

*République Algérienne Démocratique et Populaire.
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.
Université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou.
Faculté du Génie de la Construction.
Département de Génie Mécanique.*



Mémoire

*En vue de l'obtention du diplôme Master Professionnel
en Génie Mécanique. **Option** : Energétique.
Spécialité : Energies Renouvelables.*

Thème :
***Elaboration d'un nouveau composite MCP pour son
utilisation dans un échangeur stockeur.***

Présenté Par : Mlle HARANI Nabila
Mlle BOUBERRAGA Amel
Mlle BENAOUA Nassima

Proposé et dirigé par : Mr S. MAKHLOUF

Promotion : 2013/2014

Remerciement

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 tenons à exprimer nos chaleureux remerciements à notre promoteur Mr S. MAKKHLOUF pour sa précieuse aide, sa disponibilité et ses précieux conseils pour l'élaboration de ce modeste travail.

Nous remercions aussi les responsables des laboratoires du département d'Agronomie, et les responsables du laboratoire MCI (moteur à combustion interne) de la Faculté du Génie de la construction.

Nous tenons également à remercier les responsables de l'atelier de Mécanique de Oued-Aissi pour leur aide dans la réalisation de l'échangeur.

Nous tenons enfin à remercier le président et les membres du jury pour avoir accepté de juger ce modeste travail.

Dédicaces

J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail :

A mes très chers parents, tout mon respect et affection en témoignage de leur soutien, sacrifice, patience, ainsi que pour leurs conseils et leur précieuse aide morale et financière dont ils ont fait preuve pour que je réussisse, que Dieu les protège et les entoure de sa bénédiction ;

Mes très chères sœurs : Kahina, Meriem, Celia.

A mon très cher frère : Cherif.

A tous mes amis (es) sans exception et à toute la famille.

*A la promotion d'ENERGETIQUE
2013/2014.*

Amel

Merci

Dédicaces

J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail :

A mes très chers parents, tout mon respect et affection en témoignage de leur soutien, sacrifice, patience, ainsi que pour leurs conseils et leur précieuse aide morale et financière dont ils ont fait preuve pour que je réussisse, que Dieu les protège et les entoure de sa bénédiction ;

Mes très chères sœurs : Amina, Souad.

A mon très chers frères : Farid, Ahmed.

A tous mes amis (es) sans exception et à toute la famille.

*A la promotion d'ENERGETIQUE
2013/2014.*

Nabila

Merci

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*Mes frères et sœurs, et à mes charmant parents,
auxquels je dois tout mon respect .et que je ne remercierai
jamais assez pour leurs sacrifices, encouragements, soutien
morale et matériel, pour mener à bien mes études.*

Aussi à toute ma nouvelle famille.

Nassima

Merci

NOMENCLATURE

Lettres latines :

Symboles	Signification	Unite
(CS)	Chaleur Sensible	J/ kg
(CL)	Chaleur Latente	J/kg
C_s	Chaleur spécifique du corps à l'état solide.	J/(kg.K)
C_L	Chaleur spécifique du corps à l'état liquide.	J/(kg.K)
C_p	Chaleur Massique a pression constante	J/ (kg.K)
$C_{p\text{ eau}}$	Chaleur Massique d'eau	J/ (kg.K)
D	Diamètre	m
d	Distance	m
ΔT	Différence entre température finale et température initiale)	°C
Δx	Différence entre position finale et la position initiale	m
H_{finale}	Enthalpie à l'état final	J
$H_{initiale}$	Enthalpie à l'état initial	J
Δh_f	Enthalpie spécifique de fusion.	J/g
ΔH	Différence d'enthalpie	J
h	Coefficient de transfert de chaleur	W / (m ² .K)
I_s	épaisseur du spécimen	m
K	Coefficient de transmission surfacique	W/ (m ² .°c)
L_f	Chaleur Latente de Changement de Phase (f pour fusion)	J/kg
L_v	Chaleur Latente de Changement de Phase (v pour vaporisation)	J/kg
$L_{f\text{ eau}}$	Chaleur latente de changement de phase	J/kg
L	Longueur	m
m	masse	kg
Q	Flux de chaleur	W
S	Surface d'échange en contact avec le	m ²

	fluide.	
T_p	Température de la paroi.	$^{\circ}\text{C}$
T_{∞}	Température loin de la paroi.	$^{\circ}\text{C}$
$\bar{T}$	Température moyenne	$^{\circ}\text{C}$
T_1	Température de la plaque chaude.	$^{\circ}\text{C}$
T_2	Température de la plaque froide.	$^{\circ}\text{C}$
V	Volume	m^3

Lettres grecques :

Symboles	Signification	Unite
ϵ	Emissivité de la surface	
Λ	Conductivité thermique,	W/ (m.K)
P	Masse volumique	kg/m^3
Σ	Constante de Stephan Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/ ($\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$)]	$\text{W/ (m}^2 \cdot \text{K}^4)$
Φ	Densité de puissance	W/m^2

Abréviation et indices

Symboles	Signification
"U"	Echangeur à tubes
Si	Silice
Pa	Paraffine
Gr	Graphite
MCP	Matériau à Changement de Phase
MEB	Microscope Electronique à Balayage
DSC	Calorimétrie différentielle à balayage
FT-IR	Spectroscopie Infra-Rouge à Transformée de Fourier
HFM	Mesure de flux de chaleur

Les équations

Equation (I.1): Le transfert de chaleur par conduction.....	3
Equation (I.2) : La puissance.....	3
Equation (I.3) : La densité de flux de chaleur.....	3
Equation (I.4) : Loi de Newton.....	3
Equation (I.5) : La loi de Stephan Boltzmann.....	4
Equation (II.1) : Quantité de chaleur.....	17
Equation (II.2) : La chaleur spécifique.....	18
Equation (II.3) : La quantité de chaleur dans le cas d'un changement d'état (fusion)..	18
Equation (II.4) : Flux de chaleur.....	19
Equation (II.5) : L'énergie stockée.....	19
Equation (III.1) : Equation de la conductivité thermique.....	47

Equation (III.2) : Equation de la masse volumique.....	48
Equation (III.3) : Equation de la masse volumique du solide.....	48

Liste des figures

Figure I. 1:	La conduction	2
Figure I. 2:	La convection.....	3
Figure I. 3:	La radiation.....	4
Figure I. 4:	Circulation anti-méthodique.....	5
Figure I. 5:	Circulation méthodique.....	5
Figure I. 6:	Circulation à courant croisé.....	6
Figure I. 7:	Classement des échangeurs suivant la compacité.....	7
Figure I. 8:	Echangeur à tubes en U.....	8
Figure I.9 :	Echangeur à spirale.....	9
Figure I.10 :	Echangeur à bloc simple.....	10
Figure I.11 :	Echangeur à bloc complexe.....	10
Figure I.12 :	Echangeur à plaques.....	11
Figure I.13:	Différents types d'échangeurs tubulaires.....	12
Figure I.14 :	Continues ou indépendantes.....	13
Figure I.15 :	Ailettes annulaires ou spiralées.....	13
Figure I.16 :	Ailettes longitudinales.....	13
Figure I.17 :	Ailettes transversales.....	13
Figure II.1 :	Principale technique de stockage de l'énergie thermique.....	17
Figure II.2 :	Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement D'état.....	19
Figure II.3 :	Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température :(a) pour un Corps pur (b) pour un mélange.....	20
Figure II.4 :	Classification des matériaux à changement de phase.....	22
Figure II.5 :	Conditionnement des MCP dans un nodule.....	30
Figure II.6 :	Conditionnement en brique plastique.....	30
Figure III.1 :	Image des matériaux utilisés pour la préparation du composite.....	32
Figure III.2 :	La silice.....	33
Figure III.3 :	La silice en poudre	34
Figure III.4 :	Etuve.....	34
Figure III.5 :	Structure chimique de la silice sec et hydraté	34
Figure III.6 :	Structure du graphite.....	35
Figure III.7 :	Pesée des différents éléments.....	36
Figure III.8 :	Emplacement des éléments dans le récipient.....	37
Figure III.9 :	Emplacement du récipient dans le bain-marie.....	37
Figure III.10 :	Réalisation des pastilles.....	37
Figure III.11 :	Le moule utilisé pour la réalisation des pastilles.....	38
Figure III.12 :	Les pastilles de (40x40x4 mm ³) réalisés.....	38
Figure III.13 :	La compression des pastilles.....	39
Figure III.14 :	Test de perméabilité à l'eau.....	39
Figure III.15 :	La microscopie électronique à balayage.....	40
Figure III.16 :	Les pastilles réalisées.....	41
Figure III.17 :	Le spectromètre utilisé.....	41

