

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'études

Mémoire de fin d'études

*En vue de l'obtention du diplôme Master Professionnel
en Génie Mécanique*

Option : Energétique

Spécialité : Energies Renouvelables

Thème :

*Réalisation d'un échangeur stockeur rempli d'un
nouveau matériau composite pour le stockage
d'énergie*

Réalisé par :

FEDDI Nacer

**ZERROUGUI Abdenour*



Proposé et dirigé par :

*Mr: S. MAKHLOUF**

2013/2014

Remerciements

Au terme de ce travail nous tenons à remercier en premier lieu Dieu qui nous a donné la force pour mener à bien l'étude de ce projet.

Nous exprimons nos vifs remerciements à notre promoteur M S.MAKHLOUF, enseignant à l'institut de Génie Mécanique de Tizi-Ouzou de nous avoir proposé le sujet. On tient à le remercier pour sa précieuse aide, sa disponibilité et ses précieux conseils pour l'élaboration de ce travail.

Nos remerciements s'adressent aussi aux personnels des laboratoires Agronomie, Chimie et Physico-chimie de l'Université Mouloud MAMMERRI de nous avoir facilité la tâche pour mener à bien notre travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants de l'institut de Génie Mécanique de nous avoir suivis le long de notre cursus universitaire en particulier M M.HADID et M N.LAMROUS pour leur aide et leur disponibilité à notre égard.

En guise de reconnaissance, nous tenons à exprimer notre gratitude et notre respect le plus sincère aux deux doctorantes D.DJEFEL et S.KHEDACHE pour leurs précieux conseils et leur disponibilité à notre égard.

Nous remercions également le président et les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en jugeant notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail:

A mon très cher père et ma très chère mère auxquels je dois tout mon respect et que je ne remercierai jamais assez pour leurs soutiens, encouragements et conseils durant tout mon parcours universitaire;

A mes frères, Rabah et Yacine ;

A ma grande sœur Nadia et son époux Boudjmaa, ma sœur Nouara ;

A tous mes amis de la Faculté Génie Mécanique et mon très cher ami Ramzi ;

A toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin.

FEDDI Nacer

Je dédie ce travail à:

Mon très cher père et ma très chère mère auxquels je dois tout mon respect et que je ne remercierai jamais assez pour leurs soutiens, encouragements et conseils durant tout mon parcours universitaire ;

Ma grand-mère ;

Ma chère épouse Djamilia et mes enfants Dalia, Alicia et Nassim ;

Mes frères et sœurs ;

Tous mes amis et toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin.

ZERROUGUI Abdenour



Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Stockage d'énergie et matériaux à changement de phase	
I.1 Introduction	3
I.2 Différentes formes de stockage de l'énergie thermique	3
I.2.1 Stockage thermique sensible (STS)	3
I.2.2 Stockage thermique latent.....	5
I.3 Les matériaux à changement de phase (MCP).....	6
I.3.1 Les MCP organiques.....	6
I.3.1.1 Les composés organiques paraffiniques	7
I.3.1.2 Principales caractéristiques des paraffines.....	8
I.3.1.3 Les différentes cires paraffiniques	9
I.3.2 Les composés organiques non paraffiniques.....	10
I.3.2.1 Les acides gras	11
I.3.2.2 Les esters d'acides gras.....	12
I.3.2.2.1 propriétés des esters d'acides gras.....	12
I.4 Les MCP inorganiques.....	12
I.4.1 Les sels hydratés :	13
I.4.1.1 La ségrégation de phase	13
I.4.1.2 La surfusion : sous-refroidissement	13
I.4.2 Différents types d'hydrates salins :.....	14
I.5 Les MCP eutectiques	16
I.6 Choix du MCP	17
I.6.1 Critère thermique	17
I.6.2 Critères physiques	17
I.6.3 Critères cinétiques.....	17
I.6.4 Critères chimiques	17
I.6.5 Critères économiques.....	17
I.7 Méthodes de conditionnement des MCP	18
I.7.1 Principe de conditionnement :	18
I.7.2 Les macro-encapsulations	18
I.7.3 La micro-encapsulation	19

Sommaire

Chapitre II : Généralités sur les échangeurs de chaleur

II.1 Introduction	20
II-2 Définition	20
II-3 Modes de transfert de chaleur	20
II-3.1 Transfert de chaleur par conduction	20
II.3.2 Transfert de chaleur par convection	21
II.3.3 Rayonnement	21
II.4 Critères de classement des échangeurs de chaleur :	22
II.4.1 Classement technologique	22
II.4.2 Classement suivant le mode de transfert de chaleur	24
II.4.3 Classement suivant le procédé de transfert de chaleur	24
II.4.4 Classement fonctionnel	25
II.4.5 Classement suivant la compacité de l'échangeur	25
II.4.6 Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange	25
II.4.7 Classement suivant le sens relatif des écoulements des deux fluides :	26
II.5 Principales caractéristiques des échangeurs	26
II.6 Echangeurs compacts	27
II.7 Echangeurs conventionnels	27
II.8 Echangeurs tubulaires	27
II.8.1 Différentes catégories existantes	27
II.9 Echangeurs à tubes et ailettes :	28
II.9.1 Constituants d'une batterie :	28
II.9.1.1 Les tubes	28
II.9.1.2 Les ailettes	29
II.9.1.2.1 Différents types d'ailettes :	29
II.10 Quelques systèmes d'échangeurs Air MCP	31
II.10.1 Le système de Zalba el al.	31
II.10.2 Le système de Hed Bellander :	31
II.10.3 Le système Turnpenny et al.	32

Sommaire

Chapitre III : Matériel et méthodes

III.1 Introduction	34
III.2 Les matériaux utilisés pour l'élaboration du composite.....	34
III.2.1 Le MCP (la paraffine)	35
III.2.2 La perlite expansée.....	35
III.2.2.1 Obtention de la poudre de perlite	36
III.2.3 Le graphite	37
III.3 Granulométrie par tamisage	38
III.4 Préparation du composite MCP/Pe et MCP/Pe/Gr.....	39
III.4.1 Les proportions en masse des différents constituants	41
III.5 Fabrication des plaques de dimension (40× 40× 6 mm ³).....	41
III.6 Renforcement de la matrice en utilisant les fibres de jute.....	42
III.7 Compression des plaques	43
III.8 Test de perméabilité à l'eau.....	44
III.9 Préparation des échantillons pour l'analyse MEB et FT-IR	44
III.9.1 Préparation des échantillons pour le MEB :	44
III.9.2 Préparation des échantillons pour la FT-IR.....	46
III.10 Préparation des plaques de 30x30x6 cm ³ pour mesurer la conductivité thermique.....	48
III.11 La masse volumique.....	52
III.12 Calorimétrie différentielle a balayage (DSC).....	53
III.13 Choix du matériau :	54
III.14 Fabrication des pièces de l'échangeur Air-Eau-MCP	55
III.15 Fabrication des éléments de l'échangeur (conteneurs de MCP ailettes) :	55
III.16 Assemblage des pièces par soudage	60
III.17 Introduction des pastilles de MCP dans les éléments de l'échangeur	60
III.18 Réalisation des collecteurs d'admission et de sortie du fluide caloporteur.....	62
III.19 Réalisation du circuit aéraulique :	65
III.20 Montage expérimental.....	65

Sommaire

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Résultats des méthodes thermo physiques effectués pour le composite	68
IV.1.1 Images données par Microscopie Électronique à Balayage (MEB).....	68
IV.1.2 Résultats des analyses infrarouges :.....	70
IV.1.3 Calcul de la conductivité thermique :	77
Premier cas : plaque composite de (paraffine + perlite) :	77
Deuxième cas : plaque composite de (paraffine+ perlite +graphite) :	78
IV.1.4 Détermination de la masse volumique par pesée et par pycnomètre	79
IV.2 Résultats du test de calorimétrie différentielle à balayage (DSC)	80
IV.2.1 Calcul de la quantité d'énergie nécessaire pour faire fondre la paraffine d'après les résultats de la DSC	81
IV.3 Résultats du bilan thermique du prototype expérimental	82
IV.3.1 Calcul des différents flux de chaleur obtenus du modèle expérimental.....	84
IV.3.2 Conclusion.....	85
Conclusion générale	86

Nomenclature

Nomenclature

➤ Lettres latines :

Symbole	Désignation	Unité
H	Enthalpie	J
m	Masse	kg
c	Chaleur massique spécifique	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
Q	Quantité de chaleur	J
h	coefficient d'échange convectif	$W.m^{-2}.K^{-1}$
h_f	Enthalpie massique finale	$J.kg^{-1}$
h_i	Enthalpie massique initiale	$J.kg^{-1}$
C_p	Chaleur massique spécifique à pression constante	$J/kg.K$
T	Température	$^{\circ}C$
L	Chaleur latente de fusion	$J.kg^{-1}$
dq	Quantité de chaleur	J
S	surface	m^2
M	Emitance	$W.m^{-2}$
A_{λ}	Absorbance à une longueur d'onde donnée	cm^{-1}
R	Compacité	m^{-1}
V	Volume	m^3
K	Constante d'étalonnage	-
I_s	Epaisseur du spécimen	m
I_0	Lumière incidente	-
I	Lumière transmise	-
\dot{m}	Débit massique	$kg.s^{-1}$

➤ Lettres grecques :

Symbole	Désignation	Unité
Δ	variation	-
λ	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
Φ	Flux de chaleur	W
φ	Densité de flux de chaleur	$W.m^{-2}$
ρ	Masse volumique	$kg.m^{-3}$
ε	Emissivité	-
σ	Constante de Stefan- Boltzmann	$W.m^{-2}.K^{-4}$

Nomenclature

➤ Indices :

Symbole	Désignation
f	Finale
i	Initiale
s	Solide
L	Liquide
p	Paroi
∞	Loin de la paroi
e	Echange
ff	Fin de fusion
df	Début de fusion
ee	Eau à l'entrée de l'échangeur
es	Eau à la sortie de l'échangeur
ae	Air à l'entrée
as	Air à la sortie

➤ Abréviation :

Abréviation	Désignation
BASF	Badische Anilin und Soda Fabrik
STS	Stockage thermique sensible
STL	Stockage thermique latent
MCP	Matériau à changement de phase
Pa	Paraffine
Pr	Perlite
Gr	Graphite
J	Jute
MEB	Microscope électronique à balayage
FT-IR	Transformation de fourrier infrarouge
DSC	Calorimétrie différentielle à balayage
HFM	Heat folowmeter

Liste des figures

Figure I.1 : schéma comparatif des inerties thermique en fonction de l'épaisseur et de la nature du matériau.....	1
Figure I.2 :.....	2
Figure I.3 : évolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.....	5
Figure I.4 : classification des MCP.....	6
Figure I.5 : Formule chimique des paraffines (a) n-paraffini (b) iso-paraffiniques.....	8
Figure I.6 : Représentation graphique d'un changement de phase avec surfusion.....	18
Figure I.7 : conditionnement des MCP dans un nodule.....	24
Figure I.8 : (a) conditionnement des MCP en sac plastique (b) en briquette plastique.....	24
Figure I.9 : Microcapsules de paraffines.....	25
Figure II.1 : Echangeurs tubulaire.....	30
Figure II.2 : Echangeurs à plaques.....	30
Figure II.3 : Echangeur à caloducs pour climatisation.....	31
Figure II.4 : Echangeur a micro canaux.....	31
Figure II.5 : échangeurs en graphite.....	32
Figure II.6 : classement des échangeurs suivant la compacité :.....	33
Figure II 7 : disposition des tubes.....	39
Figure II 8 : Ailette longitudinales minces.....	40
Figure II 9 : Ailette sous forme de barres.....	40
Figure II 10 : Ailette transversales.....	40
Figure II 11 : Ailette continues ou indépendantes	41
Figure II 12 : système actif mis au point par zalba et al	42
Figure II 13 : principe de fonctionnement du système Hed et al (d'après Hed et Bellander..	43
Figure II 14 : système de rafraichissement actif conçu par Turnpenny et al.....	44
Figure II 15 : principe de fonctionnement du système de rafraichissement conçu par Turnpenny.	45

Liste des figures

Figure III.1 : matériaux utilisés, (a) ; paraffine, (b) ; perlite, (c) ; graphite.....	47
Figure III.2 : perlite après lavage.....	49
Figure III.3 : perlite broyée (en poudre).....	49
Figure III.4 : prise de poids	50
Figure III.5 : étuve utilisé pour le séchage de la perlite.....	50
Figure III.6 : structure cristalline du graphite.....	52
Figure III.7 : tamisage de la perlite et du graphite.....	53
Figure III.8 : Influence de la forme sur le tamisage.....	53
Figure III.9 : pesée des substances.....	54
Figure III.10 : mise des matières dans des substances.....	54
Figure III.11 : bain marie utilisé.....	55
Figure III.12 : moule utilisé pour la réalisation des pastilles.....	56
Figure III.13 : pastilles de (40*40*6 mm ³).....	56
Figure III.14 : réalisation des pastilles avec la toile de jute.....	57
Figure III.15 : compressions des pastilles.....	58
Figure III.16 : Teste de perméabilité.....	59
Figure III.17 : échantillons pour le MEB .FT-IR	59
Figure III.18 : Microscope électronique à balayage.....	60
Figure III.19 : la forme des films.....	63
Figure III.20 : Image du Spectrophotomètre IR.....	64
Figure III.21 : (a) moule en verre, (b) le mélange introduit dans l’empreinte du moule.....	65
Figure III.22 : compression manuelle	66
Figure III.23 : plaques de (30*30*0.8 cm ³).....	66
Figure III.24 : Image globale de l’unité de conductivité thermique.....	67
Figure III.25 : Schéma du pycnomètre.....	71
Figure III.26 : Plaque et Tubes de cuivre.....	73
Figure III.27 :Baguettes de brasure.....	74
Figure III.28 : traçage	75
Figure III.29 : découpage.....	75
Figure III.30 : (a) plaque de (7*40 cm ²), (b) plaque de (6*6 cm ²).....	75
Figure III.31 : dimension des plaques.....	76

Liste des figures

Figure III.32 : les deux pièces coupées.....	77
Figure III.33 : réalisation des empoches avec pliage.....	77
Figure III.34 : les deux pièces obtenues.....	78
Figure III.35 : opération de soudage des pièces réalisées.....	78
Figure III.36 : la forme finale des pièces après soudage.....	78
Figure III.37 : (a) coupage, (b) les tubes de 40 cm de longueur.....	79
Figure III.38 : opération d'assemblage des pièces et les tubes.....	79
Figure III.39 : image finale des éléments de l'échangeur.....	80
Figure III.40 : Assemblage avec plaques en bois.....	80
Figure III.41 :Mastic de silicone utilisé.....	81
Figure III.42 : Image de l'échangeur sans collecteurs.....	81
Figure III.43 : phase de réalisation des collecteurs.....	82
Figure III.44 : perçage des collecteurs.....	83
Figure III.45 : Image de l'échangeur avec collecteur.....	83
Figure III.46 : image finale de l'échangeur.....	84

Liste des tableaux

Tableau I.1 : propriétés thermo physiques des paraffines.....	9
Tableau I.2 : Exemples de propriétés physiques de paraffines.....	12
Tableau I.3 : Propriétés thermo physiques des matières organiques non paraffiniques.....	13
Tableau I.4 : propriétés thermo physiques des Acide gras.....	14
Tableau I.6 : quelques eutectiques déjà utilisé dans le stockage thermique.....	21
Tableau III.1 : constituante de la perlite expansée.....	48
Tableau III.2 : proportion en masse des constituants.....	55

Introduction générale

Le stockage d'énergie est un enjeu à la hauteur de la consommation de celle-ci. Il est primordial pour les états de disposer d'un stock d'énergie stratégique essentiel, pour satisfaire les besoins énergétiques qui ne cessent pas de croître.

Le stockage d'énergie est une action qui consiste à placer une quantité d'énergie en des lieux donnés pour permettre son utilisation ultérieure. Le terme stocké est souvent employé pour désigner le stockage de matière qui contient cette énergie. Cette dernière est stockée soit sous forme chimique, soit thermique ou autre.

L'énergie thermique est stockée sous forme de chaleur sensible (solide-solide ou liquide-liquide), ou sous forme de chaleur latente (solide-liquide).

L'étude des phénomènes de stockage et déstockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase solide-liquide a suscité depuis déjà plusieurs décennies et suscite encore de nos jours beaucoup d'intérêts dans divers domaines scientifiques et secteurs technologiques. Un intérêt est accordé particulièrement aux applications en rapport avec les systèmes de stockage de chaleur ou de froid développés pour l'agroalimentaire ou pour le chauffage et la climatisation dans le secteur résidentiel ainsi que de dissipation de chaleur latente dans les systèmes passifs de refroidissement de composants électroniques.

La récupération de chaleur rejetée par des procédés industriels, le stockage d'énergie solaire durant le jour et le stockage d'énergie électrique pour diminuer le problème de pointe en utilisant des systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente représentent aujourd'hui des moyens efficaces pour économiser de l'énergie.

Les matériaux à changement de phase, appelés (MCP), sont des matériaux intelligents qui reposent sur l'application d'un principe physique simple : ils se liquéfient en absorbant de la chaleur à partir d'une certaine température caractéristique pour chaque type de matériau (en général fixée par leur formulation) et restituent cette énergie lorsque la température de leur environnement est inférieure à celle-ci. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines tels que : le stockage de l'énergie solaire, le refroidissement des boîtes de transport de produits sensibles, les systèmes de mémoire permanentes en informatique, les systèmes de climatisation (liquide frigorigène), l'industrie textile (par exemple les vêtements) ainsi que dans le domaine de la construction des bâtiments où ils sont utilisés dans les systèmes passifs et actifs.

En raison des problèmes rencontrés pour les systèmes passifs, les recherches sont actuellement basées sur les systèmes actifs et les travaux sont menés par des organismes spécialisés tels que BASF, TEAP...etc, et parmi ces systèmes, on peut citer le système de Zalba et al., le système de Hed Bellander, le système de Turnpenny...etc. L'incorporation des matériaux à changement de phase dans des échangeurs de chaleur a pour but d'améliorer leur efficacité énergétique qui est d'ailleurs l'objectif recherché dans notre travail.

Introduction générale

Notre étude consiste, en premier lieu, d'élaborer un composite (MCP + matrice) avec des proportions bien définies, et l'introduire ensuite dans un échangeur de chaleur réalisé a cet effet. Le mémoire de synthèse des travaux réalisés a été réparti comme suit :

Le premier chapitre est consacré à des rappels sur les notions sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase.

Le second chapitre porte sur les généralités sur les échangeurs de chaleur.

Le troisième chapitre est consacré aux différents matériaux et aux différentes méthodes expérimentales utilisées.

Enfin le quatrième chapitre est consacré à l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus.

Le mémoire se termine par une conclusion qui reprend l'essentiel des résultats obtenus et les perspectives à venir.

I.1) Introduction [1]

Les matériaux à changement de phase (MCP) dans le bâtiment ont pour but de stocker et déstocker de l'énergie thermique en fonction des besoins du chauffage et/ou du refroidissement. Par exemple, l'utilisation des MCP par intégration de ces derniers dans les enveloppes légères permet d'attribuer à celles-ci une inertie identique à celle des parois lourdes. D'après le fabricant de MCP, Société BASF, une paroi contenant 2cm de MCP fabriquée par BASF a la même performance en terme d'inertie thermique qu'une brique d'épaisseur de 36 cm ou un mur en béton d'épaisseur 24 cm ou du bois massif d'épaisseur 38 cm (voir figure I.1).

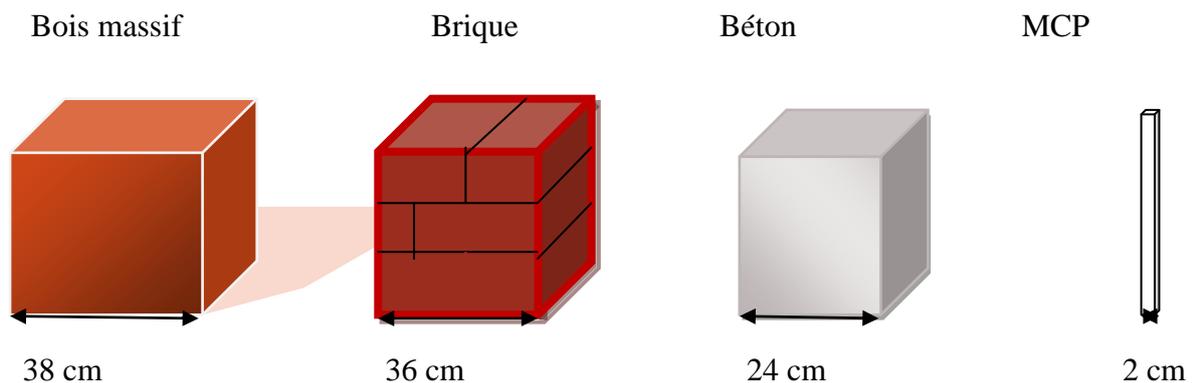


Figure I.1 : Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et de la nature du matériau.

L'énergie thermique est la somme du potentiel et des énergies cinétiques des atomes et des molécules qui composent la substance. À la suite des vibrations atomique et moléculaire l'énergie thermique d'excitation se propage dans la substance.

Ainsi l'énergie thermique peut être stockée comme un changement de l'énergie interne d'une substance en tant que chaleur sensible, chaleur latente, ou en combinaison de ces dernières.

I.2) Différentes formes de stockage de l'énergie thermique

Principalement l'énergie thermique est stockée sous deux formes, stockage par chaleur sensible à l'état liquide ou à l'état solide, et stockage par chaleur latente lors du changement de phase.

I.2.1) Stockage thermique sensible (STS)

Dans le stockage de chaleur sensible de l'énergie thermique est stockée en élevant la température d'un solide ou d'un liquide; la température du matériau de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée.

Les cycles de stockage et de récupération de la chaleur accumulée, peuvent être répétés plusieurs fois en utilisant le système de stockage de chaleur sensible sans aucun problème. C'est le plus important avantage de cette méthode.

Cependant, l'exigence d'un volume important du support de stockage peut être considérée comme un inconvénient pour ce système. Dans ce système, la quantité de chaleur dépend de la capacité calorifique du support de stockage, du changement de température et de la masse du matériau de stockage. La chaleur sensible peut être stockée à l'aide d'un lit de roches ou galets, dans le sol, la brique, le sable, l'eau, l'huile et l'air.

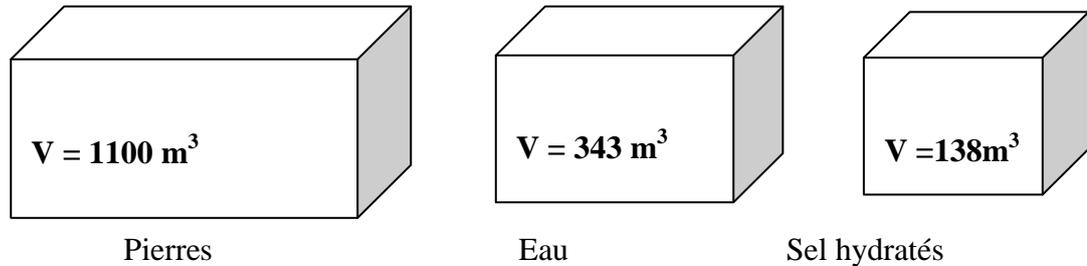


Figure I.2 : comparaison des volumes nécessaires au stockage d'une même quantité d'énergie

Pour une même quantité d'énergie stockée, il y a variation de volume d'une substance à une autre.

Ainsi, si à pression constante un corps solide ou un liquide de masse m et de capacité thermique massique c de température initiale T_1 , est chauffé jusqu'à la température finale T_2 , une quantité d'énergie donnée par sa variation d'enthalpie peut être stockée dans ce corps.

Cette quantité de chaleur est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\Delta H = H_{finale} - H_{initiale} = \int_{T_1}^{T_2} m \times c(T) dT \quad (\text{I.1})$$

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

$$\Delta H = m \times c \times (T_1 - T_2) \quad (\text{I.2})$$

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

On distingue alors les deux cas suivant :

- Si $T_2 > T_1$ on parlera de stockage du chaud.
- Si $T_2 < T_1$ on parlera de stockage du froid.

Pour le stockage par chaleur sensible, sont utilisés principalement des corps ayant des chaleurs spécifiques importantes comme par exemple des liquides tels que l'eau et des solides tels que des pierres.

I.2.2) Stockage thermique latent

La chaleur latente est l'énergie mise en jeu lors des changements d'état de la matière. La chaleur fournie au repos pendant la fusion se traduit par un accroissement des vibrations des molécules, mais par une augmentation de leur énergie potentielle leur permettant de quitter leur position d'équilibre. C'est la raison pour laquelle la température reste constante pendant toute la transformation. Cette température correspondant à la température de la transition de phase. Dans le cas d'un changement d'état (fusion), la quantité de chaleur mise en jeu s'écrit :

$$Q = m \times (h_f - h_i) = m \times \Delta h_f (J) \quad (\text{I.3})$$

Où Δh_f est l'enthalpie spécifique de fusion.

Généralement, il faut porter le matériau de la température initiale T_i à la température de fusion T_f et l'expression de l'enthalpie est :

$$Q = m \times (h_f - h_i) = m \times C_p \times (T_f - T_i) + m \times \Delta h_f (J) \quad (\text{I.4})$$

Dans le cas d'un corps pur, on trouve une courbe de variation des températures analogue à celle présentée par la figure 1.3. Pendant le chauffage du matériau avant sa température de fusion, on observe une variation linéaire de la température en fonction du temps tandis que pendant le changement d'état la température reste constante.

