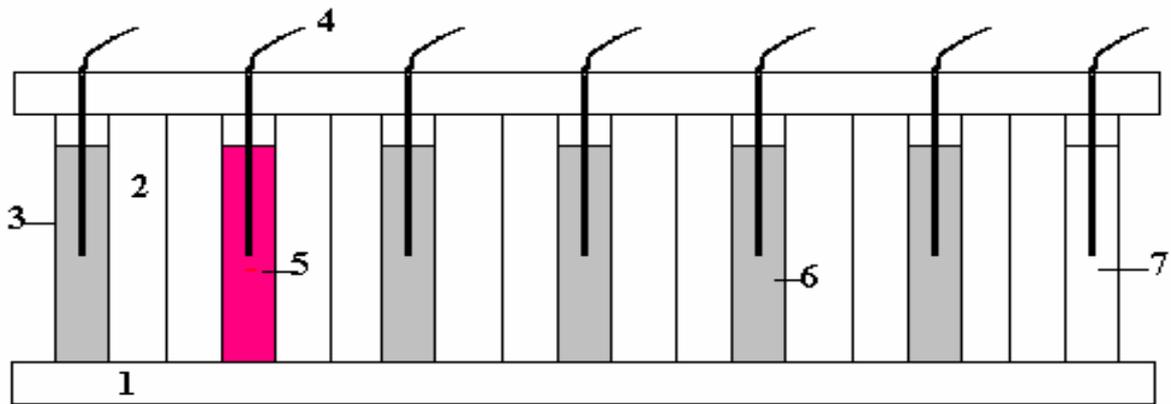
Sept tubes de même dimension (15 mm de diamètre et 90 mm de longueur) sont utilisés pour l'analyse des matériaux à changement et du matériau de référence. Pour ce dernier, on a utilisé de la poudre de cuivre car ces caractéristiques sont connues et peut résister à haute température.

Pour éliminer les effets de bords nous avons isolé la partie supérieure et inférieure des tubes par 2 cm avec le même isolant que l'enceinte. La surface intérieure de l'enceinte est couverte par des plaques d'aluminium. La séparation entre les tubes est assurée par des feuilles d'aluminium. L'utilisation de l'aluminium sert à éviter les échanges thermiques par rayonnement infrarouge.



- | | | |
|----------------------------|-------------------------|------------------------|
| 1 : four | 2 : Système de commande | 3 : Enceinte de tests |
| 4 : Tubes + isolant | 5 : Thermocouples | 6 : Plaque d'aluminium |
| 7 : Acquisition de données | 8 : PC | |

Figure 3.5. Schéma du banc essai



- | | | |
|------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 : Isolant | 2 : Plaque d'aluminium | 3 : Tube en pyrex |
| 4 : Thermocouple | 5 : Cuivre | 6 : Sel avec graphite |
| 7 : Sel | | |

Figure 3.6. Schéma des tubes avec isolation

Huit thermocouples de type K (chromel – Alumel) sont utilisés pour la mesure des températures des différents matériaux et de l'air à l'intérieur de l'enceinte. Ces thermocouples sont reliés à une acquisition de données et les résultats sont enregistrés dans un PC.

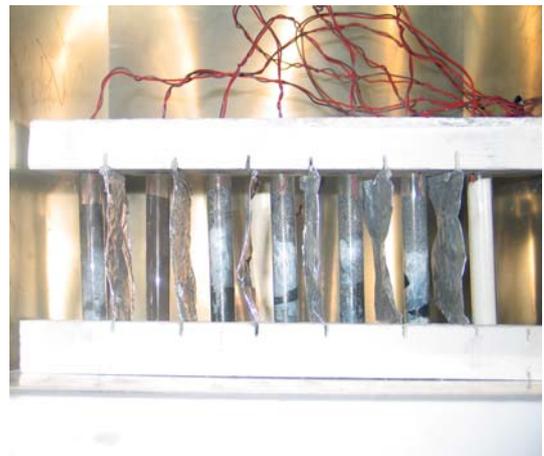


Figure 3.7. Photos du banc d'essai réalisé

3.4.2. Matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase souffrent de leur faible conductivité thermique. Cet inconvénient réduit le flux de chaleur stocké ou extrait durant la fusion ou la solidification ce qui ont limité leurs applications.

Actuellement deux méthodes sont utilisées pour augmenter la conductivité thermique des matériaux. La première est l'introduction d'une grille de métal dans le matériau à changement de phase généralement dans les paraffines (les sels sont corrosifs) et l'autre c'est la fabrication du système de stockage avec des configurations où la surface d'échange est importante (exemple tube ailettes). Néanmoins, l'utilisation des structures métalliques à l'intérieur des matériaux à changement de phase mène à l'augmentation du poids et du volume du stockage.

L'approche actuelle est l'emploi d'un matériau composé de MCP-graphite. Ce composite combine la grande densité de stockage du MCP et la grande conductivité thermique du graphite (10% seulement de graphite augmente jusqu'à 100 fois la valeur de la conductivité thermique du MCP).

3.4.3. Matériau de référence

Pour le matériau de référence, nous avons utilisé la poudre de cuivre. Les caractéristiques thermo physiques en fonction de la température sont données par le tableau 3.4.

Tableau 3.4. Caractéristiques thermo physiques du cuivre

Température (K)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur spécifique (kJ/kg°K)	Conductivité thermique (W/m°K)
50	9019	0.099	-
100	9009	0.254	480
150	8992	0.323	429
200	8973	0.357	413
250	8951	0.377	406
300	8930	0.386	401
400	8884	0.396	393
500	8837	0.406	386
600	8787	0.431	379
800	8686	0.448	366
1000	8586	0.446	352

3.4.4. Résultats

3.4.4.1. Etalonnage des thermocouples intervalle (215°C -235°C)

Pour l'étalonnage des thermocouples nous avons procédé de la manière suivante.

Les thermocouples sont regroupés en un seul point et placés dans le sable.

Nous avons programmé la température du four selon les conditions mentionnées dans la figure 3.8. Nous avons choisi 5 paliers à savoir (215, 220, 225, 230 et 235).

Pour chaque palier le four est maintenu a une température constante pendant 5h.

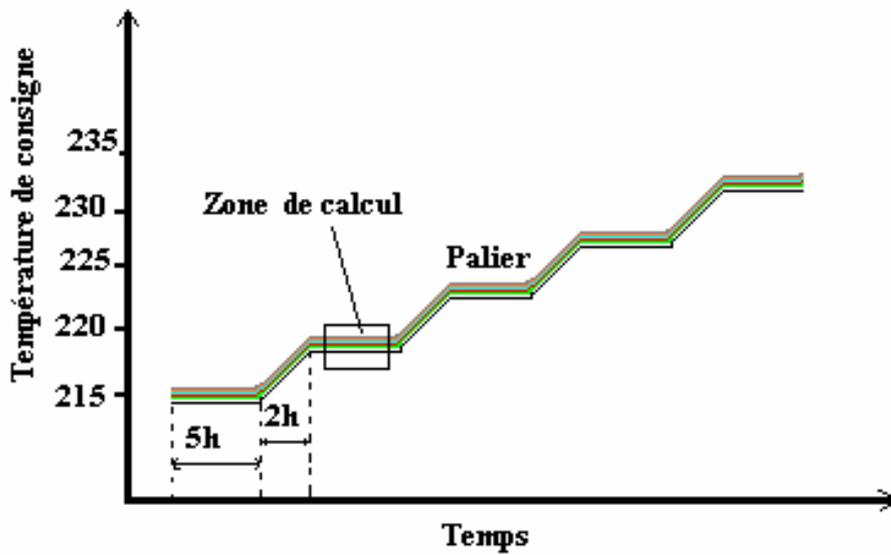


Figure 3.8. Procédure d'étalonnage.

Pour chaque palier, nous avons pris seulement les valeurs lorsque le régime était permanent et nous avons calculé la moyenne de chaque thermocouple (voir figure 3.8).

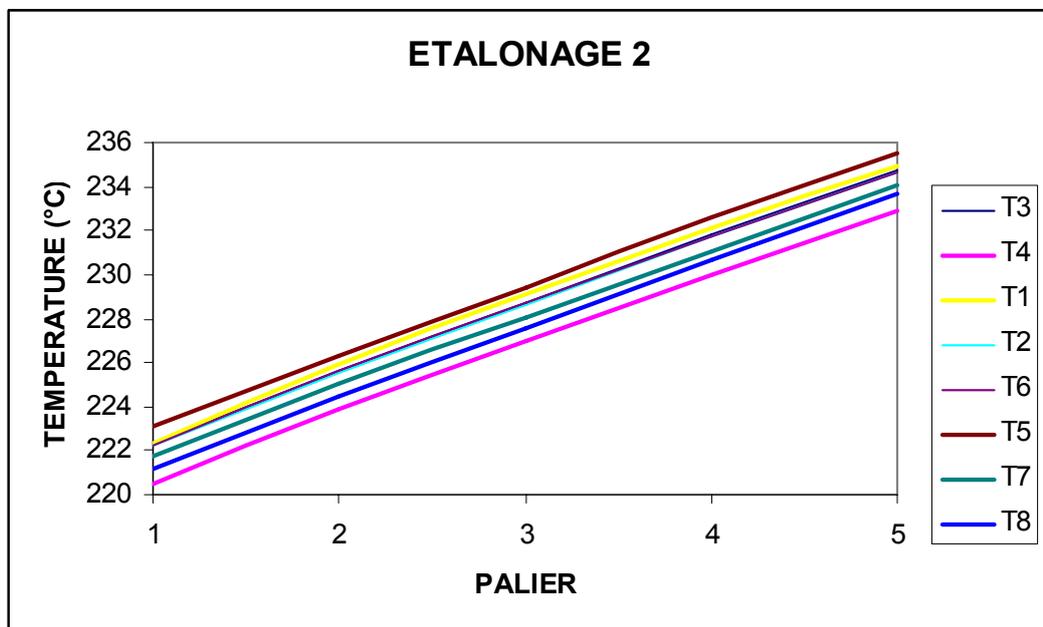


Figure 3.9. Courbes d'étalonnage des thermocouples

3.4.4.2. Analyse du sel $\text{NaNO}_3 - \text{KNO}_3$ ($T_m = 224 \text{ }^\circ\text{C}$)

Proportions $\text{NaNO}_3 = 54 \%$, $\text{KNO}_3 = 46 \%$

Température de changement de phase $T_m = 224 \text{ }^\circ\text{C}$

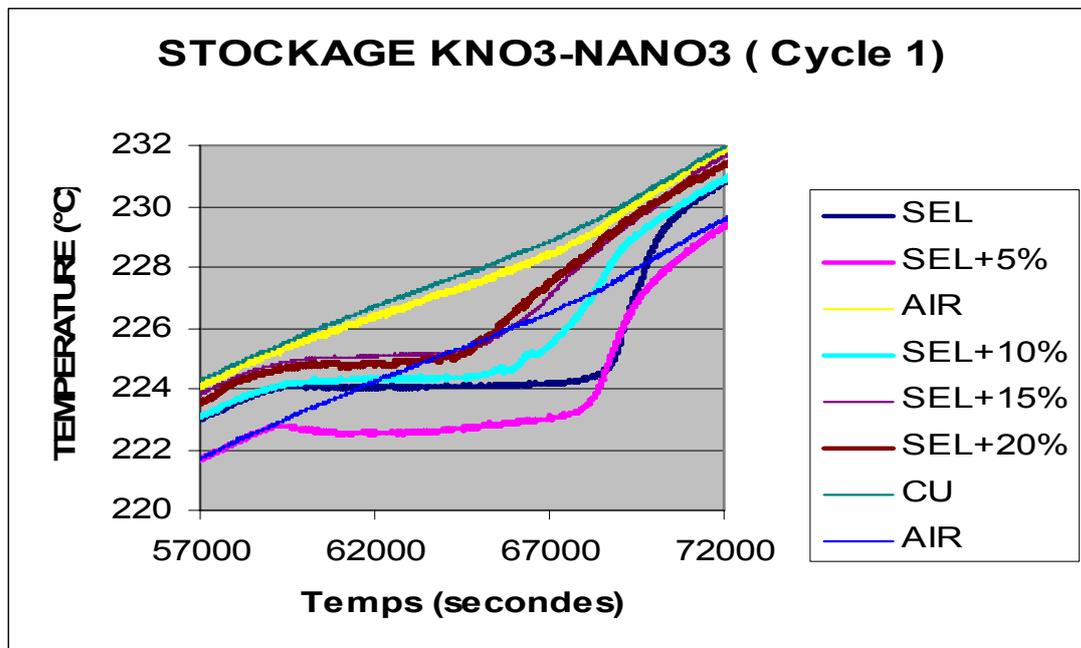
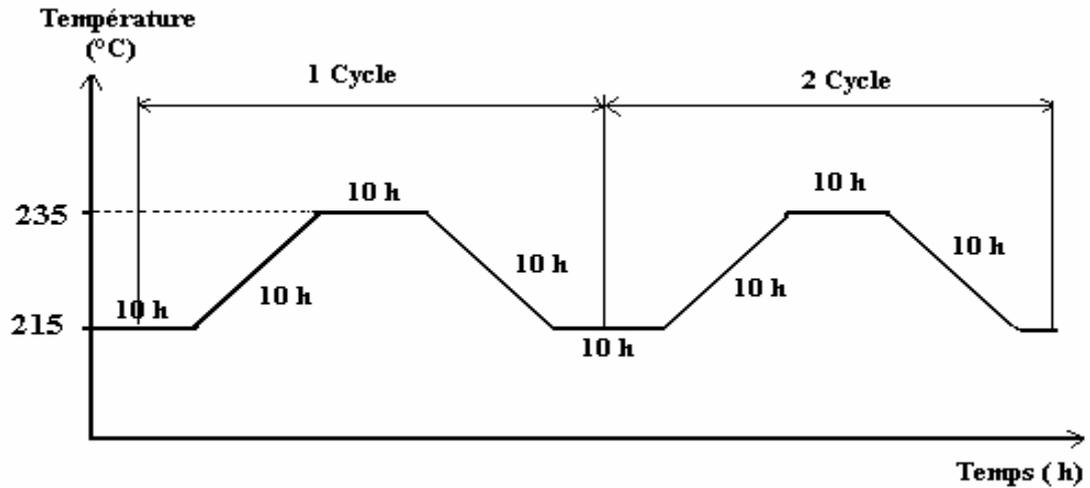
Tableau 3.2. Contenus des tubes

Voie	Nature du contenu	Masse du tube (g)	Masse du contenue (g)	% du Graphite (150 μm)	Hauteur D'échange (cm)
1	SEL	10.92	20.57	0%	7
2	SEL+SFG	10.53	13.91	5%	7.1
3	AIR	-	-	-	-
4	SEL+SFG	9.00	17.84	10%	7
5	SEL+SFG	9.29	16.02	15%	7.2
6	SEL+SFG	9.20	14.63	20%	6.8
7	CUIVRE	9.96	48.32	-	6.5
8	AIR	-	-	-	-

Diamètre des tubes varie de (1.52 – 1.54) cm

Conditions d'expérimentation

Durant l'expérimentation nous avons programmé le four pour deux cycles avec une vitesse de chauffage de 1°C/h et une période de 10h avec une température constante pour que le matériau de référence et MCP auront la même température .



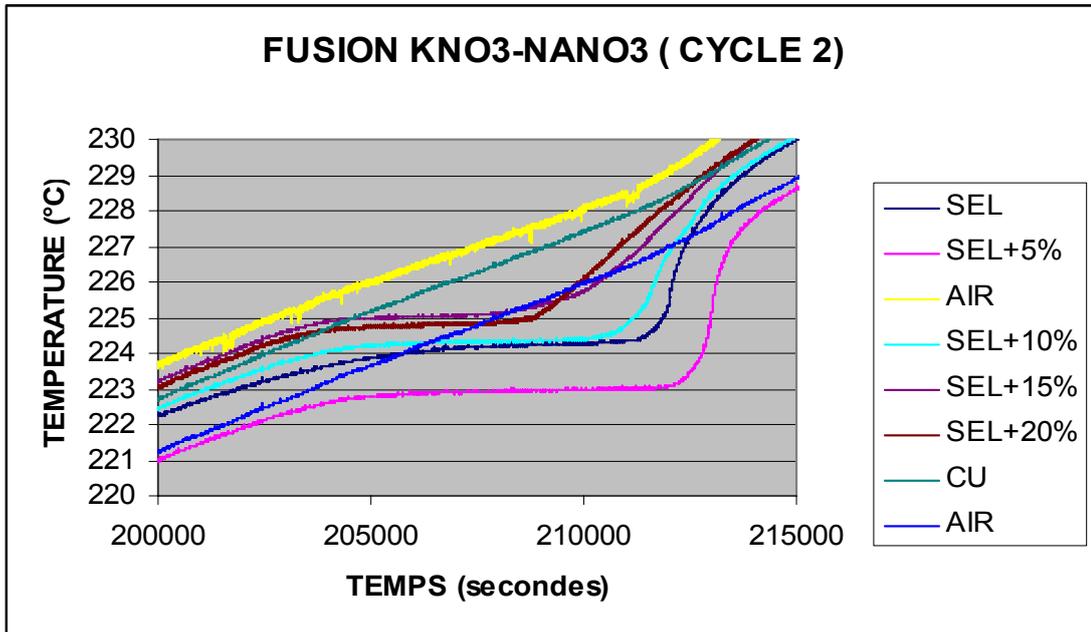


Figure 3.12. Courbes des températures durant le stockage (2eme cycle)