Figure III.18 : Les pastilles formées.....	42
Figure III.19 : Image représentative de l'appareil utilisé pour la DSC.....	44
Figure III.20: Le récipient dans le bain-marie.....	45
Figure III.21 : Le moule en verre.....	45
Figure III.22 : La plaque de dimension (300×300×6 mm ³).....	45
Figure III.23 : CT mètre.....	46
Figure III.24 : Pesées de la masse volumique.....	48
Figure III.25 : Image représentative du prototype réalisé.....	49
Figure III.26 : Les tuyaux en cuivre.....	50
Figure III.27 : Images représentatives des supports.....	51
Figure III.28 : La canette avant et après perçage. (Vue d'en bas).....	51
Figure III.29 : La canette avec et sans le couvercle (vue d'en haut).....	52
Figure III.30 : Le tube central de diamètre (D=22 mm).....	52
Figure III.31 : Image représentative des ailettes en cuivre.....	53
Figure III.32: Image représentative des ailettes soudées sur les tuyaux	53
Figure III.33: Image représentative de la fixation de la partie inférieure.....	54
Figure III.34 : Le mastic de silicone.....	55
Figure III.35: Image de l'échangeur sur SolidWorks.....	55
Figure VI.1 : Images MEB représentatives des échantillons analysés.....	56
Figure VI.2 : Spectre FT-IR de la silice.....	58
Figure VI.3 : Spectre FT-IR du graphite.....	58
Figure VI.4 : Spectre FT-IR de la paraffine.....	59
Figure VI.5 : Spectre FT-IR de la pastille.....	59
Figure VI.6 : Spectre FT-IR de la pastille et de ces composants.....	60
Figure VI.7 : Analyse DSC de la paraffine.....	62
Figure VI.8 : Analyse DSC de l'échantillon.....	62
Figure IV.9: Analyse DSC de l'échantillon et de la paraffine.....	63
Figure IV.10 : image représentative des résultats sur fluent (sans ailettes).....	65
Figure IV.11 : image représentative des résultats sur fluent (avec ailettes).....	66

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20°C.....	18
Tableau II.2 : Propriétés thermo physique des matières organiques non paraffiniques.....	25
Tableau II.3 : Propriétés thermo physiques des acides gras.....	26
Tableau II.4 : Différents hydrates salins.....	28
Tableau II.5 : Liste de quelques eutectiques.....	29
Tableau III.1 : Propriétés chimique et physiques.....	34
Tableau III.2 : Les proportions en masse des différents constituants.....	36
Tableau IV.1 : Résultats de CT mètre.....	57
Tableau IV.2 : Résultats de la masse volumique.....	61
Tableau IV. 3 : Résultats de l'analyse DSC.....	63

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les échangeurs de chaleur.

I.1 Introduction	2
I.2 Définition	2
I.3 Les modes de transfert de chaleur	2
I.3.1 Transfert de chaleur par conduction.....	2
I.3.2 Transfert de chaleur par convection	3
I.3.3 Le rayonnement thermique.....	4
I.4 Principe général de fonctionnement d'un échangeur	4
I.5 Différents modes de circulation dans un échangeur.....	5
I.5.1 Echangeur à courants parallèles	5
I.5.2 Echangeur à courants croisés	5
I.6. Critères de classement des échangeurs.....	6
I.6.1 Classement technologique.....	6
-à tubes	6
-à plaques	6
I.6.2 Classement suivant le mode de transfert de chaleur	6
I.6.3 Classement suivant le régime de fonctionnement	6
-transfert sans stockage.....	6
- transfert avec stockage.	7
I.6.4 Classement suivant l'état des fluides	7
I.6.5 Classement suivant la compacité de l'échangeur	7
I.6.6 Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange.....	7
Quel choix proposer ?	7

I.7 Différents types d'échangeurs	8
I.7.1 Échangeur à tubes en U	8
I.7.2. Echangeur à spirales.....	9
I.7.3 Échangeur à bloc	9
I.7.4 Echangeur à plaques.....	10
I.7.5 Les échangeurs tubulaires	11
I.7.5.1 Différentes catégories existantes	11
a.Echangeur monotube	11
b.Echangeur bitube ou coaxial.....	11
c.Echangeur multitubulaire.....	12
• Echangeur à tubes séparés.....	12
• Echangeur à tubes rapprochés	12
• Echangeur à tubes et calandre	12
I.7.5.2 Échangeurs à tubes ailettes.....	12
a. Ailettes continues et indépendantes	14
b. ailettes longitudinales	14
c. autres types d'ailettes transversales	14
I.8 Caractéristiques des échangeurs.....	14
I.9 Etude complète d'un échangeur	15
Etude thermique.....	15
Etude hydraulique.....	15
Etude mécanique.....	15
Optimisation économique.....	15
I.10 Conclusion.....	15

Chapitre II: Généralités sur les matériaux à changement de phase.

II.1 Introduction	16
-------------------------	----

II.2 Principe du changement de phase.....	16
II.2.1 Chaleur sensible et chaleur latente	16
-Le transfert thermique par chaleur sensible (CS)	16
-Le transfert thermique par chaleur latente (CL)	16
II.2.2 Intérêts des matériaux à changement de phase	17
-Compacité ou densité énergétique	17
-Principe technique de stockage de l'énergie thermique	17
II.2.3 Propriétés des matériaux à changement de phase	20
-Critères thermodynamiques	20
-Critères cinétiques	21
-Critères chimiques	21
-Critères économiques	21
II.3.Classification des matériaux à changement de phase	22
II.3.1 Les composés organiques	23
a. Les composés organiques paraffiniques	23
-Avantages et inconvénients des paraffines	24
- Conditionnement des paraffines	24
b. Les composés organiques non-paraffiniques	25
II.3.2 Les composés inorganiques	26
a) Sels hydratés	26
b)Différents hydrates salins.....	28
- La macro capsule de MCP.....	28
II.3.3 Les eutectiques	29
II.4 Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique ...	29
a.La macro-encapsulation	30
b.La micro-encapsulation	30
II.5 Conclusion.....	31

Chapitre III : partie expérimentale.

III.1 Introduction	32
III.2 Elaboration du MCP.....	32
III.2.1 Matériaux utilisés pour la préparation du composite	32
-La paraffine (MCP).....	32

-silice	33
-Préparation de silice en poudre	34
-Graphite	35
III.2.2 Préparation du composite MCP/Si/Gr et MCP/Si	35
III.2.3 Fabrication des pastilles de dimension (40×40×6 mm ³).....	37
-La compression des pastilles	38
-Test de perméabilité à l'eau	39
III.2.4 Préparation des échantillons pour le MEB et FT-IR et DSC	39
a) Méthodes caractérisé par le MEB	39
-Définition du MEB	39
-Principe de fonctionnement	40
-Préparation de l'échantillon	40
b) Méthodes caractérisé par FT-IR	41
-Définition de FT-IR	41
-Principe de fonctionnement	42
-Préparation de l'échantillon	42
c) méthodes caractérisées par DSC	42
-Définition de la DSC	42
-Principe de fonctionnement de l'appareil	43
III.2.5 Préparation de la plaque (300×300×6 mm ³) pour la mesure de la conductivité thermique.....	44
a) Le CT mètre	46
-Description de l'appareil	46
-Méthode d'essai	47
-Méthode de calcul	47
III.2.6 Mesure de la masse volumique par la méthode du pycnomètre.....	48
III.2.6.1 Principe de mesure de la masse volumique d'un solide.....	48
III.3 Réalisation de l'échangeur	49
III.3.1 Mise en œuvre du prototype de l'échangeur étudié	49
-Préparation des tuyaux	50
-Préparation des deux supports	50
-Préparation des canettes	51
-Préparation des tubes centraux	52
-Préparation des ailettes de cuivre.....	52

-Fixation des ailettes sur les tuyaux en cuivre	53
-Assemblage de la partie inférieure de l'échangeur	53
-Préparation du MCP	54
-Remplissage des canettes	54
-Assemblage de la partie supérieure de l'échangeur	55
-Illustration de l'échangeur sur SolidWorks	55
III.5 Conclusion.....	55

Chapitre IV : Résultats et discussions.