Si T_f est la température de changement de phase d'un corps pur qui passe de la température T_1 à la température T_2 , avec $T_1 \leq T_f \leq T_2$ alors l'énergie stockée lors de cette transformation est :

$$\Delta H = \int_{T_i}^{T_f} m \times c_s (T) dT + m \times L + \int_{T_f}^{T_2} m \times c_L (T) dT \quad (\text{I.5})$$

$C_s(T)$: chaleur spécifique du corps à l'état solide.

$C_L(T)$: chaleur spécifique du corps à l'état liquide.

L : chaleur latente de changement de phase.

On retrouve dans l'équation précédente deux termes de chaleur sensible en plus du terme mL représentant la chaleur latente due à la masse m .

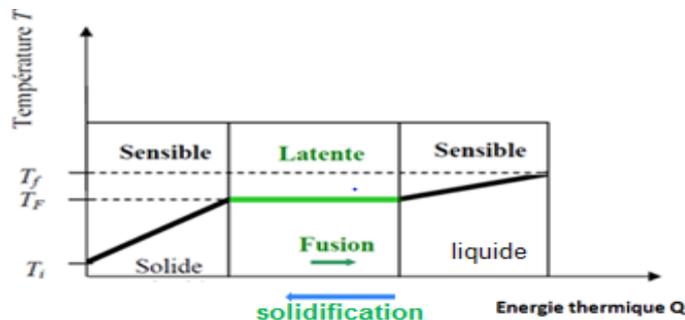


Figure I.3 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état

I.3) Les matériaux à changement de phase (MCP)

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

Il existe quatre types de transformations de MCP : gaz/liquide, gaz/solide, solide/solide et solide/liquide. Dans les systèmes de stockage d'énergie, On utilise en général les transformations solide/liquide car elles ont des Enthalpies de changement de phase élevées, et des expansions volumiques Réduites (<10%) lors de la fusion, d'après Kherrouf et al(2008). Parmi les MCP subissant cette transformation, nous avons trois groupes de matériaux : les organiques, les inorganiques et les eutectiques.

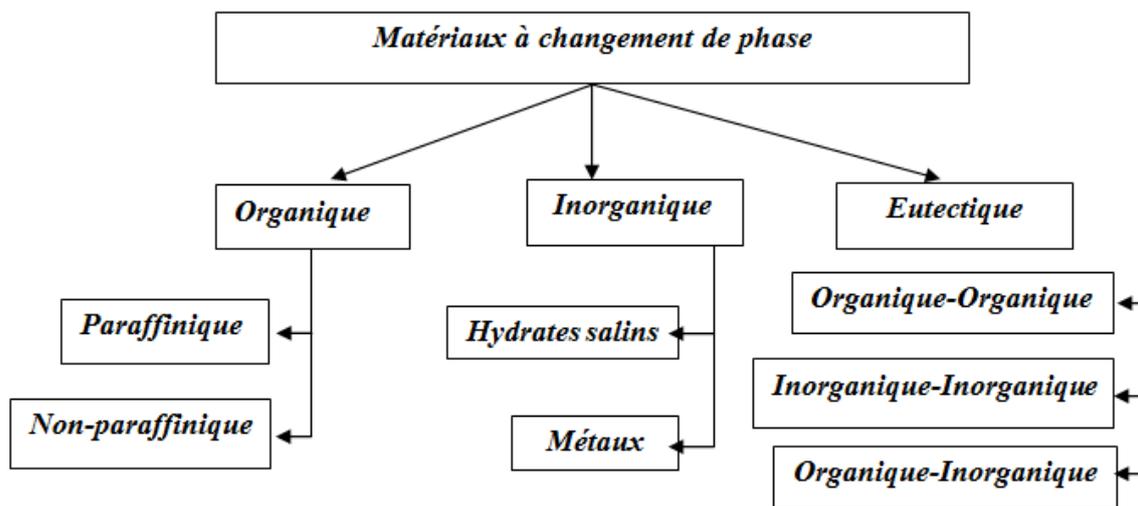


Figure I.4 : Classification des MCP

I.3.1) Les MCP organiques

Les matériaux ou les substances organiques ont une température de fusion comprise entre 0°C et 150°C. Les plus utilisés sont essentiellement à base de **paraffine**, des **acides gras** et des **alcools de sucre**. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques :

Ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables.

Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de température et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation, ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables (Farid et al, 2004 ; Vinet Veer et al).

I.3.1.1) Les composés organiques paraffiniques

Les MCPs organiques (paraffines) sont des matériaux organiques constitués de mélange d'hydrocarbures saturés (c'est-à-dire elles contiennent beaucoup d'atomes de carbone), de la famille des alcanes de formules générale C_nH_{2n+2} .

Elles sont soit extraites à partir du pétrole brut, soit synthétisées par un procédé chimique où intervient la catalyse du monoxyde de carbone et d'hydrogène en vue de les convertir en hydrocarbure (procédé Fischer-Tropsch).

Les molécules d'hydrocarbures saturés peuvent se présenter sous forme de chaîne de carbones linéaires, les hydrocarbures **n-paraffiniques**, ou bien sous forme de plusieurs branches, les hydrocarbures **iso-paraffiniques**.

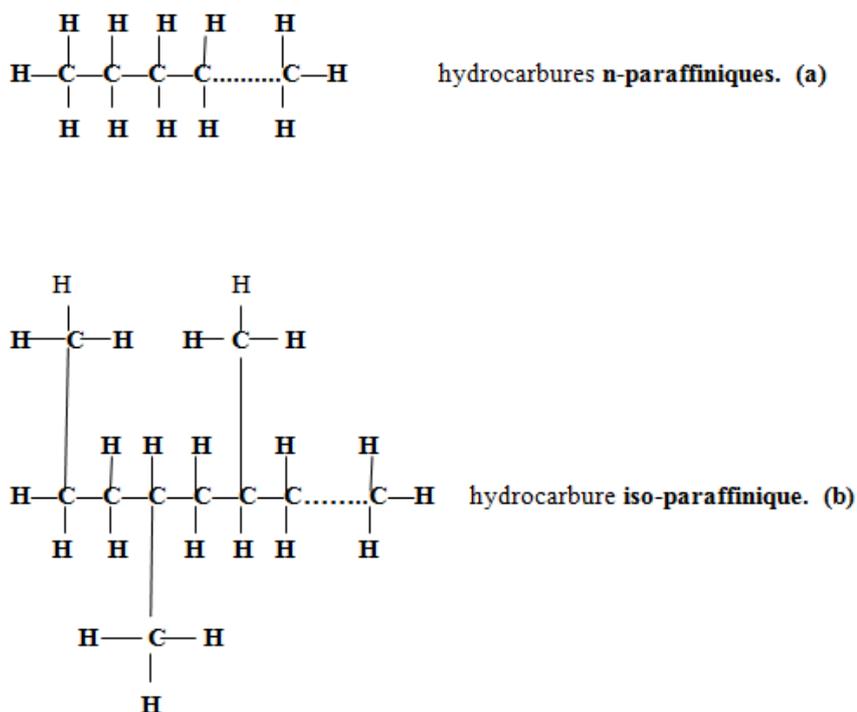


Figure I.5 : Formule chimique des paraffines(a) n-paraffini (b) iso-paraffiniques.

Le point de fusion des alcanes augmente avec le nombre croissant d'atomes de carbone. Les alcanes possèdent certaines caractéristiques favorables, telles que **la fusion congruente**, et de bonnes propriétés de **nucléation**, mais d'autre part ils présentent quelques effets indésirables tels que : une faible conductivité thermique, ils sont inflammables et incompatible avec le plastique.

On peut éliminer ces effets indésirables en modifiant légèrement la cire paraffinique. Il existe des méthodes développées pour augmenter la conductivité thermique et parmi ces dernières

l'utilisation du graphite expansé (un matériau composite MCP-graphite à une conductivité 100 fois plus que la paraffine pure).

On cite dans le tableau ci-dessous le point de fusion et la chaleur latente de fusion de certaines paraffines :

Nombres d'atomes de carbone	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
14	5.5	228
15	10	205
16	16.7	237.1
17	21.7	213
18	28	244
19	32	222
20	36.7	246
21	40.2	200
22	44	249
23	47.5	232
24	50.6	255
25	49.4	238
26	56.3	256
27	58.8	236
28	61.6	253
29	63.4	240
30	65.4	251
31	68	242
32	69.5	170
33	73.9	168
34	75.9	169

Tableau I.1 : propriétés thermo physiques des paraffines (Sharma et al 2009) [2]

I.3.1.2) Principales caractéristiques des paraffines

- L'enthalpie de fusion varie entre 180 et 230 kJ/kg. Cette valeur est grande par rapport à celle des autres matériaux organiques dont la capacité thermique massique est 2.1 kJ/(kg. K).
- La capacité volumique de stockage de chaleur est de l'ordre de **4 à 5** fois supérieure à celle de l'eau (1m³ de paraffine est équivalent à 5m³ d'eau).
- La surfusion est négligeable (faible). La pression de vapeur de fusion est faible.
- Elles sont stables chimiquement : stabilité chimique élevée par contre il est nécessaire de les protéger de l'air en particulier lorsqu'elles sont chaudes.
- Pas de ségrégation de phase.
- Les cires paraffiniques sont inertes chimiquement avec presque tous les matériaux. Il y a donc peu de problèmes de corrosion avec les paraffines et leur conteneur. En effet,

les cires paraffiniques sont utilisées pour protéger les matériaux contre la corrosion (tous les vernis utilisés dans l'automobile sont à base de paraffine).

- Les cires paraffiniques ne présentent aucun danger écologique. Elles n'ont pas d'effets négatifs sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes (exemple : enrobage du fromage rouge).
- Elles sont non toxiques et 100% recyclables.
- Quelques paraffines commerciales sont adaptées aux applications de l'énergie solaire.
- Pour les applications dans les bâtiments, une paroi contenant 3cm d'épaisseur de paraffine est l'équivalent thermique d'une paroi de 40cm de béton.
- La masse volumique de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850kg/m³, et celle de la phase solide varie de 800 à 900kg/m³. La dilatation volumique est autour de 15%. On peut éviter ou au moins réduire ce problème par un conditionnement adapté (exemple : la capsule KAPLAN ENERGIE, une partie de cette capsule se comporte comme un ressort).
- Les paraffines ordinaires sont des mélanges d'hydrocarbures et ont un prix raisonnable. En fonction de leur composition, elles ont des points de fusion variables. Par contre les cires paraffiniques pures sont très coûteuses.

Les deux principaux inconvénients sont les suivants :

- Les cires paraffiniques présentent une très faible conductivité thermique allant de **0.18 à 0.25 W/(m.K)**, ce qui correspond à la moitié de celle des hydrates salins. Cette faible conductivité thermique présente un handicap pour la cinétique de stockage et du déstockage de chaleur pendant les cycles **fusion/solidification**.
- Les cires paraffiniques sont facilement inflammables.

I.3.1.3) Les différentes cires paraffiniques

On donne ici quelques exemples de cires paraffiniques, soit pures soit en mélange :

- **n-octadecane (C₁₈H₃₈)** : sa température de fusion est 28°C, elle a une chaleur latente de fusion de 244 kJ/kg.
- **n-eicosane (C₂₀H₄₂)** : sa fusion est congruente à T=36.7°C, sa chaleur latente de fusion est de 247 kJ/kg.
Ces deux dernières cires sont très inflammables quand elles sont exposées à une flamme, et elles s'oxydent fortement. Par contre elles ne sont ni toxiques, ni corrosives; elles ont une bonne conductivité thermique, en revanche à l'état pur elles sont très chers.
- **Les cires blanches (112/118)** : elles sont issues du raffinage de pétrole brut. Elles font apparaître deux transitions de phase solide avant leur plage de fusion qui est comprise entre 42 et 48°C. Elles ont été soumises à 1743 cycles de fusion/cristallisation sans changement ni de la température de transition, ni du profil de transition.

- **P116** : cette cire a une chaleur latente de fusion de 210 kJ/kg et son domaine de fusion est compris entre 45 et 48°C. En forme de capsules sphériques, elle a subi 2600 cycles thermiques sans se détériorer.

Le tableau ci-dessous permet d'évaluer les variations des propriétés de quelques paraffines en fonction de leur masse moléculaire.

	Paraffines			
	Tétradécane	Héxadécane	Octadécane	Eicosane
Formule	C₁₄H₃₀	C₁₆H₃₄	C₁₈H₃₈	C₂₀H₄₂
Température de fusion (°C)	5.5	16.7	28	36.7
Enthalpie de fusion (kJ/kg)	226	237	244	247
Conductivité thermique (W/m.K)	0.15	0.15	0.15	0.15
Capacité thermique massique (kJ/kg.K)	2.07	2.11	2.16	2.21
Masse volumique solide (kg/m ³)	825	835	814	856
Masse volumique liquide (kg/m ³)	771	776	774	778
Retard à la solidification (°C)	Aucun	Négligeable	Négligeable	Aucun
Pression de vapeur (Pa)	133 à 75°C	133 à 105°C	133 à 75°C	133 à 100°C
Tension superficielle (N/m)	27.4*10 ⁻³	3.4	27.4*10 ⁻³	-
Viscosité (cP)	2.1	-	3.4	-

Tableau I.2 : Exemples de propriétés physiques de paraffines.

I.3.2) Les composés organiques non-paraffiniques :

Les composés organiques non-paraffiniques incluent plusieurs matières organiques comme les **acides gras**, les **alcools** et de **glycols** convenables pour le stockage d'énergie.

Les composés organiques non-paraffiniques sont les MCP les plus nombreux, avec des propriétés très variables. Ces matériaux sont inflammables et ne devraient donc pas être exposés aux hautes températures, aux flammes ou aux agents oxydants.

Un exemple de composés organiques non-paraffiniques sont donnés dans le tableau (I.3) avec leurs propriétés thermodynamiques

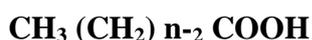
Matériaux	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
Acide formique	7.8	247
Acide caprylique	16.3	149
Glycérine	17.9	198.7
Acide D-lactic	26	184
Méthyle palmitate	29	205
Camphenilone	39	205
Docasylbromide	40	201
Caprylone	40	259
Phénol	41	120
Heptadécane	41	201
1-cyclohexylo octadécane	41	218
4-Heptadécane	41	197

Tableau I.3 : Propriétés thermo physiques des matières organiques non paraffiniques (Sharma et al, 2009) [2]

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

I.3.2.1) Les acides gras

Les acides gras sont des matières issues des huiles végétales ou animales (huiles saturées), ils ont la forme chimique suivante :



Comme il est facile de les incorporer directement dans les structures, ils sont considérés comme de bons candidats dans des applications de bâtiment. Certains acides gras sont jugés d'un intérêt certain pour des applications de stockage d'énergie thermique à basse température.

Un exemple d'acides gras avec leurs propriétés thermophysiques sont donnés dans le tableau suivant :

Matériaux	Formule	Points de fusion (°C)	Chaleur latente kJ/kg
Acide acétique	CH ₃ COOH	16.7	184
Acide caprique	CH ₃ (CH ₂) ₈ COOH	36	152
Acide laurique	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH	49	178
Acide myristique	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ COOH	58	199
Acide palmitique	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ COOH	55	163
Acide stéarique	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	69.4	199

Tableau I.4 : Propriétés thermophysiques des acides gras (Sharma et al, 2009) [2]

I.3.2.2) Les esters d'acides gras

Ces matériaux sont produits par estérification directe des acides gras séparés des huiles.

Quelques esters d'acides gras :

- ✓ Stéarate de butyle
- ✓ Stéarate de vinyle
- ✓ Méthyle-12 hydroxy stéarate

Ces esters sont utilisés pour le stockage passif de chaleur.

- ✓ Le palmitate d'isopropyle
- ✓ L'isopropyle stéarate

Ces esters sont utilisés pour le stockage d'énergie dans les pays chauds.

I.3.2.2.1) Propriétés des esters d'acides gras

- Ils ont une chaleur latente importante et une chaleur spécifique (C_p) entre 1.9 et 2.1 kJ/(kg.K).
- Le changement de volume lors de la fusion est négligeable.
- Ils sont stables chimiquement, non corrosifs, non toxiques.
- Ils ont d'excellentes caractéristiques fusion/solidification sans sous-refroidissement.

Ce dernier point leur donne un avantage important quant à leur utilisation comme MCP. Leur point de fusion pas très élevé les rend aptes aux applications de stockage d'énergie thermique à basse température.

I.4) Les MCP inorganiques

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de température de fusion comprise entre -100°C et $+1000^{\circ}\text{C}$. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0°C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0°C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieure à 150°C).

Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une conductivité thermique élevée. Ils ont une fusion nette (c'est-à-dire une plage de fusion étroite). Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leur utilisation sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agents de nucléation afin d'être fiables (Farid et al, 2004 et Vineet, 2005).

I.4.1) Les sels hydratés :

Les hydrates salins sont des mélanges de sels minéraux et d'eau formant un solide cristallin de formule générale $AB_n\text{H}_2\text{O}$, le plus connu est l'hydrate salin $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ car il a :

- Une chaleur latente de fusion élevée.
- Sa conductivité thermique peut être le double de celle des matériaux organiques.
- Une faible variation de volume pendant le changement de phase.
- Une bonne compatibilité avec le plastique (emballage).
- Une fusion congruente, non congruente, semi congruente.
- Coût variable.

D'autre part, les hydrates salins ont certains inconvénients tels que la fusion accompagnée de la séparation de phase (ségrégation de phase), le sous-refroidissement (surfusion) et le caractère corrosif.

Quelques méthodes sont élaborées pour empêcher la ségrégation de phase pour l'utilisation des hydrates salins comme MCP, sont l'addition d'un agent épaississant ou d'un agent de gélification de l'hydrate salin.

La première méthode, l'agent épaississant est ajouté pour augmenter la viscosité de l'hydrate salin.

La seconde méthode, l'hydrate salin est stabilisé dans les pores d'un polymère gel.

En outre, un agent de nucléation (poudres métalliques qui favorisent le démarrage de la cristallisation) est ajouté pour éviter le phénomène de surfusion.

I.4.1.1) La ségrégation de phase

Lorsque la fusion n'est pas congruente, on observe une ségrégation de phase (**exemple :**



Pour prévenir ce problème plusieurs techniques ont été testées comme l'utilisation d'agents épaississants.

Comme agents épaississants on utilise par exemple de la cellulose, du gel de silice de la silice...etc.

I.4.1.2) La surfusion : sous-refroidissement

La surfusion correspond à l'état liquide d'un corps tandis que sa température est inférieure à la température de cristallisation. Celle-ci n'apparaît que pour certains types de **MCP** comme les matériaux inorganiques.

Généralement on traite ce problème en ajoutant un agent de nucléation (poudre métallique) qui favorise le démarrage de la cristallisation.

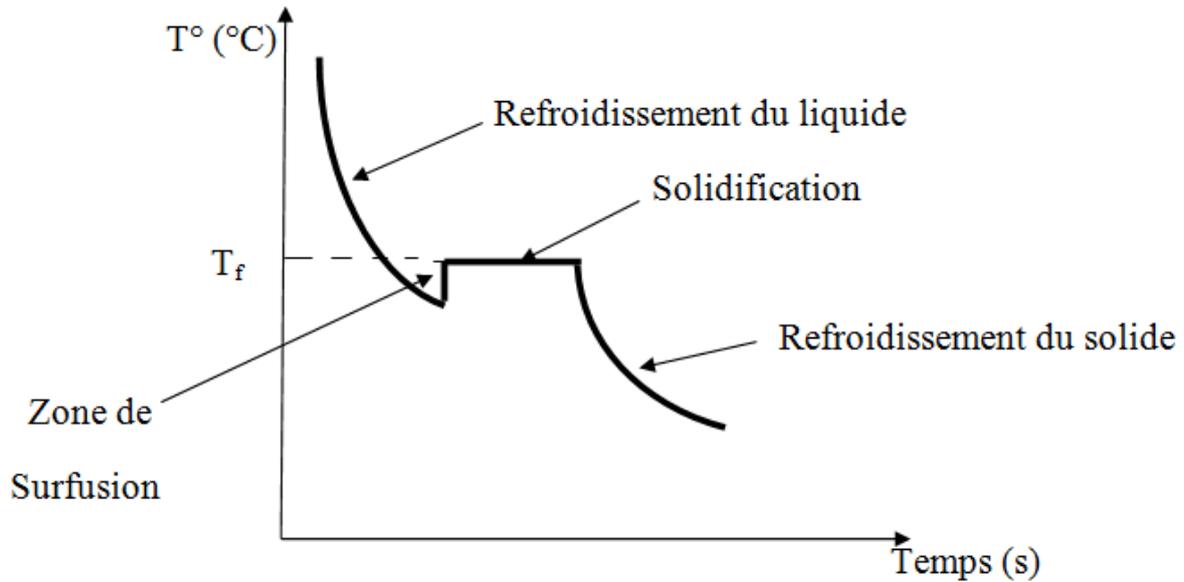


Figure I.6 : Représentation graphique d'un changement de phase avec surfusion.

I.4.2) Différents types d'hydrates salins :

- **Chlorure de Sodium bi hydrate ($\text{Na Cl}, 2\text{H}_2\text{O}$) :**
On l'utilise pour faire déneiger les routes.
- **Sulfate de Sodium déca hydrate ($\text{Na}_2 \text{SO}_4, 10\text{H}_2\text{O}$) :**

Cet hydrate n'est pas cher et il est facile à obtenir. La fusion de la phase solide est stable et non congruente à $T = 32.4^{\circ}\text{C}$. Ce point de fusion permet de l'utiliser dans de nombreuses applications. Il possède une grande chaleur de fusion $\Delta h = 252 \text{ kJ/kg}$. Par comparaison, pour une même quantité d'énergie stockée, il nécessite un volume égal à 1/3 de celui de la pierre et 2/5 de celui de l'eau.

Parmi ses inconvénients, on peut citer son caractère très corrosif vis-à-vis de nombreux matériaux de structure et sa faible conductivité thermique qui posent le problème du conditionnement. D'autre part, il subit un sous-refroidissement d'environ 15 à 30°C en dessous de sa température théorique de changement d'état. Pour y remédier, on rajoute du tétra borate de sodium déca hydrate ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) pour provoquer le changement de phase à sa température théorique.

A la température de fusion du sel de Glauber, 15% du sulfate de sodium reste sous une forme de sel anhydre insoluble. Etant deux fois plus dense que la solution saturée, la partie anhydre décante ne participera pas à la cristallisation sous forme de composé défini lorsque la chaleur sera retirée. Pour prévenir cet effet, un agent d'épaississement est utilisé pour garder l'hydrate en suspension jusqu'à ce qu'il puisse se reformer avec sa structure cristalline de composé défini quand la chaleur est enlevée.

- **Chlorure de Calcium hexa hydrate ($\text{CaCl}_2, 6\text{H}_2\text{O}$)**

Le chlorure de calcium hexa hydrate a souvent été utilisé pour le chauffage solaire passif. Son point de fusion est de l'ordre de 27 à 29.7°C et sa chaleur latente de fusion est de 170 kJ/kg. Son principal inconvénient est la formation de chlorure de calcium tétra hydrate ($\text{CaCl}_2, 4\text{H}_2\text{O}$). L'hexa hydrate a une fusion non-congruente que l'on peut rendre congruente en ajoutant du $\text{SrCl}_2, 6\text{H}_2\text{O}$.

- **Acétate de Sodium tri hydrate ($\text{Na CH}_3 \text{COO}, 3\text{H}_2\text{O}$)**

La fusion de cet hydrate est à $T = 58^\circ\text{C}$ et sa chaleur latente de fusion est de 170 à 264 kJ/kg. Il est adapté au chauffage des locaux et à la production d'eau chaude sanitaire.

- **Hydroxyde de Baryum octahydrate ($\text{Ba}(\text{OH})_2, 8\text{H}_2\text{O}$)**

Il a une fusion congruente à $T = 78^\circ\text{C}$ avec une chaleur de fusion élevée de 301 kJ/kg, mais il est fortement alcalin et toxique. Il absorbe le CO_2 de l'air et devient donc insoluble dans l'eau. Il réagit fortement avec l'aluminium.

La cristallisation se produit en blocs compacts mais quand on ajoute de l'eau supplémentaire (plus 6% en poids) la cristallisation se produit en petits cristaux.

- **Chlorure de Magnésium hexa hydrate ($\text{MgCl}_2, 6\text{H}_2\text{O}$) et Nitrate de Magnésium hexa hydrate ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2, 6\text{H}_2\text{O}$)**

Ces deux sels, avec additifs pour éviter la surfusion ont été testés après encapsulation. Les tests ont montré que ces capsules étaient détruites après quelques centaines de cycles thermiques. Des boîtes en acier doux avec un enduit sont recommandées pour leur conditionnement.

Tableau récapitulatif des principaux hydrates salins avec leurs caractéristiques

Hydrates salins	Température de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion KJ /Kg
Sel de Glauber($\text{Na}_2\text{SO}_4, 10\text{H}_2\text{O}$)	32.4	252
Chlorure de calcium, hexa hydrate($\text{CaCl}_2, 6\text{H}_2\text{O}$)	27 – 30	190
Acétate de sodium tri hydrate($\text{Na CH}_3 \text{COOH}, 3\text{H}_2\text{O}$)	58	170 – 264
$\text{NH}_4, \text{Al}(\text{SO}_4)_2, 12\text{H}_2\text{O}$	95	238.5
Phosphate de sodium dodécahydrate($\text{Na}_3, \text{PO}_4, 12\text{H}_2\text{O}$)	77	213
Pyrophosphate de sodium décahydrate sous forme de capsules (calotherm70)	70	184
Hydroxyde de Baryum octahydrate($\text{Ba}(\text{OH})_2, 8\text{H}_2\text{O}$)	78	301
Carbonate de sodium décahydrate($\text{Na}_2\text{CO}_3, 10\text{H}_2\text{O}$)	32 – 35	247
Nitrate de calcium tétra	40 – 43	140

hydrate($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)		
---	--	--

Tableau I.4 : Principaux hydrates salins avec leurs caractéristiques (Jotshi et al) [3]**I.5) Les MCP eutectiques**

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs en général. Ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celles des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels (VineetVeer et BUDDHI, 2005).