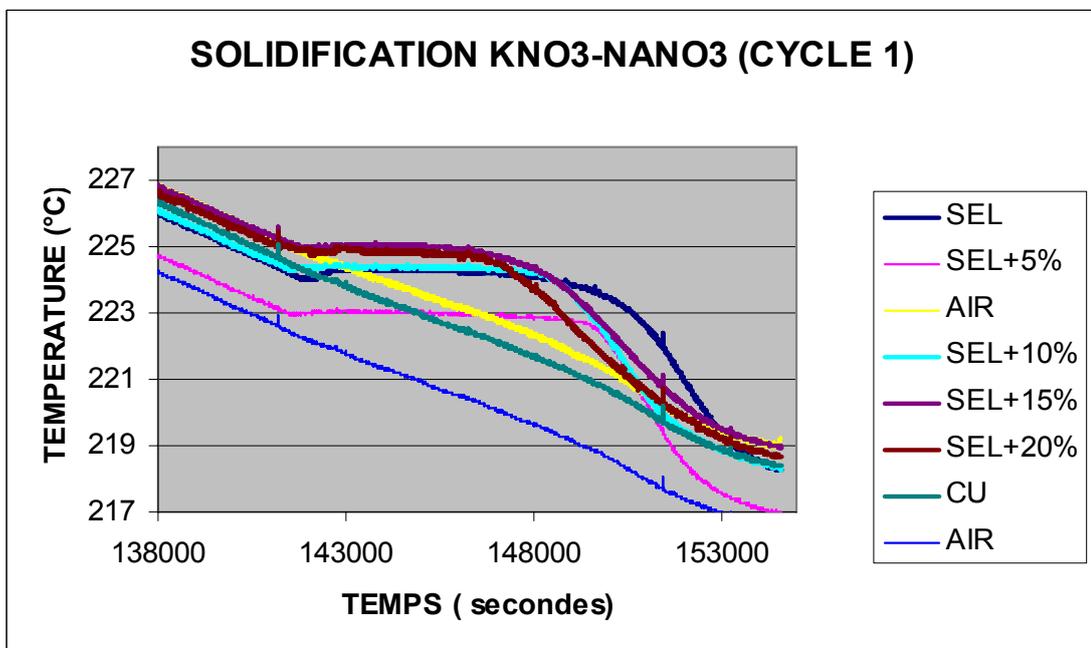


Figure 3.13. Courbes des températures durant la solidification (1^{er} cycle)

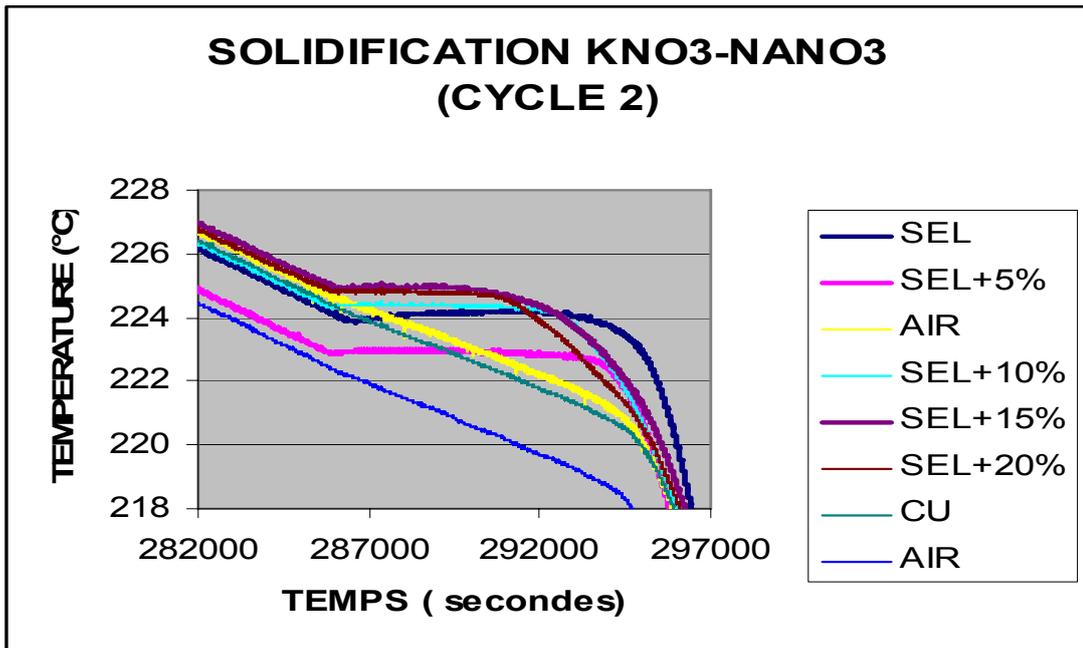


Figure 3.14. Courbes des températures durant la solidification (2eme cycle)

3.4.4.3. Etalonnage des thermocouples intervalle (294-310)

On a procédé de la même manière que le cas précédent et nous avons obtenus la courbe d'étalonnage suivante.

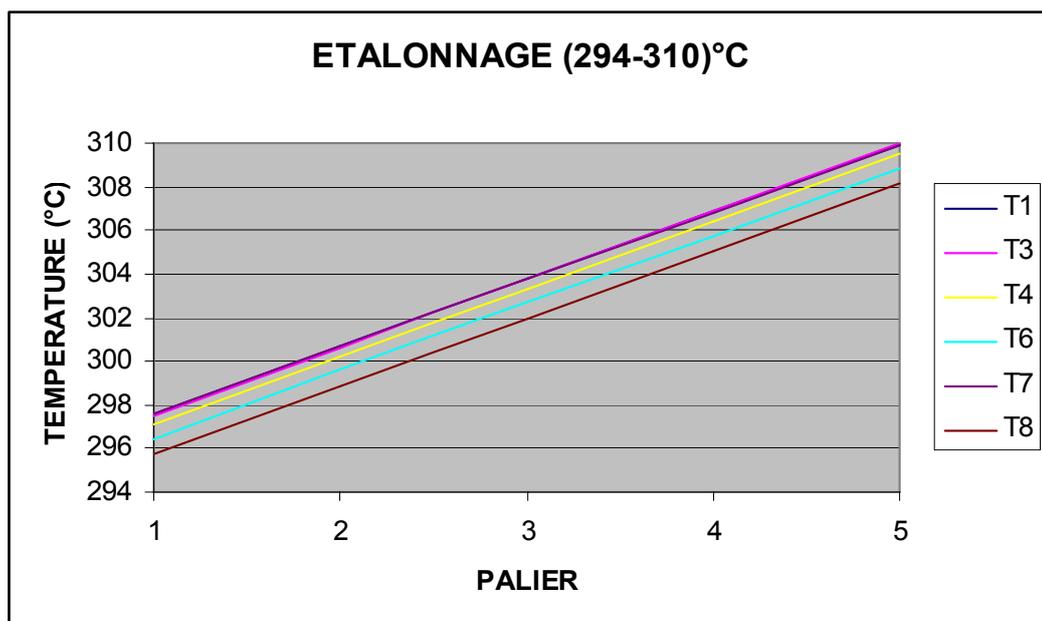


Figure 3.15. Etalonnage des thermocouples dans l'intervalle 290-310

3.4.4.4. Analyse du sel $\text{NaNO}_3 - \text{KNO}_3$ ($T_m=298^\circ\text{C}$)

Proportions $\text{NaNO}_3 = 95.4 \%$, $\text{KNO}_3 = 4.6 \%$

Température de changement de phase $T_m=298^\circ\text{C}$

Tableau 3.3. Données et contenus des tubes

VOIE	NATURE	MASSE DU TUBE (g)	MASSE DU SEL (g)	% GRAPHITE
1	Sel	8.89	14.52	0
3	Sel + Graphite	8.88	10	5%
4	Sel + Graphite	9.12	10	10%
6	Air			
7	Cu	8.88	28.6	

Conditions d'expérimentation

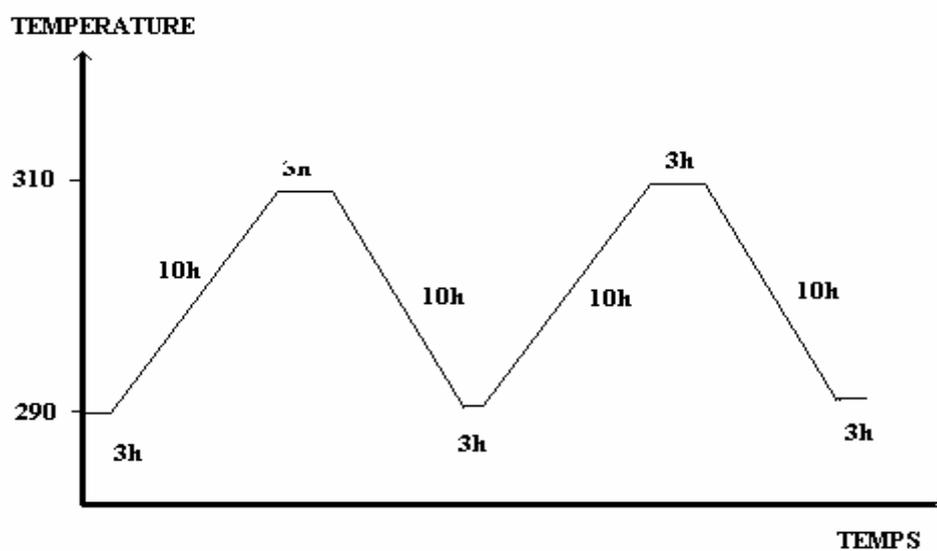


Figure 3.16. Conditions d'expérimentation

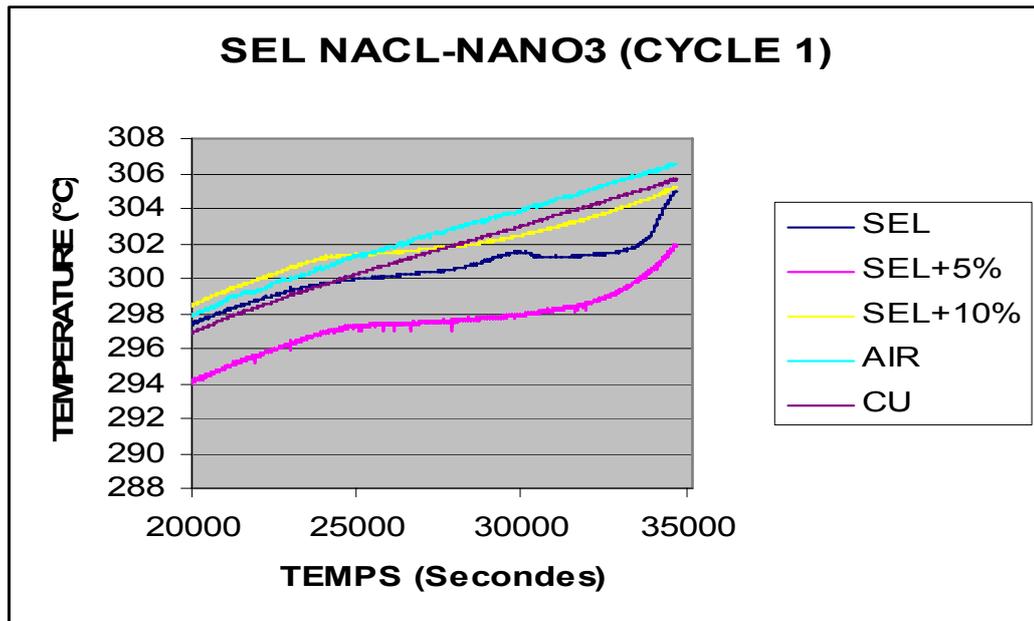


Figure 3.17. Courbes des températures durant la fusion

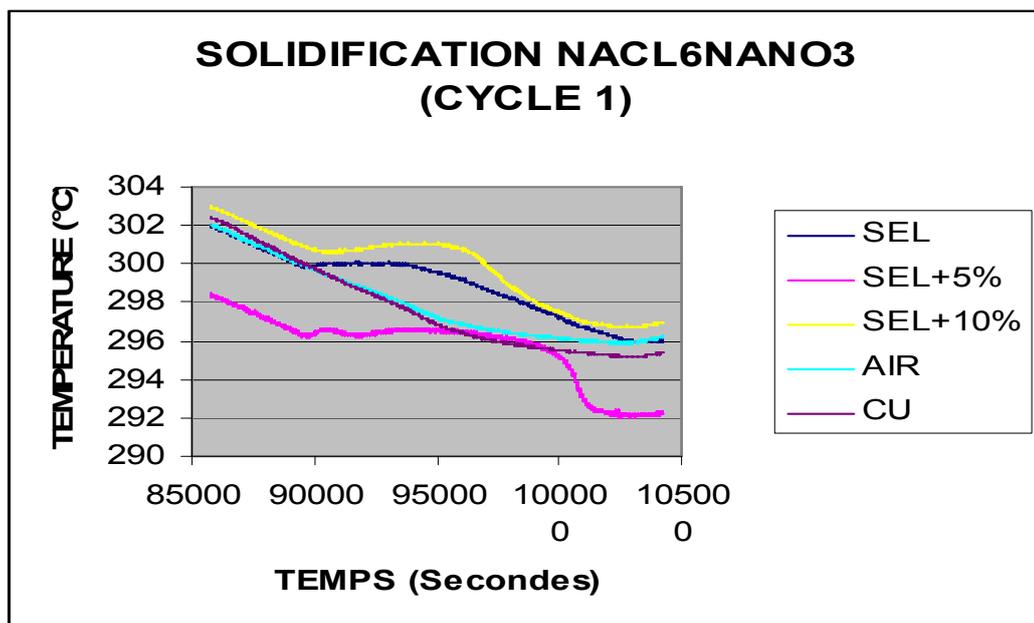


Figure 3.18. Courbes des températures durant la cristallisation

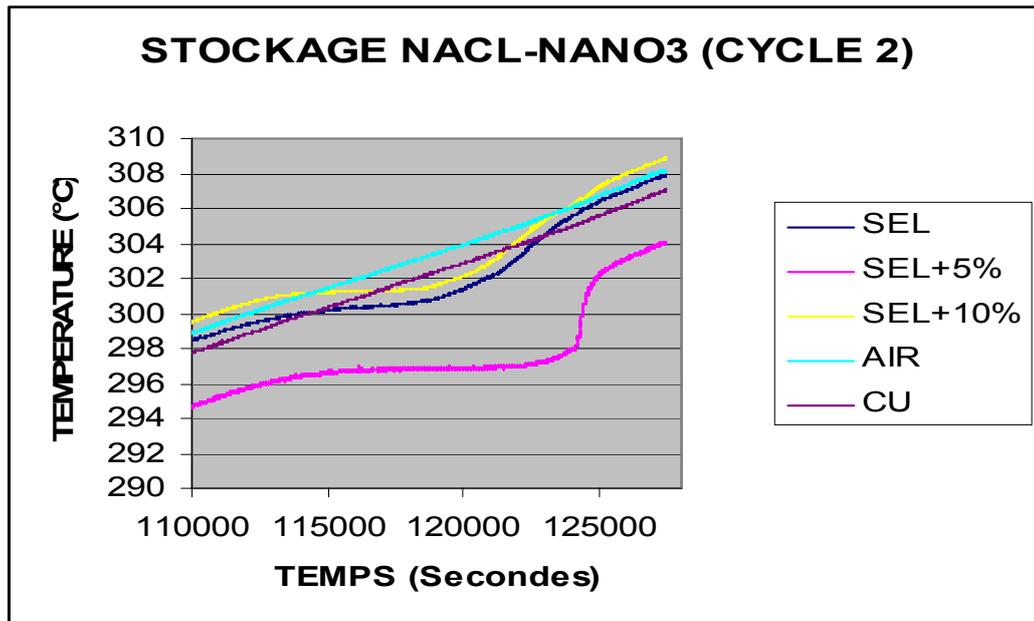


Figure 3.19. Courbes des températures durant la fusion

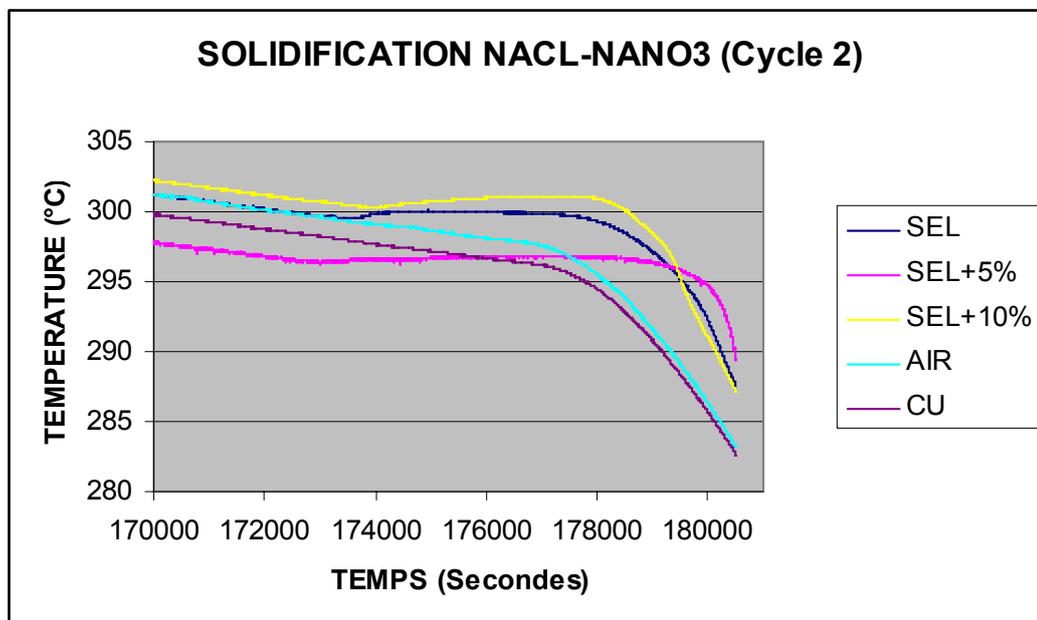


Figure 3.20. Courbes des températures durant la cristallisation

Nous remarquons que les courbes des températures des différents tubes sont conformes aux recommandations de la méthode *T-history*, mais malheureusement le traitement de ces courbes pour l'obtention des différentes caractéristiques donne des valeurs erronées. Ceci est du aux points suivants :

- 1/ La non connaissances des limites des différentes zones (liquide, changement d'état et solide)
- 2/ Les thermocouples doivent rester dans l'axe du tube, mais les différentes expériences et les hautes températures atteintes durant les manipulations provoquent les déplacements de ces thermocouples. Les différentes études ont montré que le changement de la position du thermocouple suivant la verticale n'influe pas sur le résultat par contre le changement suivant l'horizontale influe énormément sur les mesures.
- 3/ Les gaines des thermocouples utilisés n'ont pas résisté au delà de 300°C. Pour cela, les courbes obtenues ne sont pas conformes à la méthode.