IV.1 Résultats du MEB	56
-Discussion	56
IV.2 Résultats de la conductivité thermique	56
-Discussion	57
IV.3 Résultats FT-IR	58
-Spectre de la Pastille	60
-Discussion	61
IV.4 Résultats de la mesure de la masse volumique	61
IV.5 Résultats de la DSC.....	62
-Discussion	64
IV.6 Résultats de la simulation avec FLUENT	65
-Discussion	67
Conclusion générale.....	68
Perspectives	69

Introduction

L'énergie, cette ressource qui conditionne le développement et l'industrialisation, s'est vue décerner depuis des années un rôle prépondérant dans le monde du travail.

La sonnette d'alarme tirée en 1973, a fait prendre conscience à l'humanité que cette ressource parfois abondante, n'est pas pour autant inépuisable. Essentiellement constituée par les hydrocarbures, elle risque de s'épuiser dans un très proche avenir si elle n'est pas utilisée avec parcimonie.

Depuis, les nouveaux objectifs ont été basés sur la recherche et le développement technologique en vue d'exploiter de nouvelles formes d'énergies, dont la mise en valeur permettra dans certaines mesures de satisfaire les besoins énergétiques futurs. On s'intéresse donc aux énergies dites renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, ainsi qu'à l'utilisation des matériaux appelés matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie.

L'étude des phénomènes de stockage de chaleur dans les matériaux dits 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 et plus particulièrement dans les applications en rapport avec les systèmes de stockage de chaleur 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.

Actuellement, toute l'énergie thermique produite ou recueillie transite au moins une fois par un échangeur thermique. Cet appareil est destiné à des usages extrêmement divers malgré une fonction générale de base identique qui est le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid.

Cependant le but de cette modeste contribution est d'étudier un système de stockage de chaleur latente de fusion dans un matériau à changement de phase. L'objectif est la réalisation d'un échangeur de chaleur (Air/Eau/MCP), pour stocker le surplus d'énergie thermique (chaleur) en utilisant un MCP.

Ce qui fait l'originalité de cet échangeur est le fait que cette étude se veut écologique puisque le constituant principal, qui est le récipient qui abrite le MCP, est fabriqué à partir de canettes de commerce ramassées dans la nature.

Pour mener à bien cette étude que nous considérons comme une contribution éco-thermique de notre part, nous avons commencé par un premier chapitre consacré à la théorie des échangeurs thermiques. Nous faisons une revue générale des différents types d'échangeurs existant en citant les critères de leur classement.

Le deuxième chapitre est consacré en première partie à la théorie des matériaux à changement de phase où on a expliqué le principe du changement de phase, et parlé de la classification de ces matériaux, et en deuxième partie à l'élaboration du matériau à changement de phase utilisé ensuite dans l'échangeur.

Enfin le dernier chapitre est consacré à l'interprétation des résultats obtenus après les essais effectués sur ce composite.

Le mémoire se termine par une conclusion qui reprend l'essentiel des résultats obtenus et une perspective pour les travaux futurs.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES ECHANGEURS

I.1 Introduction

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie. Une grande part (90 %) 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 d'énergie...etc.), dans le transport (automobile, aéronautique, marine), mais également 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, maintenance et encombrement. 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 consommée des procédés.

I.2 Définition

L'échangeur de chaleur, instrument clé du thermicien ou de l'énergéticien permet de contrôler la température d'un système ou d'un produit en échangeant de la chaleur entre deux milieux. Il est indispensable dans de nombreuses applications courantes, chauffage, climatisation, réfrigération, refroidissement électronique, en génie des procédés, pour le stockage d'énergie ou la production d'énergie mécanique (ou électrique) à partir de l'énergie thermique. Dans l'échangeur classique, un fluide chaud transfère une partie de son enthalpie à un fluide froid. Ce type d'échangeur sert de base pour donner les définitions et les paramètres nécessaires à son dimensionnement ainsi qu'à la compréhension des phénomènes [2].

I.3 Les modes de transfert de chaleur

Le transfert d'énergie thermique est une transmission de cette énergie d'une région à une autre, sous l'influence d'une différence de température. On reconnaît classiquement trois modes de transmission de chaleur :

La Conduction, la Convection et le Rayonnement.

I.3.1 Transfert de chaleur par conduction

Dans ce mode de transfert les atomes se transmettent la chaleur de proche en proche grâce aux vibrations des molécules et du mouvement des électrons.

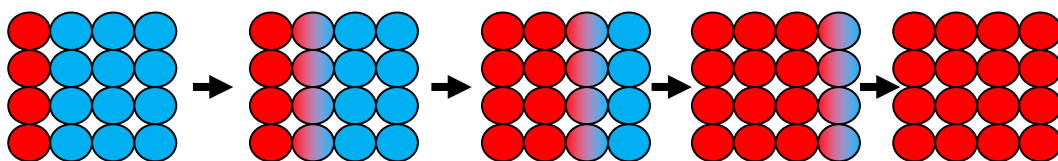


Figure I.1: La conduction

C'est le mode de propagation à l'intérieur des solides, ou des fluides au repos ou en mouvement.

Le transfert de chaleur par conduction est régi par la loi de Fourier, établie expérimentalement pour le cas d'un transfert unidirectionnel d'un corps solide indéformable.

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

où λ est la conductivité thermique du matériau.

Le flux de chaleur s'écrit alors :

$$\phi = \frac{dq}{dt} = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (I.2)$$

La densité de flux de chaleur (W/m^2) s'écrit :

$$\phi = \frac{1}{S} \frac{dq}{dt} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (I.3)$$

I.3.2 Transfert de chaleur par convection

Dans le transfert par convection les molécules sont par contre en mouvement et où les molécules chaudes se mélangent avec les molécules froides et leur transmettent de la chaleur 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.

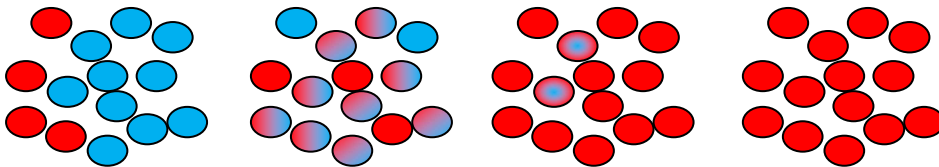


Figure I.2: La convection

C'est le mode de propagation de la chaleur à travers des liquides et des gaz. Ce mode de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\phi = h S (T_p - T_\infty) \quad (I.4)$$

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.

I.3.3 Le rayonnement thermique

La lumière du soleil est une forme de radiation qui est rayonnée à travers l'espace jusqu'à notre planète terre.

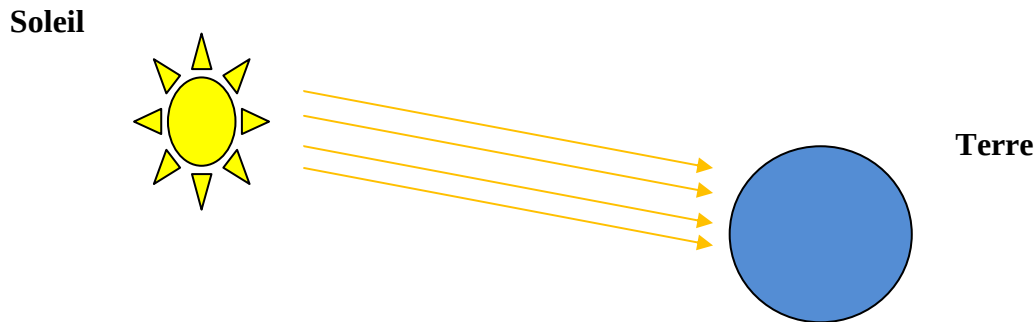


Figure I. 3: La radiation

Le soleil transfère sa chaleur à travers des millions de kilomètres sans aucune aide ou support matériel quelconque. La radiation est la faculté d'augmenter ou de diminuer la température d'un solide sans le toucher. Des ondes électromagnétiques véhiculent la chaleur, cette puissance est évaluée par la loi de Stephan Boltzmann :

$$M = \epsilon \sigma T^4 \quad (I.5)$$

Où ϵ est l'émissivité de la surface et σ la constante de Stephan Boltzmann qui vaut $5,67 \cdot 10^{-8}$ ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$).