On cite dans le tableau ci-dessous quelques eutectiques déjà utilisés pour les applications de stockage thermique.

Eutectiques inorganiques	Point de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [kJ/kg]
49.3% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 50.7% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	58	132.3
61.5% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 38.5% NH_4NO_3	51	131.1
58.3% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 41.7% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	58	106
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + $\text{CaBr}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	14	140
Eutectiques organiques		
AcidesCaprique-Lauriques	18	120
AcidesPalmitique-Laurique	33	145
AcidesStéariqueLaurique	34	150

Tableau I.6 : Quelques eutectiques déjà utilisés dans le stockage thermique (S.M.Hasnain 1997) [4]**I.6) Choix du MCP**

Les matériaux à changement de phase possèdent certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques qui sont définies à partir d'un certain nombre de critères, selon le domaine d'application.

Le matériau changement de phase doit avoir :

I.6.1) Critère thermique

- Un niveau de température de changement de phase adapté à l'application.
- Une valeur de la chaleur latente de changement de phase supérieure à 130 KJ /Kg.
- Une bonne conductivité thermique pour assurer une cinétique de charge et de décharge rapide.

I.6.2) Critères physiques

- Une faible pression de vapeur pour minimiser les problèmes de pression sur les systèmes de stockage.
- Une faible variation de volume lors du changement d'état. Une masse volumique élevée permet de réaliser un stockage suffisant avec le volume le plus faible possible.
- Une fusion congruente lors de l'utilisation d'un corps composé (pas de ségrégation de phase).

I.6.3) Critères cinétiques

- Les cinétiques (vitesses) de charge et de décharge doivent être rapides.
- Pas de surfusion, cause de problème pour le stockage.
- Stabilité du MCP pendant les cycles thermiques.

I.6.4) Critères chimiques

Le matériau à changement de phase doit montrer :

- Une stabilité chimique avec les autres matériaux.
- Une stabilité chimique avec le taux et les niveaux de température.
- Une compatibilité avec les matériaux du réservoir de stockage pour chaque phase, ceci pour tout phénomène de corrosion, de réaction chimique ou électrochimique.
- Un bon taux de cristallisation facilite le passage de l'état fusion à l'état cristallisation.
- Ininflammabilité.
- Non toxique.

I.6.5) Critères économiques

- Un coût raisonnable.
- Une bonne disponibilité.

I.7) Méthodes de conditionnement des MCP

I.7.1) Principe de conditionnement :

- Le MCP et le conteneur (l'enveloppe) doivent être compatibles.
- A la fusion le MCP doit avoir une faible viscosité.
- Le taux de fuite est fortement augmenté, pour cela le réservoir de stockage doit être très étanche.

- Le changement de phase du MCP provoque une variation de volume. Cette variation de volume peut être à l'origine d'une rupture de l'enveloppe du réservoir.

Les principales techniques existantes pour conditionner les MCP sont :

I.7.2) Les macro-encapsulations :

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

Il existe des procédés industriels qui utilisent le conditionnement dans des sphères de matière plastique ou nodules.

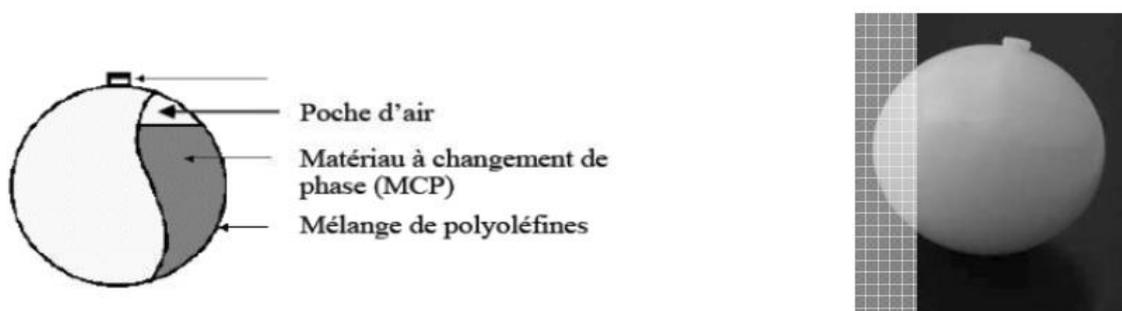


Figure I.7 : Conditionnement des MCP dans un nodule



a)



b)

Figure I.8 : a) Conditionnement des MCP en sac aluminium, b) en briquette plastique.

I.7.3) La micro-encapsulation :

La micro-encapsulation est un procédé physique ou chimique qui permet d'emprisonner de petites gouttes solides ou liquides dans une coquille solide de quelques microns de diamètres de (1 à 1000 μm), en général entre 5 et 20 μm .

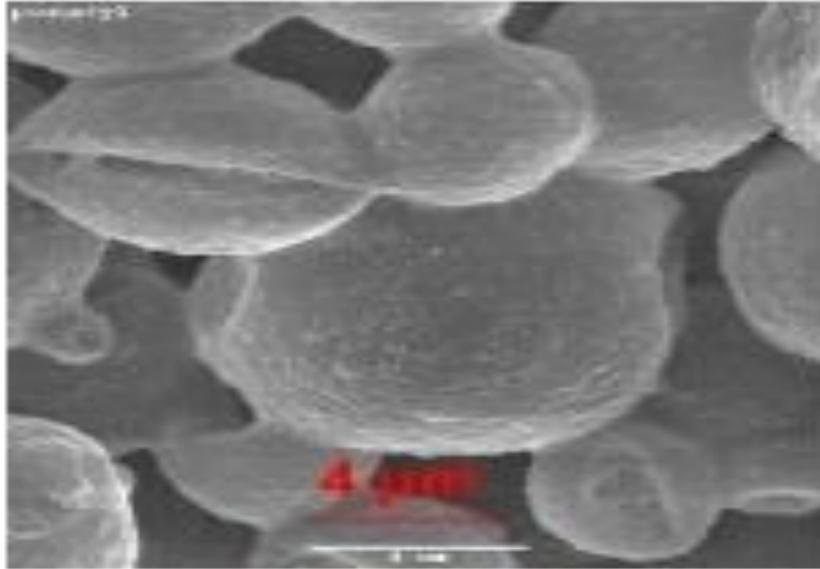


Figure I.9 : Microcapsules de paraffines.

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

Chapitre II : Généralités sur les échangeurs de chaleur

II.1) Introduction

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un dispositif essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie. Une grande part de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés. On les utilise principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production de l'énergie, etc....), du transport (automobile, aéronautique, marine), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation...etc). Le choix d'un échangeur de chaleur pour une application donnée dépend de nombreux paramètres : domaine de température et de pression des fluides, propriétés physiques et agressivité de ces fluides.

Il est évident que le fait de disposer d'un échangeur bien adapté, bien dimensionné, bien réalisé et bien utilisé permet un gain de rendement et d'énergie.

II-2) Définition [5]

Les échangeurs de chaleur sont des composants incontournables dans les systèmes énergétiques et des procédés industriels. Le principe le plus général consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique, à travers une paroi qui est le plus souvent métallique, ce qui favorise les échanges de chaleur. Le fluide chaud circule depuis une entrée de l'échangeur jusqu'à sa sortie en transférant une partie de son enthalpie à un fluide froid qui lui aussi circule entre une entrée et une sortie distinctes de celles du fluide chaud. Ces appareils sont d'une très grande diversité puisqu'ils vont du radiateur de chauffage central aux générateurs de vapeur des centrales nucléaires, en passant par les échangeurs des moteurs turbocompressés et les récupérateurs divers, mais tous font appel essentiellement aux mécanismes des transferts thermiques.

II-3) Modes de transfert de chaleur [6]

Le transfert d'énergie thermique est une transmission de cette énergie d'une région à une autre, sous l'influence d'une différence de températures. On reconnaît classiquement trois modes de transmission de chaleur : la *Conduction*, la *Convection* et le *Rayonnement*.

II-3.1) Transfert de chaleur par conduction

Dans la transmission par conduction la chaleur se diffuse de proche en proche d'une particule à l'autre grâce aux vibrations des atomes ou des molécules et du mouvement des électrons; ce mode de transfert nécessite donc une présence de matière, mais sans déplacement macroscopique de celle-ci. Le transfert de chaleur par conduction est régi par la

Chapitre II : Généralités sur les échangeurs de chaleur

loi de Fourier, établie expérimentalement pour le cas d'un transfert unidirectionnel d'un corps solide indéformable.

$$dq = -\lambda S \frac{dT}{dx} dt \quad (\text{II.1})$$

Où λ est la conductivité thermique du matériau.

Le flux de chaleur s'écrit alors:

$$\Phi = \frac{dq}{dt} = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (\text{II.2})$$

La densité de flux de chaleur s'exprime par :

$$\varphi = \frac{1}{S} \frac{dq}{dt} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (\text{II.3})$$

II.3.2) Transfert de chaleur par convection

En ce qui concerne la convection, le transfert de chaleur se fait par le mouvement de fluide, sous l'effet d'une variation de température ou d'une force extérieure : dans le premier cas il s'agit d'une convection naturelle et dans le second d'une convection forcée. Ce mode de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\Phi = h S (T_p - T_\infty) \quad (\text{II.4})$$

h : coefficient d'échange convectif.

S : surface d'échange en contact avec le fluide.

T_p : température de la paroi.

T_∞ : température loin de la paroi.

II.3.3) Rayonnement

Le rayonnement est le seul mode de transfert de chaleur qui ne nécessite pas de support matériel, il peut avoir lieu entre deux corps placés dans le vide. Des ondes électromagnétiques véhiculent la chaleur, cette puissance est évaluée par la loi de Stephan Boltzmann :

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{II.5})$$

Où ε est l'émissivité de la surface.

σ est la constante de Stephan Boltzmann et vaut $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

Après avoir défini les modes de transfert de chaleur, nous allons passer à un cas pratique (les échangeurs de chaleur), où ces différents modes de transfert de chaleur

Chapitre II : Généralités sur les échangeurs de chaleur

peuvent coexister à la fois. Cependant les échangeurs radiatifs n'interviennent que très rarement dans les échangeurs de chaleur.

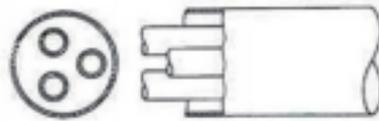
II.4) Critères de classement des échangeurs de chaleur : [5]

Il existe plusieurs critères de classement, parmi eux on cite :

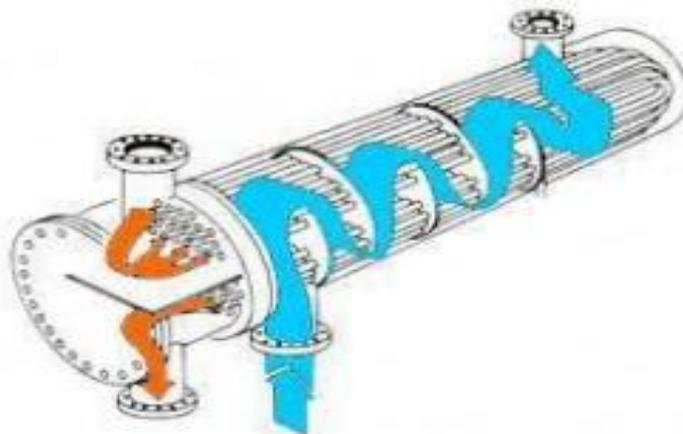
II.4.1) Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

- **à tubes** : monotube, à tube séparés, à tube à ailettes, coaxiaux ou multitubulaires (Figure II.1)
- **à plaques** : à surface primaire ou à surface secondaire (Figure II.2)
- **autres types** : à caloducs (Figure II.3), micro échangeurs (Figure II.4), échangeurs non métalliques (céramique, polymère, graphite, verre, Figure II.5).



a-Echangeur à tubes séparés



b-Echangeur tubes et calandre

Figure II.1 : Echangeurs tubulaires



Figure II.2 : Echangeurs à plaques



Figure II.3 : Echangeur à caloducs pour climatisation



Figure II.4 : Echangeur à microcanaux

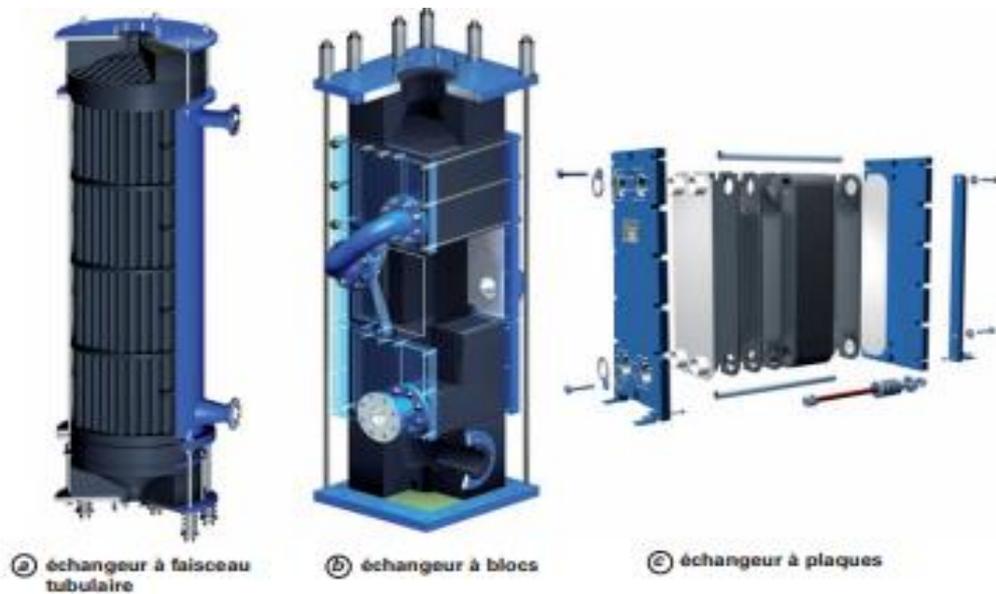


Figure II.5 : Echangeurs en graphite.

II.4.2) Classement suivant le mode de transfert de chaleur

Les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) sont couplés dans la plupart des applications (chambre de combustion, récupération sur les fumées...etc). Il y a souvent un mode de transfert prédominant. Pour tout échangeur avec transfert de chaleur à travers une paroi, la conduction intervient.

II.4.3) Classement suivant le procédé de transfert de chaleur

Suivant qu'il y a ou non stockage de chaleur, on définit un fonctionnement en récupération ou en régénérateur de chaleur :

Chapitre II : Généralités sur les échangeurs de chaleur

- Transfert sans stockage, donc en récupérateur, avec **2** ou **n** passages et un écoulement en général continu.
- Transfert avec stockage, donc en régénérateur, avec un seul passage et un écoulement intermittent, la matrice de stockage étant statique ou dynamique.

II.4.4) Classement fonctionnel

Le passage des fluides dans l'échangeur peut s'effectuer avec ou sans changement de phase, selon le cas de figure il s'agira d'un écoulement monophasique ou diphasique. On distingue alors :

- Le cas de deux fluides en écoulement monophasique.
- Le cas d'un seul fluide en écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs.
- Le cas de deux fluides en écoulement avec changement de phase, cas des évapo-condenseur

II.4.5) Classement suivant la compacité de l'échangeur [5]

La compacité est définie par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. R.K. SHAH propose qu'un échangeur soit considéré comme compact si sa compacité est supérieure à $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Une classification suivant la compacité peut être schématisée comme suit :

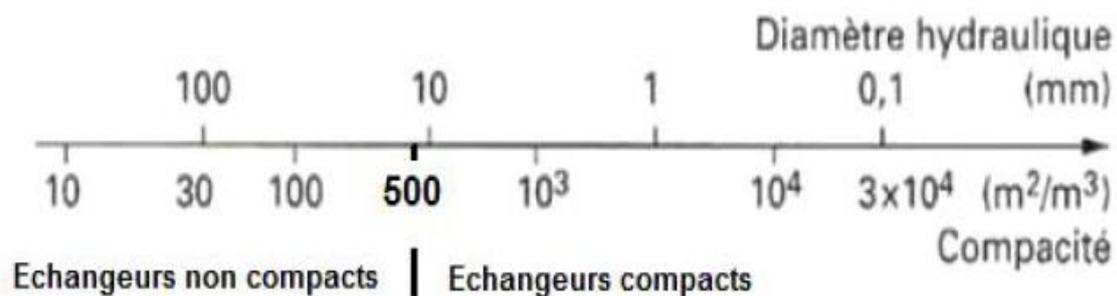


Figure II.6 : Classement des échangeurs suivant la compacité

Les échangeurs de chaleur peuvent être classés compacts ou non compacts suivant leurs diamètres hydrauliques. Plus le diamètre hydraulique est grand moins l'échangeur est compact, et plus le diamètre hydraulique est petit l'échangeur est compact.

II.4.6) Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange

On retiendra deux types de parois :

Chapitre II : Généralités sur les échangeurs de chaleur

- Les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : super alliage, métaux ou alliages réfractaires.
- Les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc.

II.4.7) Classement suivant le sens relatif des écoulements des deux fluides :

- Les échangeurs à courants parallèles (Co-courants) ou échangeurs anti-méthodique : l'écoulement des deux fluides parallèles s'effectue dans le même sens.
- Les échangeurs à contre-courants ou échangeurs méthodiques : l'écoulement des deux fluides est parallèle mais en sens contraire.
- Les échangeurs a courants croisés avec ou sans brassage : les lignes de courants des deux fluides sont perpendiculaires l'une par rapport à l'autre.

II.5) Principales caractéristiques des échangeurs [7]

Les échangeurs de chaleur sont caractérisés essentiellement par :

- La nature de la source chaude ou froide qui peut être sous forme gazeuse (air), liquide (eau) ou solide (sol).
- La fonction de l'échangeur : un échangeur de chaleur peut aussi bien jouer le rôle d'un évaporateur ; refroidisseur de gaz ou de liquide, que celui d'un condenseur ; refroidi par un gaz ou un liquide.
- Les conditions de fonctionnement : les conditions de température supportable par les parois de l'échangeur, il faut aussi éviter l'accumulation thermique qui peut engendrer du gèle sur les parois. La pression du fluide qui ne doit pas dépasser les limites du matériau constituant l'échangeur. Le pincement, c'est-à-dire le minimal de température entre les deux fluides.
- Leurs géométries : les dimensions extérieures, d'un échangeur sont très importantes car elles ont un lien direct avec l'encombrement de ce dernier. On a aussi la disposition des tubes, qui peut être alignée ou en quinconce avec un entraxe bien défini, leurs diamètres intérieurs et extérieurs, qui définissent l'épaisseur des tubes.
- La nature du matériau qui les compose : les matériaux dont les échangeurs sont composés, dépendent de la nature des sources de chaleurs ; on utilise de l'acier ordinaire pour l'ammoniac, des métaux cuivrés pour les fluides halogénés, aluminium et ses alliages ainsi que des aciers spéciaux inoxydables. Les contraintes mécaniques, thermiques et financières, sont aussi des paramètres influant sur la nature des matériaux des échangeurs. Pour les ailettes, on choisit généralement l'aluminium, qui est un matériau léger et bon conducteur.
- Les caractéristiques de fonctionnement :
 - ✓ Le coefficient global d'échange thermique.
 - ✓ Perte de pression pour le circuit du fluide (chaud ou froid) et pour celui du frigorigène.

Chapitre II : Généralités sur les échangeurs de chaleur

- ✓ Mode de réglage (par exemple ; contrôle de la pression du frigorigène, du givrage ou de la composition de l'eau).
- Les particularités d'entretien : qui sont souvent délicates,
 - ✓ Purge (incondensable, huile).
 - ✓ Nettoyage, dégivrage, dépoussiérage et détartrage.
 - ✓ Traitements annexes (adoucissement de l'eau, filtration).

II.6) Echangeur compact

Un échangeur compact, est un échangeur dont la compacité est supérieure à $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Autrement dit c'est un échangeur qui présente la plus grande surface d'échange sous un volume réduit. L'échangeur de chaleur se fait généralement entre deux types de fluides distincts. Un fluide circulant à l'extérieur, sera le fluide traité (chauffé ou refroidi), et un fluide circulant à l'intérieur, sera le fluide servant à ce traitement. Dans notre cas on a considéré l'air comme fluide extérieur et l'eau comme fluide intérieur.

La compacité étant définie par le rapport (R) entre la surface d'échange (S_e) et le volume externe V :

$$R = \frac{S_e}{V} \quad (II.6)$$

Donc, l'encombrement d'un échangeur sera principalement fonction de sa surface externe, car le fluide externe (air) est plus mauvais convecteur que le fluide interne (eau).

II.7) Echangeur conventionnel [7]

L'échangeur conventionnel est composé de tubes lisses tel que la surface d'échange extérieure est identique à la surface d'échange intérieure.

La compacité C_t énoncée ci-dessus n'est fonction que des paramètres suivants :

- Diamètre externe des tubes.
- Disposition relative des tubes (alignés ou quinconces).
- Espacement des tubes.

Afin d'obtenir un échangeur compact on se doit d'augmenter cette surface d'échange en utilisant des ailettes.

II.8) Echangeurs tubulaires [5]

II.8.1) Différentes catégories existantes

Pour des raisons historique et économique, les échangeurs utilisant des tubes comme constituante principal de la paroi d'échange sont les plus répandus. On peut distinguer trois catégories en fonction du nombre de tubes et de leur arrangement, qui autorisent une surface d'échange croissante entre les deux fluides du 1m^2 à quelques milliers de m^2 :

Chapitre II : Généralités sur les échangeurs de chaleur

- **Echangeur monotube**, dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentín ou d'un drapeau.
- **Echangeur bitube ou coaxial**, dans lequel les deux tubes sont concentriques et l'échangeur est souvent cintré pour limiter son encombrement ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur.
- **Echangeur multitubulaire**, existant sous plusieurs formes :
 - **Echangeur à tubes séparés**
 - **Echangeur à tubes rapprochés**
 - **Echangeur à tubes et calandre**

II.9) Echangeurs à tubes ailettes :

Lorsque l'un des fluides transitant dans l'échangeur s'avère nettement moins bon caloporteur que l'autre, l'utilisation d'ailettes s'impose autour des tubes ou quelques fois dans les tubes afin que la résistance thermique globale ne soit pas principalement due au fluide ayant le plus petit coefficient d'échange thermique. C'est le cas des échangeurs gaz-liquide et liquide-gaz utilisés dans la récupération thermique sur les fumées ou les gaz chauds ou dans les différents systèmes thermodynamiques tels que les pompes à chaleur ou les groupes de réfrigération ; en génie climatique, ces échangeurs sont appelés **batteries à ailettes**.

Les batteries à ailettes sont constituées d'un faisceau de tubes, répartis en rangs ou nappes, dans lesquels circule un fluide caloporteur ayant un bon coefficient d'échange. Le fluide extérieur étant un gaz (air généralement), un ailettement externe des tubes est nécessaire pour diminuer l'écart entre les résistances thermiques externe et interne.

II.9.1) Constituants d'une batterie :

Ce type d'échangeurs est constitué principalement de tubes ainsi que d'ailettes, qui viennent augmenter la surface d'échange.

II.9.1.1) Les tubes

Ce sont des tubes dont le diamètre est normalisé et correspond au diamètre extérieur, ils sont généralement en acier inoxydable, en cuivre, en laiton, en verre, en aluminium ou en matière plastique. Le choix du matériau dépend des fluides utilisés.

Deux dispositions de tubes sont possibles :

- Tubes alignés : avec un pas carré c'est-à-dire que les tubes sont disposés aux sommets d'un carré.
- Tubes en quinconce : avec un pas triangulaire c'est-à-dire que les tubes sont disposés aux sommets d'un triangle.

Chapitre II : Généralités sur les échangeurs de chaleur

La première disposition offre un nettoyage plus facile de l'échangeur, tandis que la deuxième est plus compacte, plus économique et offre un meilleur coefficient d'échange.

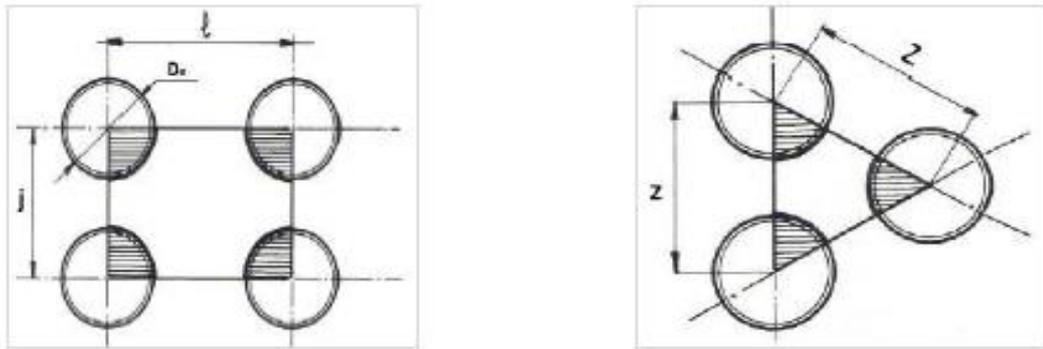


Figure II 7 : Disposition des tubes.