3.5. Analyse par calorimétrie différentielle par balayage (DSC)

Parallèlement aux expérimentations par la méthode *T-history*, nous avons effectué des tests sur deux sels différents ayant une température de fusion aux environs de 500°C. Les analyses sont effectuées sur le microcalorimètre à balayage disponible au laboratoire TREFLE (TG-DSC-111). Il s'agit d'un calorimètre à compensation de puissance dit de balance nulle ou l'énergie absorbée ou dégagée par l'échantillon est compensée en ajoutant ou en soustrayant une quantité équivalente d'énergie électrique dans les élément chauffant localisé dans le four.

3.5.1. Analyse du sel NaCl – CaCl₂

Proportions NaCl = 48 %, CaCl₂ = 52 % (molaire)

Température de changement de phase T_m=498 °C

Tableau 3.4. Résultats obtenus du sel NaCl-CaCl₂ pour deux vitesses différentes

DATE : Le 23 juin 2006								
SEL : NaCl/CaCl₂								
	MASS E	VITESS E	T ouset	Tpeak	Toffset	Hm	Remarque	
	mg	°C/mn	°C	°C	°C	J/g		
	63,7	1	499,78	503,84	505,42	124,12	Fusion	
	63,7	1	491,14	490,68	489,87	121,01	Cristallisation	
	MASS E	VITESS E	T ouset	Tpeak	Toffset	Hm	Cycle	Remarque
	mg	°C/mn	°C	°C	°C	J/g		
	63,7	0,1	499,23	500,62	501,56	121,03	1	Fusion
	63,7	0,1	498,6	497,64	496,59	102,3	1	Cristallisation
	63,7	0,1	493,48	499,36	502,02	124,5	2	Fusion
	63,7	0,1	498,31	497,59	495,96	99,26	2	Cristallisation
	63,7	0,1	493,51	499,13	500,97	98,13	3	Fusion
	63,7	0,1	497,26	497	495,93	105,67	3	Cristallisation
	63,7	0,1	493,95	499,35	499,97	103,58	4	Fusion
	63,7	0,1	495,77	493,17	492,81	91,26	4	Cristallisation
	Masse	0,1065g						
	Masse initiale	0,1702g						
	Masse Finale	0,1738 g						

3.5.2. Analyse du sel $\text{Li}_2\text{CO}_3 - \text{Na}_2\text{CO}_3$

Proportions $\text{Li}_2\text{CO}_3 = 43 \%$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 57 \%$

Température de changement de phase $T_m = 497 \text{ }^\circ\text{C}$

Tableau 3.5. Résultats obtenus du sel $\text{Li}_2\text{CO}_3\text{-Na}_2\text{CO}_3$ pour deux vitesses différentes

DATE: 27 / 06 / 06									
$\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$									
	MASS E	VITESSE	T onset	Tpeak	Toffset	Hm Mesurée	Hm Reelle	Cycle	Remarque
	mg	°C/mn	°C	°C	°C	J/g	J/g		
	42	1	496,05	501,16	502,39	249,14	275,4	1	Fusion
	42	1	487,01	486,79	484,1	251,12	277,6	1	Cristallisation
	42	1	491,38	497,68	500	263,62	291,47	2	Fusion
	42	1	492,19	489,75	484,96	271,56	300,28	2	Cristallisation
	42	1	488,82	497,67	500	250,67	276,35	3	Fusion
	42	1	493	491,67	487,95	251,08	277,55	3	Cristallisation
	42	1	489,05	496,95	499	241,09	266,46	4	Fusion
	42	1	488,37	487,2	485,02	256,37	283,42	4	Cristallisation
	42	1	489,59	497,11	499,53	248,16	274,31	5	Fusion
	42	1	490,41	489,29	486,65	249,41	275,7	5	Cristallisation
	Masse	0,1235 g							
	Masse initiale	0,1666 g							
	Masse Finale								
	MASS E	VITESSE	T onset	Tpeak	Toffset	Hm Mesurée	HmReelle	Cycle	Remarque
	mg	°C/mn	°C	°C	°C	J/g	J/g		
	42	0,1	493	496,77	498,03	229,89	254,03	1	Fusion
	42	0,1	491,83	491,72	491,37	233,86	258,44	1	Cristallisation

D'après l'étalonnage de l'appareil on a la relation suivante :

$$H_m (\text{réelle}) = 1.11 \cdot H_m (\text{mesurée}) - 1.144$$

3.6. Conclusion

Ce travail consiste à adapter la méthode *T-history* pour la caractérisation des sels hydratés destinés pour le stockage à hautes températures. Cette technique nous permet de déterminer le plus grand nombre de caractéristiques thermo physiques de un ou plusieurs MCP simultanément.

Son utilisation pour la caractérisation de plusieurs produits à basse température (0 – 100°C) tels que l'acide laurique, l'acétate de sodium et la paraffine a donné des résultats satisfaisants avec une erreur de 4% par rapport aux propriétés trouvées dans la littérature.

Son adaptation à des matériaux qui ont des températures de fusion élevées pose des problèmes. Le dispositif expérimental proposé dans le cadre de ce travail, nous a permis au moins d'avoir les courbes d'évolution (MCP et référence) selon la technique *T-history* malgré les difficultés qu'on a rencontrées durant les expériences.

Le principal inconvénient de cette méthode vient du fait que les résultats des mesures de Cp_l , Cp_s et Hm dépendent de la bonne détermination des intervalles de temps qui définissent les surfaces A_1 , A_2 , A_3 , A_1 et A_2 . En plus pour notre cas, l'établissement de ces zones est très compliqué car le processus n'est pas visualisé.

CHAPITRE 4

Application des matériaux à changement de phase dans un système passif

La demande de l'électricité en Algérie croît à un taux annuel rapide de 7%, selon les rapports de la Société Nationale d'Electricité et du Gaz (SONELGAZ), soit près de 36 tétrawatt-heure en énergie et environ 6500 mégawatt en puissance [69]. En période de pointe, il arrive que la demande soit supérieure à l'offre en raison de l'utilisation massive de système de chauffage et de climatisation. La surconsommation d'électricité a souvent contraint la SONELGAZ à procéder à des délestages qui durent plusieurs heures afin de préserver le réseau et lui éviter une défaillance totale. Une meilleure gestion de la production d'électricité et un avantage significatif peuvent être réalisés si une partie de la charge maximale pouvait être décalée vers la période creuse. Ceci paraît effectivement possible grâce l'utilisation du stockage thermique.

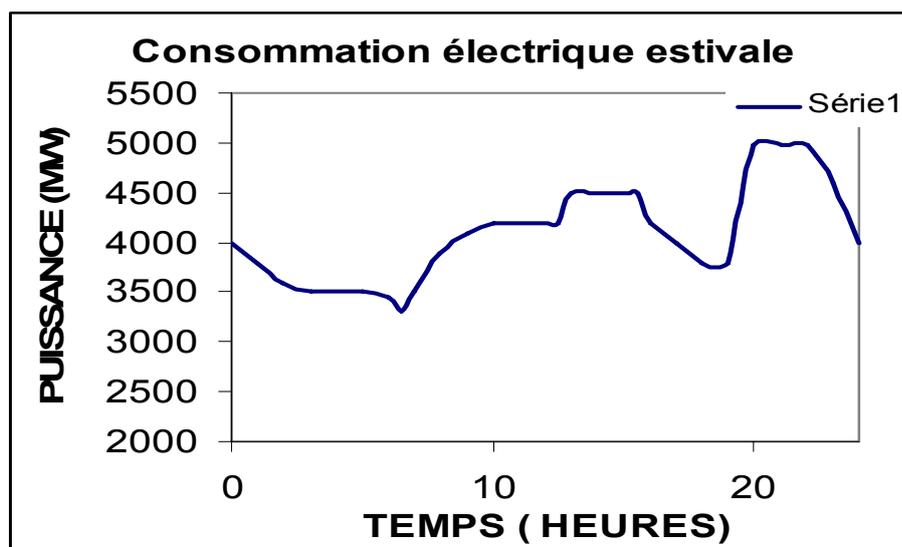


Figure 4.1 Consommation électrique journalière (Août 2005) [69]

Le bâtiment est considéré actuellement parmi les plus grands secteurs consommateurs d'énergie et responsables des émissions des gaz à effet de serre. Face aux changements climatiques qui en découlent, il est aujourd'hui impératif de prendre conscience de la nécessité de maîtriser la consommation énergétique liée à ce secteur. L'incorporation des matériaux à changement de phase dans l'enveloppe des bâtiments reste la solution la plus rapide et la moins coûteuse qui permet de diminuer la consommation d'énergie de chauffage/climatisation tout en assurant la qualité et le confort des occupants. Les murs, plafond et plancher offrent de grands secteurs pour le transfert thermique passif. Le wallboard de gypse ou plâtre contenant du MCP peut être installé dans les nouvelles constructions ou la réadaptation d'anciennes bâtisses.

4.1 Climat en Algérie

Étant donné la diversité des zones climatiques de l'Algérie, une subdivision du territoire en un certain nombre de zones plus ou moins homogènes s'avère nécessaire. En général, quatre zones sont proposées.

Dans le Tell, c'est-à-dire dans la zone côtière, le climat est tempéré, avec des températures particulièrement agréables pendant l'hiver, la neige étant très rare. Pendant l'été, la température n'est qu'exceptionnellement très élevée, restant en général dans une moyenne de 31 à 32 degrés centigrades pendant le jour. Mais sur toute la côte, il règne une humidité qui peut s'avérer gênante à la longue.

Le climat des Hauts Plateaux est beaucoup plus rude. Il y fait froid l'hiver et il y tombe parfois des quantités importantes de neige. En revanche, il y fait très chaud l'été, avec des températures diurnes plus élevées par rapport au Tell; mais des nuits plus fraîches en générales. De plus, l'air y est très sec, ce qui la chaleur plus facilement supportable.

Dans l'Atlas, le climat est le climat commun des pays de montagnes. L'hiver, les sommets sont couverts d'une épaisse couche de neige, sauf qu'on n'y trouve ni glaciers ni neiges éternelles. En été, la température y est très agréable avec des

nuits toujours très fraîches.

Enfin, dans le Sahara, on trouve des températures extrêmes. Pendant l'hiver, les nuits sont froides et il y gèle fréquemment, avec des températures atteignant facilement (- 6) ou (- 8) degrés centigrades, alors qu'au plein soleil de midi, ces mêmes températures montent aux environs de + 25 °C. L'écart entre la température minimum a nuit et la température maximum du jour atteint et dépasse parfois 30°C. En été, ces écarts restent importants avec des exemples concrets de températures diurne de + 54°C à l'ombre et nocturne de + 30°C au même endroit.

Un phénomène assez fréquent qui contribue à élever la température de façon excessive est connu sous le nom de " siroco ". Il s'agit d'un vent violent venant du Sud. Il est particulièrement chaud, sec et chargé de particules de sable qui pénètrent partout.

4.2. Situation de l'habitat en Algérie

L'Algérie pays en voie de développement, malheureusement se trouve depuis les années 80 sous la pression de la forte demande d'habitat. Pour palier à ce problème, l'état a mis en place de grands programmes de réalisation de logements (le programme 2005-2009 prévoit la réalisation de 1 million de logements). Malheureusement les choix du type de constructions et des matériaux ne prennent pas en compte les spécificités climatiques des différentes régions. La négligence de ce paramètre engendre d'une part des désagréments aux occupants et nécessite des dépenses excessives de chauffage et de climatisation d'autre part, entraînant une surconsommation d'énergie électrique.

4.3 Modélisation

4.3.1 Habitat de référence

L'habitat que nous proposons de modéliser est une maison de référence d'une superficie de 60 m² et d'une hauteur de 2.9 m. c'est le type de maisons individuelles

le plus répandu en Algérie. Les murs sont composés d'une couche de 2.5 cm d'enduit ciment, 20 cm de briques creuses et un wallboards de 8 cm d'épaisseur.

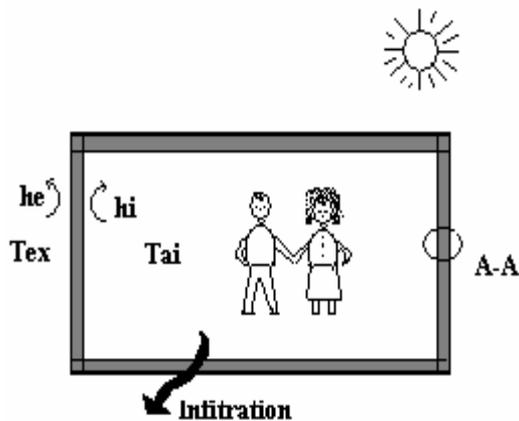


Figure 4.2 Différents échanges thermiques dans la maison

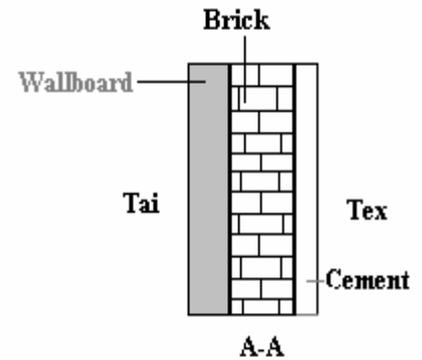


Figure 4.3. Composition du mur

Le wallboard utilisé est constitué d'un mélange de gypse et des granules contenant du matériau à changement de phase (paraffine) dont la température de fusion est de 26°C. Le gypse est un support idéal parce que 40 % de son volume est de l'air. Le MCP utilisé est un granulé à 35% de paraffine de diamètre 1-3 mm produit par la compagnie Rubitherm [71] ; ses caractéristiques sont données dans le tableau 4.1 [20].

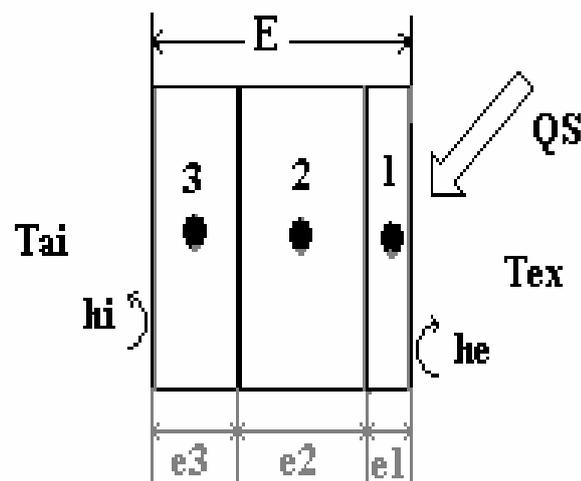


Figure 4.4. Différents noeuds

4.3.2. Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier la modélisation de l'habitat et de son comportement thermique, les hypothèses suivantes sont faites :

- H1 - Le matériau de changement de phase et la matrice de plâtre sont supposés
Composer un seul corps avec des propriétés thermo physiques homogènes.
- H2 - Le transfert de chaleur à travers les murs est supposé unidirectionnel, ceux-ci sont subdivisés en trois couches à températures uniformes (3 nœuds : 1 correspondant à l'enduit ciment, 2 au wallboard et 3 au mur de briques externe)
- H3 - La température de l'air à l'intérieur de la maison est uniforme (mono zone)
- H4 - Toutes les propriétés thermo physiques sont maintenues constantes sauf pour la chaleur spécifique du wallboard gypse /MCP

La méthode de la capacité de chaleur apparente (C_{pa}) ou effective est décrite par plusieurs travaux de Farid [4]. Dans cette méthode est supposé que la fusion et la solidification s'effectue dans un intervalle de température de 2°C à 4°C qui représente la situation réelle de plusieurs MCP commercialisés est valable aussi pour des matériaux qui ont un intervalle étroit. Farid [4] a supposé qu'une simple fonction delta Δ peut être utilisée pour décrire la variation du C_{pa} à l'intérieur de la région du changement d'état. L'aire du triangle représente la chaleur latente de fusion du MCP. Les triangles asymétriques et la représentation carré sont aussi utilisés (voir figure 4.5)

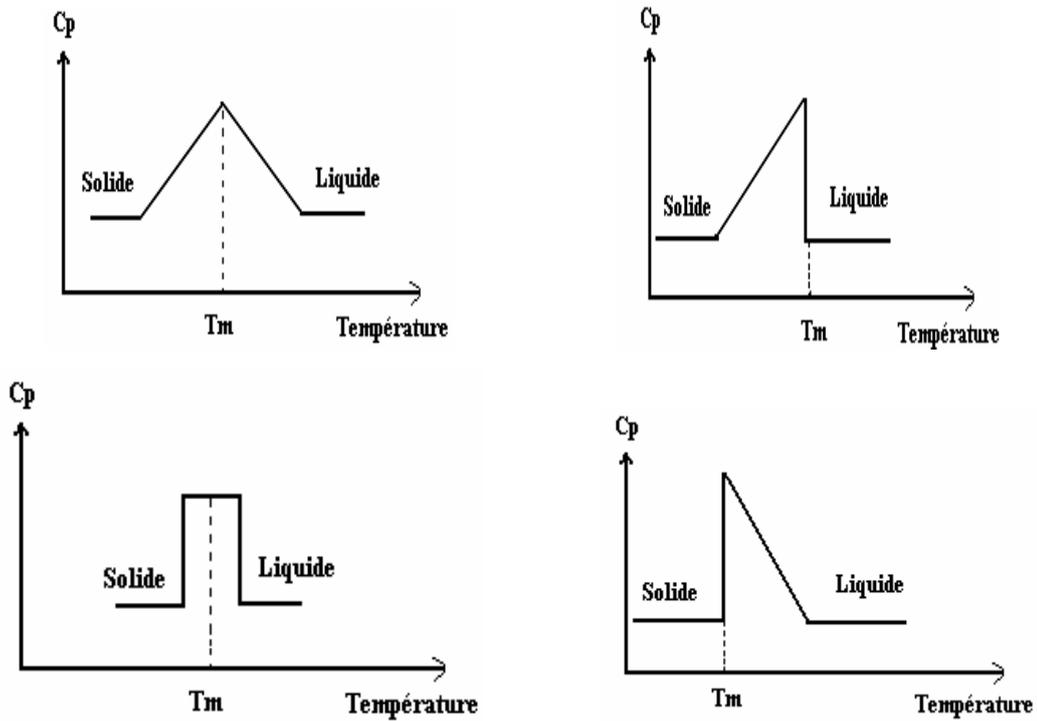


Figure 4.5. Fonctions de la chaleur apparente proposées dans la littérature [4]

La capacité de chaleur apparente du wallboard gypse/MCP utilisé e dans cette étude a été déduite par des mesures de DSC [20] et [21].