I.4 Principe général de fonctionnement d'un échangeur

Le principe le plus général consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique. De manière générale, les deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi qui est le plus souvent métallique, ce qui favorise les échanges de chaleur. On a en général un fluide chaud qui cède de la chaleur à un fluide froid. En d'autres termes, le fluide chaud se refroidit au contact du fluide froid et le fluide froid se réchauffe au contact du fluide chaud. Les deux fluides échangent de la chaleur à travers la paroi d'où le nom de l'appareil. Le principe général paraît simple mais il donne lieu à un grand nombre de réalisations différentes par la configuration géométrique. Le principal problème consiste à définir une surface d'échange suffisante entre les deux fluides pour transférer la quantité de chaleur nécessaire dans une configuration donnée. La quantité de chaleur transférée dépend de la surface d'échange entre les deux fluides mais aussi de nombreux autres paramètres. Ce qui rend une étude précise de ces appareils assez complexes. Les flux de chaleur transférés vont aussi dépendre des températures d'entrée et des caractéristiques thermiques des fluides (chaleur spécifique, conductivité thermique) des

fluides ainsi que des coefficients d'échange par convection. Ce dernier paramètre dépend fortement de la configuration des écoulements et une étude précise doit faire appel à la mécanique des fluides.

I.5 Différents modes de circulation dans un échangeur

Ce classement est réalisé à partir de la géométrie de l'échangeur et du sens relatif des écoulements des deux fluides. Dans ce qui suit, on représente uniquement les circulations des fluides les plus souvent rencontrées.

I.5.1 Echangeur à courants parallèles

Dans cette configuration (figure I.4), les deux fluides s'écoulent dans la même direction. Cette circulation est dite parallèle de même sens ou anti- méthodique (Co-courant)

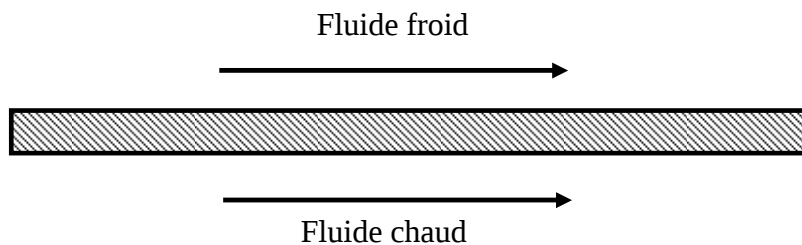


Figure I.4 : Circulation anti-méthodique

Si la circulation a lieu dans le sens contraire, les écoulements sont dits à contre-courant ou méthodique, (figure I.5).

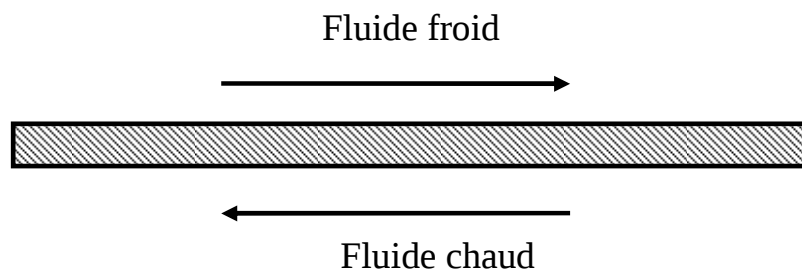


Figure I.5 : Circulation méthodique

I.5.2 Echangeur à courants croisés

Dans ce type d'échangeurs les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre, (figure I.6). On remarque ainsi que le sens d'écoulement est sans importance.

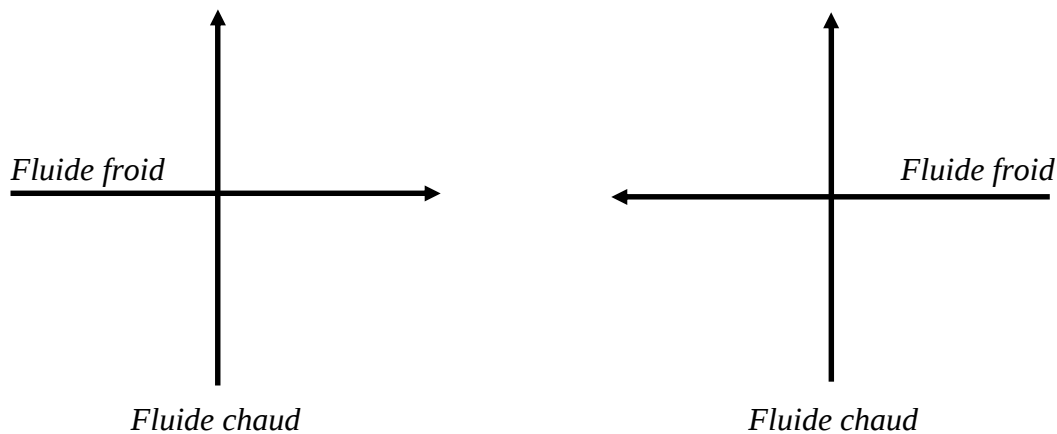


Figure I.6 : Circulation à courants croisés

I.6. Critères de classement des échangeurs

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs. Énumérons les principaux [3].

I.6.1 Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

- **à tubes** : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires ;
- **à plaques** : à surface primaire ou à surface secondaire ;
- autres types: par exemple à contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé, à un seul fluide...

I.6.2 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.

I.6.3 Classement suivant le régime de fonctionnement

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

- **transfert sans stockage**, donc en récupérateur, avec deux 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.

I.6.4 Classement suivant l'état des fluides

Le passage des fluides dans l'échangeur peut s'effectuer avec ou sans changement de phase ; suivant le cas, on dit que l'on a un écoulement monophasique ou diphasique. On rencontre alors les différents cas suivants :

- les deux fluides ont un écoulement monophasique ;
- un seul fluide présente un changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs ;
- les deux fluides présentent un changement de phase, cas des évapocondenseurs.

I.6.5 Classement suivant la compacité de l'échangeur

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 environ $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Une classification en fonction de la compacité peut être donnée comme suit :

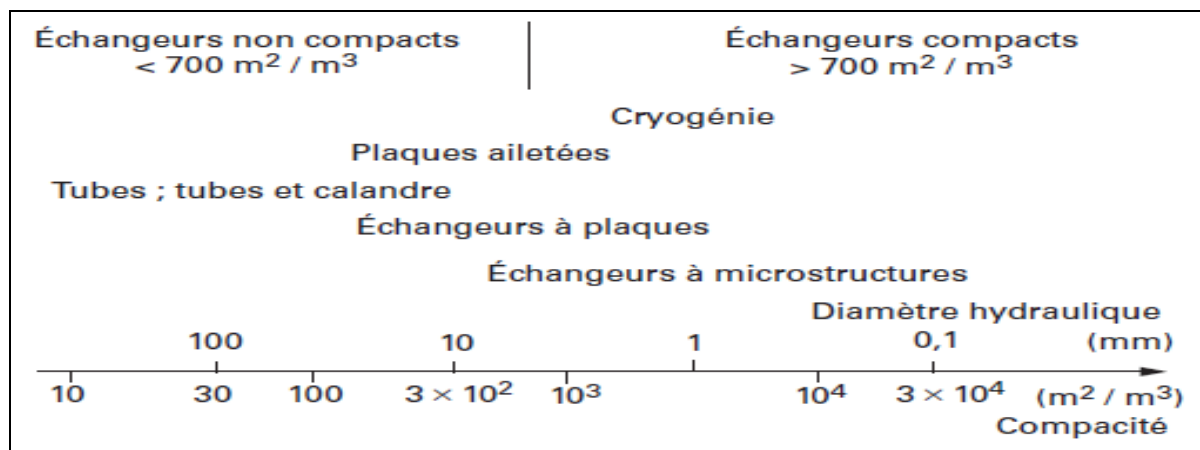


Figure I.7: Classement des échangeurs suivant la compacité

I.6.6 Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange

On retient deux types de parois :

- les échangeurs métalliques : en acier, cuivre, aluminium, ou matériaux spéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires ;
- les échangeurs non métalliques : en plastique, céramique, graphite, verre, etc.