II.9.1.2) Les ailettes [7]

Les ailettes sont de fines lames métalliques, fabriquées d'un métal bon conducteur, elles permettent d'augmenter la surface d'échange, ainsi que le coefficient d'échange thermique. Elles seront placées du côté de la paroi présentant le plus faible coefficient d'échange convectif.

II.9.1.2.1) Différents types d'ailettes :

Il existe une grande variété d'ailettes, on peut citer :

- **Ailettes longitudinales minces :**
 - a) A section constante.
 - b) A section variable.
 - c) A section ramifiée.

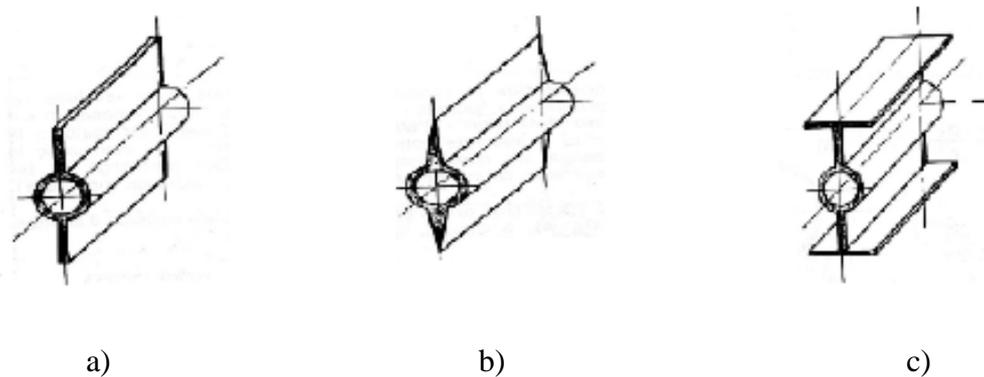


Figure II 8 : Ailettes longitudinales minces

- **Ailettes linéaires sous forme de barres de sections diverses**
 - a) A section constante (circulaire, carré).

b) A section variable (conique, aiguille).



Figure II 9 : Ailettes sous forme de barres

➤ **Ailettes transversales :**

- a. A section constante (carrée, circulaire).
- b. A section variable
- c. Ailettes hélicoïdales.

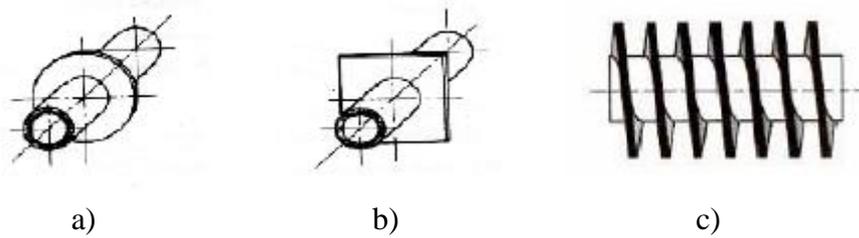


Figure II 10 : Ailettes transversales

➤ **Ailettes continues ou indépendantes :**

- a. Continues planes.
- b. Continues ondulées.
- c. Indépendantes.

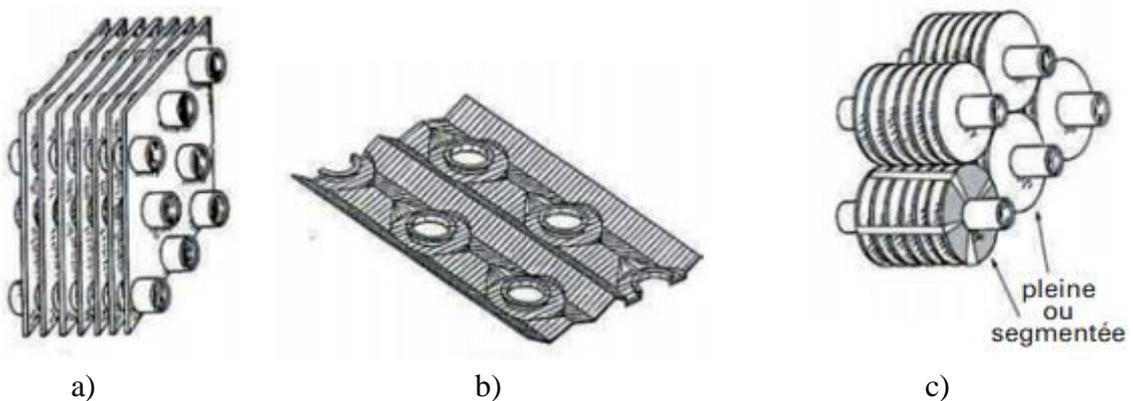


Figure II 11 : Ailettes continues ou indépendantes

II.10) Quelques systèmes d'échangeurs Air MCP : [8]

II.10.1) Le système de Zalba et al.

Le système d'échangeur actif mis au point par Zalba et al. (2004) est un circuit d'air fermé (Cf. figure II.12) constitué d'un ventilateur (1) pour faire circuler l'air dans le dispositif expérimental, d'un dispositif qui permet de chauffer et de refroidir de l'air à la température désirée (2), d'un débitmètre pour mesurer les débits d'air (3) et d'un système de stockage d'énergie thermique (4). Ce dernier est une vésicule d'encapsulations de forme rectangulaire (Figure II.12)

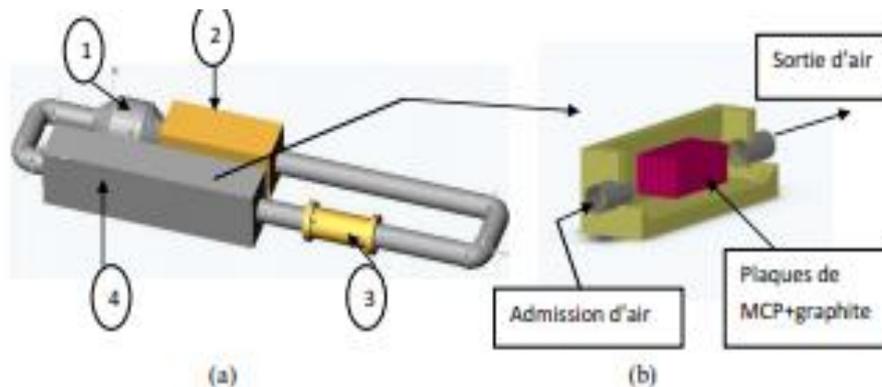
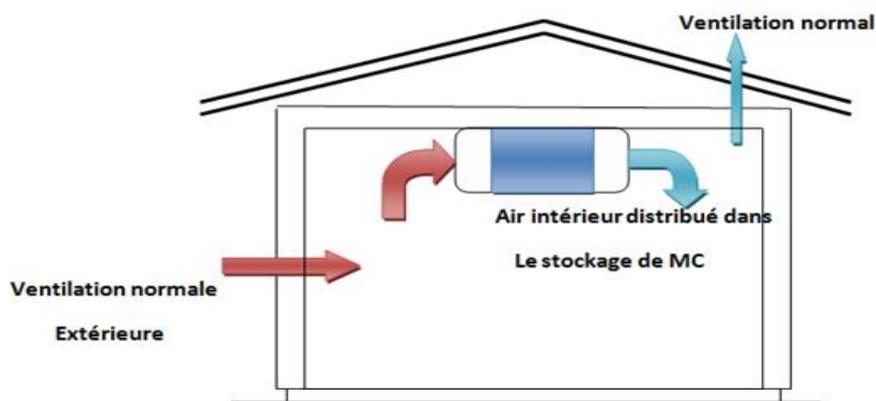


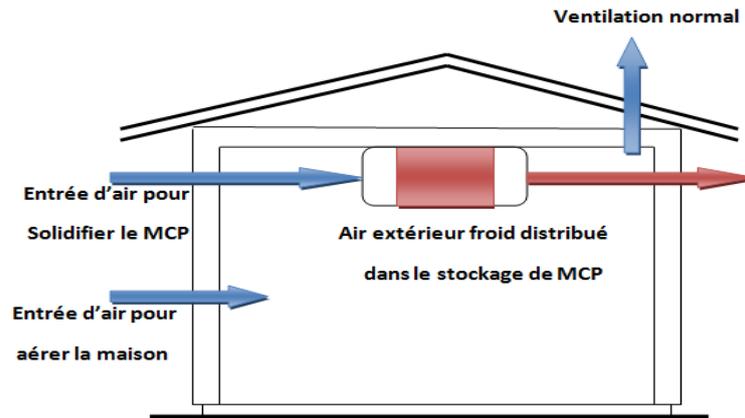
Figure II.12 : Système actif mis au point par Zalba et al. : a) dispositif expérimental, b) système de stockage d'énergie thermique

II.10.2) Le système de Hed Bellander :

Hed et Bellander (2005) ont mis au point un système actif de rafraîchissement à base de MCP. La figure II.13a représente le principe de fonctionnement durant la journée où l'air chaud circule dans le système pour faire fondre le MCP et l'air rafraîchi issu du système permet d'améliorer le confort thermique de la maison. La figure II.13b représente le principe de fonctionnement en nocturne où nous disposons de deux entrées d'air : l'une pour solidifier le MCP et l'autre pour aérer la maison.



a)



b)

Figure II.13 : Principe de fonctionnement du système Hed et al. (d'après Hed et Bellander)

II.10.3) Le système Turnpenny et al.

Turnpenny et al. (1999, 2000) ont mis au point un système de chauffage composé d'un certain nombre de caloducs contenant des MCP disposée en cercle monté près du plafond sur un support avec ventilateur au centre du cercle (Figure II.14)



Figure II 14 : Système de rafraîchissement actif conçu par Turnpenny et al.

Le principe de fonctionnement est le suivant : la nuit (Figure II.15.a), on ouvre les volets. L'air frais de l'extérieur est aspiré. Une partie de cet air va circuler autour des caloducs, ce qui va permettre aux MCPs de se solidifier. Cet air est ensuite évacué vers l'extérieur à l'aide d'un extracteur d'air. L'autre partie de l'air va permettre d'aérer la salle. La journée (Figure II.15.b) les volets sont à peine fermés, l'air chaud de la salle est tiré sur les extrémités des caloducs. Elle va circuler le long des caloducs.

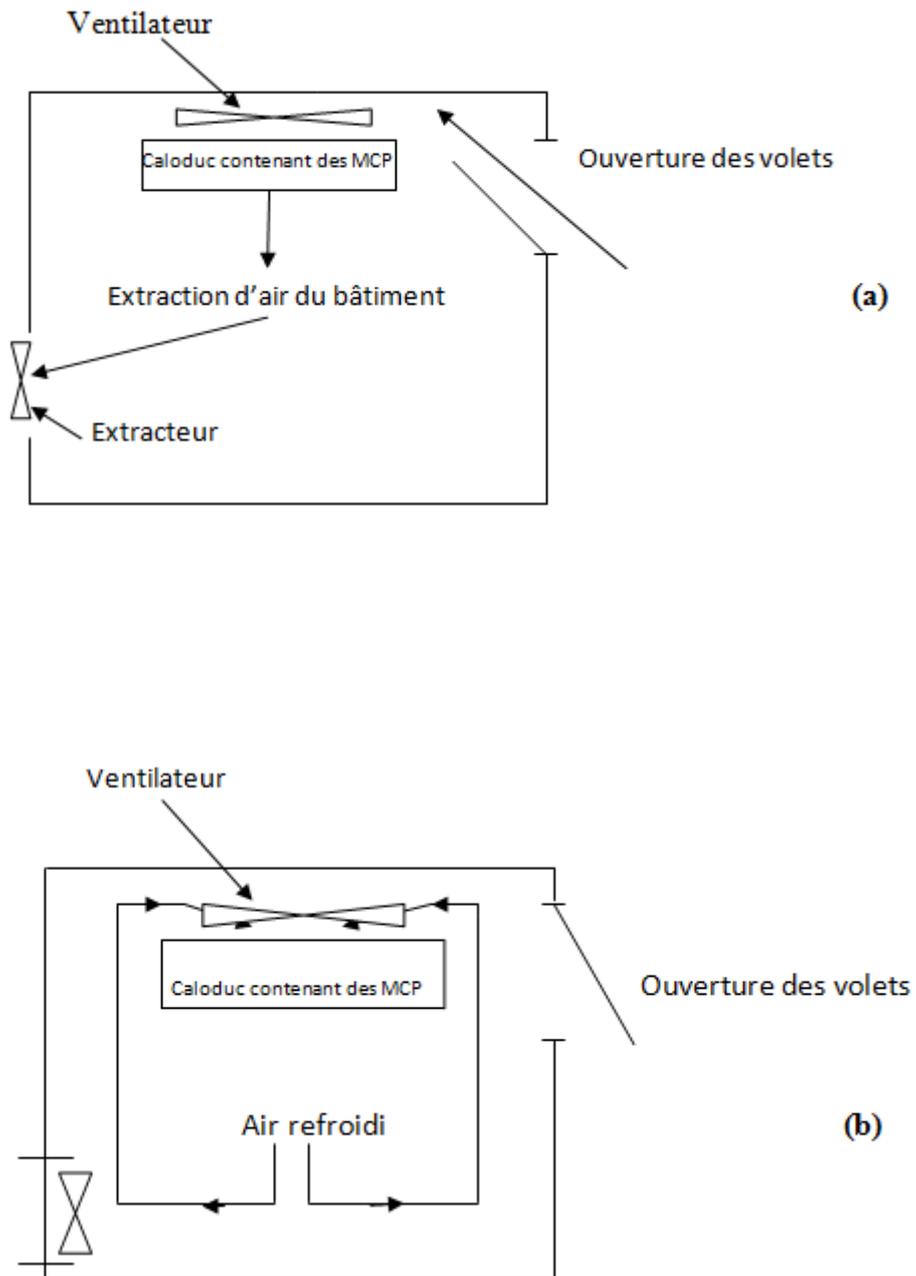


Figure II.15 : Principe de fonctionnement du système de rafraîchissement conçu par Turnpenny : a) fonctionnement nocturne, b) fonctionnement diurne.

III.1 Introduction

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur latente est largement utilisé de nos jours dans divers systèmes en raison de la capacité de stockage élevée à température constante dans un volume réduit.

Les paraffines, sont souvent utilisées comme Matériau à changement de Phase (MCP) en raison de leur importante capacité de stockage et leurs propriétés physiques (ségrégation de phase, surfusion) appropriées ainsi que pour leur stabilité chimique. Toutefois, elles présentent deux inconvénients qui empêchent leur application directe dans les systèmes de stockage : leur faible conductivité thermique et leur dispersion dans les matrices poreuses lors du processus de fusion. La meilleure solution pour faire face à ces deux inconvénients est la micro encapsulation, mais vu que les procédés de mise en œuvre nécessitent des moyens technologiques qui ne sont pas à notre portée, nous avons opté pour une méthode plus simple, qui consiste à mélanger le MCP à des matériaux sous forme de poudre tels que l'argile, le graphite, la perliteetc . Dans notre cas on a utilisé la perlite et le graphite.

L'objectif de notre travail est la mise au point d'un composite à base de paraffine qui dispose d'une grande capacité de stockage d'énergie thermique. Introduite dans une matrice de perlite sous forme de poudre, avec un ajout de faible pourcentage en graphite afin d'améliorer la conductivité thermique, on obtient un composite. Comme application, on introduit le composite obtenu dans un échangeur de chaleur dans le but d'améliorer ses performances thermiques.

Première partie : Mise au point du composite

III.2 Les matériaux utilisés pour la mise au point du composite

Le matériau à changement de phase utilisé dans cette étude est la paraffine (Pa, Fig.III.1a). La poudre minérale utilisée est la perlite expansée (Pr, Fig.III.1b) et le graphite en poudre (Gr, Fig.III.1c) permet d'améliorer la conductivité thermique du composite.

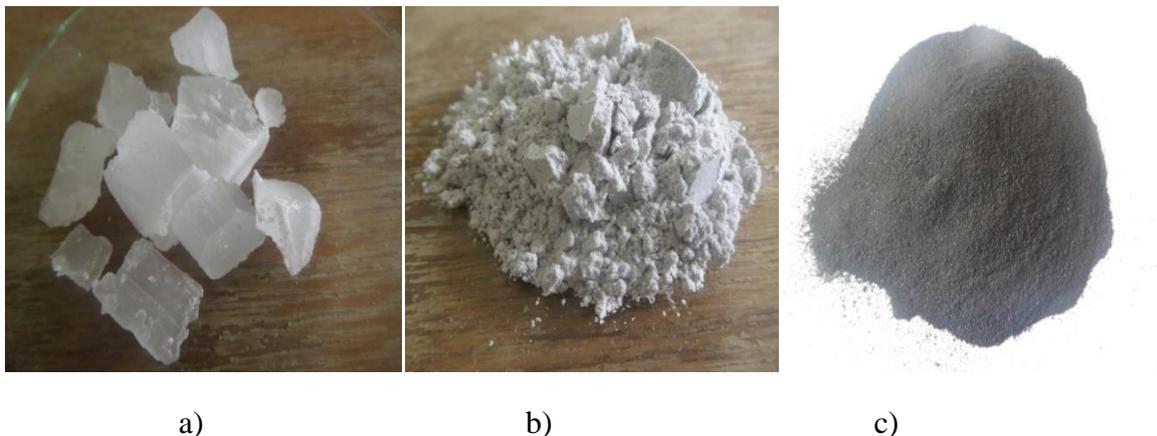


Figure III.1 : Matériaux utilisés : a) Paraffine, b) Perlite, c) Graphite

III.2.1 Le MCP (la paraffine)

Le choix du MCP pour le stockage de chaleur à basse température dépend en premier lieu de l'application à laquelle est destiné le système de stockage et essentiellement de sa température de fonctionnement et de stabilité du MCP au cycle de stockage et déstockage.

Pour notre travail il est prévu initialement d'opter pour une cire de paraffine utilisé par exemple dans la conservation des échantillons du béton en Génie civil, dont la température de fusion avoisine les 60 °C.

Cependant, pour la réalisation de la partie expérimentale de notre travail, il ne nous a pas été possible de se procurer cette paraffine non disponible sur le marché national.

- Seule une cire de paraffine est disponible, et elle est destinée à la fabrication de bougies, comportant des additifs chimiques inconvenables (présence entre autres de +20% de stéarine).

III.2.2 La perlite expansée [9]

La perlite est une roche volcanique siliceuse naturelle de la famille des rhyolites perlitiques. La roche est d'abord concassée et calibrée par granulométrie. La perlite broyée ressemble à du sable. L'expansion industrielle de la perlite est réalisée dans des fours spéciaux, fixes ou rotatifs. Sous l'effet de la chaleur (1200 °C), les grains de perlite s'expandent. Une multitude de cellules fermées se forment à l'intérieur des grains. En effet, la vapeur d'eau expansée la matière jusqu'à 15 fois son volume initial.

Fiche technique de la perlite expansée :

Composant	Formule chimique	Pourcentage
Silice	Si O ₂	70 – 80 %
Alumine	Al ₂ O ₃	12 – 16 %
Oxyde de sodium	Na ₂ O	2 – 5 %
Oxyde de potassium	K ₂ O	2 – 5 %
Oxyde de calcium	CaO	0 - 2 %
Oxyde de magnésium	MgO	0 - 1 %
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	0 - 1 %
Eau libre et liée	H ₂ O liée	< 1 %

Tableau III.1 : Constituants de la perlite expansée [9]**III.2.2.1 Obtention de la poudre de perlite**

La perlite expansée est lavée avec de l'eau pour enlever toute trace d'impuretés puis elle est séchée dans une étuve à la température 105 °C pendant 24h. Après le premier séchage, la

perlite est pesée avec une balance électronique et remise dans l'étuve pour un deuxième séchage pendant 24h, la 2^{ème} prise de poids a montré qu'il n'y a aucune variation de poids qui signifie que la perlite est complètement sèche.



Figure III.2 : Perlite après lavage

La perlite sèche est broyée avec un moulin pour obtenir une poudre la plus fine possible.



Figure III.3 : Perlite moulue (en poudre)

La poudre de perlite est séchée dans l'étuve à 105°C pendant 24h. La prise de poids avant et après séchage montre l'absence d'eau dans la poudre.



Figure III.4 : Mesure de la masse de la poudre



Figure III.5 : Etuve utilisée pour séchage de la perlite

III.3 Le graphite [10]:

Le graphite naturel est un minéral de carbone (C) élémentaire, de structure cristalline hexagonale. Sa couleur varie du noir à gris-noir. C'est un minéral tendre, flexible, il est caractérisé par :

- sa faible densité qui varie de 2.1 à 2.3 ;
- son point de fusion très élevé (3500°C) ;

Le graphite est une substance inerte qui résiste à l'attaque de la plupart des produits chimiques. C'est un excellent conducteur d'électricité et de chaleur.

Dans notre travail, on a utilisé le graphite synthétique, il est de même composition que le graphite naturel et est obtenu par graphitisation (cuisson entre 2600 et 3000°C) d'un mélange de coke de pétrole et de brai (bitume) précuit. Ce traitement permet de resserrer les pores et d'obtenir des grains de graphite dont le diamètre est de l'ordre du micromètre. Il est plus pur environ (99% de carbone) que le graphite naturel et offre une meilleure conductivité thermique et électrique ainsi qu'une plus grande résistance chimique.

En raison de ses bonnes propriétés physique et chimique tels que la neutralité chimique, la bonne résistance à la chaleur, la bonne conductivité thermique et électrique, le faible coefficient d'expansion thermique, et le faible coefficient d'absorption des rayons X et des électrons, il est utilisé dans de nombreux domaines tels que la fabrication des mines de crayons, réfractaires, creusets et moules, balais de moteurs électriques, garnitures de freins et d'embrayages, joints de pompes, les piles a combustible pour les véhicules.

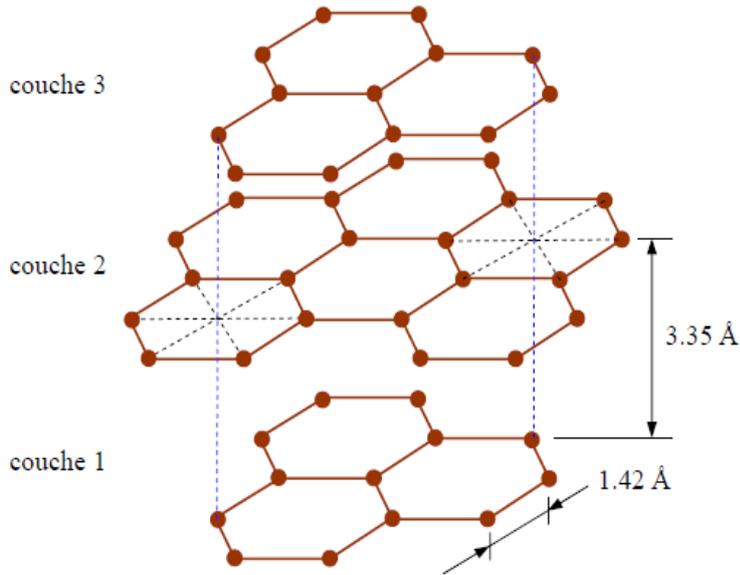


Figure III.6 : Structure cristalline du graphite

III.4 Granulométrie par tamisage

C'est la technique la plus largement utilisée (depuis l'Antiquité). Elle est peu coûteuse mais peut représenter une charge de travail importante et entraîner un temps de tamisage très long selon les quantités à mesurer. L'écartement des mailles du tamis varie généralement de quelques microns à quelques millimètres.

Lors du tamisage, on passe du tamis de grand diamètre des trous au tamis de diamètre plus petit ; on fait vibrer le tamis pour se débarrasser des particules de grandes tailles.

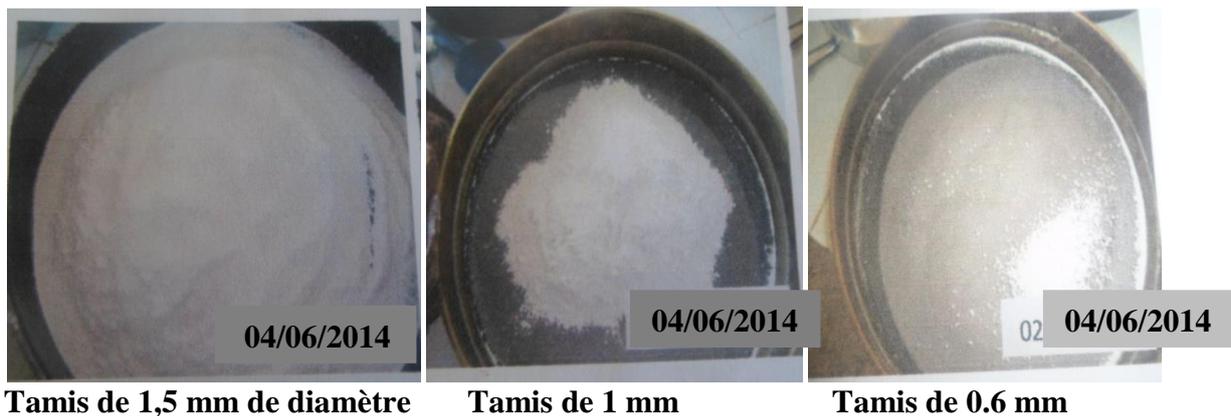


Figure III.7 : Tamisage de la perlite et du graphite

On passe aussi la poudre de perlite ou de graphite successivement dans des tamis de diamètre de 1,5 mm, puis 1mm et enfin 0,6mm.