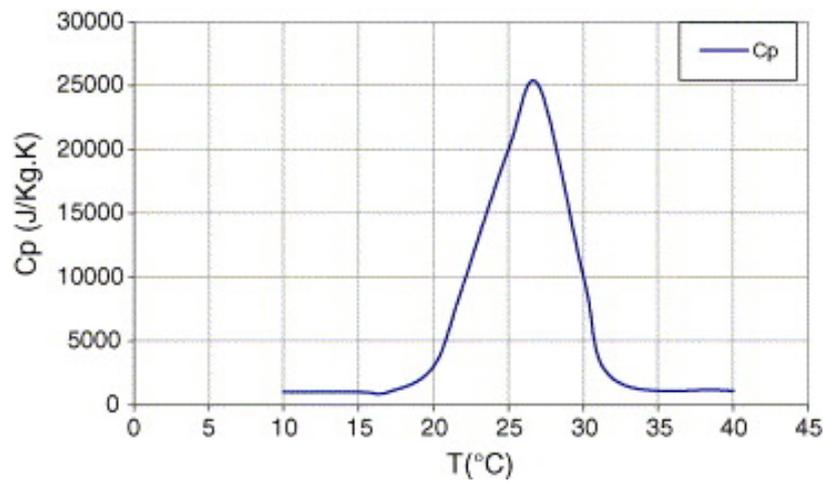


Figure 4.6. Chaleur apparente du MCP/gypse utilisé dans le modèle

Les bilans thermiques au niveau des 3 nœuds considérés dans les murs et de l'air intérieur peuvent être exprimés comme suit :

a/ Bilan thermique au niveau du ciment

$$\rho_C \cdot e_1 \cdot C_{p,C} \cdot \frac{\partial T_C}{\partial t} = \frac{k_C}{e_1} (T_B - T_C) + h_{ex} (T_{ex} - T_C) + Q_{S_{ex}} \quad (4.1)$$

b/ Bilan thermique au niveau de la brique

$$\rho_B \cdot e_2 \cdot C_{p,B} \cdot \frac{\partial T_B}{\partial t} = \frac{2 \cdot k_B}{e_2} (T_C - T_B) + \frac{2 \cdot k_B}{e_2} (T_{wal} - T_B) \quad (4.2)$$

c/ Bilan thermique au niveau du wallboard

$$\rho_{wal} \cdot e_3 \cdot C_{p,wal} \cdot \frac{\partial T_{wal}}{\partial t} = \frac{k_{wal}}{e_3} (T_B - T_{wal}) + h_{in} (T_{ai} - T_{wal}) \quad (4.3)$$

d/ Bilan thermique au niveau de l'air intérieur

$$\rho_{ai} \cdot V \cdot C_{p,ai} \cdot \frac{\partial T_{ai}}{\partial t} = h_{in} \cdot A_{wal} (T_{wal} - T_{ai}) + 0.34 h_{inf} (T_{ex} - T_{ai}) + Q_{APP} + Q_{S_i} \quad (4.4)$$

Avec h_{inf} donnée par l'expression suivante :

$$h_{inf} = 2 \cdot V \cdot n_{50} \cdot e_i \cdot \varepsilon_i \quad (4.5)$$

Et où n_{50} est le taux horaire de renouvellement d'air (h^{-1}), e_i classe d'exposition au vent et ε_i est un coefficient qui tient compte de la hauteur du local.

4.4. Résultats et interprétations

Les propriétés thermiques des composants du mur de maçonnerie employées comme données d'entrées dans les simulations sont présentées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1. Caractéristiques thermo physiques des composants du bâtiment

	ρ (kg/m ³)	Cp (kJ/kg°K)	k (W/m°K)
Gypse	900	900	0.34
Gypse + MCP	900		0.306
Brique	2400	1000	0.79
Ciment	977	837	1.75
Air	1.2	1000	0.024

4.4.1. Méthode de résolution et validation du modèle

Pour la résolution numérique des équations différentielles obtenues à partir des bilans thermiques des nœuds, on a utilisé le schéma explicite des différences finies. Pour valider notre modèle, nous avons introduit dans notre modèle les caractéristiques du prototype réalisé par Darkwa [40] et nous avons comparé nos résultats.

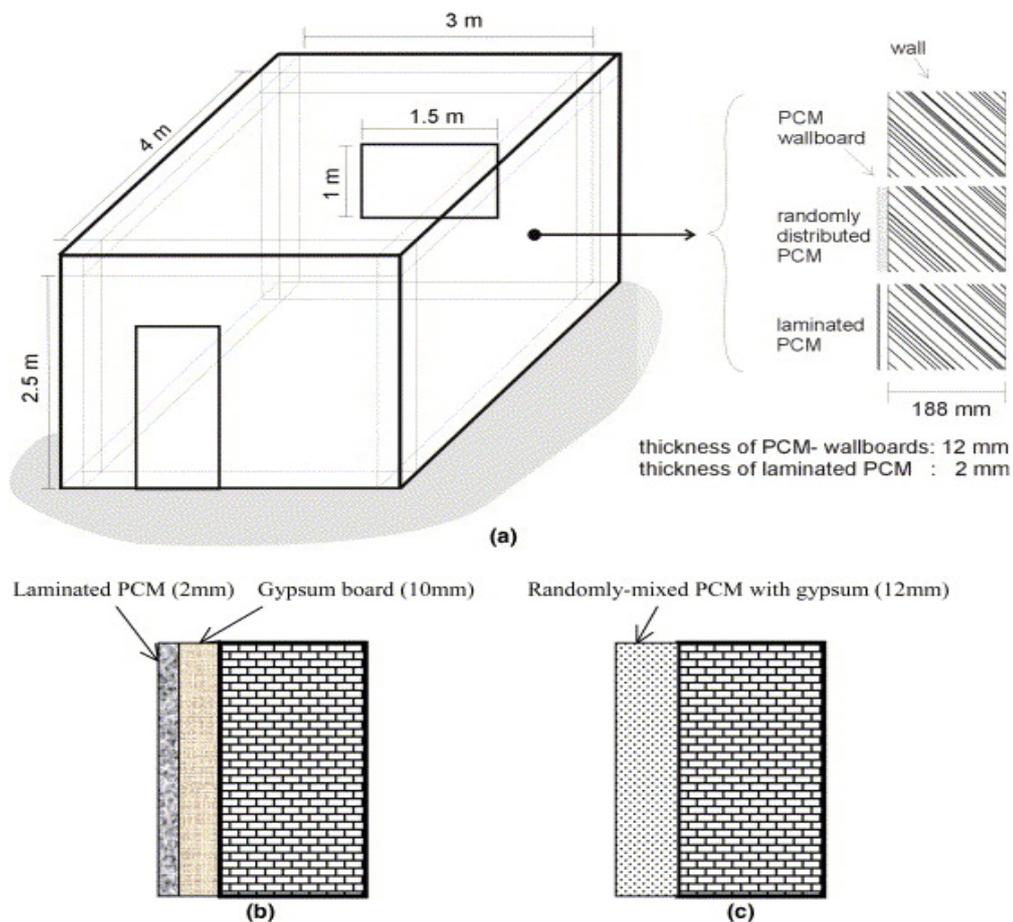


Figure 4.7. Prototype réalisé par Darkwa [40].

La figure 4.7 montre le schéma de la salle de test réalisé par Darkwa[40]. Sa surface est de $3\text{ m} \times 4\text{ m}$ et de 2.5 m de hauteur. La fenêtre mesure $1.5\text{ m} \times 1\text{ m}$ face à des sud. Les murs sont de construction légère avec les surfaces intérieures garnies de 12 millimètres de wallboard épais de MCP. Les deux échantillons de cloison sèche contiennent la même quantité (16.7% masse) de MCP. L'échantillon stratifié se compose de 2 millimètres et de 10 millimètres séparant des couches de

MCP et de gypse respectivement tandis que le type mélangé d'une façon aléatoire se compose d'une couche de MCP et de gypse mélangés ensemble.

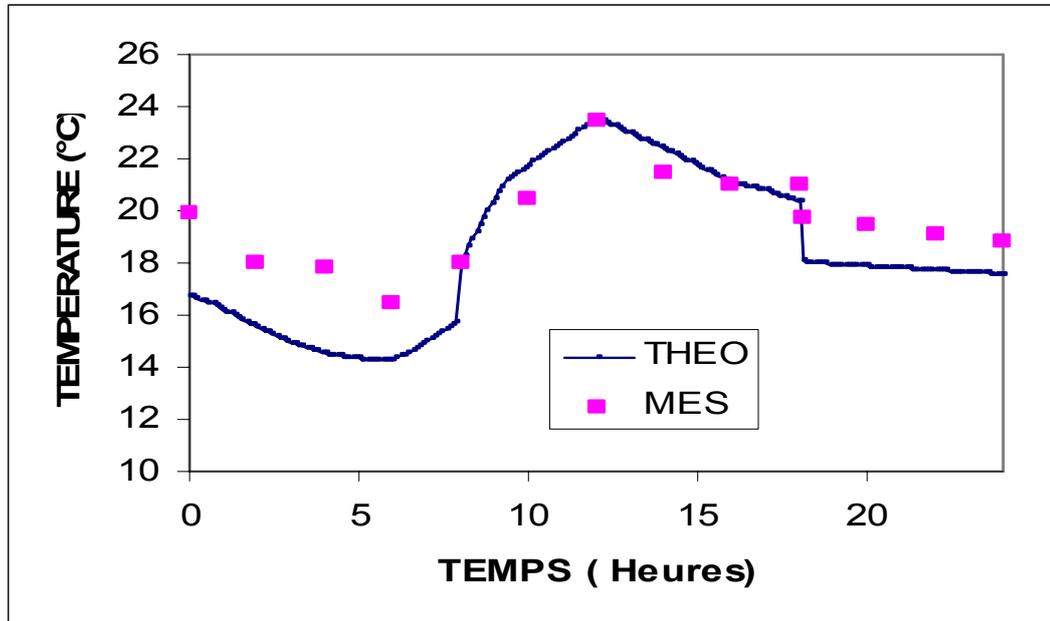


Figure 4.8. Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux

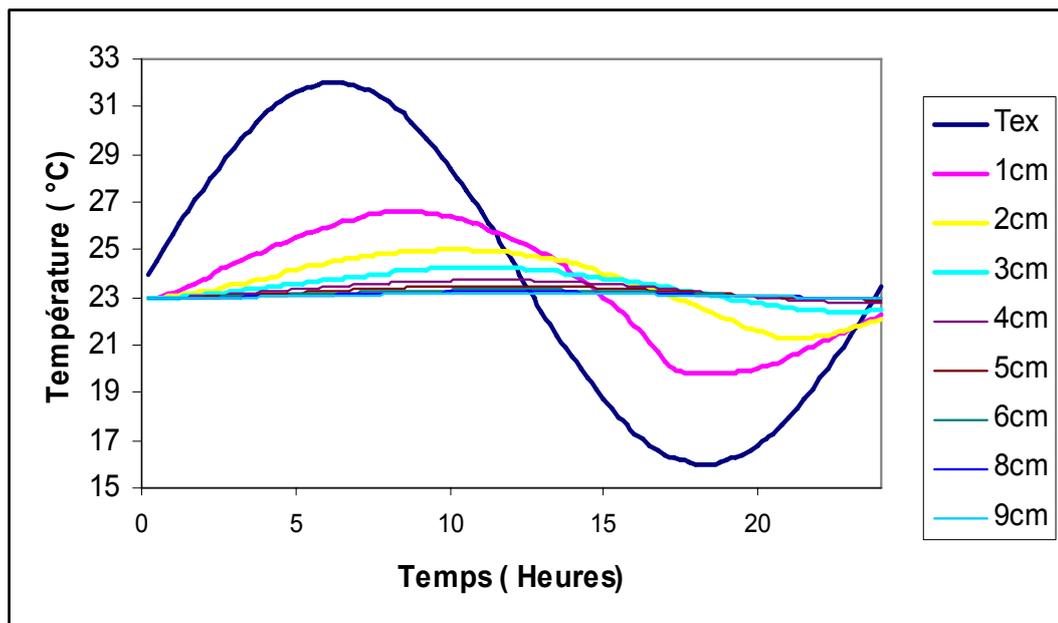


Figure 4.9. Variation des épaisseurs du wallboard.

Sur la figure 4.8. nous avons comparé les résultats théoriques avec les mesures obtenus sur la cellule de test. Nous remarquons que les allures sont les mêmes et les écarts observés durant la nuit (de 0h jusqu'à 8h du matin et de 18h jusqu'à minuit) sont due à la sous estimation des échange par infiltrations d'une part et de la faible valeur de l'inertie thermique introduit dans le programme.

On a aussi validé notre modèle en variant l'épaisseur du wallboard de 1 cm jusqu'à 8 cm. Nous constatons sur la figure 4.9. qu'à partir de 8 cm la température reste constante durant toute la période de simulation malgré que la température extérieure varie sinusoïdalement avec une valeur maximale de 36°C et 16 °C de valeur minimale. Ce résultat confirme les conclusions de Neeper [35]. Un wallboard de 8 cm d'épaisseur maintient une température constante à l'intérieur de la maison

4.4.2. Simulation Thermique

Pour voir l'impact de wallboard avec matériaux a changement de phase sur le confort thermique, nous avons simulé la maison de référence dans des conditions extérieures semblables à certaines régions du pays (régions sahariennes et les hauts plateaux) pour les périodes hivernales et estivales.

Les résultats obtenus pour 5 jours de simulation sont présentés sur les figures 4.10. et 4.11. On a supposé que la température extérieure change avec un modèle sinusoïdal avec une température maximale de 36°C et 12°C de température minimale.

On observe que la présence des granules de MCP dans le wallboard permet l'atténuation de l'amplitude des oscillations de la température intérieure et qu'elle reste presque constante (20°C). Par contre, le wallboard de gypse seul de même épaisseur provoque une faible diminution des amplitudes des oscillations de la température de l'air intérieure. Le déphasage des pics des températures extérieures et intérieures est de 2h et que la valeur maximale de la température interne est de 25°C.

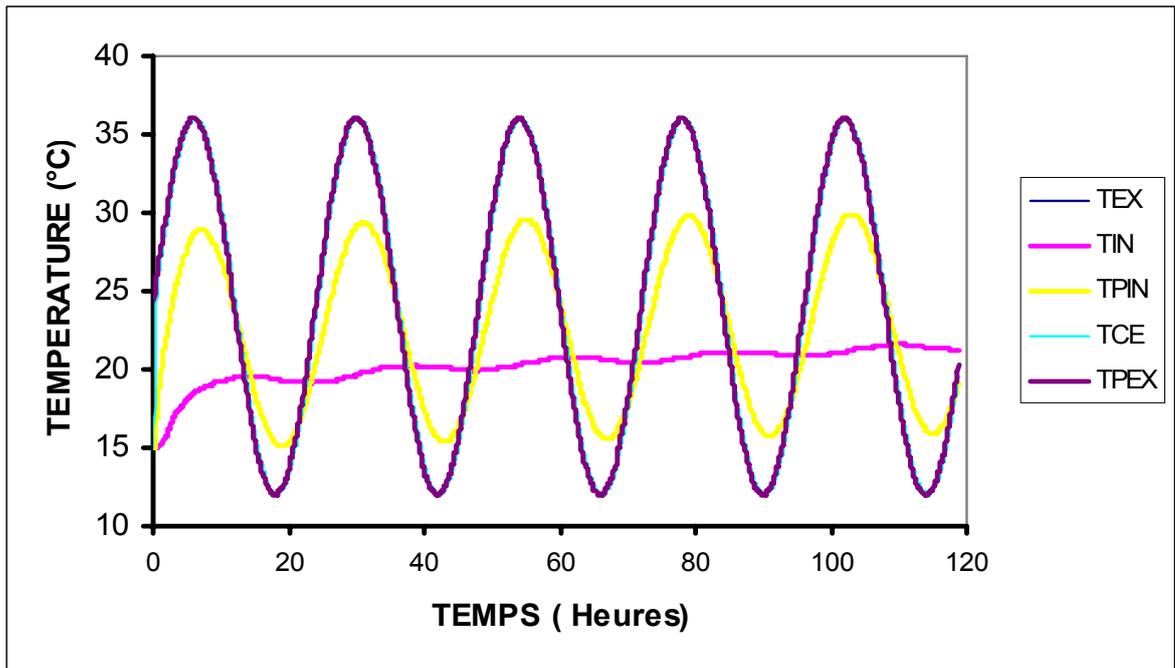


Figure 4.10. Evolution des températures des différents nœuds pour 5 jours de simulations (wallboard avec MCP)