Quel choix proposer ?

Ces différents groupes peuvent se recouper, aussi choisirons-nous pour décrire les différentes technologies et les applications des échangeurs :

- tout d'abord, les échangeurs tubulaires,
- puis, les échangeurs à plaques,

- et, enfin, quelques autres types d'échangeurs en fonction du choix d'un échangeur de chaleur pour une application donnée dépend de nombreux paramètres : les propriétés physiques des fluides, les températures, ainsi que les pressions de service...etc. Les contraintes d'encombrement et de maintenance doivent aussi être prises en compte, ainsi que les considérations économiques.

I.7 Différents types des échangeurs

Il existe différents types d'échangeurs selon les objectifs recherchés [4].

I.7.1 Échangeur à tubes en U

Il s'agit de l'échangeur le plus commun.

Avantages	Inconvénients	Utilisation
• Résiste aux fortes pressions • Libre dilatation des tubes et du corps • Toutes puissances	• Encombrement • Prix de revient élevé • Débouchage difficile	• vapeur/eau • Eau surchauffée/Eau • Huile/Eau • Process

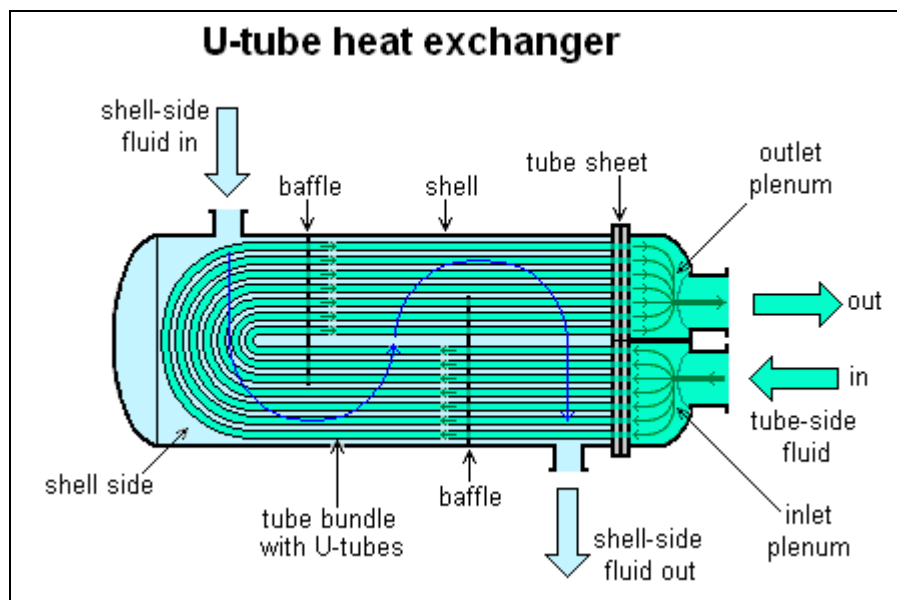


Figure I.8 : Echangeur à tubes en U

I.7.2. Echangeur à spirales

Un échangeur à spirales consiste en 2 plaques de métal enroulées de manière hélicoïdale pour former une paire de canaux en spirale. Le diamètre de l'échangeur est relativement grand, avec une surface d'échange maximale d'environ 450 m² pour un diamètre de 3 m, ce qui le place dans la catégorie des échangeurs non compact.

Il est utilisable pour les liquides visqueux ou pour les mélanges liquide-solide et possède une capacité auto-nettoyante garantissant un encrassement réduit par rapport à l'échangeur à faisceau tubulaire. Il ne peut travailler qu'avec des différences de températures et de pression limitées.

Avantages	Inconvénients	Utilisation
• Grande surface de contact • Large passage • Encombrement réduit • Excellent condenseur • Autonettoyant	• Non démontable • Ecart de Température limités	• Eau/Eau • Vapeur/Eau • Eau surchauffée/Eau

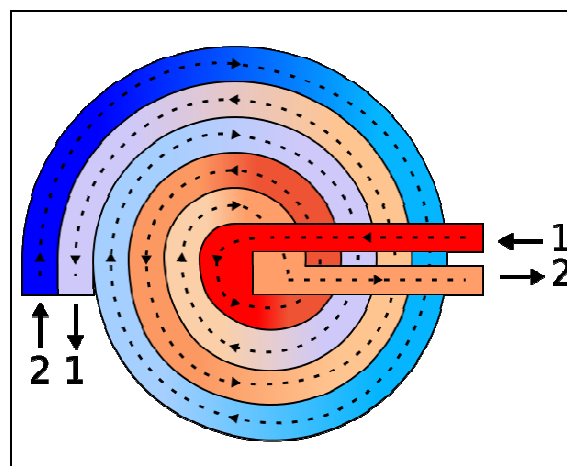


Figure I.9 : Echangeur à spirale

I.7.3 Échangeur à bloc

L'échangeur à bloc est un type d'échangeur de chaleur réservé à des applications particulières. Il consiste en un bloc d'une matière thermiquement conductrice percé de multiples canaux dans lesquels circulent les 2 fluides. Le bloc est le plus souvent composé de graphite

additionné parfois de polymères pour améliorer les propriétés mécaniques de l'échangeur. Le bloc est placé dans une structure qui assure la distribution des liquides dans les canaux.

Avantages	Inconvénients	Utilisation
- Bonne résistance chimique - Inertie - Peu de pertes thermiques - Modulable	- Sensible aux grands écarts de T - Sensible aux chocs - Coefficients de transfert moyen - Prix	- Vapeur/Eau - Eau/Eau - Eau surchauffée/Eau - Liquides corrosifs

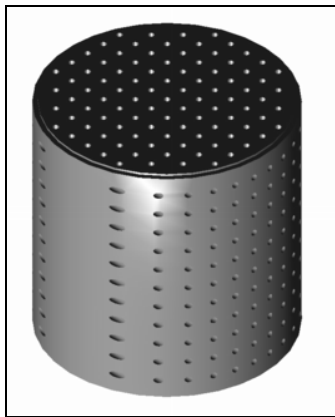


Figure I.10 : Echangeur à bloc simple

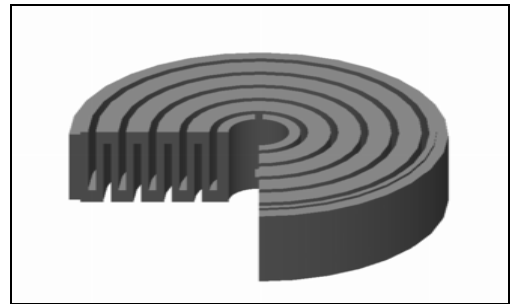


Figure II.11 : Echangeur à bloc complexe

I.7.4 Echangeur à plaques

L'échangeur à plaques est un type d'échangeurs de chaleur qui connaît un usage croissant dans l'industrie. Il est composé d'un grand nombre de plaques disposées en forme de millefeuilles et séparées les unes des autres d'un petit espace (quelques millimètres) où circulent les fluides. Le périmètre des plaques est bordé d'un joint qui permet par compression de la structure d'éviter les fuites.