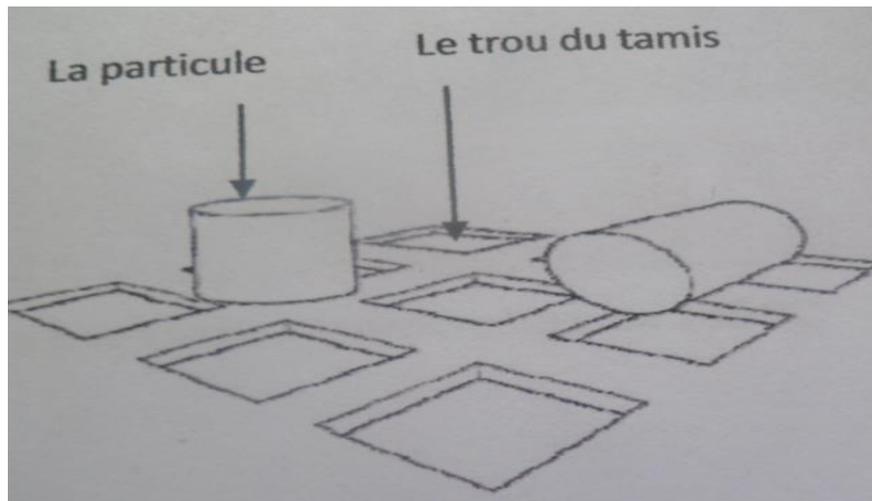


Figure III.8 : Influence de la forme sur le tamisage

Pour des particules de taille irrégulière, le tamis discrimine selon la position du grain comme l'illustre le Figure III.8. La particule doit avoir des diamètres inférieurs à la taille de la maille pour passer à travers l'ouverture.

III.5 Préparation du composite MCP/Pe et MCP/Pe/Gr

La méthode de préparation consiste à placer les éléments du composite dans un récipient. Le récipient est couvert avec du papier aluminium pour éviter toute infiltration d'eau (Figure III.9).

La proportion en masse de paraffine est passée de 90 à 55% pendant la préparation des composites, de façon à éviter une fuite du MCP lors du processus de chauffage.

La pesée de chaque constituant et pour chaque proportion à été effectuée avec la balance électronique (Fig. III.10).

Le récipient contenant tous les composants du composite est placé dans un bain-marie réglé à une température de 75 °C pour faire fondre la paraffine (figure III.11). Après fusion de la paraffine, les différents constituants sont bien mélangés pour assurer un mélange homogène.



Figure III.9 : Mélange des substances



Figure III.10 : Pesée des substances



Figure III.11 : Bain marie utilisé

III.5.1 Les proportions en masse des différents constituants

Numéro de l'échantillon	MCP paraffine (Pa) en %	Matrice perlite (Pr) en%	Graphite (Gr) en %	Notation
1	80%	20%	/	80%Pa20%Pr
2	80%	15%	5%	80%Pa15%Pr5%Gr
3	75%	25%	/	75%Pa25%Pr
4	75%	20%	5%	75%Pa20%Pr5%Gr
5	70%	30%	/	70%Pa30%Pr
6	70%	25%	5%	70%Pa25%Pr5%Gr
7	65%	35%	/	65%Pa35%Pr
8	65%	30%	5%	65%Pa30Pr5%Gr
9	60%	40%	/	60%Pa40%Pr

10	60%	35%	5%	60%Pa35%Pr5%Gr
11	55%	45%	/	55%Pa45%Pr
12	55%	40%	5%	55%Pa40Pr5%Gr

Tableau III.2 : Proportion en masse des constituants

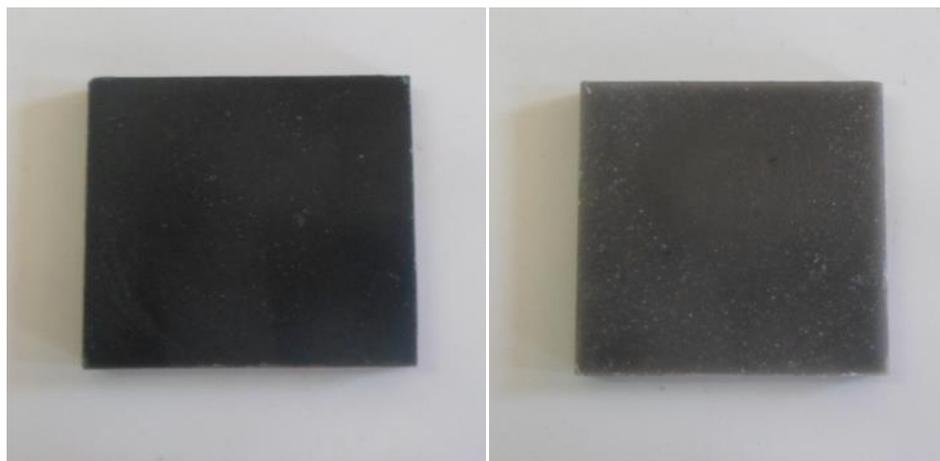
III.6 Fabrication des plaques de dimension (40× 40×6 mm³)

Le mélange obtenu est versé dans l’empreinte d’un moule de forme parallélépipédique, fabriqué à cet effet au sein de l’atelier de mécanique de notre département (Fig.III.12)



Figure III.12 : Moule utilisé pour la réalisation des pastilles

Le composite est laissé à l’air libre pendant quelques minutes, le temps de cristallisation de la paraffine. Après démoulage on obtient des plaques sous forme de pastilles prêtes à l’utilisation.



a) Avec graphite

b) Sans graphite

Figure III.13 : Pastilles de (40x40x6 mm³)

III.7 Renforcement de la matrice en utilisant les fibres de jute

Des fibres de jute ont été utilisées comme renfort : la toile de jute est coupée à des dimensions de 40x40 mm² (Figure III. 14a).

Pour la réalisation des pastilles renforcées par les fibres de jute, on a superposé trois couches de toile de jute pour avoir l'épaisseur voulue.

Après la fusion du composite, la toile de jute est plongée dans le mélange, l'ensemble est remis dans le bain marie pour donner à la toile le temps d'absorber une quantité importante de paraffine. Ensuite le mélange obtenu est versé dans l'empreinte d'un moule pour obtenir la forme de la pastille (Figure III. 14a b).

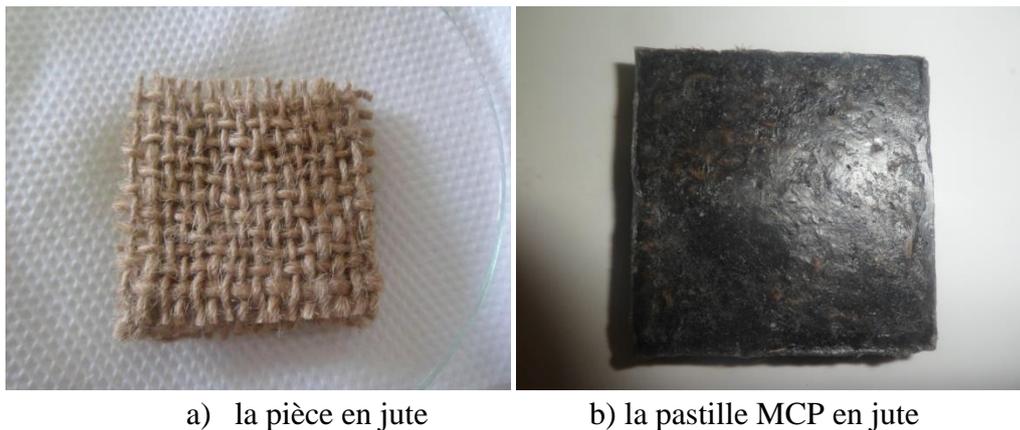


Figure III.14 : Mise au point des pastilles avec la toile de jute

Quelques indications sur la toile de jute:

Le jute est issu de deux plantes herbacées de la famille des Malvacées cultivées dans les régions tropicales telles que le Bangladesh et l'Inde.

Le jute est utilisé principalement dans la fabrication des sacs d'emballage, il sert aussi à la fabrication des cordes. On cherche désormais à diversifier son utilisation dans le tissu, notamment dans le domaine du géotextile, c'est-à-dire de tissus grossiers destinés à retenir la terre.

III.8 Compression des plaques

Les plaques (pastille) obtenues sont soumises à une compression unidirectionnelle à 80 kN pour minimiser la présence des bulles d'air qui peuvent se former lors de la cristallisation du composites (les pastilles), et permettre une meilleure densité du composite pour assurer plus de stockage d'énergie.



Figure III.15 : Presse pour compression des pastilles

III.9 Test de perméabilité à l'eau

Une pastille qui a les proportions suivantes : 60%Pa, 35%Pr, 5%Gr est pesée (Figure III.16a). Elle est par la suite immergée dans un récipient rempli d'eau (Figure III.16b). Après 72heures, la pastille est retirée du récipient puis essuyée (enlever l'eau de surface) et enfin pesée (Figure III.16c). On constate une variation nulle de la masse de la pastille qui signifie qu'il n'y a eu aucune prise d'eau du composite. Ce qui nous permet d'affirmer que le composite mis au point est imperméable à l'eau.



a) Pesée avant immersion

b) Pastille dans l'eau

c) Pesée après immersion

Figure III.16 : Test de perméabilité

III.10 Préparation des échantillons pour l'analyse MEB et FT-IR

Pendant la réalisation des pastilles de $40 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$, une partie du composite est utilisée pour la réalisation des petites pastilles de forme circulaire pour les différents tests, (MEB, FT-IR).



Figure III.17 : Echantillons pour le MEB et FT-IR

III.10.1 Préparation des échantillons pour le MEB :

L'une des petites pastilles circulaires est polie avec un papier verre pour assurer une surface parfaite lisse et éliminer la couche de paraffine en surface. Cela permet de mieux visualiser l'adhérence du MCP avec la poudre de perlite et du graphite (image du MEB).

❖ Principe de fonctionnement du MEB [11]

Le MEB permet d'obtenir des images de surface pratiquement de tous les matériaux solides, à des échelles allant de celle de la loupe ($\times 10$) à celle du microscope électronique en transmission (500.000 ou plus). Ces images mettent en valeur en premier le faisceau d'électrons réémis par le relief et la grande profondeur du champ.

Le MEB à pression contrôlée (dit environnemental) permet l'observation dans un vide allant jusqu'à **30 Pa**, rendant ainsi possible l'examen d'échantillons qui peuvent supporter le vide sans le polluer.



Figure III.18 : Microscope électronique à balayage

❖ **Fonctionnement simplifié :**

L'image est une reconstitution : une sonde envoie un faisceau d'électrons qui balaye la surface de l'échantillon, un détecteur récupère de manière synchrone induit par cette sonde pour en former une image cartographique de l'intensité de ce signal. Le MEB est constitué d'une source d'électrons et d'un jeu de lentilles (condenseur) qui se focalise sur un diaphragme.

Une deuxième lentille (objectif) refocalise ce faisceau sur l'échantillon en un spot très fin (<15 à 200Å). Un jeu de bobines de déflexion permet de déplacer le faisceau et donc de balayer l'échantillon.

L'agrandissement est déterminé par le rapport entre la surface balayée sur l'échantillon (un rectangle de dimension variant entre quelques millimètres et une fraction de micromètre de côté), et la dimension du document final sur l'écran d'observation.

❖ **Systèmes de fixation :**

Une fois préparé correctement, l'échantillon doit être introduit dans la chambre objet du microscope et fixé sur un support adéquat.

La nature du support et la manière à fixer sur ce support dépend à la fois de la nature de l'échantillon et du type d'observation et/ou d'analyse.

Dans le cas d'une observation topographique d'un échantillon massif, la méthode la plus courante est de le coller sur un porte échantillon à l'aide d'une laque conductrice (laque à l'argent ou le carbone) ou éventuellement d'un ruban adhésif double face.

La figure III.18 montre les éléments qui composent le MEB.

III.10.2 Préparation des échantillons pour la FT-IR

Une partie des pastilles cylindriques réalisées est réduite sous forme de poudre, pour permettre la réalisation des pastilles fines, utilisées dans le test FT-IR.

❖ **Principe de fonctionnement du spectroscope : [12]**

Il existe principalement deux types de spectroscopes IR : les traditionnels et les spectroscopes IR à transformée de fourrier, ou FT-IR. Dans les deux cas, le principe de fonctionnement est assez complexe à décrire. Nous ne proposons que des approches simplifiées du fonctionnement.

❖ **Spectroscopes IR traditionnels :**

Dans les spectroscopes traditionnels, le schéma de principe est le suivant : une source émet une série de radiations dans le domaine infrarouge, un monochromateur sélectionne la longueur d'onde, l'onde est dédoublée pour aller d'une part au détecteur (I°) et d'autre part

traverse la cellule contenant l'échantillon, puis allant au détecteur (I). Le rapport I/I° est calculé et le monochromateur fait varier la longueur d'onde. Un graphe est alors émis, graphe représentant la transmission ($T= I / I^{\circ}$) en fonction du nombre d'onde.

❖ Spectroscopie IR à transformée de fourrier :

Dans le spectrophotomètre IR à transformée de Fourier, ce n'est pas par un balayage d'une onde monochromatique que se construit le spectre mais un paquet d'onde contenant les ondes du domaine IR est émis et c'est par analyse de Fourier que les signaux sont séparés et interprétés en un spectre représentant l'absorbance A en fonction de la longueur d'onde λ .

❖ Absorbance :

L'absorbance mesure la capacité d'un milieu à absorber la lumière qui le traverse. On l'appelle également densité optique ou extinction. Il s'agit d'une grandeur sans unité donnée par la relation :

$$A_{\lambda} = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (\text{III.1})$$

L'absorbance est définie par le rapport entre la lumière incidente I_0 qui traverse le milieu à une longueur d'onde λ , et la lumière transmise I exprimée en logarithme de base 10.

❖ Réalisation du spectre :

Tout dépend de la nature du produit. Voici l'inventaire des méthodes.

Liquide pur : il est appliqué directement sur les fenêtres. Une ou deux gouttes suffisent.

Solide en cristaux : il est mélangé à un sel, passé dans une presse pour former un film et placé dans un spectroscope. Le sel utilisé couramment est du bromure de potassium.



Figure III.19 : la forme des films

Autres sels utilisés :

Sel	NaCl	KBr
Limite de transmission en cm^{-1}	650	400

Des échantillons différents sous forme de poudre sont mélangés avec le bromure de potassium (KBr) à raison d'un milligramme de poudre pour deux cents milligrammes (200mg) de KBr, puis compresser sous forme de pastille. L'analyse est réalisée par utilisation d'un spectrophotomètre IR à transformée de Fourier, de modèle FT-IR 8001M.



Figure III.20: Image du Spectrophotomètre IR

III.11 Préparation des plaques de 30x30x6 cm³ pour mesurer la conductivité thermique

Un mélange de 60%Pa, 35%Pr, 5%Gr d'une masse de 720g est mise dans un récipient. L'ensemble est placé dans un bain marie réglé à 70°C pour faire fondre la paraffine. Après la fusion totale de la paraffine, les différents constituants sont bien mélangés pour assurer un mélange homogène sous forme de liquide visqueux, qui est ensuite versé dans un moule en verre fabriqué à cet effet.



a) Moule en verre b) Mélange des composants dans le moule

Figure III.21 : Mise au point des plaques 30x30x6 cm³

Enfin, on place la partie supérieure du moule puis on exerce sur elle une charge pour chasser les bulles d'air formées entre la matière et les parois du moule, et améliorer ainsi l'état de surface de la plaque, et pouvoir obtenir une épaisseur uniforme (**Figure III.22**).



Figure III.22 : Compression manuelle

L'ensemble du moule et le composite est laissé dans un endroit frais pour permettre la cristallisation du composite. Une fois l'ensemble est refroidi, le démoulage du moule est effectué pour obtenir une plaque de dimensions $30 \times 30 \times 0,8 \text{ cm}^3$ (**Figure III.23.a**).

La même opération est effectuée pour un mélange 60% Pa, 40% Pr (**Figure III.23.b**).



a) Avec graphite

b) Sans graphite

Figure III.23 : plaques de ($30 \times 30 \times 0.8 \text{ cm}^3$)

Le CT mètre [13] :

Le CT mètre est un appareil de contrôle thermique non destructif, il a été élaboré dans le but d'évaluer, avec précision, les paramètres thermiques d'un certain nombre de matériaux et de contrôler la production des matériaux isotropes et homogènes par prélèvements.



Figure III.24 : Image globale de l'unité de mesure de la conductivité thermique

❖ **Description de l'appareil :**

Une armoire à charnières en fibre de verre abrite les composants principaux de l'ensemble. La section de base de l'armoire contient le débitmètre thermique et la plaque froide, installée sur quatre ressorts. Cet ensemble est refroidi à l'aide d'eau à température constante de façon à ce que la plaque soit sensiblement iso thermique.

Le débitmètre thermique donne une sortie en millivolts, proportionnellement à la différence de température sur les deux surfaces. Le couvercle de l'armoire abrite la plaque chaude chauffée électriquement. Elle est contrôlée d'une manière électronique à une température de consigne et l'entrée de la température par un voyant rouge clignotant. La plaque est levée et abaissée par un mécanisme à poignée à vice située en haut de l'armoire.

Un indicateur à cadran dans la roue permet de déterminer le spécimen testé. Le mouvement de la plaque chaude permet d'utiliser des spécimens d'épaisseur allant jusqu'à 75 mm. La plaque chaude est protégée par un interrupteur de température de 70°C. Une isolation en mousse entoure l'ensemble de débitmètre thermique. Une isolation similaire se trouve sur le couvercle, ainsi qu'un espace d'air stagnant autour de l'ensemble de la plaque chaude, pour empêcher la perte de chaleur.

❖ **Méthode d'essais :**

La taille des échantillons qui peuvent être utilisés avec la méthode de mesure de la conductivité pour un débitmètre thermique est de 300×300 mm. Le spécimen testé doit avoir des dimensions maximum de 75 mm d'épaisseur.

La conductivité thermique est comprise entre 0,1 et 1,4 W/(m·K). En général, plus le matériau utilisé est isolant, plus le spécimen devrait être mince, sinon la durée du test sera longue.

Des feuilles de caoutchouc en silicone sont utilisées pour des résistances inconnues ou d'une faible résistance thermique et aussi pour éliminer l'espace d'air entre le spécimen, la plaque chaude et la plaque froide.

Pour les spécimens granuleux, comme le sable et gravier une plinthe de bois est fournie pour y mettre le matériau. Il doit être placé dans la plinthe de 15 mm d'épaisseur pour lui donner une densité maximale, sinon le résultat ne sera pas précis à cause des espaces d'air entre les grains de sable.

❖ Méthode de calcul :

On dit que les conditions de régime permanent sont obtenues lorsque 5 lectures consécutives à cet intervalle donnent des valeurs de résistance thermique d'une stabilité de 1% sans changer à chaque fois dans le même sens.

A chaque intervalle d'échantillonnage, on note les valeurs de T_1 et T_2 et de la sortie du débitmètre thermique. La température moyenne et la différence de température entre T_1 et T_2 sont calculées.

Selon que des tapis de caoutchouc en silicone sont utilisés ou non, la conductivité thermique peut être déterminée par l'équation lambda suivante :

$$\lambda = \frac{I_s[(K_1 + (K_2 * T)) + ((K_3 + (K_4 * T) * HFM)) + ((K_5 + (K_6 * T)) * HFM^2)]}{\Delta T}$$

Avec :

λ : conductivité thermique

I_s : épaisseur du spécimen en m

ΔT : différence de température ($T_1 - T_2$) en °C

T : température moyenne en $(T_1 + T_2)/2$ en °C

HFM : sortie du débitmètre (HeatFolowmeter Reading) en mV.

T_1 : température de la plaque chaude.

T_2 : température de la plaque froide.

Les constantes d'étalonnage avec ou sans silicone :

$$K_1 = 88.1389$$

$$K_2 = -2.7829$$

$$K_3 = -21.3064$$

$$K_4 = 0.8037$$

$$K_5 = 0.7954$$

$$K_6 = -0.0189$$

III.12 La masse volumique

❖ Définition :

La masse volumique représente la masse d'une substance par unité de volume.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{Kg/m}^3] \quad (\text{III.2})$$

Mesure de la masse volumique par la méthode de flacon :

Le flacon utilisé s'appelle un pycnomètre. Il est constitué d'un petit ballon (d'environ 50 cm³) sur lequel vient s'adapter un bouchon rodé creux surmonté d'un tube capillaire et d'une ampoule de garde.

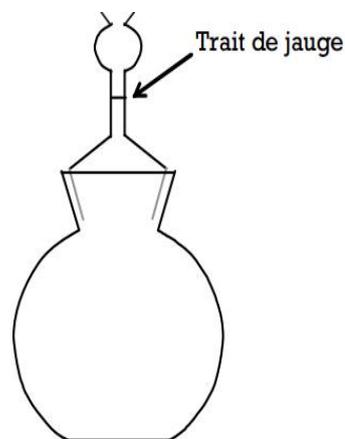


Figure III.25 : Schéma du pycnomètre

❖ Principe de mesure de la masse volumique d'un solide

Il faudra peut-être veiller à utiliser un pycnomètre à col large. On réalise les trois pesées suivantes :

Pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait de jauge et le solide à coté : M_1 .

Pycnomètre contenant le solide et rempli d'eau jusqu'au trait de jauge : M_2 .

Pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait de jauge : M_e .

La masse du solide s'obtient par différence : $m_s = M_1 - M_e$

La masse d'eau occupant le même volume s'exprime par : $m_e = M_1 - M_2$

L'expression de la masse volumique du solide est donc donnée par :

$$\rho = \frac{m_s}{m_e} \cdot \rho_L = \frac{M_1 - M_e}{M_1 - M_2} \rho_L \quad (\text{III.3})$$

ρ_s : masse volumique du solide.

ρ_L : masse volumique du liquide utilisé.

III.13 Calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

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

Les flux de chaleur en DSC sont la conséquence de transition ou de réaction endothermique ($\Delta Q < 0$) ou exothermique ($\Delta Q > 0$) comme celles déterminés par les changements de phase, la fusion, la cristallisation. Ces changements sont détectés par une méthode différentielle.

Les courbes **DSC** en fonction de la température de chauffage contiennent des séries de pics orientés négativement (vers le bas) ou positivement (vers le haut) de l'axe de flux de chaleur.

Les positions des pics sur l'axe de température et leurs nombre permettent l'identification qualitative du matériau analysé. Quant aux aires des pics, elles permettent le calcul des chaleurs de réaction, de transition, de fusion ou de cristallisation.

Dans notre cas deux échantillons (paraffine, composite 60%Pa35%Pr5%Gr), ont subi le test de **DSC**, dans le but de connaître la température et l'enthalpie de changement de phase des deux échantillons.

Deuxième partie : réalisation d'un échangeur stockeur

Dans cette partie, nous présentons les différentes opérations de fabrication et d'assemblage de tous les éléments constitutifs de l'échangeur de chaleur (air/eau/MCP) étudié.

III.14 Choix du matériau :

Le matériau utilisé pour la fabrication de l'échangeur est le cuivre (plaque et tubes en cuivre) ce choix revient aux caractéristiques intéressantes qu'offre ce matériau :

- Une bonne conductivité thermique (385 W/m.K)
- Malléable et donc facile à manipuler
- Possibilité de souder avec différents matériaux de soudage (brasure, étain...etc).



a) Plaque de cuivre b) Tube de 8 mm de diamètre



c) Tube de 42 mm de diamètre

Figure III.26 : Plaque et Tubes de cuivre



Figure III.27 : Baguettes de brasure

Les étapes de fabrication se sont déroulées comme suit :

- Fabrication des différentes pièces de l'échangeur.
- Assemblage des pièces avec soudure pour obtenir les éléments de l'échangeur.
- Introduire les plaques MCP (pastilles) dans les éléments de l'échangeur
- Fabrication et fixation des collecteurs admission et sortie de fluide caloporteur.
- Fabrication et fixation du système aéraulique.

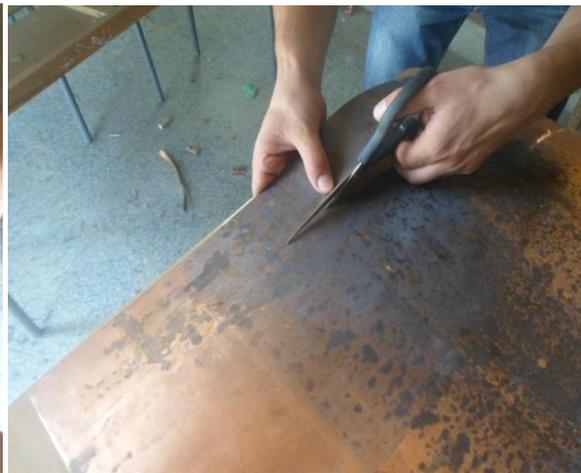
III.15 Fabrication des pièces de l'échangeur Air-Eau-MCP

La fabrication des pièces de l'échangeur s'est déroulée comme suit :

Nous avons fabriqué d'abord les éléments de l'échangeur (conteneurs d'MCP ailettes), ensuite des tubes de 8 mm de diamètre en cuivre sont coupés sur une longueur de 38 cm. Par la suite, les collecteurs d'admission et de sortie du fluide caloporteur sont fabriqués, et enfin le circuit aéraulique a été fabriqué pour assurer l'échange de chaleur forcé avec l'air.

III.16 Fabrication des éléments de l'échangeur (conteneurs de MCP ailettes) :

La fabrication des éléments stockeurs de l'échangeur est illustrée sur les images ci-dessous. Dans un premier temps la feuille de 0.5 mm de cuivre est coupée en bandes puis en pièces de dimensions appropriées pour être utilisées en capsules carrés Figures III.28, III.29 et III.30.