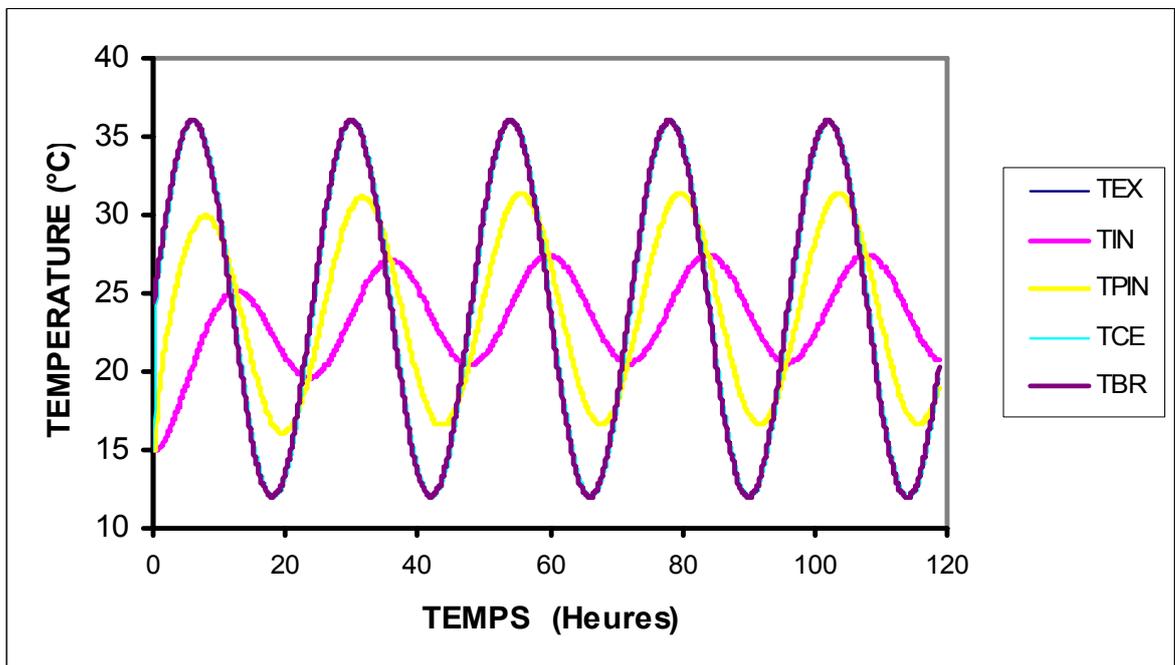


Figure 4.11. Evolution des températures des différents nœuds pour 5 jours de simulations (wallboard sans MCP)

Cas de climatisation

Les conditions de simulations sont :

- Température extérieure égale à 40 °C durant toute la période de simulation (24 heures)
- Nombre de personnes incluses dans la simulation est de 6 (moyenne nationale)
- Le système de climatisation fonctionne pendant 6 heures durant les heures creuses et à l'arrêt pour le temps restant de la simulation.
- Les apports solaires qui pénètrent dans la maison sont négligés
-

La simulation est faite pour trois types de maisons

- Maison avec Wallboard Gypse /MCP
- Maison avec wallbord Gypse
- Maison avec une épaisseur de 2cm de plâtre à la place du wallboard.
-

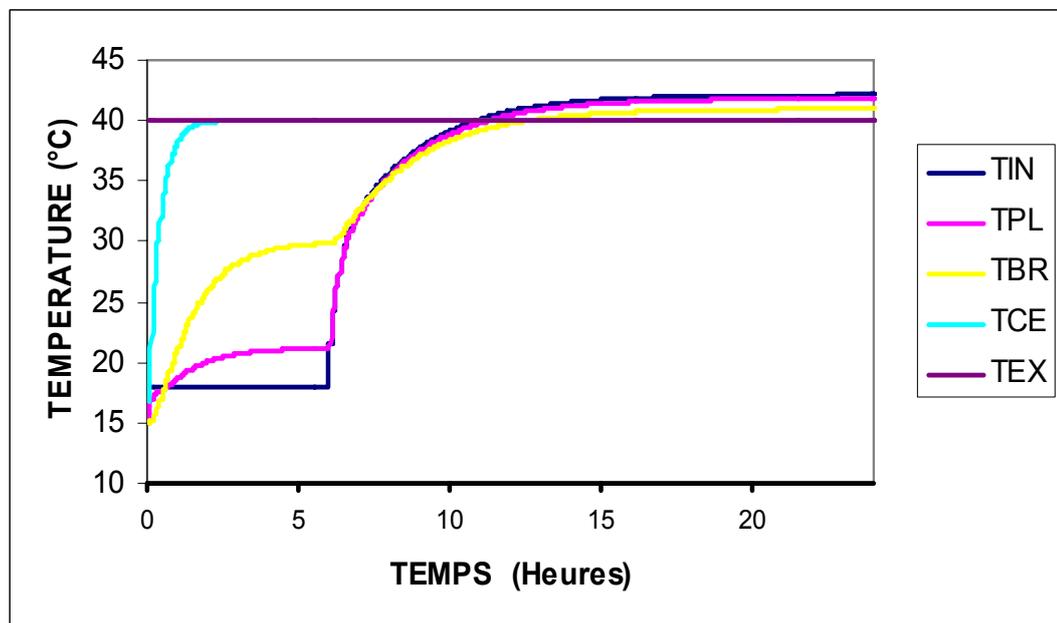


Figure 4.12. Profils des températures pour une maison sans wallboard.

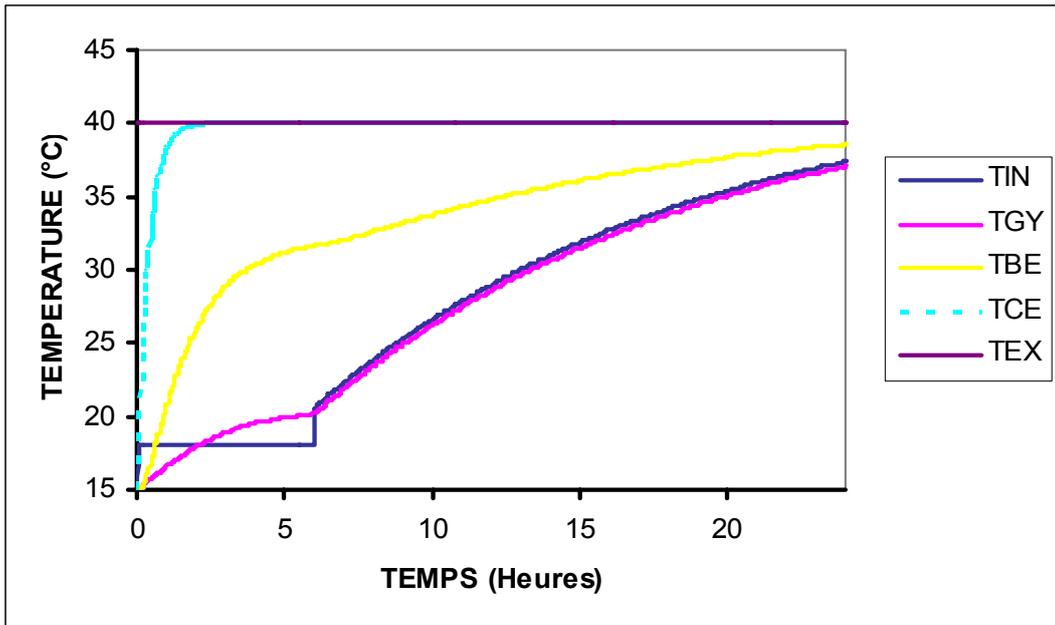


Figure 4.13. Profils des températures pour une maison avec wallboard sans MCP

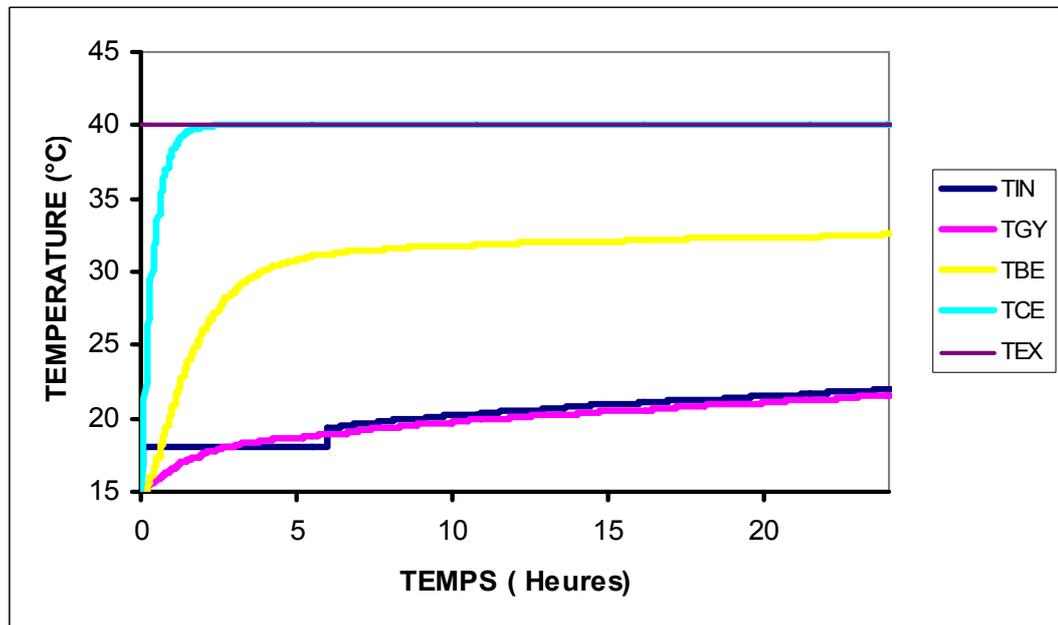


Figure 4.14. Profils des températures pour une maison avec wallboard / MCP

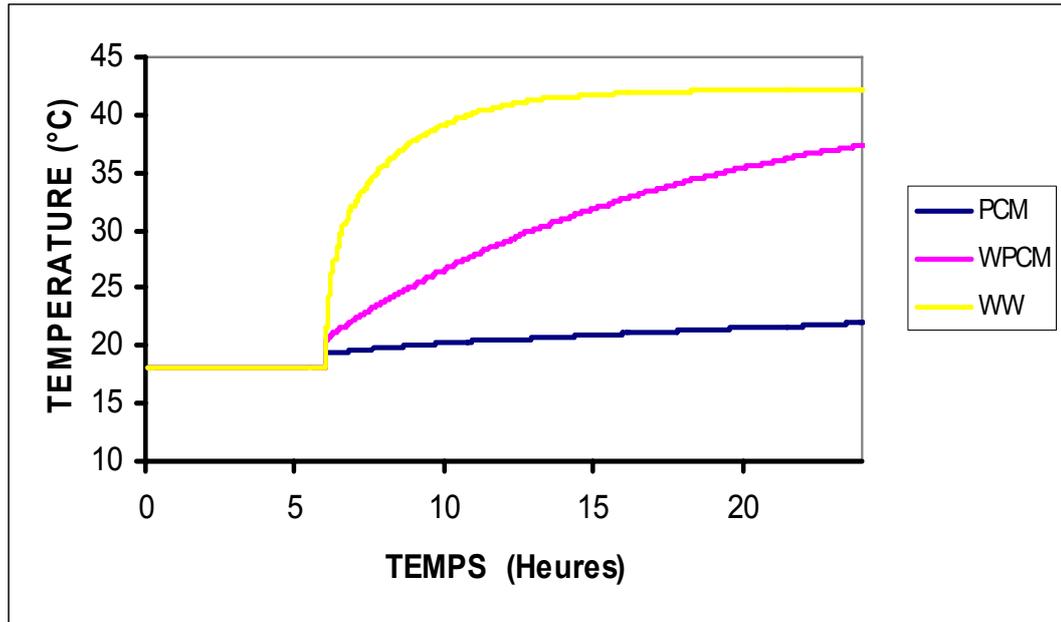


Figure 4.15. Comparaison des températures internes

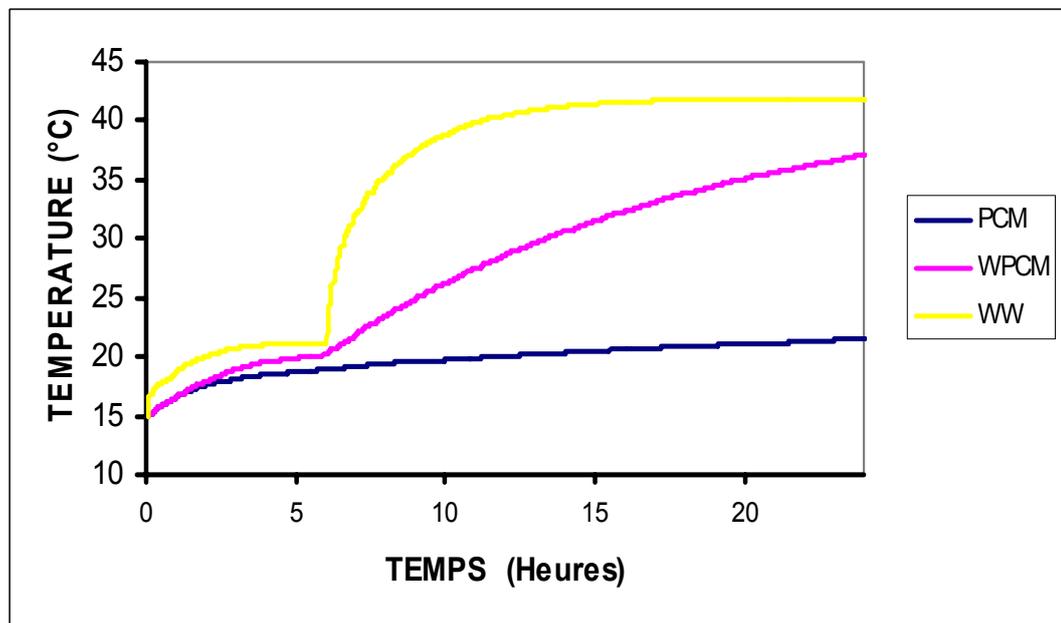


Figure 4.16. Comparaison des températures des parois internes

Les figures 4.12, 4.13. et 4.14. représentent les évolutions des températures des différents nœuds pendant 24 h de simulation. Nous constatons qu'après l'arrêt du système de climatisation, les températures de la maison sans wallboard augmentent rapidement après seulement quelques heures et dépasse la température extérieure. Cette augmentation rapide est due à son inertie thermique, mauvaise isolation thermique de la maison et la contribution des apports humains.

Pour la maison avec wallboard de gypse, nous remarquons que les températures croient moins rapidement que le premier cas. La présence du wallboard avec gypse a amélioré sensiblement l'isolation thermique.

Pour la maison avec wallboard avec gypse/MCP, nous constatons que, les températures de la paroi interne et de l'air intérieur augmentent lentement pendant toute la durée de simulation.

La comparaison des températures des parois internes et de l'air intérieur des figures 4.15 et 4.16, montrent que la présence des MCP augmente considérablement l'inertie thermique et améliore l'isolation thermique de la maison et que la température de l'air intérieur reste dans la zone du confort au environ de 23 °C.

2/ Cas de chauffage

Pour le cas de chauffage, on considère que la température extérieure reste constante à 5°C et que le système de chauffage fonctionne pendant 6 heures avant d'être arrêté. La température durant le chauffage est considérée comme constante et égale à 26°C. Pour ce cas, les apports internes sont négligés. La durée de simulation est de 48 h.