Les plaques ne sont pas plates, mais possèdent une surface ondulée selon un schéma bien précis afin de créer un flux **turbulent** synonyme d'un meilleur transfert de chaleur, mais permet également de canaliser les fluides se déplaçant à la surface vers les coins de la plaque. Le fluide se déplace, par exemple, du coin inférieur gauche vers le coin supérieur droit de la plaque, où un orifice lié à un tuyau lui permet de passer de l'autre côté de la plaque et de sauter une couche du millefeuille (un espace entre 2 plaques) avant de s'écouler à nouveau le long de la plaque suivante. Ainsi chaque fluide ne circule parallèlement à une plaque que tous les 2 espaces.

Avantages	Inconvénients	Utilisation
• Compact • Très bons coefficients de transfert • Prix compétitifs • Peu de pertes thermiques • Modulable	• Faible écart de T possible • Régulation • Perte de charge importante • Pression de travail limitée	• Vapeur BP/Eau • Eau/Eau • Huile/Eau • Eau surchauffée/Eau

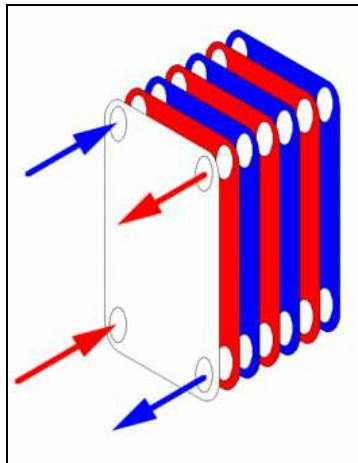


Figure I.12 : Echangeur à plaques

I.7.5 Les échangeurs tubulaires [3]

I.7.5.1 Différentes catégories existantes

Pour des raisons historiques et économiques, les échangeurs utilisant des tubes comme constituant 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 m^2 à quelques milliers de m^2 :

- Echangeur monotube** (figure I.8.a) dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentin ou d'un drapeau,
- Echangeur bitube ou coaxial** (figure I.8.b) 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;

c. **Echangeur multitubulaire** existant sous plusieurs formes :

- **Echangeur à tubes séparés** (figure I.13.c) : à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) se trouvent placés plusieurs tubes de petits diamètres (8 à 20 mm) maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé ;
- **Echangeur à tubes rapprochés** (figure I.13.d) : pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban ou un fil enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans. Les tubes peuvent être soit lisses, soit à ailettes (figure I.13.e) : ces derniers permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique ; différents types d'ailettes sont présentés au paragraphe I.7.5.2,
- **Echangeur à tubes et calandre** (figure I.13.f) : le nombre de tubes varie alors de quelques dizaines à plusieurs milliers; c'est l'échangeur actuellement le plus répandu.

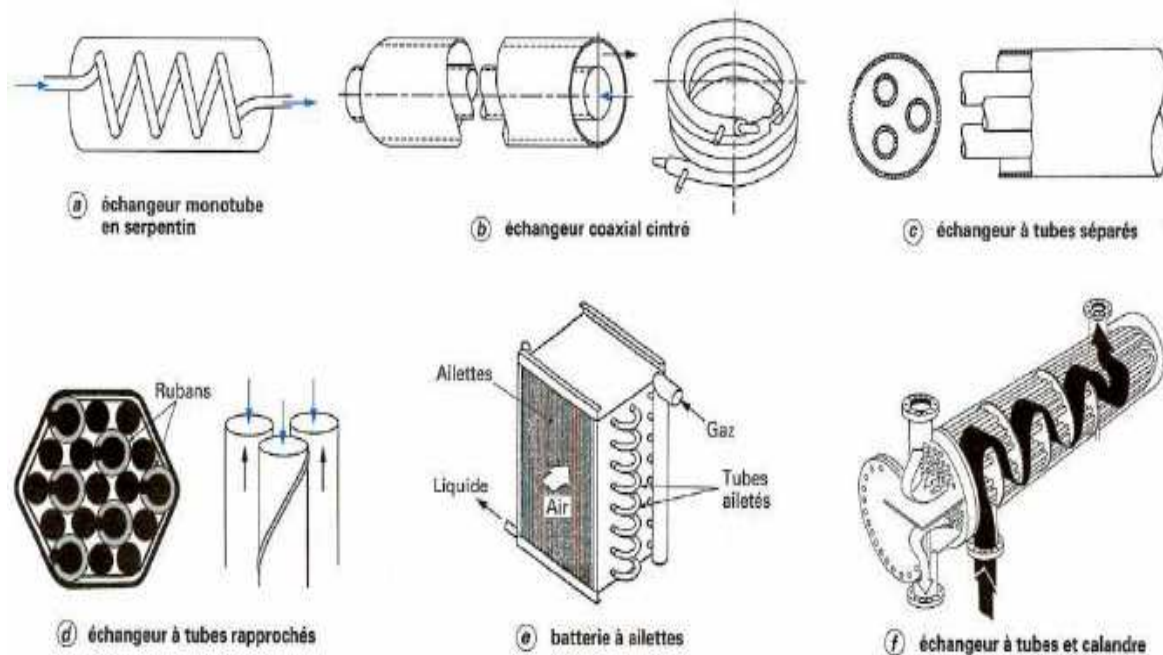


Figure I.13: Différents types d'échangeurs tubulaires

I.7.5.2 Échangeurs 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 quelquefois dans les tubes afin que la résistance thermique globale ne soit pas principalement due au fluide ayant le plus petit coefficient d'échange thermique (cf. article *Échangeurs de chaleur. Intensification des*

échanges thermiques [RE 9 518]). 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 ailettagage externe des tubes est nécessaire pour diminuer l'écart entre les résistances thermiques externe et interne.

Les ailettes peuvent être disposées de différentes façons.