**Figure III.28 : Tracé****Figure III.29 : Découpage**

(a)



(b)

Figure III.30 :a) feuille coupée en bande b) Coupe en plaque qui servira de capsule

Ensuite, on a tracé les deux plaques obtenues à des dimensions précisées sur la figure (III.31).

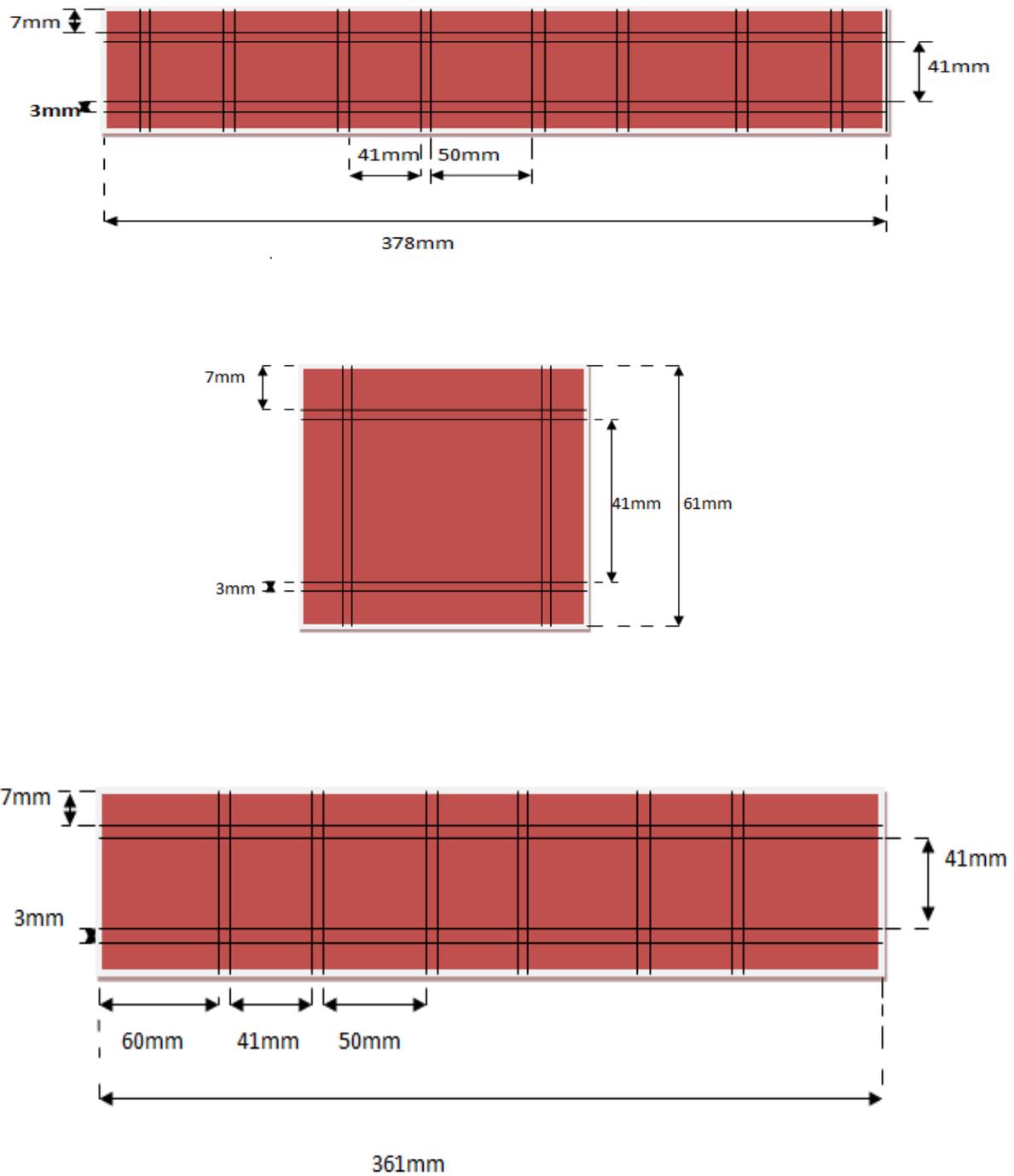


Figure III.31 : dimension des plaques

Les deux pièces sont coupées à l'aide d'un ciseau de façon à obtenir après pliage des poches qui vont loger les pastilles de MCP.

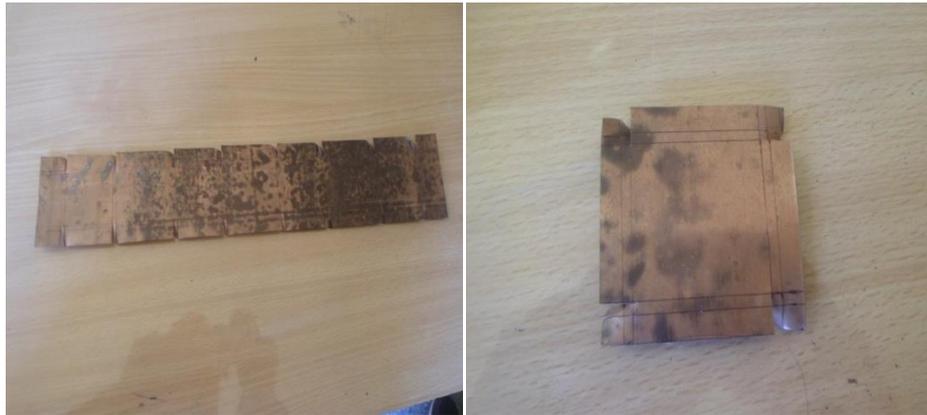


Figure III.32 : Les deux pièces coupées.



Figure III.33 : Emboutissage de la feuille pour la réalisation des empoches avec pliage



Figure III.34 : Pièces finales après emboutissage

Les deux éléments obtenus sont soudés avec brasure pour assurer l'étanchéité.



Figure III.35 : Opération de soudage des pièces réalisées.



Figure III.36 : Forme finale des pièces après soudage.

Les tubes en cuivre de diamètre intérieur et extérieur respectivement 7.1 et 8 mm sont coupés à l'aide d'une scie à métaux, pour avoir une longueur de 40 cm, comme la montre la figure ci-dessous.



a) Coupe des tubes

b) Tubes de 40 cm de longueur

Figure III.37 : Coupe des tubes pour l'échangeur.

III.17 Assemblage des pièces par soudage

Sur la face extérieure des pièces embouties de forme carrée sont soudés deux tubes parallèles.



Figure III.38 : Opération d'assemblage des pièces et les tubes



Figure III.39 : Elément de l'échangeur après soudage

III.18 Introduction des pastilles de MCP dans les éléments de l'échangeur

Avant d'introduire le MCP dans l'échangeur des plaques en bois de dimensions ($6.5 \times 50.2 \text{ cm}^2$) ont été coupées. Deux rangées de trous sont ensuite effectuées sur la planche. La distance entre les deux rangées est de 3 cm et la distance entre deux trous pour chaque rangée est de 14.2 mm.

Ces plaques vont servir d'une part comme support provisoire pour garder la géométrie de l'échangeur le temps de séchage de la colle de silicone utilisée lors de l'introduction de l'MCP et d'autre part, les plaques en bois vont servir de guide pour percer les plaques de cuivre utilisées pour la réalisation des collecteurs (Figure (III.40)).



Figure III.40 : Assemblage avec plaques en bois

Méthode d'introduction des pastilles de MCP :

Après avoir préparé 102 pastilles de MCP (Pa60%, Pr35%, Gr5%) de dimensions ($4 \times 4 \times 6 \text{ mm}^3$), celles-ci sont introduites dans les empoches des éléments de l'échangeur, qui

ensuite collées avec le mastic de silicone (Figure III.41). Et cette opération est effectuée pour 29 éléments, et ces derniers ont été laissés à l'air libre pour le séchage de la colle pendant 72 heures. A la fin de l'opération 29 éléments collés l'un à côté de l'autre sont obtenus (Figure III.42).



Figure III.41 : Mastic de silicone utilisé



Figure III.42 : Image de l'échangeur sans collecteurs

Quelques informations sur la colle de silicone :

Le mastic de silicone (Sikafix PRO-11FC) est un mastic à base de colle polyuréthane de fixation souple, utilisé en menuiserie, électricité, sanitaire, joints étanches. Il adhère sans

primaire sur du verre, de l'acier, du PVC, du zinc, et sur l'aluminium...etc. Il résiste au choc, vibrations, variations de température et résiste aux UV, à l'eau, et aux intempéries.

III.19 : Réalisation des collecteurs d'admission et de sortie du fluide caloporteur

Pour la réalisation des collecteurs on a essayé au départ d'utiliser, les plaques de cuivre avec les quelles on a fabriqué les éléments de l'échangeur, mais comme leur épaisseur est faible (0.5 mm), on a rencontré des problèmes dès que on a commencé à percer. Comme des plaques en cuivre d'épaisseur importante (>1 mm) ne sont pas disponible sur le marché, on a pensé à utiliser un autre matériau à part le cuivre mais aucun matériau disponible ne peut s'adhérer avec le cuivre lors du procédé de soudage.

Pour fabriquer les collecteurs, nous avons utilisé des tubes en cuivre de 42 mm de diamètre extérieur et 40 mm de diamètre intérieur. Pour obtenir des plaques à partir des tubes, nous les avons coupés longitudinalement à l'aide d'une meule puis aplatis pour obtenir des plaques utilisées pour la réalisation des collecteurs Figure III.43.



Figure III.43 : Phase de réalisation des collecteurs

Pour chaque collecteur il faut deux plaques et chacune d'elles est pliée d'un côté comme le montre la figure III.44. L'une des plaques est percée en utilisant la plaque en bois comme empreinte pour reproduire les mêmes trous.



Figure III.44 : Perçage des collecteurs

L'assemblage des deux plaques pliées donne ainsi la forme du collecteur. Les plaques trouées servant de base pour les collecteurs sont placées sur les deux extrémités de l'échangeur comme le montre la Figure III.45.



Figure III.45 : Image de l'échangeur avec collecteur

Les deux autres plaques non percées, qui servent de couverture, sont ensuite fixées directement sur les plaques percées à l'aide du mastic de silicone, pour donner la forme rectangulaire des deux collecteurs. Des bouchons sont ensuite conçus pour servir de fermeture sur les extrémités des collecteurs ; chaque collecteur porte alors deux bouchons dont l'un est percé pour permettre la fixation d'un tube de 22 mm de diamètre qui va servir d'admission ou de sortie pour le fluide caloporteur comme le montre la Figure III.46 ci-dessous.

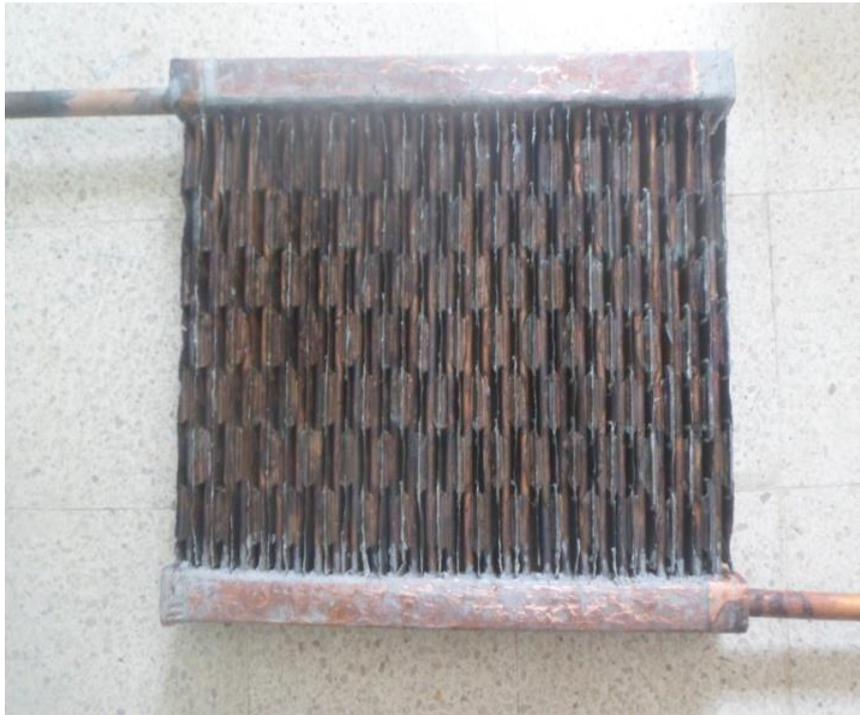


Figure III.46 : Image finale de l'échangeur.

III.20 Réalisation du circuit aéraulique :

Le circuit aéraulique a été réalisé avec des plaques de plexiglas qui permet de donner la forme finale avec des dimensions qui permettent d'une part l'emboitage de l'échangeur et la fixation de l'extracteur de l'air, d'autre part la fixation du nit d'abeilles afin de calculer le débit d'air extrait.



Figure III.47 : image du circuit aéraulique.



Figure III.48 : emboutissage de l'échangeur avec le circuit aéraulique.

III.21 Montage expérimental

Le montage expérimental réalisé comporte les éléments suivants :

- l'échangeur de chaleur
- le circuit aéraulique
- un bain thermostaté
- une pompe a eau
- Des tuyaux
- une vanne
- table d'acquisition de donnés
- un ordinateur dans le quel est installé le logiciel de traitement des donnés.

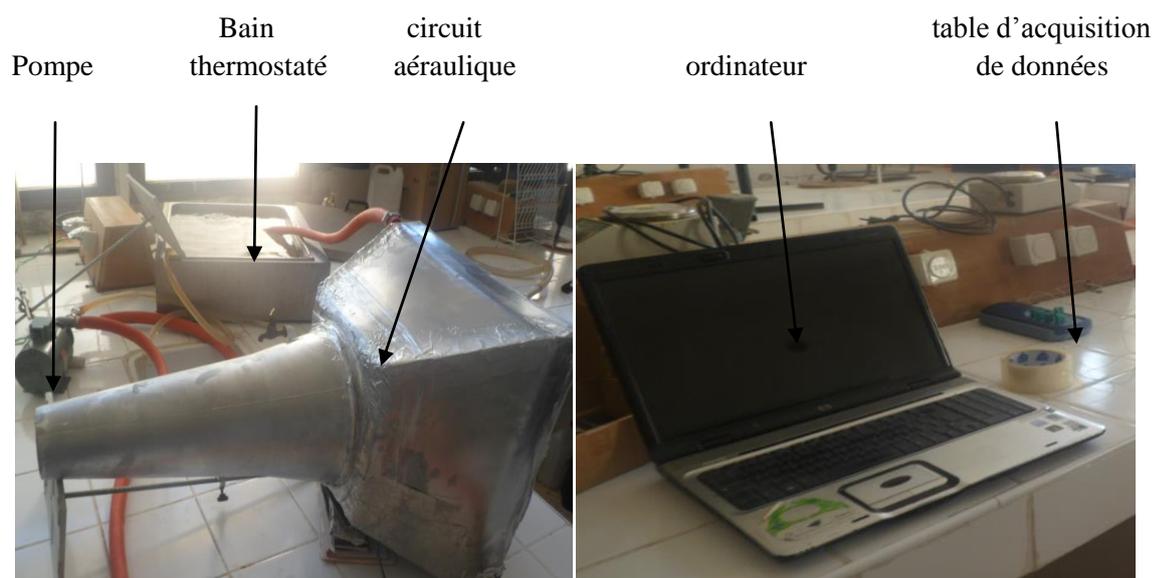


Figure III.49 : différents éléments du montage expérimental

La première étape consiste à emboîter l'échangeur de chaleur avec le circuit aérouique, et pour assurer l'étanchéité entre l'échangeur et le circuit aérouique une colle de silicone a été utilisée. L'échangeur de chaleur est alimenté par l'intermédiaire d'une pompe à eau, cette dernière aspire de l'eau chaude d'un bain thermostaté, la circulation de l'eau est assurée par un tuyau en plastique, une vanne est placée entre la sortie de la pompe et l'entrée de l'échangeur pour varier le débit, la sortie de l'échangeur est reliée au bain thermostaté avec un tuyau en plastique, c'est-à-dire le système fonctionne en circuit fermé.

La deuxième étape consiste à relier la table d'acquisition au système par l'intermédiaire des thermocouples, ces derniers sont implantés comme suit :

- Le premier à l'entrée de l'échangeur de chaleur
- Le deuxième à la sortie de l'échangeur de chaleur
- Le troisième exposé à l'air ambiant
- Le quatrième est placé entre l'échangeur de chaleur et l'extracteur
- Le cinquième est placé à la sortie du système aérouique
- Le sixième est plongé dans le bain thermostaté

À la fin la table d'acquisition est reliée à l'ordinateur.

La figure ci-dessous montre le montage réalisé :



Figure III.50 : image globale du montage expérimental

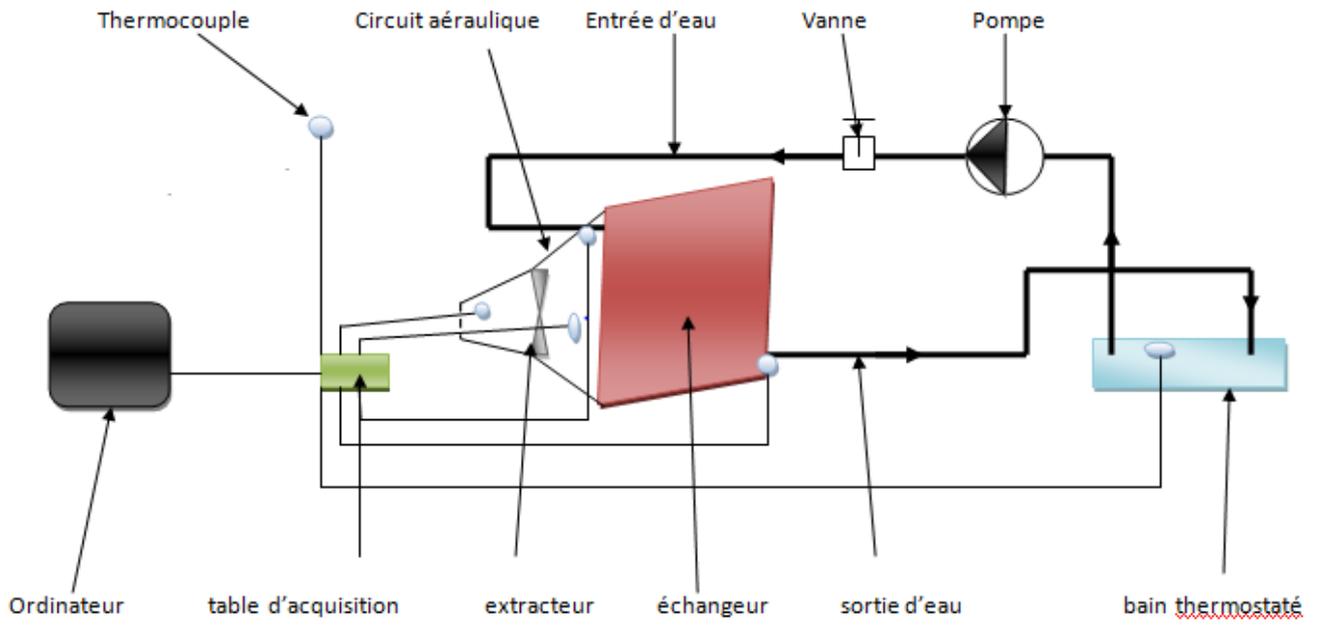
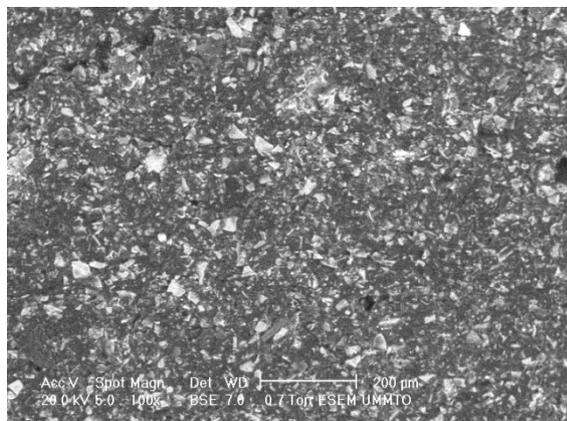


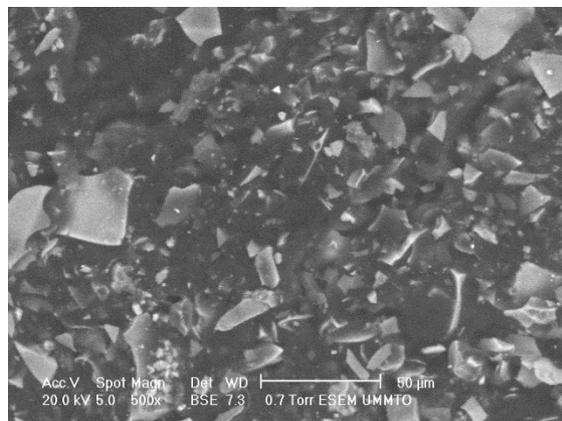
Figure III.51 : Schéma descriptif du montage expérimental

IV.1) Résultats de la caractérisation des paramètres thermophysiques du composite**IV.1.1) Images par Microscopie Electronique à Balayage (MEB)**

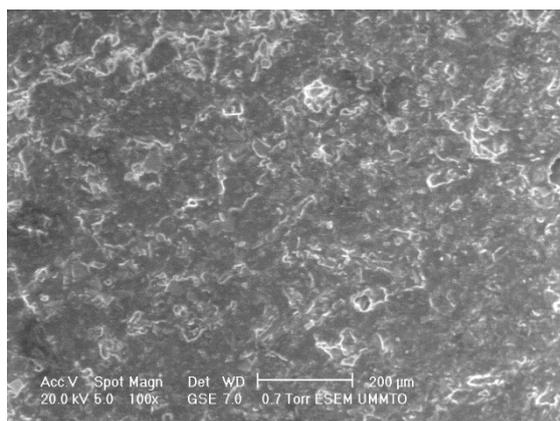
- Echantillon : Pa 60% Pr35% Gr5%



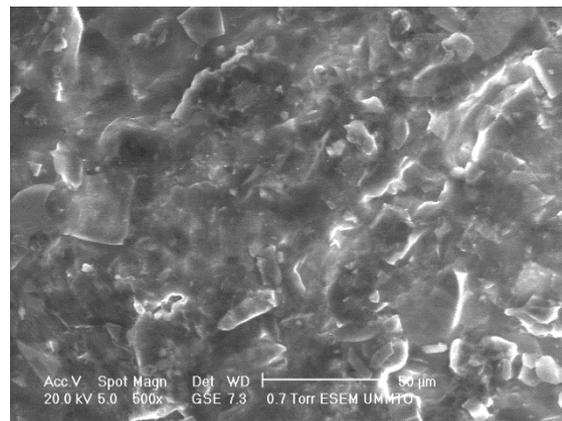
(a)



(b)



(c)



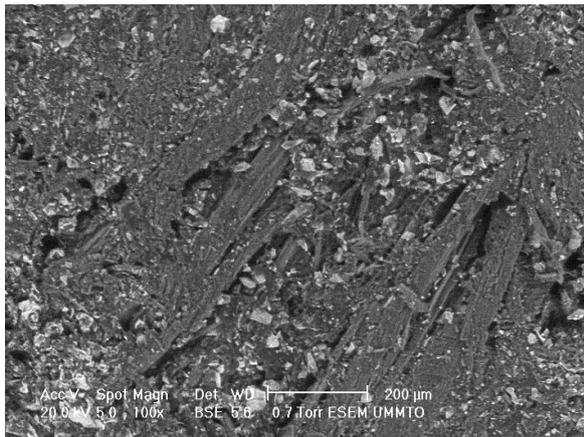
(d)

Figure IV.1 : Images MEB de l'échantillon Pa 60% Pr35% Gr5%

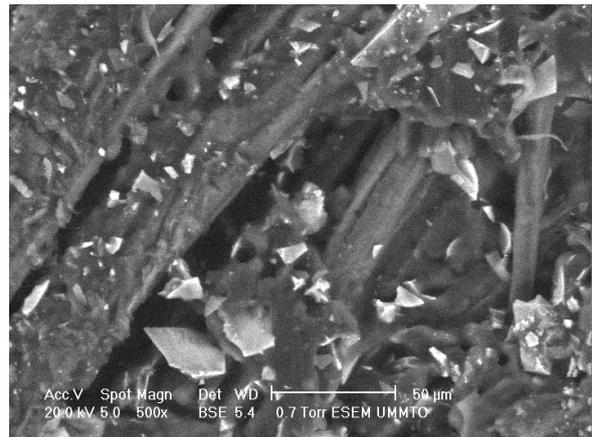
L'observation au Microscope Electronique à Balayage de l'échantillon montre en Figure IV.1a et IV.1b, l'apparition des grains lumineux qui représentent les particules de poudre de perlite (la poudre de perlite étant plus dense que le graphite et la paraffine). La distribution des grains lumineux montre que la poudre de perlite est bien répartie de façon homogène dans la structure de l'échantillon. La poudre de graphite n'apparaît pas dans l'image MEB car elle a une faible densité par rapport à la poudre de perlite, et c'est le même constat que la paraffine.

A la Figure IV.1c et IV.1d, l'absence des fissures indiquent que la paraffine a bien adhéré à la perlite et le graphite. On note que les deux poudres ont une bonne compatibilité avec la paraffine.