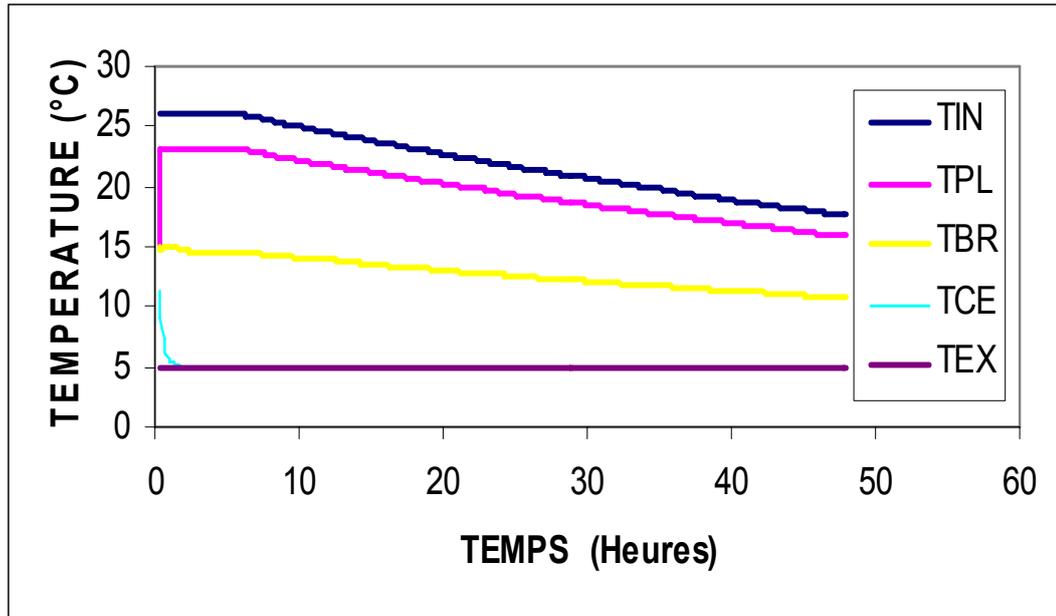


Figure 4.17. Profils de température durant le chauffage (maison sans wallboard)

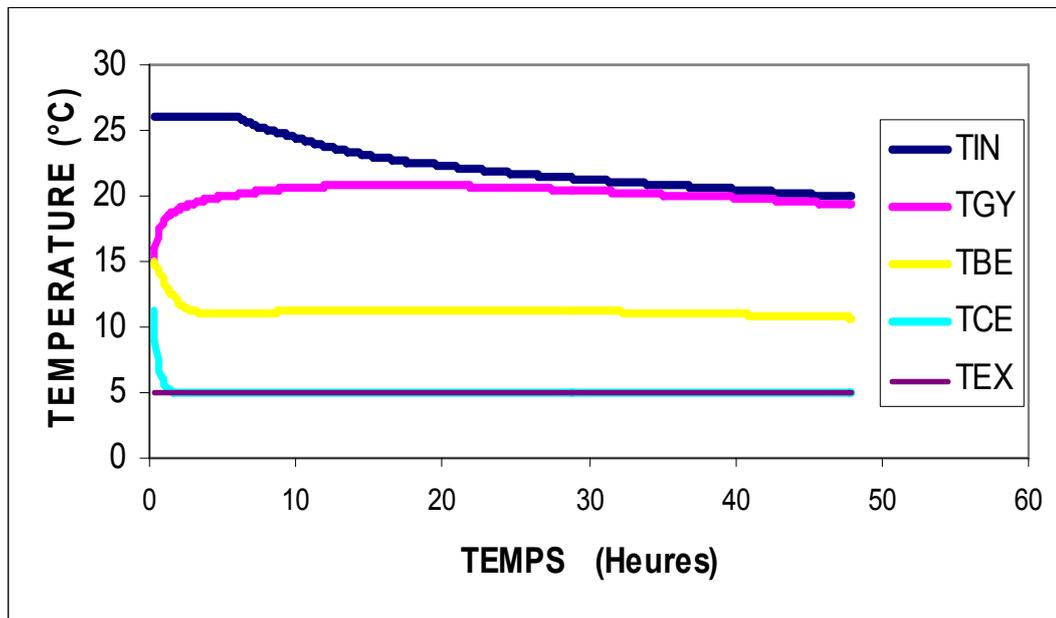


Figure 4.18. Profils de température durant le chauffage (maison avec PCM)

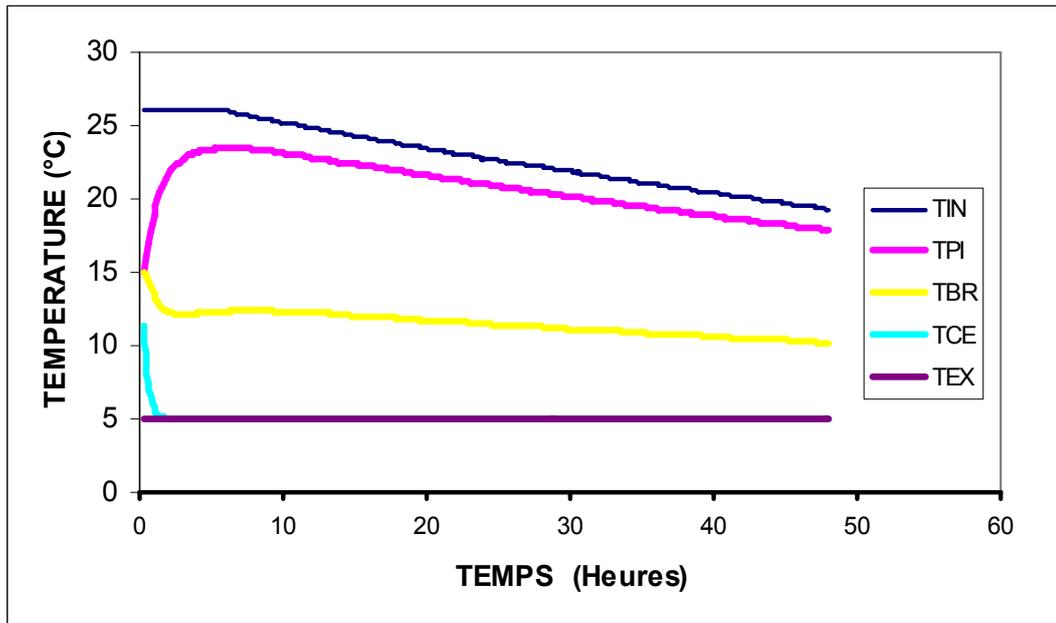


Figure 4.19. Profils de températures durant le chauffage (wallboard sans MCP)

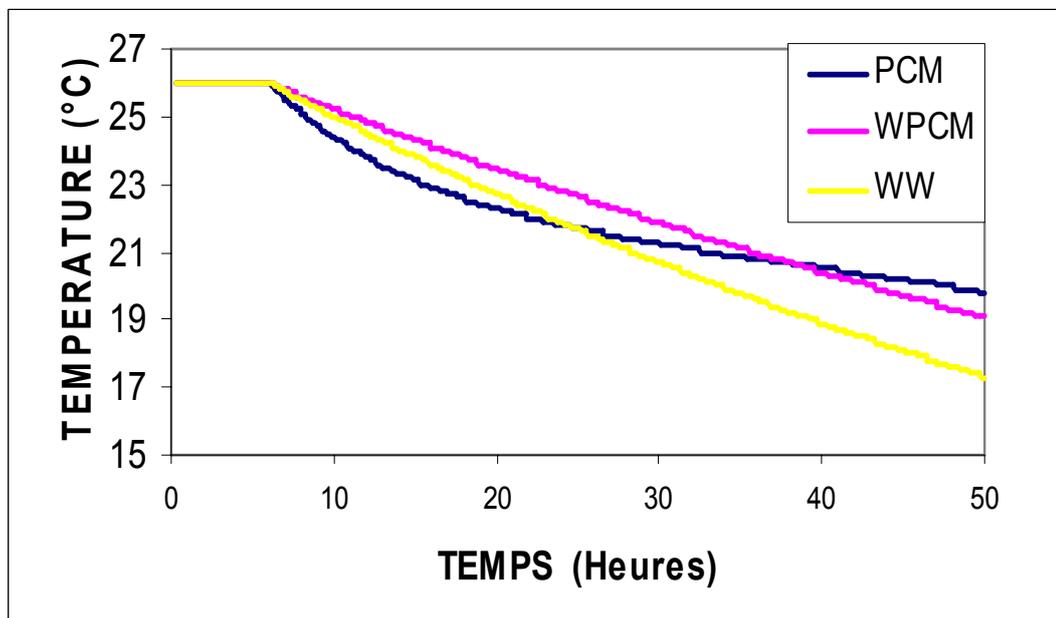


Figure 4.20. Comparaison des températures de l'air intérieur

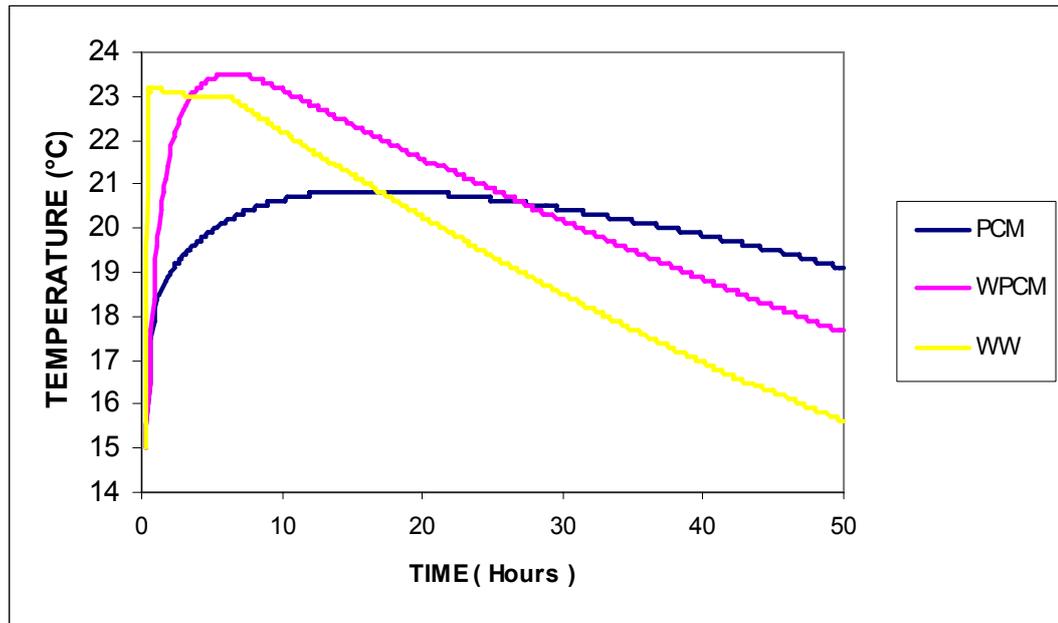


Figure 4.21. Comparaison des températures des parois internes

Sur les figures 4.17, 4.18 et 4.19, nous avons présenté les évolutions des températures de chaque nœud pour les trois cas de mur. Après deux jours de simulations, nous remarquons que les températures du ciment, brique sont presque identiques pour les trois mur, par contre pour les température du wallboard et de l'air intérieur on constate qu'après l'arrêt du système de chauffage la température de l'air pour le mur avec MCP décroît selon un profil parabolique décroissant, les deux autres suivent une décroissance linéaire (figure 4.20). La comparaison des températures de parois internes (figure 4.21) montre que le mur avec MCP sa température augmente légèrement et reste constante plus de 20 heures alors pour les murs sans MCP, on remarque que les températures des parois se rapprochent de la température de chauffage puis décroît avec une pente accentuée après l'arrêt du système de chauffage.

4.5. Conclusion

Un modèle mathématique basé sur les bilans thermiques a été développé pour simuler le comportement thermique d'une maison et voir l'impact de l'incorporation des matériaux à changement de phase dans l'enveloppe du bâtiment. Une série de simulations thermiques et des analyses comparatives des maisons dans des conditions proches de plusieurs régions du pays ont montré les avantages d'employer la chaleur latente, basse température pour la conception passive des bâtiments.

Un bâtiment muni de wallboard gypse/MCP de 8 cm d'épaisseur permet de stocker l'électricité sous forme de chaleur ou de froid pendant les heures creuses dans l'enveloppe du bâtiment et de maintenir la température intérieure dans des conditions satisfaisantes de confort thermiques pendant 18 heures.

CHAPITRE 5

Application des matériaux à changement de phase dans un système actif

Une méthode pour l'usage du stockage de chaleur latente est l'encapsulation de MCP dans des récipients à l'intérieur d'un réservoir de stockage calorifugé. Le MCP peut être encapsulé dans une variété de manières en utilisant les géométries cylindriques, plats, ou capsules sphériques. La géométrie sphérique semble offrir un certain nombre d'avantages qui la rend parmi les méthodes les plus attrayantes d'encapsulation. Les capsules sphériques sont préférées pour des raisons de la facilité de l'emballage dans le réservoir de stockage avec une porosité uniforme. En plus, pour les systèmes utilisant l'air comme fluide caloporteur, le coefficient d'échange par convection est faible donc il faut prévoir une grande surface d'échange. Pour cela, l'encapsulation sphérique est la solution la plus utilisée.

5.1. Modélisation

5.1.1. Présentation du système physique

Le système physique est représenté très schématiquement par la figure 5.1.

Le stock est constitué des particules sphériques contenant chacune un matériau à changement de phase, contenues dans une enceinte métallique fixe d'axe vertical traversé par un fluide caloporteur. Le fluide caloporteur circule dans le stock en contact direct avec les particules.

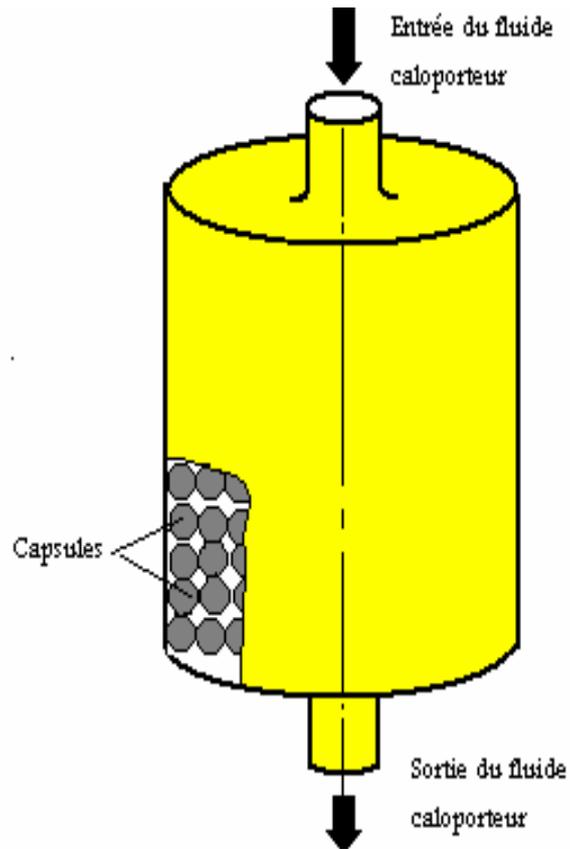


Figure 5.1. Schéma du réservoir de stockage

5.1.2. Hypothèses simplificatrices de base

- H1 - Les parois de la cuve sont adiabatiques.
- H2 - L'influence de la paroi du cylindre est négligée.
- H3 - Le phénomène est monodimensionnel.
- H4 - La vitesse moyenne de l'écoulement du fluide est constante dans tout le stock.
- H5 - La conduction entre les particules sphériques est ignorée.
- H6 - Les gradients de températures sont faibles à l'intérieur des particules sphériques.
- H7 - Les particules sphériques sont toutes de la même nature, sont aussi de la même taille.
- H8 - L'échange par rayonnement est négligé.

H9 - Le coefficient d'échange par convection entre le solide et le fluide supposé constant et indépendant de la température.

H10 - Les propriétés thermo physiques du fluide et des capsules sont constantes dans tout le stock sauf la capacité calorifique du MCP, elle est variable pendant le changement de phase pour les particules.

5.1.3. Mise en équation

Nous avons divisé la longueur du stockage en n tranches de dimensions égales.

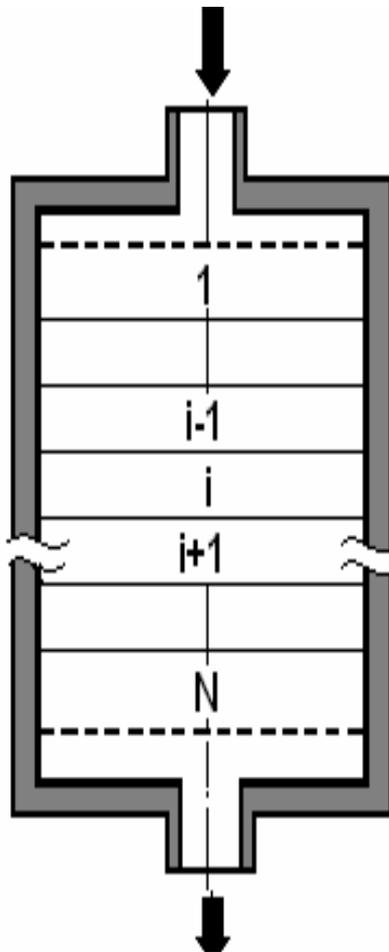


Figure 5.2 Les différentes tranches du réservoir

Prenons une tranche i de longueur dx compris entre les abscisses i et $i+1$ comme montre la figure:

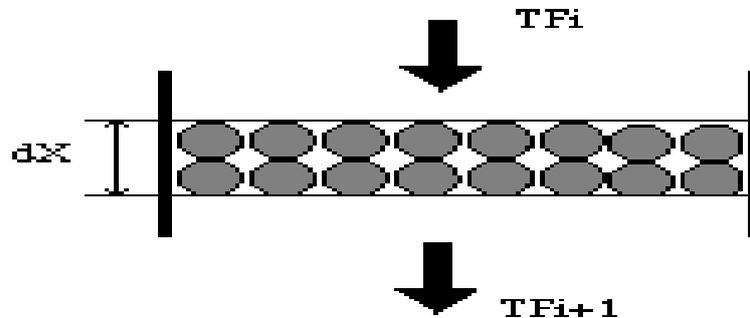


Figure 5.3 Elément de longueur du stock

Nous nous intéressons à l'évolution en fonction du temps des températures moyennes du fluide et des capsules dans la section d'entrée (l'abscisse x) de cet élément pendant le temps dt .