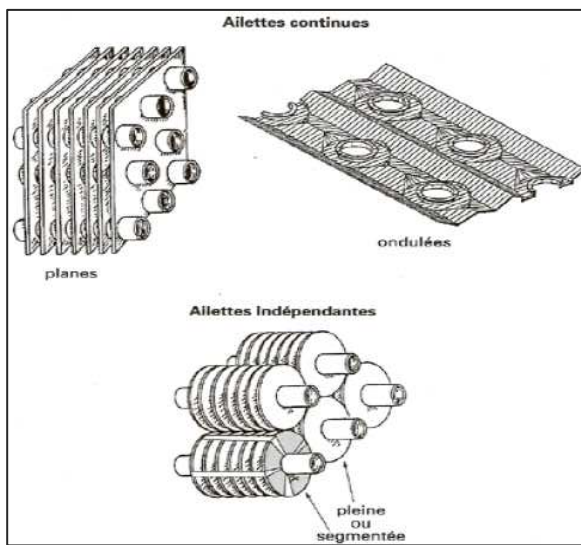


Figure I.14 : Ailettes continues ou indépendantes

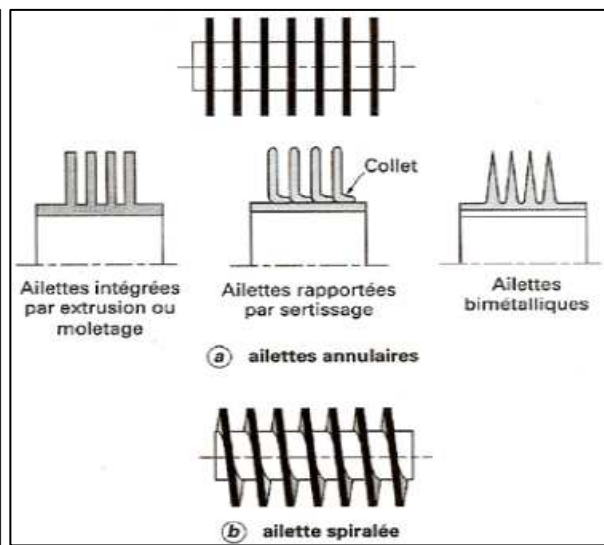


Figure I.15 : Ailettes annulaires ou spiralées

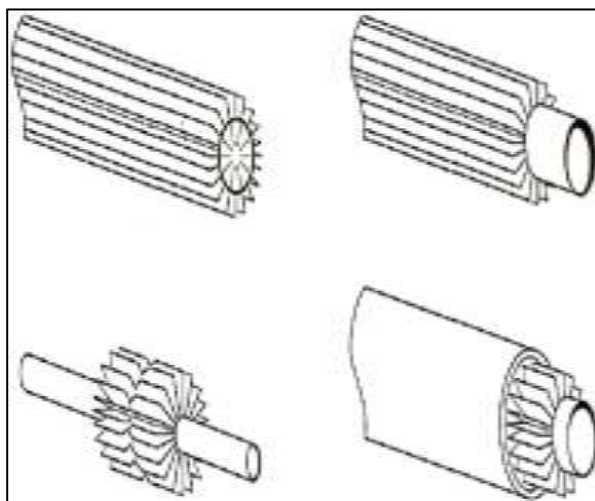


Figure I.16 : Ailettes longitudinales

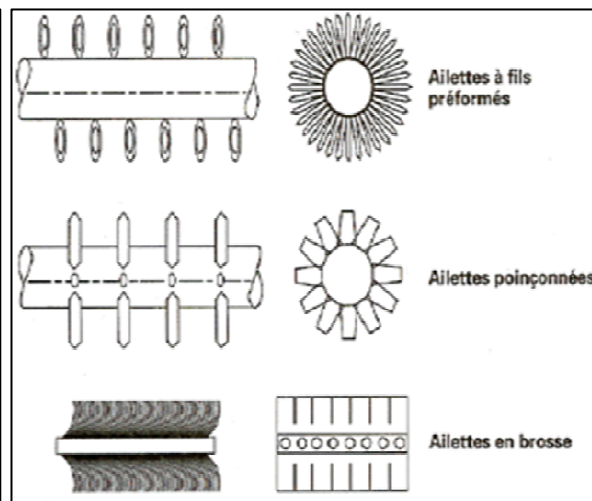


Figure I.17 : Ailettes transversales

a. Ailettes continues et indépendantes

Les ailettes continues sont traversées par plusieurs tubes. De forme généralement rectangulaire, elles sont souvent fabriquées par emboutissage puis fixées par dilatation des tubes. Un collet fixe l'écartement entre les ailettes. Elles peuvent être planes ou ondulées; l'ondulation provoque une perturbation de l'écoulement qui améliore l'échange thermique.

Les ailettes indépendantes sont traversées par un seul tube. Elles peuvent être pleines ou segmentées. Les ailettes indépendantes peuvent être de différentes sortes :

- ailettes annulaires, en principe des ailettes pleines (figure **I.15a**) ;
- ailette hélicoïdale (spiralée) (figure I.15b), pleine ou segmentée, bien adaptée aux grandes longueurs de tubes. Elle est généralement obtenue par enroulement d'un ruban serti ou soudé sur le tube. Si la hauteur de l'ailette est grande devant le rayon du tube, l'ailette est segmentée.

b. ailettes longitudinales

Les ailettes sont disposées suivant l'axe des tubes (figure **I.16**) ; elles peuvent être situées à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes. Pour améliorer le transfert de chaleur, elles sont quelquefois localement torsadées.

c. autres types d'ailettes transversales

On peut observer sur la figure I.17 quelques autres types d'ailettes fréquemment utilisés. De nombreux constructeurs utilisent des ailettes qui leur sont spécifiques. Les assemblages usuels des tubes à ailettes transversales sont, soit en quinconce (pas triangulaire), soit en ligne (pas carré).

I.8 Caractéristiques des échangeurs [3]

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 supportables 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 de température entre les deux fluides doit être minimal.
- 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 chaleur; 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.
 - ✓ 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).

I.9 Etude complète d'un échangeur [3]

L'étude complète d'un échangeur comporte une analyse thermique et hydraulique, une étude mécanique et une optimisation économique.

Etude thermique

Consiste essentiellement à déterminer la surface d'échange thermique nécessaire, le flux thermique échangé, la distribution des températures des deux fluides de l'entrée à la sortie de l'appareil.

Etude hydraulique

Cette étude a pour but de déterminer les pertes de charges dans l'appareil.

Etude mécanique

Elle concerne le calcul des efforts et contraintes en fonctionnement compte-tenu des températures et pressions opératoires.

Optimisation économique

Cela consiste à trouver le meilleur compromis, pour une puissance à transférer les données, entre une surface d'échange faible avec des vitesses de fluides élevées, au prix d'une puissance de pompage importante, et d'autre part, une surface d'échange plus grande, mais avec des vitesses de circulation des fluides plus faibles.

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types d'échangeurs, en détaillant les échangeurs tubulaires avec ailettes, en citant les différentes façons de leur disposition et en finissant par les caractéristiques et l'étude complète d'un échangeur.

CHAPITRE II

GENERALITES SUR LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE

II.1 Introduction

On appelle **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 située entre 10 et 80 degrés souvent utilisé dans le bâtiment. 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...).

II.2 Principe du changement de phase [5]

II.2.1 Chaleur sensible et chaleur latente

Tout matériau, solide ou liquide (ou gazeux) possède une capacité à stocker ou à céder de l'énergie sous forme de chaleur. On distingue 2 types de transfert de chaleur (ou transfert thermique):

- **Le transfert thermique par chaleur sensible (CS)**

Dans ce cas, le matériau en question peut céder ou stocker de l'énergie en voyant varier sa propre température, sans pour autant changer d'état. La grandeur utilisée pour quantifier la CS échangée par un matériau est la **Chaleur Massique**, notée C_p et exprimée en **J/(kg .K)**.

Exemple: $C_{p \text{ eau}} = 4186 \text{ J/(kg. K)}$

signifie qu'il faut 4186 joules pour élever 1 kg d'eau de 1 °C (valable aux températures proches de 20 °C).

- **Le transfert thermique par chaleur latente (CL)**

Dans ce cas, le matériau peut stocker ou céder de l'énergie par simple changement d'état, tout en conservant une température constante, celle du changement d'état. La grandeur utilisée pour quantifier la CL échangée par un matériau est la **Chaleur Latente de Changement de Phase** notée L_f (f pour fusion) pour un changement de phase Liquide/Solide, et L_v (v pour vaporisation) pour un changement de phase Liquide/Vapeur. Celle-ci est exprimée en **J/kg**.

Exemple : $L_{f \text{ eau}} = 330 \times 10^3 \text{ J/kg}$

Signifie que la fusion, c'est-à-dire la fonte, de 1 kg de glace à la température (constante) de 0 °C nécessitera une énergie de 330000 joules soit 330 kJ.

II.2.2 Intérêts des matériaux à changement de phase

Compacité ou densité énergétique

Il est important de noter que les quantités d'énergie mises en jeu dans le processus de changement de phase sont bien plus importantes que celles qui interviennent lors de transferts en chaleur sensible (dans la mesure où l'on travaille sur des intervalles restreints de températures). C'est grâce à ces transferts latents qu'il est aujourd'hui possible de réduire considérablement le volume d'un élément de stockage d'énergie (Compacité), ou encore d'augmenter très fortement la quantité d'énergie contenue dans un même volume de stockage (Densité énergétique).