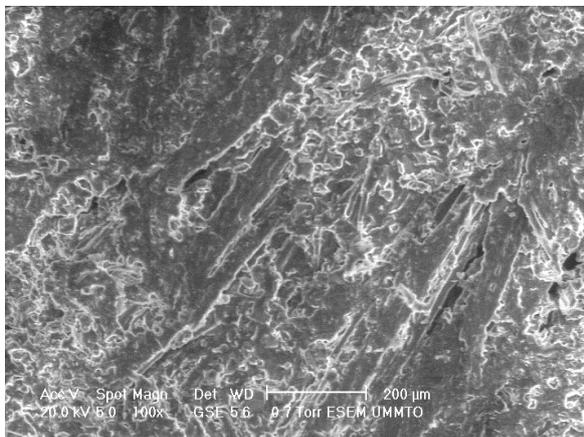
- Echantillon : Pa 60% Pr35% Gr5% +J



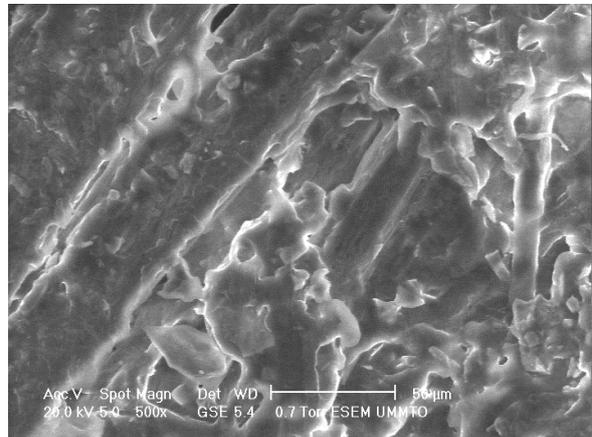
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure IV.2 : Images MEB de l'échantillon Pa60% Pr35% Gr5% +J

L'observation au Microscope Electronique à Balayage de l'échantillon met en évidence la distribution homogène de la poudre de perlite et les fibres du jute en (a) et (b), l'absence des fissures indique la bonne adhérence de la paraffine à la perlite et le graphite ainsi qu'aux fibres de jute. Les deux poudres et les fibres de jute ont une bonne compatibilité avec la paraffine.

IV.1.2) Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

- Spectre infrarouge de la perlite :

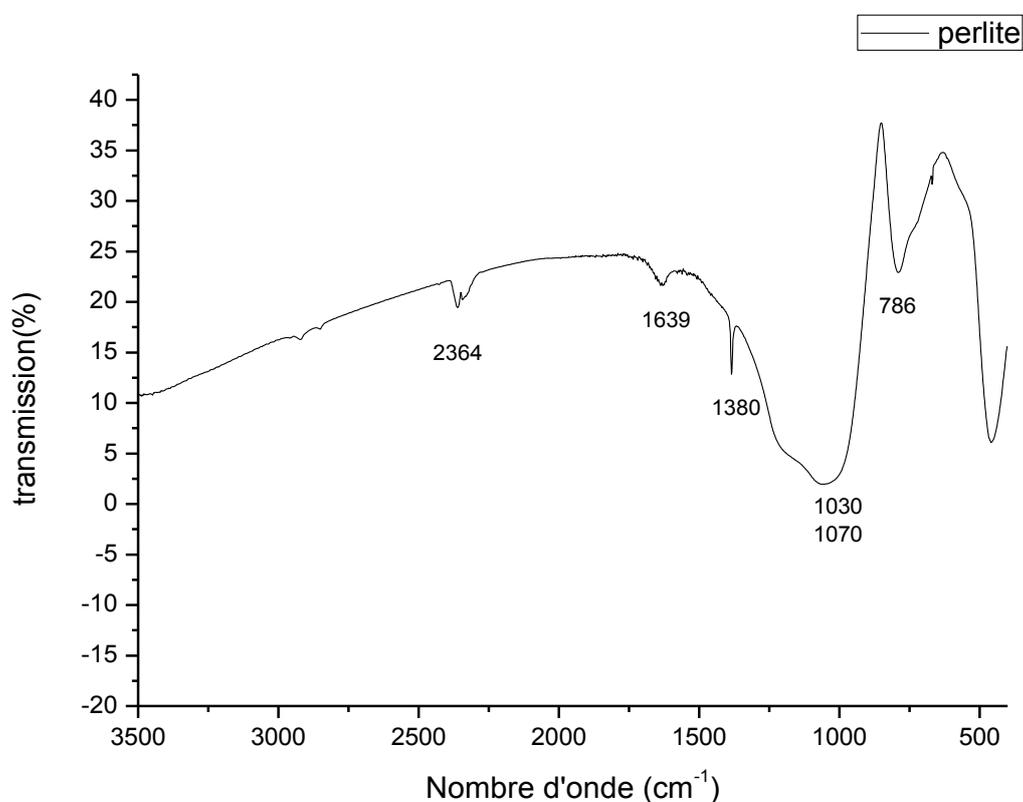


Figure IV.3 : Spectre Infrarouge de la perlite

Le spectre infrarouge de la perlite met en évidence les bandes d'adsorption caractéristiques suivantes :

- Pic à 2364 cm^{-1} : vibration de valence correspond à C-H, CH_2
- Pic à 1639 cm^{-1} : vibration de valence correspond à C=C
- Pic à 1380 cm^{-1} : vibration de déformation de la liaison CH_2 du cycle ou OH
- Bande $1030\text{-}1070\text{ cm}^{-1}$: vibration de la liaison S=O élongation (classe : Sulfoxyde)
- Pic à 786 cm^{-1} : vibration de déformation hors plan de la liaison C=O

- Spectre infrarouge du graphite

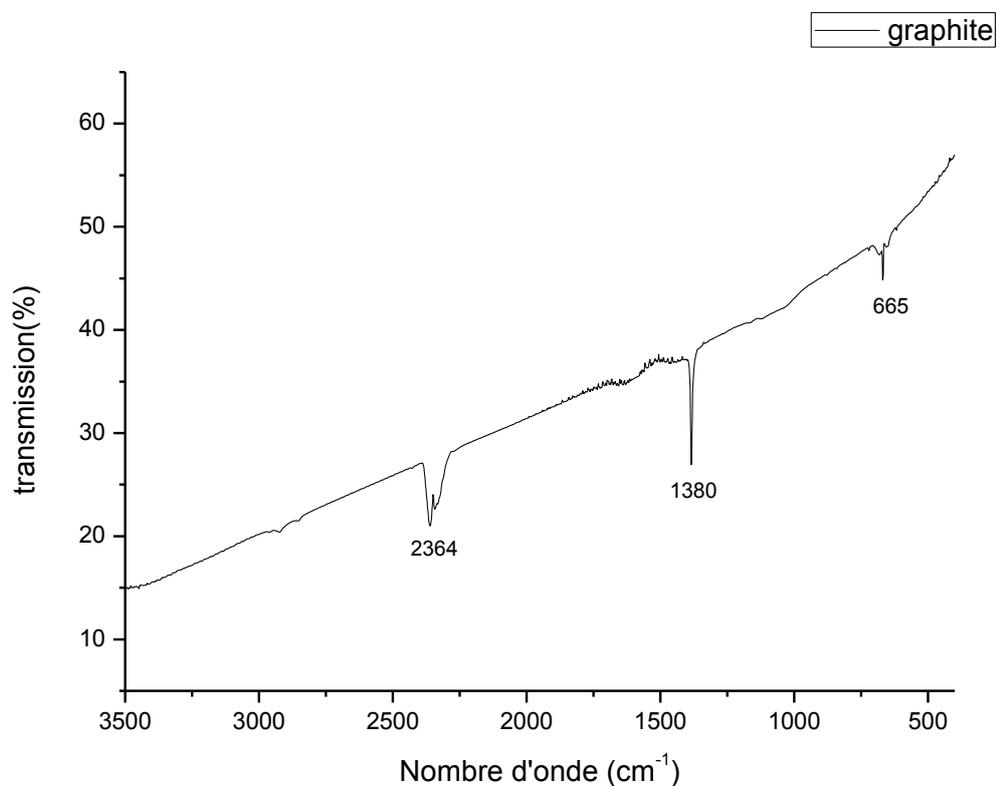


Figure IV.4 : Spectre infrarouge du graphite

Le spectre infrarouge du graphite met en évidence les bandes d'adsorption caractéristiques suivantes :

- Pic à 2364 cm^{-1} : vibration de valence correspond à C-H, CH_2
- Pic à 1380 cm^{-1} : vibration de déformation de la liaison CH_2 du cycle ou OH
- Pic à 665 cm^{-1} : Rotation plane des hydrogènes des carbones (C_6)

- Spectre infrarouge des fibres de jute

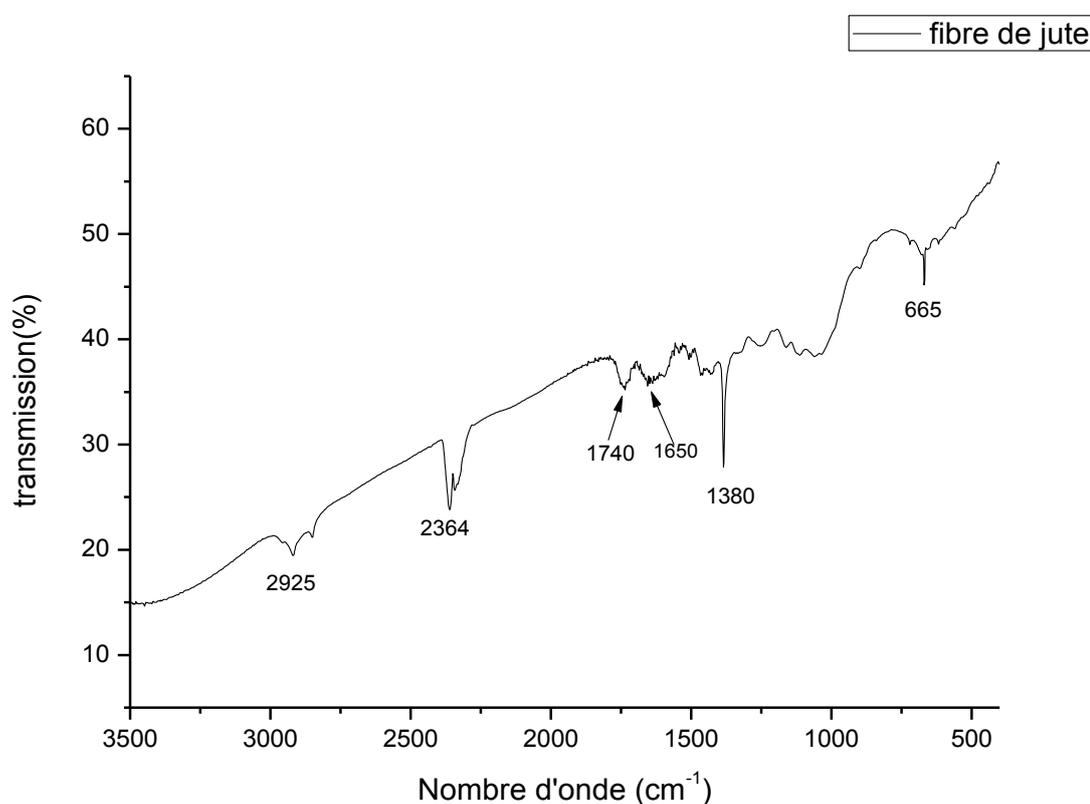


Figure IV.5 : Spectre infrarouge des fibres de jute

Le spectre infrarouge des fibres de jute met en évidence les bandes d'adsorption caractéristiques suivantes :

- Pic à 2925 cm⁻¹ : vibration asymétrique de la liaison C-H, CH₂
- Pic à 2364 cm⁻¹ : vibration de valence correspond à C-H, CH₂
- Pic à 1740 cm⁻¹ : vibration de valence correspond à C=O (acides carboxyliques)
- Pic à 1650 cm⁻¹ : vibration de valence correspond à C=C (double liaison)
- Pic à 1380 cm⁻¹ : vibration de déformation de la liaison CH₂ du cycle ou OH
- Pic à 665 cm⁻¹ : Rotation plane des hydrogènes des carbones (C₆)

- Spectre infrarouge de la paraffine

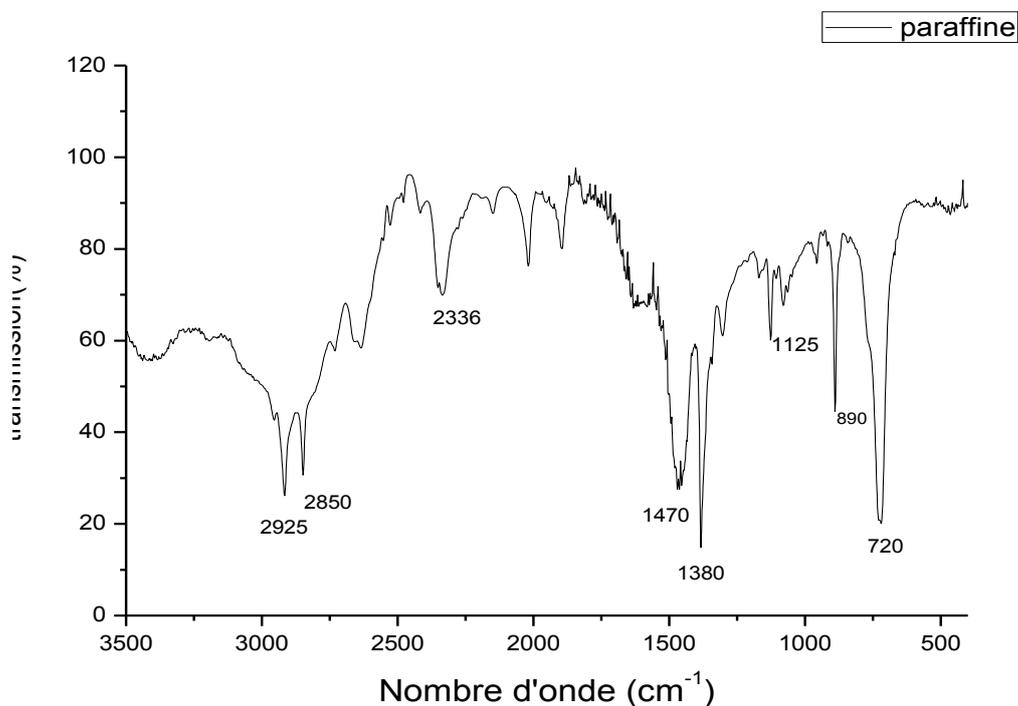


Figure IV.6 : spectre infrarouge de la paraffine

Le spectre infrarouge de la paraffine met en évidence les bandes d'adsorption caractéristiques suivantes :

- Pic à 2925 cm⁻¹ : vibration asymétrique de la liaison C-H, CH₂
- Pic à 2850 cm⁻¹ : vibration de symétrique de la liaison C-H, CH₂
- Pic à 2336 cm⁻¹ : triple liaison des nitriles
- Pic à 1470cm⁻¹ : vibration de déformation de la liaison CH₃ dans le plan a
- Pic à 1380 cm⁻¹ : vibration de déformation de la liaison CH₂ du cycle ou OH
- Pic à 1125 cm⁻¹ : vibration de la liaison C-O élongation (alcool secondaire)
- Pic à 890 cm⁻¹ : vibration de déformation de la liaison C-H, CH₂
- Pic à 720 cm⁻¹ : vibration de déformation de la liaison CH₂

- Spectre infrarouge du composite (Pa-Pr-Gr)

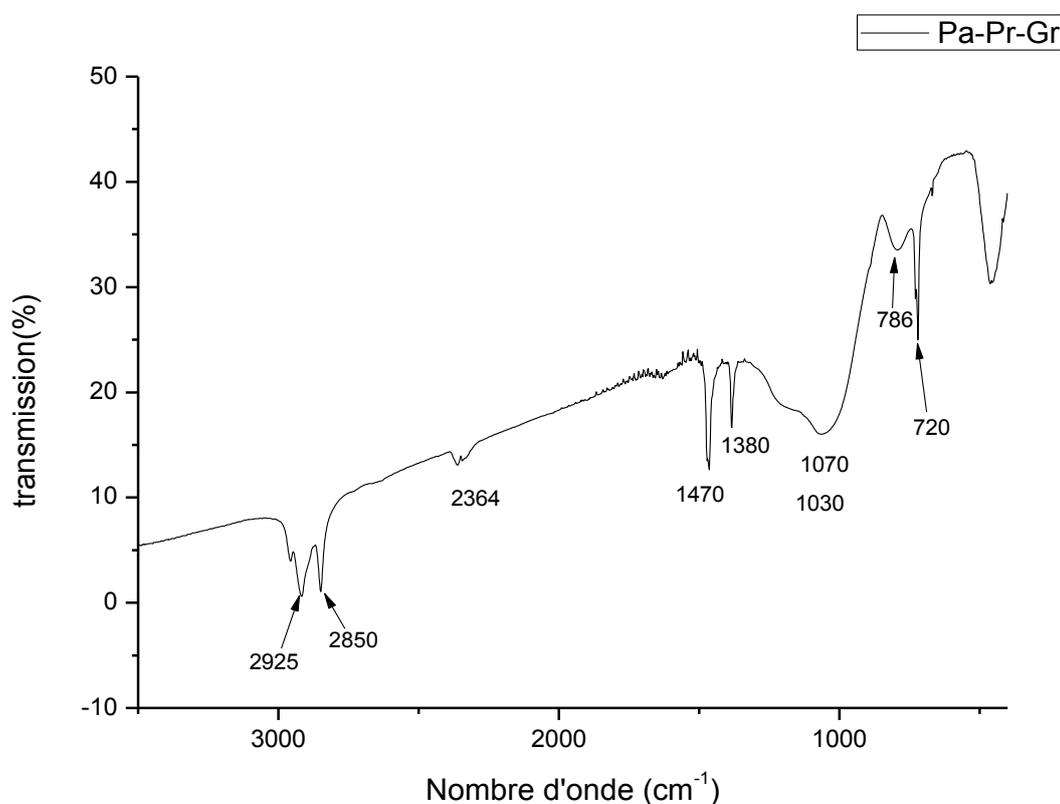


Figure IV.7 : Spectre infrarouge du composite Pa-Pr-Gr

Le spectre infrarouge du composite Pa-Pr-Gr met en évidence les bandes d'adsorption caractéristiques suivantes :

- Pic à 2925 cm⁻¹ : vibration asymétrique de la liaison C-H, CH₂
- Pic à 2850 cm⁻¹ : vibration symétrique de la liaison C-H, CH₂
- Pic à 2364 cm⁻¹ : vibration de valence correspond à C-H, CH₂
- Pic à 1470 cm⁻¹ : vibration de déformation de la liaison CH₃ dans le plan
- Pic à 1380 cm⁻¹ : vibration de déformation de la liaison CH₂ du cycle ou OH
- Bande 1030-1070 cm⁻¹ : vibration de la liaison S=O élongation (classe : Sulfoxyde)
- Pic à 786 cm⁻¹ : vibration de déformation hors plan de la liaison C=O
- Pic à 720 cm⁻¹ : vibration de déformation de la liaison CH₂

- Superpositions des spectres infrarouges (Pa-Pr-Gr-Composite)

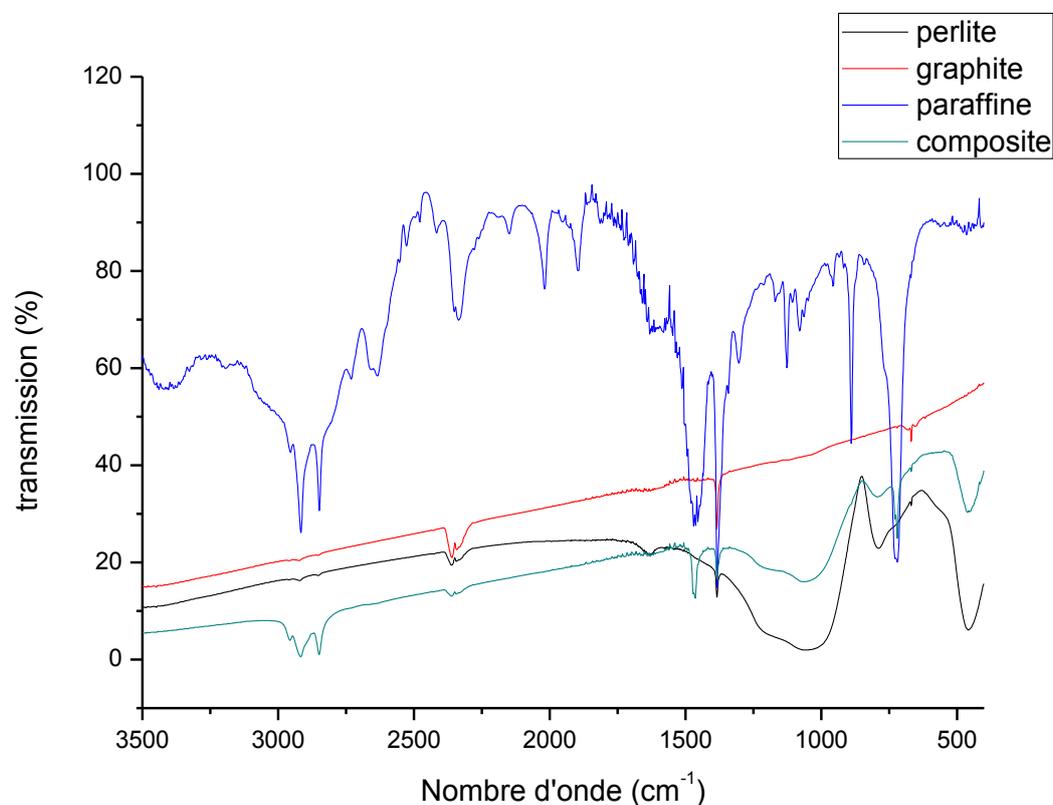


Figure IV.8 : Superpositions des spectres infrarouges (Pa-Pr-Gr-Composite)

On remarque que tous les pics du spectre infrarouge du composite Pa-Pr-Gr sont apparus soit dans le spectre infrarouge de la paraffine, ou de graphite ou de la perlite. On remarque également que l'intensité de certains pics a diminué, mais aucun nouveau pic n'est apparu. On peut ainsi affirmer qu'il n'y a pas de réaction chimique dans les composites élaborés.