L'équation d'énergie pour le fluide s'écrit:

$$\varepsilon \cdot \rho_F \cdot C_{p_F} \cdot \frac{\partial T_F(x,t)}{\partial t} + \varepsilon U \cdot \rho_F \cdot C_{p_F} \cdot \frac{\partial T_F(x,t)}{\partial x} = k_F \cdot \frac{\partial^2 T_F(x,t)}{\partial x^2} + h_{cf} \cdot a \cdot (T_{Ca}(x,t) - T_F(x,t)) \quad (5.1)$$

Les capsules sphériques contenant chacune un matériau fusible, lorsqu'il est traversé par le fluide chaud à une température supérieure à la température de fusion, il se produit un échange de chaleur entre le fluide et le solide,

L'équation de l'énergie pour les capsules s'écrit:

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_{Ca} \cdot C_{p_{app}} \cdot \frac{\partial T_{Ca}(x,t)}{\partial t} = h_{cf} \cdot a \cdot (T_F(x,t) - T_{Ca}(x,t)) \quad (5.2)$$

Conditions initiales et aux limites

à $t = 0$

$$T_F(x, t = 0) = T_{Ca}(x, t = 0) = T_0 \quad (5.3)$$

à $x=0$

$$T_F(x=0,t) = T_{Ca}(x=0,t) = T_{ent} \quad (5.4)$$

A la sortie du lit, on suppose que le système est adiabatique

$$\frac{\partial T_F}{\partial x}(x=L,t) = \frac{\partial T_{Ca}}{\partial x}(x=L,t) = 0 \quad (5.5)$$

Capacité apparente

Pour simplifier on va supposer que la variation de C_{pc} est linéaire en fonction de la température comme représente la figure :

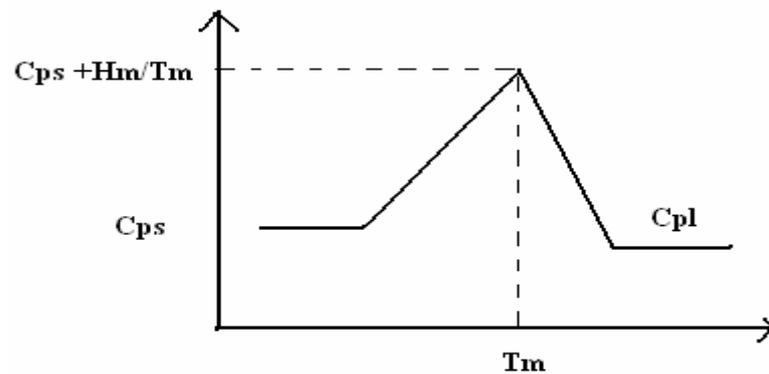


Figure 5.4 Fonction du Cp apparent utilisée dans le modèle

5.1.4. Résolution des équations

$$\frac{\partial T_F(x,t)}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial T_F(x,t)}{\partial x} = \frac{k_F}{\varepsilon \cdot \rho_F C p_F} \cdot \frac{\partial^2 T_F(x,t)}{\partial x^2} + \frac{h_{cf} \cdot a}{\varepsilon \cdot \rho_F C p_F} \cdot (T_{Ca}(x,t) - T_F(x,t)) \quad (5.6)$$

et

$$\frac{\partial T_{Ca}(x,t)}{\partial t} = \frac{h_{cf} \cdot a}{(1-\varepsilon) \cdot \rho_{Ca} \cdot C p_{app}} (T_F(x,t) - T_{Ca}(x,t)) \quad (5.7)$$

La discrétisation des équations à partir d'un maillage spatial et temporel de pas respectivement égaux Δx et Δt permet d'écrire en utilisant le schéma purement implicite des différences finies nous obtenons les équations suivantes :

Pour le fluide

$$T_{Fi}^{t+1} - T_{Fi}^t + \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta x} (T_{Fi}^{t+1} - T_{Fi-1}^{t+1}) = \frac{k_F \Delta t}{\rho_F \cdot C p_F \cdot \varepsilon \cdot \Delta x^2} \{T_{Fi-1}^{t+1} - 2T_{Fi}^{t+1} + T_{Fi+1}^{t+1}\} + \frac{h_{cf} \cdot a}{\rho_F \cdot C p_F \cdot \varepsilon} (T_{Cai}^{t+1} - T_{Fi}^{t+1}) \quad (5.8)$$

Pour le MCP

$$T_{Cai}^{t+1} - T_{Cai}^t = \frac{h_{cf} \cdot a \cdot \Delta t}{\rho_{Ca} \cdot C p_{Ca} \cdot (1 - \varepsilon)} (T_{Fi}^{t+1} - T_{Cai}^{t+1}) \quad (5.9)$$

Si on pose

$$A = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad B = \frac{k_F \Delta t}{\rho_F \cdot C p_F \cdot \varepsilon \cdot \Delta x^2} \quad C = \frac{h_{cf} \cdot a \cdot \Delta t}{\rho_F \cdot \varepsilon \cdot C p_F} \quad D = \frac{h_{cf} \cdot a \cdot \Delta t}{\rho_{Ca} \cdot C p_{Ca} \cdot (1 - \varepsilon)}$$

$$T_{Fi-1}^{t+1} (-A - B) + T_{Fi}^{t+1} (1 + A + 2B + C) + T_{Fi+1}^{t+1} (-B) = T_{Fi}^t + T_{Cai}^{t+1} \quad (5.10)$$

$$T_{Cai}^{t+1} = T_{Cai}^t + D (T_{Fi}^{t+1} - T_{Cai}^{t+1}) \quad (5.11)$$

$$T_{Cai}^{t+1} = \frac{D T_{Fi}^{t+1} + T_{Cai}^t}{1 + D} \quad (5.12)$$

En substituant l'équation (5.12) dans l'équation (5.10) nous aurons :

$$T_{Fi-1}^{t+1} (-A - B) + T_{Fi}^{t+1} (1 + A + 2B + C) + T_{Fi+1}^{t+1} (-B) = T_{Fi}^t + \frac{C}{1 + D} (D T_{Fi}^{t+1} + T_{Cai}^t) \quad (5.13)$$

$$T_{Fi-1}^{t+1} (-A - B) + T_{Fi}^{t+1} \left(1 + A + 2B + C - \frac{C \cdot D}{1 + D}\right) + T_{Fi+1}^{t+1} (-B) = T_{Fi}^t + \frac{C}{1 + D} (T_{Cai}^t) \quad (5.14)$$

Les équations des différents nœuds $0 \leq i \leq N$

Nous obtenons alors le système d'équations suivant :

$$i = 1 \quad T_{F0}^{t+1}(-A - B) + T_{F1}^{t+1}\left(1 + A + 2.B + C - \frac{C.D}{1+D}\right) + T_{F2}^{t+1}(-B) = T_{F1}^t + \frac{C}{1+D}T_{Ca1}^t$$

$$i = 2 \quad T_{F1}^{t+1}(-A - B) + T_{F2}^{t+1}\left(1 + A + 2.B + C - \frac{C.D}{1+D}\right) + T_{F3}^{t+1}(-B) = T_{F2}^t + \frac{C}{1+D}T_{Ca2}^t$$

$$i = 3 \quad T_{F2}^{t+1}(-A - B) + T_{F3}^{t+1}\left(1 + A + 2.B + C - \frac{C.D}{1+D}\right) + T_{F4}^{t+1}(-B) = T_{F3}^t + \frac{C}{1+D}T_{Ca3}^t$$

· · · · ·
 · · · · ·
 · · · · ·
 · · · · ·
 · · · · ·

$$i = N \quad T_{FN-1}^{t+1}(-A - B) + T_{FN}^{t+1}\left(1 + A + 2.B + C - \frac{C.D}{1+D}\right) + T_{FN+1}^{t+1}(-B) = T_{FN}^t + \frac{C}{1+D}T_{CaN}^t$$

Si on pose

$$AA = (-A - B) ,$$

$$BB = \left(1 + A + 2.B + C - \frac{C.D}{1+D}\right) ,$$

$$CC = -B \quad \text{et} \quad DD = \frac{C}{1+D}$$

$$\text{Et} \quad T_{F0}^{t+1} = T_{in}$$

Nous aurons :

$$i = 1 \quad T_{F1}^{t+1} BB + T_{F2}^{t+1} CC = T_{F1}^t + DD.T_{Ca1}^t - AA.T_{in}^t$$

$$i = 2 \quad T_{F1}^{t+1} AA + T_{F2}^{t+1} BB + T_{F3}^{t+1} CC = T_{F2}^t + DD.T_{Ca2}^t$$

$$i = 3 \quad T_{F2}^{t+1} AA + T_{F3}^{t+1} BB + T_{F4}^{t+1} CC = T_{F3}^t + DD.T_{Ca3}^t$$

$$\begin{array}{ccccccc} \cdot & & & & & & \\ \cdot & & & & & & \\ \cdot & & & & & & \\ \cdot & & & & & & \end{array}$$

$$i = N \quad T_{FN-1}^{t+1} AA + T_{FN}^{t+1} BB + T_{FN+1}^{t+1} CC = T_{FN}^t + DD.T_{CaN}^t$$

Nous avons obtenus une matrice tri diagonale.

$$\begin{bmatrix} BB & CC & 0 & 0 & \dots & \dots \\ AA & BB & CC & 0 & \dots & \dots \\ 0 & AA & BB & CC & \dots & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \dots \\ \cdot & & & & & \\ \dots & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & AA & BB+CC \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} T_{F1}^{t+1} \\ T_{F2}^{t+1} \\ \dots \\ T_{FN-1}^{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{F1}^t + DD.T_{Ca1}^t - AA.T_{in}^t \\ T_{F2}^t + DD.T_{Ca2}^t \\ \dots \\ T_{FN-1}^t + DD.T_{CaN-1}^t \end{bmatrix}$$

La résolution de cette matrice est effectuée par la méthode TDMA. On calcule d'abord les températures du fluide T_{Fi}^{t+1} connaissant les températures T_{Fi}^t et T_{Cai}^t et ceci pour tous les nœuds i puis on calcule T_{Cai}^{t+1} à partir de l'équation (5.12).

5.2. Caractéristiques géométriques et thermiques

5.2.1 Diamètre équivalent

Les capsules sont des sphères identiques, donc on peut les caractériser par le diamètre d , défini par:

$$d = \left[\frac{6 \text{ volume des capsules}}{\pi \text{ nombre des capsules}} \right]^{1/3} \quad (5.15)$$

5.2.2. Porosité:

Par définition, la porosité est le rapport du volume occupé par le fluide sur le volume total (fluide / capsules). Sa valeur varie de 0.36 à 0.44. H. Torab et D. Beasley [66] ont donné une expression qui dépend du rapport entre le diamètre équivalent de la capsule et le diamètre de la cuve de stockage.

$$\varepsilon = 0.4272 - 4.1516 \cdot 10^{-3} (D/d) + 7.881 \cdot 10^{-5} (D/d)^2 \quad \text{pour } D/d < 28$$

et

$$\varepsilon = 0.3625 \quad D/d > 28 \quad (5.16)$$

5.2.3. Longueur caractéristique:

La longueur caractéristique est le rapport du volume d'une capsule à sa surface.

$$\xi = \frac{V_{\text{Capsule}}}{S_{\text{capsule}}} \quad (5.17)$$

5.2.4. Surface d'échange

La surface d'échange (fluide capsules) d'un milieu poreux de volume V_s et de porosité ε est égale à :

$$A_C = n_{capsule} \cdot A_{capsule} \quad (5.18)$$

Où $n_{capsule}$ est le nombre de capsule dans le réservoir de stockage et $A_{capsule}$ est la surface d'une capsule.

5.2.5 Taux de surface de contact:

Le taux de surface d'échange est le rapport de la surface de contact au volume correspondant.

$$a = \frac{A_C}{V_s} \quad (5.19)$$

Pour des capsules sphériques identiques

$$a = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d} \quad (5.20)$$

5.2.6. Coefficient d'échange (fluide / capsules):

La détermination du flux convectif échangé entre la capsule et le fluide caloporteur nécessite la connaissance du coefficient de transfert thermique volumique. Ce dernier est donné par la relation d'Alanis et Rovetta [55]

$$h_v = 824 \left[\frac{\rho_F U}{d} \right]^{0.92} \quad (5.21)$$

Le coefficient thermique surfacique est alors déduit simplement en utilisant la relation suivante :

$$h_{cf} = \frac{d}{(6 \cdot (1 - \varepsilon)) \cdot h_v} \quad (5.22)$$

5.3. Résultats

L'étude numérique a été faite sur une cuve cylindrique placée verticalement de 1 m de long, rempli de capsules en plastique de 0.1 de diamètre contenant chacune de la paraffine n-octadécane (température de fusion est de 28°C) et traversé par un air chaud chauffé et maintenu à une température d'entrée constante de 40°C.

Sur la figure 5.5, nous avons présenté les résultats théoriques obtenus pour un débit constant et une porosité uniforme à l'intérieur de la cuve de stockage.

Si on observe les évolutions des températures du MCP de quelques nœuds en fonction du temps, nous remarquerons que pour les premiers nœuds l'augmentation des températures est rapides par contre si on s'éloigne de l'entrée la zone correspondante à la fusion est plus importante.

La figure 5.6 illustre la variation spatiale de la température du MCP pour différents temps durant le stockage. L'analyse de cette figure montre que le stockage se fait en grande partie en chaleur sensible (état solide) sauf pour les premières tranches la fusion est rapide. Pour le deuxième temps (100), nous remarquons un palier dans les tranches du milieu ceci correspond au changement de phase. Après un certain temps ($t=150$) on remarque que le stockage est en mode chaleur sensible (état liquide).

Pour le déstockage nous avons supposé qu'au début la cuve à une température uniforme de 35°C et l'air entre à 10°C.

Les profils de températures en fonction du temps pour quelques nœuds et en fonction de la profondeur du stockage sont représentés sur les figures 5.7 et 5.8. Nous constatons que le changement de phase est rapide et que le comportement thermique est identique à celui d'un stockage par chaleur sensible c'est-à-dire que l'effet du changement de phase n'est pas visible sur les courbes.

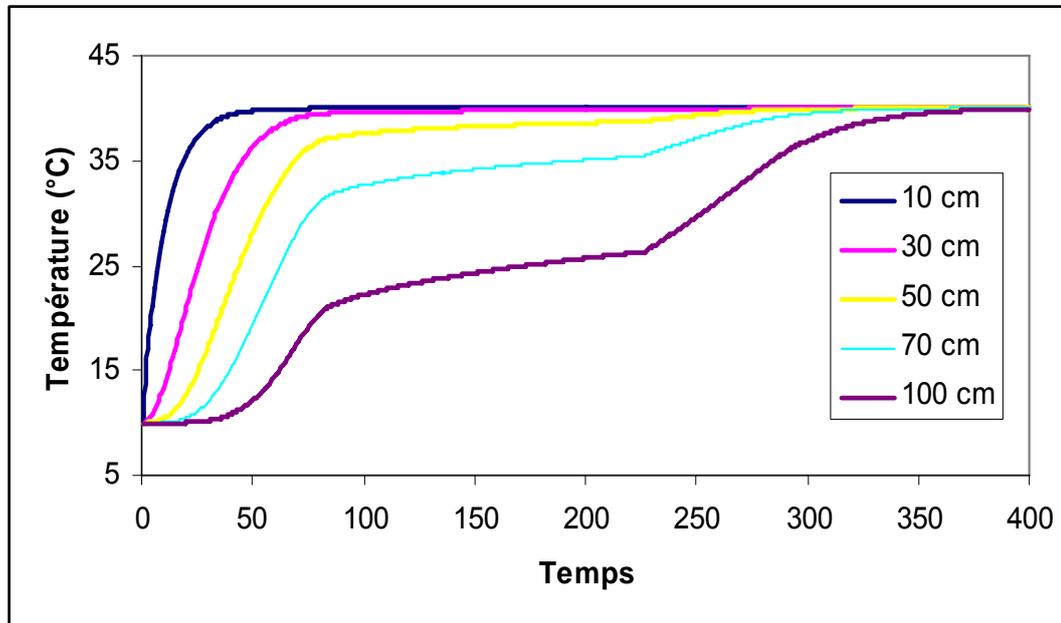


Figure 5.5. Profils des températures du MCP pour quelques nœuds

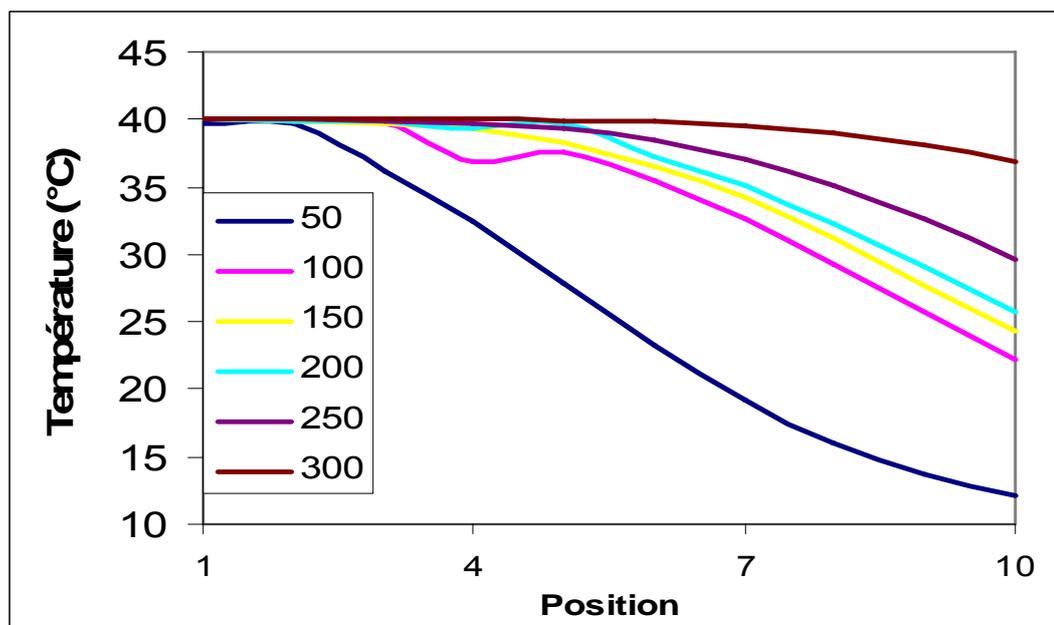


Figure 5.6. Evolution des températures des nœuds pour différents temps.

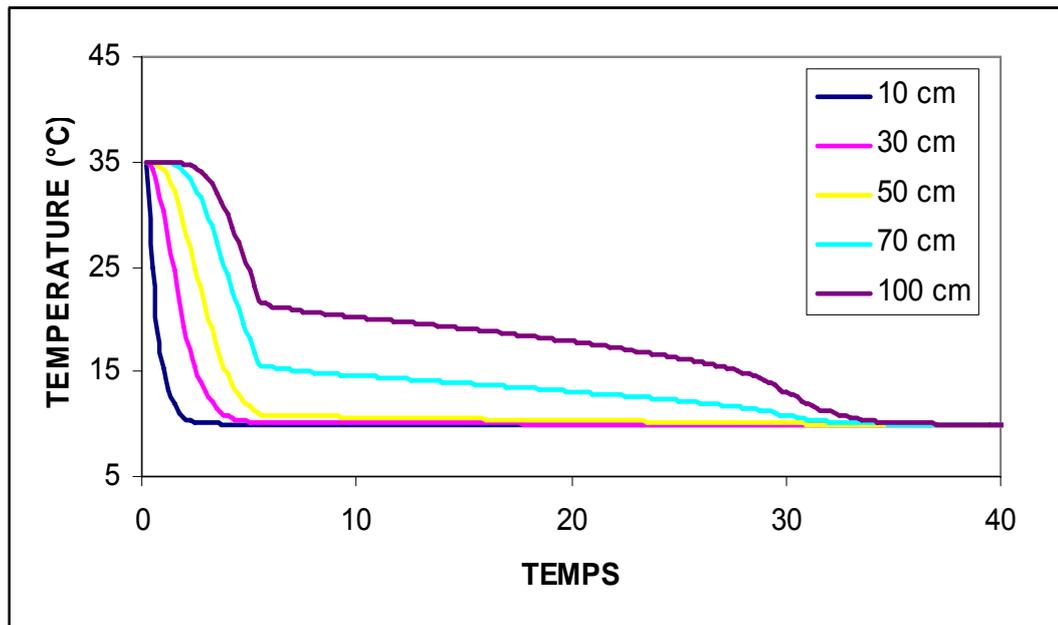


Figure 5.7. Profils des températures durant le déstockage.