- Spectre infrarouge du composite Pa-Pr-Gr-J

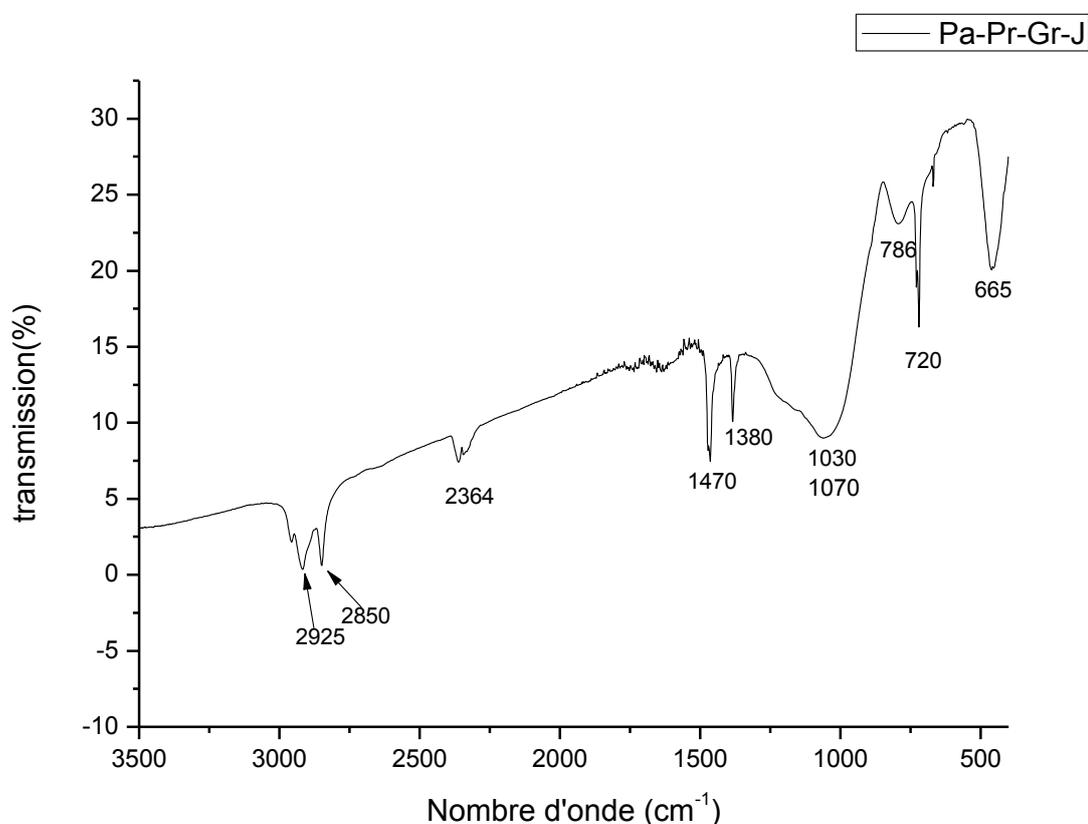


Figure IV.9 : Spectre infrarouge du composite Pa-Pr-Gr-J

Le spectre infrarouge du composite Pa-Pr-Gr-J met en évidence les bandes d'adsorption caractéristiques suivantes :

- Pic à 2925 cm⁻¹ : vibration asymétrique de la liaison C-H, CH₂
- Pic à 2850 cm⁻¹ : vibration symétrique de la liaison C-H, CH₂
- Pic à 2364 cm⁻¹ : vibration de valence correspond à C-H, CH₂
- Pic à 1470cm⁻¹ : vibration de déformation de la liaison CH₃ dans le plan
- Pic à 1380 cm⁻¹ : vibration de déformation de la liaison CH₂ du cycle ou OH
- Bande 1030-1070 cm⁻¹ : vibration de la liaison S=O élongation (classe : Sulfoxyde)
- Pic à 786 cm⁻¹ : vibration de déformation hors plan de la liaison C=O
- Pic à 720 cm⁻¹ : vibration de déformation de la liaison CH₂
- Pic à 665 cm⁻¹ : Rotation plane des hydrogènes des carbones (C₆)

- Superpositions des spectres infrarouges (Pa-Pr-Gr-J-Composite)

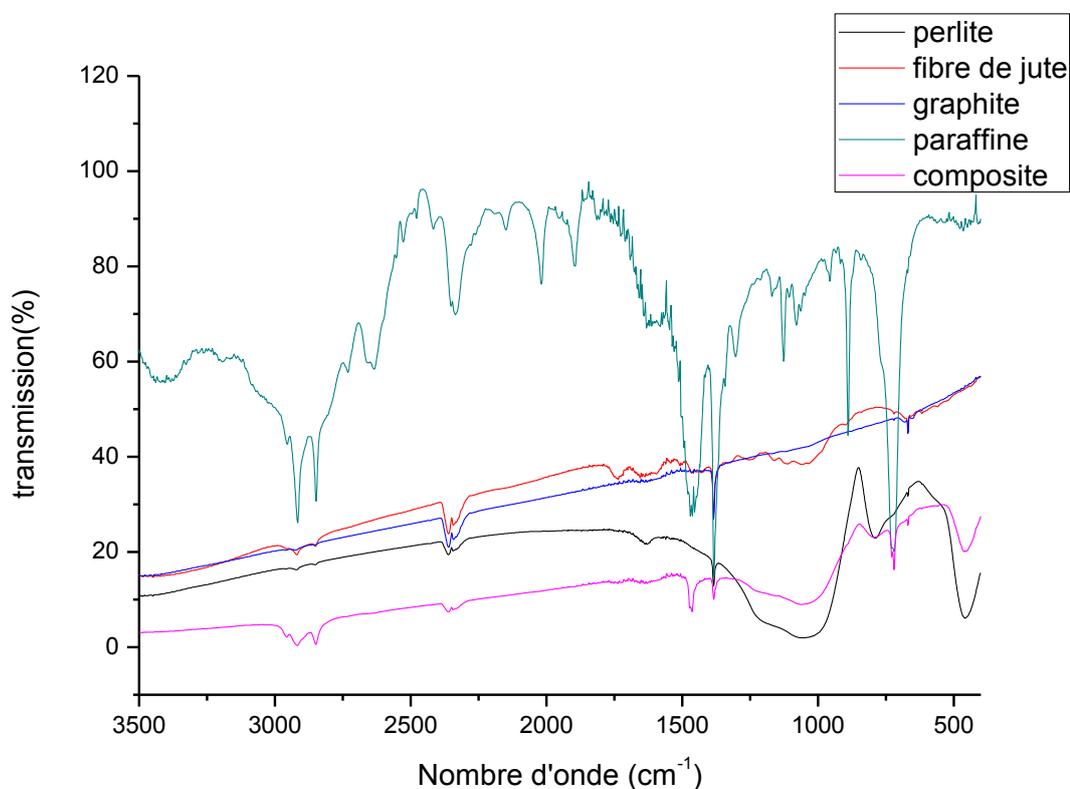


Figure IV.10 : Superposition des spectres infrarouges (Pa-Pr-Gr-J-Composite)

On remarque que tous les pics du spectre infrarouge du composite Pa-Pr-Gr-J sont apparus, soit dans le spectre infrarouge de la paraffine, soit dans le spectre du graphite ou de la perlite ou les fibres de jute. On remarque également que l'intensité de certains pics a diminué, mais aucun nouveau pic n'est apparu. On peut ainsi affirmer que il n'y a pas de réaction chimique au sein des composites élaborés.

IV.1.3) Détermination de la conductivité thermique

- **Premier cas : cas de la plaque de composite de (paraffine + perlite) :**

Epaisseur de la plaque : $e = 7.5 \cdot 10^{-3}$ m.

$$T_1 = T_c = 34.65^\circ\text{C}$$

$$T_2 = T_f = 20.3^\circ\text{C}$$

$$\text{HFM} = 44.6 \text{ mv}$$

$$T_{\text{moy}} = T = \frac{T_1 + T_2}{2} = 26.48 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$dT = T_1 - T_2 = 14.35 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\lambda = \frac{Is[(K1+(K2*T)) + ((K3+(K4*T)*\text{HFM})) + ((K5+(K6*T))*\text{HFM}^2)]}{dT}$$

$$\text{AN: } \lambda_1 = \mathbf{0.3135 \text{ W/(m.K)}}$$

- **Deuxième cas : plaque composite de (paraffine+ perlite +graphite)**

$$\text{Epaisseur de la plaque : } e = 7.025 * 10^{-3} \text{ m}$$

$$T_1 = T_c = 34.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = T_f = 20.6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{HFM} = 47.2 \text{ mV}$$

$$T_{\text{moy}} = T = \frac{T_1 + T_2}{2} = 27.75 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$dT = T_1 - T_2 = 14.3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{AN: } \lambda_2 = \mathbf{0.325 \text{ W/(m.K)}}$$

Conclusion:

D'après le calcul de la conductivité thermique pour les deux composites (Pa 60%, Pr 40%) et (Pa 60%, Pr 35%, Gr 5%), on constate que $\lambda_2 > \lambda_1$. Le graphite améliore la conductivité thermique des matériaux même en faible pourcentage.

IV.1.4) Détermination de la masse volumique par pesée et pycnomètre

Pour déterminer la masse volumique, on a testé 04 échantillons (Pa-Pr-Gr) et 04 échantillons (Pa-Pr) et 02 échantillons avec fibre du jute.

N°	Echantillons	M _e (g)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	Masse volumique (g/cm ³)
COM1	70% Pa30% Pr	71.993	72.400	72.028	1094.086
COM2	70% Pa25% Pr5% Gr	72.002	72.301	72.021	1067.857
COM3	65% Pa35% Pr	72.032	72.301	72.056	1144.681
COM4	65% Pa30Pr5% Gr	72.022	72.423	72.066	1123.249

COM5	60%Pa40%Pr	71.998	72.253	72.056	1294.416
COM6	60%Pa35%Pr5%Gr	71.996	72.221	72.038	1229.508
COM7	55%Pa45%Pr	72.002	72.341	72.088	1339.921
COM8	55%Pa40Pr5%Gr	71.988	72.319	72.068	1318.725
COM9	60%Pa40%Pr+J	71.989	72.591	72.025	1063.604
COM10	60%Pa35%Pr5%Gr+J	72.031	72.715	72.041	1014.836
COM11	100%Pa	71.998	72.431	71.944	889.117

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Le Tableau IV.1 représente les valeurs des masses mesurées (M_e , M_1 , M_2) et les valeurs de la masse volumique pour chaque échantillon.

Le graphe ci-dessus représente la masse volumique en fonction du pourcentage de la perlite et du graphite.

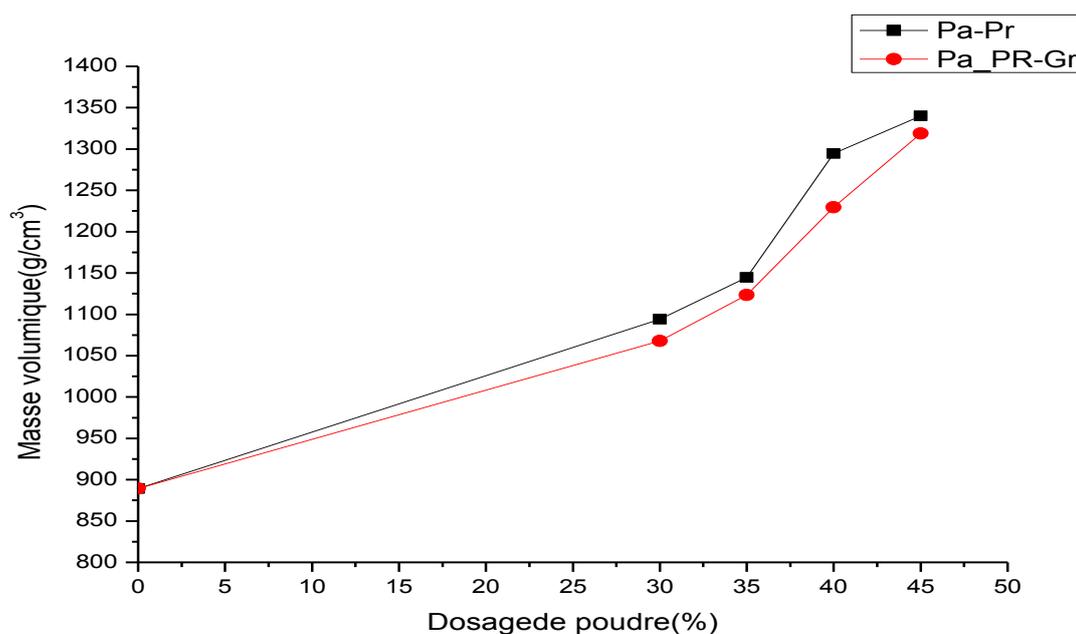


Figure IV.11 : Variation de la masse volumique en fonction de dosage en poudre

A partir du graphe ci-dessus, on remarque une évolution linéaire de la masse volumique qui est proportionnelle au pourcentage en poudre. On remarque également que pour un même dosage la présence de la poudre de graphite diminue la masse volumique de l'échantillon, donc le graphite est moins dense que la poudre de perlite utilisée.

Résultats des tests de calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

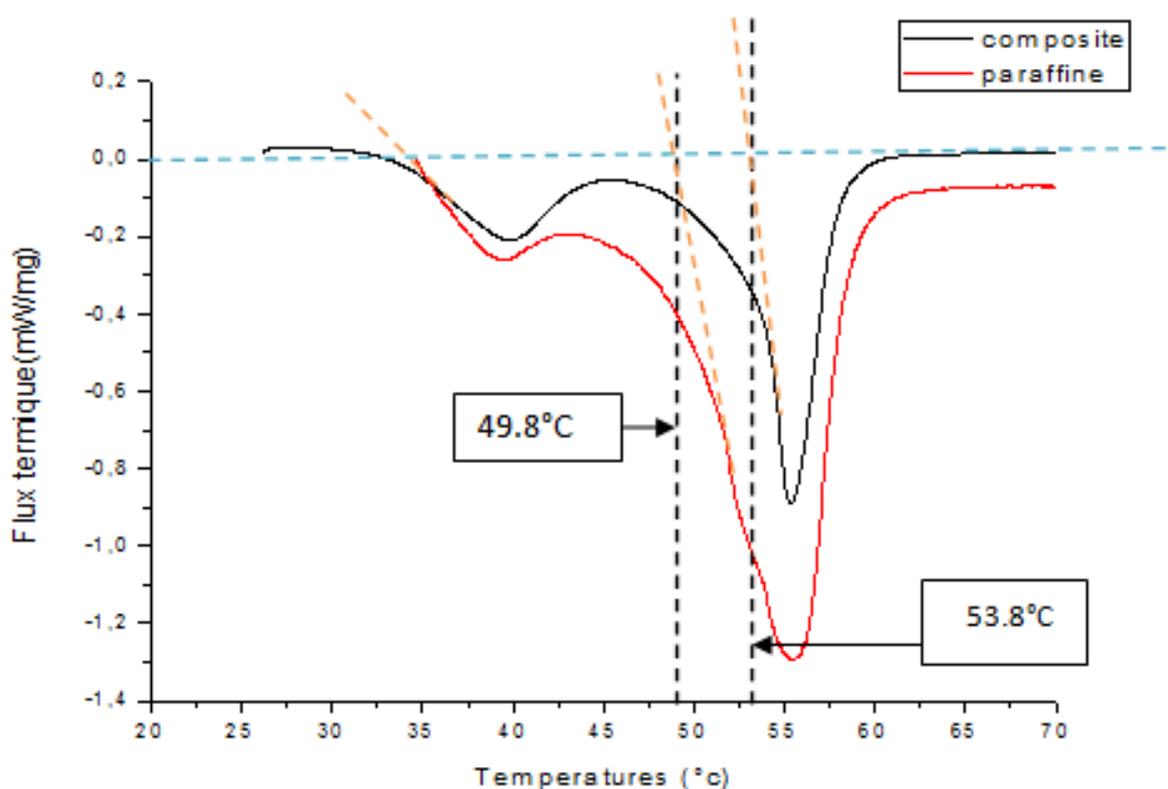


Figure IV.12 : Analyse DSC de la paraffine et du composite MCP/Pr, Gr

La figure IV.12 représente la courbe DSC de la paraffine pure et celle du composite MCP/Pa, Gr. Les courbes ci-dessus représentent la phase de fusion du composite, ce qui explique sur le graphe un flux négatif (dépense en énergie pour l'appareil). La transformation est endothermique (correspond à la fusion de la paraffine). Dans ces courbes, les pics représentent le changement de phase solide-liquide. La température du début de fusion de la paraffine est estimée à 49.8°C, et la température du pic de fusion est de 55.6°C, celle de fin de fusion est 58.3°C. La chaleur latente de changement de phase solide-liquide est estimée à 135 J/g.

La température début de fusion du composite est 53.8°C, la température du pic de fusion est 55.4°C et celle de fin de fusion est 57.8°C. La chaleur latente de changement de phase solide-liquide est de 72.45 J/g (valeur relativement). On remarque qu'elle a fortement diminué par rapport à celle de la paraffine. Bien qu'il y ait une légère modification de température de fusion, celle-ci reste toujours dans le domaine approprié aux applications de stockage d'énergie.

Calcul de la quantité d'énergie nécessaire pour faire fondre la paraffine du composite d'après les résultats de la DSC

➤ Pour le premier pic :

$$Q_1 = m C_{Pf} (T_{ff} - T_{df})$$

Où :

m : est la masse du composite et elle est égale à 1.17 kg

C_{pf} : la chaleur massique spécifique de fusion du premier pic, 4275 J/(kg.K)

T_{ff} : température de fin de fusion, elle est égale à 43.3°C

T_{df} : température de début de fusion, elle est égale à 34.4°C

AN : **$Q_1 = 44.52 \text{ kJ}$**

• Pour le deuxième pic :

$$Q_2 = m C_{Pf} (T_{ff} - T_{df})$$

C_{pf} : chaleur massique spécifique du deuxième pic, 16397 J/(kg.K)

T_{ff} : température de fin de fusion, elle est égale à 57.8

T_{df} : température de début de fusion, elle est égale à 53.8

AN : **$Q_2 = 76.74 \text{ kJ}$**

Donc, la quantité de chaleur nécessaire pour faire fondre toute la paraffine du composite est la somme des deux quantités de chaleur calculées précédemment.

Donc : **$Q = Q_1 + Q_2$**

AN : **$Q = 121.26 \text{ kJ}$**

IV.2) Résultats du montage expérimental effectué

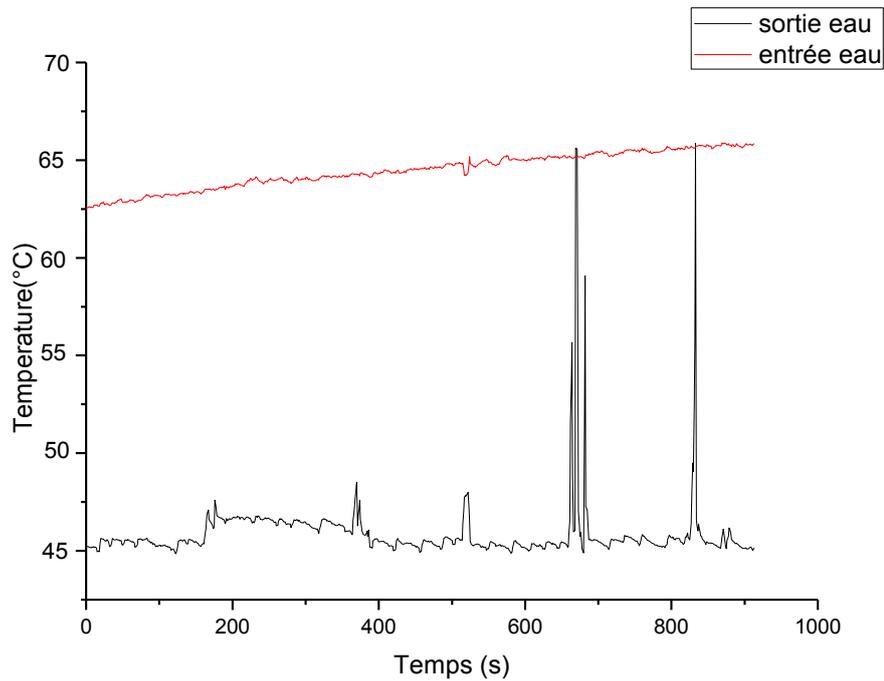


Figure IV.13 : variation de la température d'Eau en fonction du temps

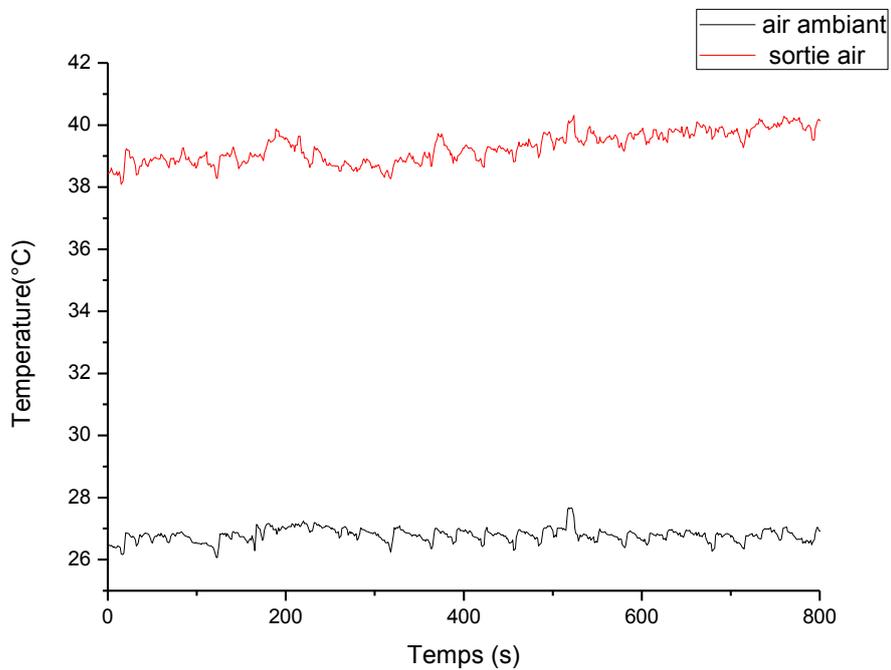


Figure IV.14: Variation de la température d'air en fonction du temps

Calcul des différents flux de chaleur obtenue du modèle expérimental

- **Le flux cédé par l'eau :**

$$Q_e = \dot{m}_{eau} C_{p_{eau}} (T_{es} - T_{ee}) \quad (IV.4)$$

Où :

$$\dot{m}_{eau} = 0.072 \text{ kg/s}$$

$$C_{p_{eau}} = 4182 \text{ J/kg.K}$$

On donne les résultats de calcul dans le tableau ci-dessous

Temps (s)	Température d'entrée d'eau dans l'échangeur (°C)	Température de sortie d'eau de l'échangeur (°C)	Flux Q_e (kW)
0	62.5	45.5	5.12
200	63.5	46.5	5.12
400	64.5	46	5.57
600	65	45	5.93
800	65.5	45.5	5.93

Tableau (IV.2) : résultats de calcul du flux cédé par l'eau en fonction du temps.

- **Le flux récupéré par l'air :**

$$Q_{air} = \dot{m}_{air} C_{p_{air}} (T_{as} - T_{ae}) \quad (IV.5)$$

Où : $\dot{m}_{air} = 0.0317 \text{ kg/s}$

$$C_{p_{air}} = 1006 \text{ J/kg.K}$$

Le tableau ci-dessous donne les résultats de calcul :

Temps (s)	Température d'entrée d'air (°C)	Température de sortie d'air (°C)	Le flux Q_{air} (kW)
0	27	38.5	0.37
200	27	39.5	0.40
400	27	39.5	0.40
600	27	40	0.41
800	27	40	0.41

Tableau (IV.3) : Résultats de calcul du flux récupérer par l'air en fonction du temps.

- **Le flux absorbé par les parois de l'échangeur**

$$Q_{ab} = [m_{cu} C_{p(cu)} (T_f - T_i)] / \Delta t \quad (IV.6)$$

On a:

$$m_{cu} = 8.755 \text{ kg}$$

$$C_{p(cu)} = 381 \text{ J/ kg K}$$

$$T_f = 63 \text{ }^\circ\text{C} \quad ,$$

$$T_i = 27 \text{ }^\circ\text{C} \quad , \quad \Delta t = 1000 \text{ s}$$

$$\text{AN:} \quad Q_{ab} = \mathbf{120.08 \text{ W}}$$

Conclusion

D'après le calcul des différents flux générés par le montage expérimental, on constate que la variation de température entre l'entrée et la sortie est estimée à 20°C, et qui donne un flux de chaleur qui varie de 5.12 kW à 5.93 kW (flux cédé par l'eau), et d'autre part le flux récupérer par l'air est de l'ordre de 0.41 kW et le flux absorbé par les parois de l'échangeur est 0.12 kW, la somme de ces deux derniers est faible devant le flux cédé par l'eau. Par ailleurs la quantité de chaleur nécessaire pour faire fondre la paraffine est de 121.26 kJ qui est importante, donc on peut dire qu'une partie de la différence entre le flux cédé par l'eau et le flux récupérer par l'air et la paroi est absorbée par le composite.

Conclusion générale

Dans cette étude, le composite paraffine/perlite/graphite est préparé comme un matériau de stockage d'énergie thermique à forme stabilisée pour des applications de stockage d'énergie, et en particulier dans un échangeur stockeur. Ce composite a été préparé par la méthode dite de mélange de poudre de perlite et de graphite avec le MCP (paraffine). Ce composite MCP, à forme stabilisée, a été caractérisé par les techniques d'analyse MEB, FT-IR et DSC. Les observations au MEB ont montré que la paraffine a été bien retenue dans la perlite, utilisée comme support de stockage. Les résultats FT-IR ont montré l'existence d'une bonne compatibilité chimique entre le MCP et les composants du matériau composite. Les résultats d'analyse par DSC des composites MCP/Perlite/Graphite, dont la température de début de fusion est de 53.8 °C avec une chaleur latente de 85.62 J/g, est appropriée pour des applications de stockage d'énergie.

Un échangeur stockeur a été réalisé de manière à loger les plaques (pastilles) de MCP. Un circuit aéraulique à été monté spécialement sur l'échangeur pour son refroidissement en convection forcée dans la phase de déstockage.

Un montage expérimental à été mis au point au sein du laboratoire afin de tester les performances de cet échangeur stockeur.

Les résultats obtenus donnent une variation de température de l'eau estimée à environ 20 °C lors de la phase de stockage. Après calcul des différents flux de chaleur (flux cédé par l'eau, flux récupéré par l'air, flux absorbé par les parois de l'échangeur), on a constaté qu'une partie du flux chaleur cédé par l'eau est stocké dans le matériau composite MCP ; c'est l'objectif recherché dans cette étude. Cet échangeur stockeur permet, dans sa phase de stockage, d'assurer, pour le fluide chaud, un écart de température appréciable qui pourrait trouver son utilisation dans le domaine industriel. Il faut néanmoins préciser qu'une phase de déstockage est nécessaire et doit être menée. Une ventilation forcée de l'air à travers l'échangeur, sur une durée qui reste à déterminer (par expérience), doit assurer au MCP un déstockage de chaleur qui lui permettra de subir la phase de cristallisation pour un nouveau cycle thermique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] JP. Dumas/X.PY. Stockage d'énergie thermique par Matériau à changement de phase (MCP) ECPH-2009.
 - [2] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R Chen, Buddhi, D., 2009. Review on thermal energy Storage with phase change materials and application. Renewable and sustainable energy Reviews, p 318-345.
 - [3] C.K. Jotshi, D.Y. Goswami and J.J. Tomlinson, Solar thermal energy storage in phase Change materials, in proc. 1992 ASES Annual Conf, USA, 1992.
 - [4] S.M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: Heat storage materials and techniques, Energy research, Vol. 39(11), pp. 1127-1138, 1997.
 - [5] Echangeur de chaleur – description des échangeurs – catégorie : Génie énergétique, be 9516, Technique de l'Ingénieur.
 - [6] J.F. Sacadura, Initiation aux transferts thermiques, coordonnateur. Edition TEC et DOC.
 - [7] G.Ricot, Transmission et échangeurs de chaleur, les éditions Parisiennes.
 - [8] Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Paris, France. Spécialité Energétique. Serge Blaise Ekomy Ango. Le 24 novembre 2011.
 - [9] Fiche technique de la perlite expansée, PERLINDUSTRIA. info@perlindustria.com / www.perlitayvermiculita.com (consulté le 01/07/2014).
 - [10] Jean-Paul Bailon et Jean-Marie Dorlot. Troisième édition des matériaux, page 624-625.
 - [11] Faeber (2004). Microanalyse X par sonde électrique. Institut de physique et de chimie des matériaux de Strasbourg (IPCMS), France.
 - [12] Walte B.A. 1989- An Aufbau methodology for the modeling of rotational fine structure of infrared spectral bands- J. Chem, Ed, 66.p 805-809.
 - [13] P.A. HILTON. LTD, Manuel d'utilisation du CT mètre du laboratoire de G.M.
-