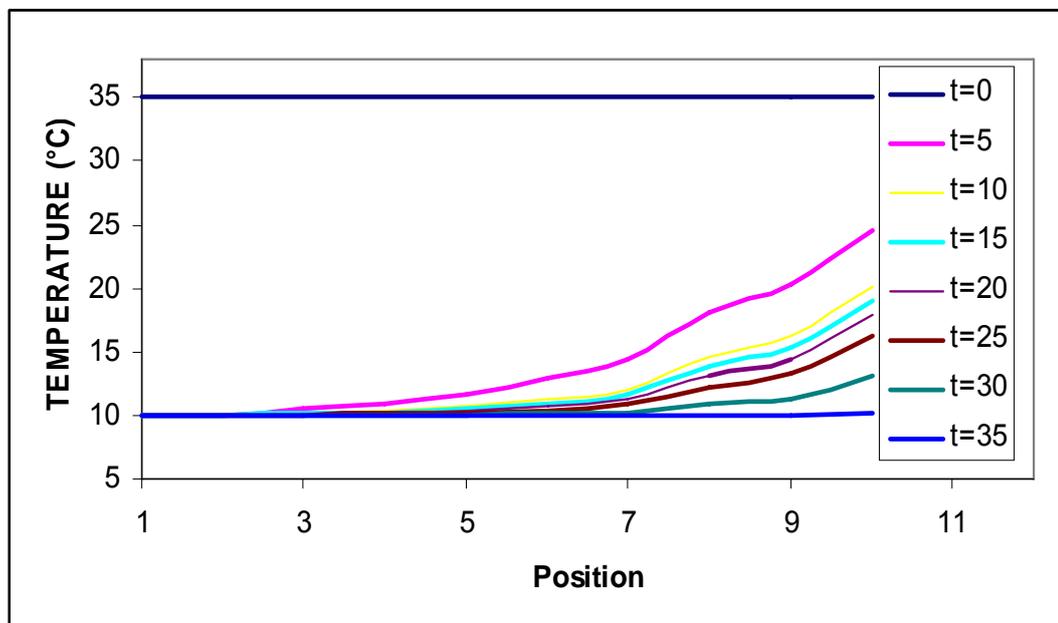


Figure 5.8. Profils des températures durant le déstockage.

5.4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons procédé à une analyse du stockage thermique dans un réservoir rempli de sphères avec un matériau à changement de phase à l'intérieur.

Le modèle théorique unidimensionnel proposé est basé sur les bilans thermiques au niveau du fluide caloporteur et des sphères. La résolution numérique est obtenue à l'aide du schéma implicite des différences finies. L'analyse du comportement thermique a montré que le changement de phase lors de la fusion est visible pour les couches qui sont loin de la rentrée. Par contre, pour la décharge la solidification est rapide et le comportement thermique du stockage est identique à un stockage par chaleur sensible.

Enfin, ce modèle peut être utilisé pour voir l'influence des paramètres dynamiques tels que : le débit, le diamètre des capsules, la porosité et la température d'entrée.

CONCLUSION GENERALE

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 Caractérisation par la méthode *T-history* est un moyen simple et rapide pour connaître les propriétés thermophysiques. Les résultats ont montré qu'on peut l'utiliser à basses températures. La chaleur latente a été obtenue avec une erreur de 4%. Par contre, pour les hautes températures la méthode doit être améliorée.

En ce qui concerne les applications dans le bâtiment, l'étude a montré que l'incorporation des MCP dans l'enveloppe du bâtiment permet de stocker l'électricité sous forme de chaleur ou de froid pendant les heures creuses et de maintenir la température intérieure dans des conditions satisfaisantes de confort thermique pendant 18 heures.

Nous avons aussi procédé à une analyse du stockage thermique dans un réservoir contenant des capsules sphériques remplies de matériau à changement de phase. Un modèle monodimensionnel a été élaboré. Ce dernier nous permettra de mettre en évidence certains paramètres qui influent sur le comportement thermique du stockage.

Enfin, nos investigations sur le stockage par chaleur latente ont montré que de nombreux systèmes sont prometteurs, mais le défi de proposer une alternative économique aux systèmes standards fait qu'il sera nécessaire de soutenir la recherche et le développement pour que cette technologie soit largement utilisée.

L'augmentation graduelle du nombre de systèmes actuellement en usage élargit la quantité de données disponibles sur leurs performances. On peut dire que l'avenir des produits MCP pour le chauffage et le refroidissement est prometteur. Il apparaît, toutefois que certains domaines de la recherche sur les MCP avancent plus rapidement que d'autres: Les systèmes MCP actifs sont commercialisés alors que les systèmes passifs sont encore à l'étape recherche et développement.

REFERENCES

1. A. M. Khuldhair and M.M. Farid. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion Management* 45(2004) 263-275
2. A. Abhat. Low Temperature latent heat thermal energy storage materials. *Solar Energy* 30(1983) 313-331.
3. B. Zelba, J.M. Martin, L. F. Cabeza and H. Mehling. Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 251-283
4. S. D. Sharma. Thermal energy storage systems using phase change material for temperature applications. Phd Thesis (1999).
5. Feldman and D. Shapiro. Fatty acids and their mixtures as phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy Materials* 18 (1989) 201-216.
6. A. Hasan. A phase change material energy storage system employing palmitic acid. *Solar Energy* 52 (1994) 143-154.
7. D. Banu, D. Feldman and D. Hawes. Evaluation of thermal storage as latent heat in phase change material wallboard by differential scanning calorimetry and large scale thermal testing. *Thermochimica Acta* 317(1998) 39-45.
8. L. Shilei, Z. Neng and F. Guohui. Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter. *Energy and Building* 38 (2006) 18-24.

9. M.M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. Razack and S. Al Hallaj. A review on phase change energy materials and applications. *Energy Conversion and Management* 45 (2004) 15597-1615.
10. E. Palomo, Z. Acem, Y. Janot, J. Lopez et V. Morisson. Matériaux graphite/sel pour le stockage d'énergie à haute température HTP-STOCK (ACI Energie 2003). Rapport d'avancement, juillet 2005 Laboratoire Interétablissements TREFLE ENSAM Bordeaux.
11. Z. Yinping and J. Y. Jiang Yi A simple method , the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. *Measurement and science technology* 10 (1999) 201-205.
12. H. Hiki, S, K. Kim and Y. S. Kim. Accuracy improvement of t-history method for measuring heat of fusion of various materials. *International Journal of Refrigeration* 27 (2004) 360-366.
13. J. M. Martin, B. Zalba, L. F. Cabeza and H. Mehling. Determination of enthalpy-temperature curves of phase change materials with the temperature- history method: improvement to temperature dependent properties. *Measurement and science technology* 14 (2003) 184-189.
14. J. H. Peck, J. J; Kim, C. Kang and H. Hiki. A study of accurate latent heat measurement for PCM with a low melting temperature using T-history method *International Journal of Refrigeration* 29 (2006) 1225-1252.
15. A. Sari and K. Kaygusuz. Thermal energy Characteristic and Stearic acids Eutectic mixture for low temperature heating applications. *Chinese J. Chemical Engenering* Vol 14 (2006) 270-275.
16. E.M. Sparrow, T.A. Myrum. Inclination induced direct contact melting in a circular tube. *ASME J Heat Mass Transfer* 107 (1985): 533-540

17. A. Saito, S Okawa, T. Shintani., R. Iwamoto On the heat removal characteristics the analytical model of thermal energy storage capsule using gelled glaubers salt as the PCM. International Journal Mass Transfer 44 (2001) 4693-4701.
- 18 T.Hirata, Y. Makino, Y. Kaneko. Analysis of close-contact melting for octadecane and inside isothermally heated horizontal rectangular capsule. International Journal HEAT AND Mass transfer 34 (1991) 3097-3106.
- 19 M. Farid et R. M. Husian. An electrical storage heater using phase change method of heat storage. Energy Conversion Management 30 (1990) 219-230.
- 20 A. Laouadi, M. Lacroix, N. Galanis. Thermal performance of planar latent heat energy storage unit with electric heat sources. in: Fundamentals of phase change sublimation, solidification, conference organised by ASME Chicago Novembre 13-18 (1994).
- 21 P. Brousseau, M. Lacroix. Numerical simulation of a compact multilayer phase change material energy storage system. Fundamentals of phase change: sublimation, solidification conference organised by Chicago, Nov 13-18 (1994).
- 22 R. H. Henze et J..A.C. Humphrey. Enhanced heat conduction in phase change thermal energy storage devices. International Journal of Heat and Mass Transfer. 24(1981) 459-474.
- 23 M. Benmedda. Etude numérique et expérimentale de la fusion et de la solidification d'un matériau à changement de phase (paraffine n-octadécaneà dans une enceinte munie d'ailettes. Thèse Doctorat (Phd) Janvier 1996. Département de génie mécanique Université de Sherbrooke. Canada.
- 24 A. Hamid et M. Lacroix. Etude expérimentale de la fusion et la solidification cyclique de la paraffine dans une enceinte. Rapport de stage; Département de Génie mécanique. Université de Sherbrooke. Canada 1994.

- 25 C.Arkar and S. Medved. Enhanced solar assisted building ventilation system using sphere encapsulated PCM thermal heat storage. IEA, ECES, Annex 17, Advanced thermal Energy storage Techniques. Feasibility studies and demonstration Projects, 2^{ème} Workshop, 3-5 April 2002.Ljubljana Slovinia.
- 26 M. Farid and R. J. Shetton. New hot water cylinder incorporating phase change heat storage. APCCHE 2002 Christchurch 29 septembre 3 October.
- 27 H. Al Qarnia. Analyse du transfert de chaleur dans un système de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion pour le chauffage d'eau. 12^{ème} Journées Internationales de thermique. Tanger, Maroc 15 au 17 Novembre 2005.
- 28 K. A. R. Ismail and J. R. Henriquez. Numerical and experimental study of spherical capsules packed bed latent heat storage system. Applied Thermal Engineering, 22(2002) 1705-1716.
- 29 K. A. R. Ismail and R. Stuginsky Jr. A parametric study on possible fixed bed models for pcm and sensible heat storage. Applied Thermal Engineering Vol 19 (1999) 757-788.
- 30 T. Kousksou, J.P. Bedecarrets, J.P. Dumas et A. Mimet. Dynamic modelling of the storage of an encapsuled ice tank. Applied Thermal Engineering 25 (2005) 1535 -1548.
- 31 . Benmansour, M. A. Hamdan et B. Jubran. Stockage de l'énergie thermique dans un matériau à changement de phase. CHEMSS Alger 11 au 15 Mai (2000)
- 32 J. P Bédécarrats, F. Strub, B. Falcon and J. P. Dumas. Phase change thermal energy using spherical capsules performance of test plant. International Journal of Refrigeration. 19 (1996) 187-196.

- 34 K. Athientitis, C. Liu, D. Hawes, D. Banu and D. Feldman. Investigation of the thermal performance of passive solar room with wall latent heat storage. *Building and environment* Vol 32 N°5 (1997) 405-410.
- 35 A. Neeper. Thermal dynamic of wallboard with latent heat storage. *Solar energy* Vol 68 N° 5 (2000) 393-403.
- 36 A. Maha, A. Bontemps, H. Saillée, D. Quenard. Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour wallboards containing a phase change material. *Energy and Building* 38(2006) 357-366
- 37 A. Maha, A. Bontemps, H. Saillée, D. Quenard. Thermal testing and numerical simulation of prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. *Energy and Building* 38(2006) 673-681.
- 38 K. Darkwa, P. W. O'Callagan. Simulation of phase change drywalls in a passive solar building. *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 853-858.
- 39 K. Darkwa. Evaluation of regenerative phase change drywalls low energy building application. *International Journal of Energy Research*. 23(1999) 1205-1212.
- 40 K. Darkwa and J. S. Kim. Dynamic of energy storage in phase drywall systems. *International Journal of Energy Research*. 29 (2005) 335-343.
- 41 L. Shilei, Z. Neng and F. Guohui. Impact of phase changer wall room on indoor thermal environment in winter. *Energy and Building* 38 (2006) 18-24.
- 42 M. J. Huang, P.C. Eames and N.J. Hewitt. The applications of validated numerical model to predict the energy conservation potential of using phase change materials in the fabric of a building.. *Solar Energy Materials and solar cells*. 90(2006) 1951-1960.

- 43 Y.P.P. Zhang, K.P. Lin, R Yang H.F. Di and Y. Jiang. Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized in energy efficient building. *Energy and building* 38(25006) 1262-1269.
- 44 A. Hamid, N. Ait Messaoudène and E. Palomo. Impact of Using wallboard with phase change Materials in electric consumption in Algéria. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 6(2008) 521-528
- 45 J. S. Kim and K. Darkwa. Simulation of in intergrated PCM Wallboard system. *International Journal of Energy Research*. 27(2003) 215-223.
- 46 J. Dilip. Modeling the performance of greenhouse with packed bed thermal storage on crop drying application. *Journal of Food Engeering* 71(2005)170-178.
- 47 V. V. Tyagi and D; Buddhi PCM Thermal storage in building; A state of art. *Renewable & sustainable energy reviews*. 11 (2007) 1148-1166.
- 48 B. Peuportier et S. Thiers. De Eco-technique à l'eco-conception des bâtiment. Journée thématique SFT-IBPSA Mars 2006.
- 49 M. Zukowski. Mathematical modeling and numerical simulation of a short term thermal energy storage system using phase change material for heating applications. *Energy conversion & management*. (2006).
- 50 H. Kazeoui, A. Tahakourt, A. Ait el Mokhtar et R. Belarbi. Utilisation couplée de l'énergie solaire et des matériaux locaux dans le bâtiment. FIER 2002 TETOUAN Maroc.
- 51 P. Hollmuller, B. Lachal et J.M. Zraggen. Rafrâichissement de bâtiment par déphase thermique contrôlé. Article soumis à CISBAT 05 Ecole polytechnique fédérale 28-29 septembre 2005.

- 52 A. F. Rudd. Matériaux à changement de phase pour le stockage thermique distribue dans le bâtiment. ASHRAE;99, partie 2, 3724. Atlanta, GA,1993.
- 53 D. Heim. Two solution methods of heat transfer with phase change within whole building dynamic simulation. Building simulation 2005. Ninth International IBPSA Conférence. Montreal Canada August 15-16 2005.
- 54 D. Heim and J.A. Clarke. Numerical modelling and thermal simulation of PCM-gypsum composites with ESP-r. Energy building 36(2004) 795-805.
- 55 S. Nezzar et M. Gourdache. Etude des performances énergétiques dans la conception bioclimatique en région aride. Word Energy Council. 17th congrès 2006.
- 56 S. Citherlet et J. Bony. Combi-système avec matériaux à changement de phase. Office fédéral de l'énergie Rapport annuel 2004.
- 57 M. Amir, M. Lacroix et N. Galanis. Comportement thermique de dalles chauffantes électrique pour le stockage quotidien. International Journal Thermique science 38(1999) 121-131.
- 58 P. Xavier. Transferts thermiques avec changement de phase. Cours de DESS Génie et Gestion de froid, Université de perpignan.
- 59 Keumnan Cho and S. H. Choi. Thermal characteristics of paraffin in a spherical capsule during freezing and melting processes. International Journal of heat and mass transfer. Vol 43 (2000) 3183-3196.
- 60 S. L. Chen, C. L. Chen, C. C. Tin, L. Tzong-Shing and K. Ming-Chun. An experimental investigation of cold storage in a capsulated thermal storage tank. Experimental Thermal and Fluid Science Vol 23 (2000) 133-144.

- 61 Y. Shiina and T. Inagati. Study on the efficiency of effective thermal conductivities on melting characteristics of latent heat storage capsules. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol 48 (2005) 373-383.
- 62 R. Gicquel, D. Harang et D. Schmoll. Dynamique des stockages thermiques mixtes par chaleur sensible. Revue générale de Thermique Août Septembre (1979) 212-213.
- 63 C. Dang Vu et B. Delcambre. Etude expérimentale et modélisation d'un stockage thermique de longue durée en lit de cailloux enterrés couplés à des capteurs solaires à air. Revue de physique appliqué 22 (1987) 487-503.
- 64 E. F. Sowell and R. L. Curry. A convolution model of rock bed thermal storage units. Solar Energy 24 (1980) 441-449.
- 65 Alanis, E. Sarava and L. Rovetta. Measurement of rock pile heat transfer coefficient. Solar Energy 19 (1978) 517-527.
- 66 H. Torab and D.E. Beasley. Optimisation of packed bed thermal energy storage units Solar Engineering (1985).
- 67 M. Berdja. Modélisation et simulation numérique d'un matériau à changement de phase dans une cavité rectangulaire. Mémoire de Magister Département de mécanique université de Blida Juillet 2007.
- 68 F. C. Cavalcanti. Caractérisation thermique de produit de l'état liquide à l'état solide. Thèse doctorat. CETHIL Lyon 2006.
- 69 Sonelgaz site web www.sonalgaz.dz
- 70 Cristopia Energy System site web www.cristopia.com
- 71 Rubitherm site web www.rubitherm.de

72 Fourni par www.climator.com

73 Fourni par www.teappcm.com

74 H. Kakiuchi, Mitsubitshi Chemical Corporation, private communication, 2002