- **Principe technique de stockage de l'énergie thermique**

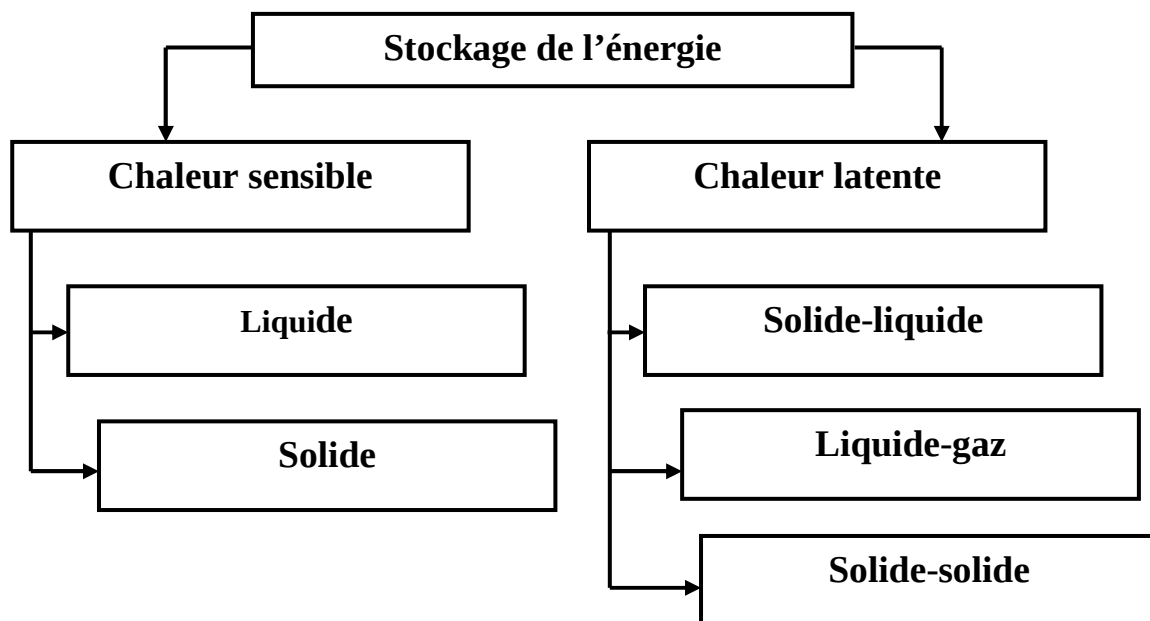


Figure II.1 : Principale technique de stockage de l'énergie thermique.

- 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.

Ainsi, si à pression constante l'on réchauffe un corps solide ou liquide de masse m et de capacité thermique massique $c(T)$ de la température initiale T_1 , à la température finale T_2 , on peut stocker une quantité de chaleur donnée par sa variation d'enthalpie.

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

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

Si la chaleur spécifique peut être considérée comme constante dans l'intervalle de températures entre T_1 et T_2 ($c(T)=c^{te}=c$) alors :

$$\Delta H = m \times c \times (T_1 - T_2) \quad (II.2)$$

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 les deux cas suivants :

- 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 on utilise principalement des corps ayant des chaleurs spécifiques importantes comme par exemple des liquides tels que l'eau et des solides tels que des pierres.

Certaines propriétés des substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible sont données dans le **Tableau II.1**.

Matériaux	Densité (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Capacité thermique volumétrique (J /m ³ .K)
Argile	1458	879	1.28
Briques	1800	83	1.51
Grés	2200	721	1.57
Bois	700	2390	1.67
Béton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
Fer	7900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68
Eau	988	4182	4.17

Tableau II.1 : Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20°C

- La chaleur latente est l'énergie mise en jeu lors du changement d'état de la matière.

Elle intervient aussi dans les changements allotropiques.

La chaleur fournie au repos pendant la fusion se traduit non par un accroissement de la vitesse 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 pendant toute la transformation correspond 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 :

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

Où Δh_f est l'enthalpie spécifique de fusion.

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

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

Dans le cas d'un corps pur on trouve une courbe de variation des températures analogue à celle présentée par la (**Figure II.1**) 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 :

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

$C_S(T)$: 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 (II.5) deux termes de chaleur sensible en plus du terme mL représentant la chaleur latente due à la masse m .

Température

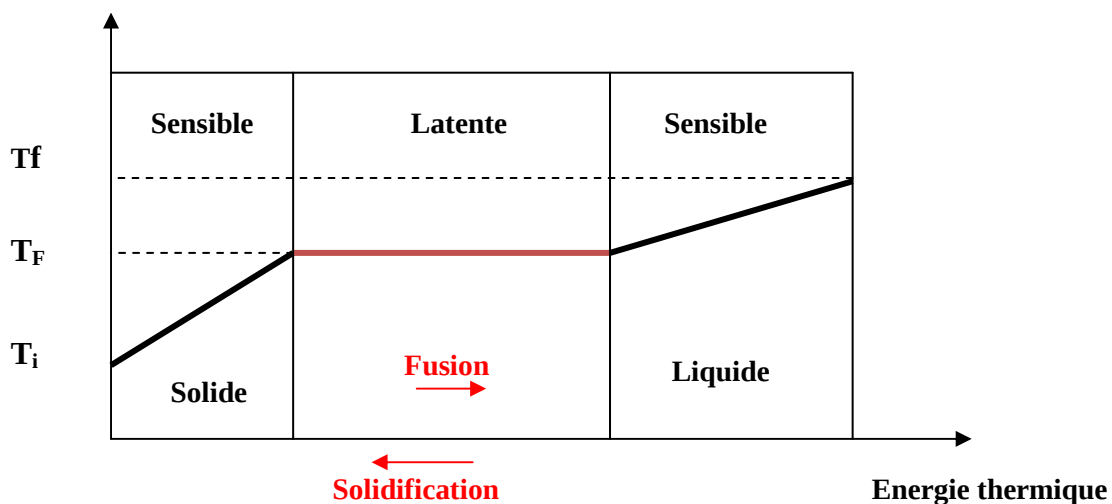


Figure II.2 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.

Si l'on représente l'enthalpie en fonction de la température, on obtient donc la (courbe (a) **Figure II.3**), on remarque la discontinuité due au changement d'état (pas de variation de température).

Dans le cas d'un mélange (alliage...), la variation d'enthalpie ne présente plus de discontinuité (courbe (b) **Figure II.3**) sauf dans le cas où l'on a formation d'un composé défini avec fusion(ou solidification) congruente.

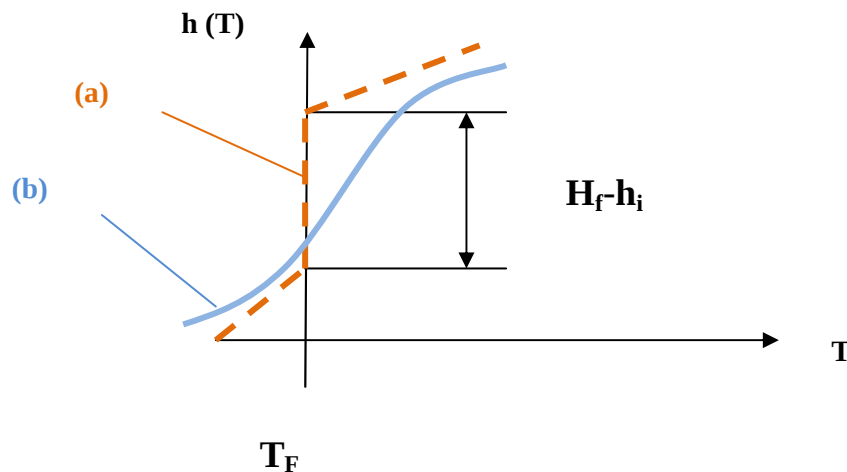


Figure II.3 : Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température :
a) pour un corps pur, b) pour un mélange.

En résumé, les avantages de la chaleur latente sont donc :

- ✓ Des densités importantes de stockage.
- ✓ Une température de changement de phase (cristallisation et fusion) quasiment constante pour les corps purs ou les composés définis.

II.2.3 Propriétés des matériaux à changement de phase

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0-120°C). Cependant ils peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lorsqu'ils possèdent certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques, qui sont définies à partir d'un nombre de critères.

Critères thermodynamiques

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- une température de fusion dans la gamme de température souhaitée.

- une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur).
- Une chaleur spécifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative.
- Une fusion congruente.
- Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition.

Critères cinétiques

- Le matériau à changement de phase ne doit montrer ou presque pas de phénomène de surfusion.
- Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiquée par les tables thermodynamiques.

Critères chimiques

Le matériau à changement de phase doit montrer :

- Une stabilité chimique.
- Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur latente soit viable.
- Aucune action corrosive sur les matériaux de construction ou sur leur contenant.

Aussi le matériau ne doit pas être nocif, il doit être non inflammable et non explosif.

Critères économiques

Le matériau de changement de phase doit être :

- Disponible en grande quantité.
- A bon marché.

A priori aucun matériau à changement de phase ne peut satisfaire tous ces critères .beaucoup de matériaux ont été étudiés comme de potentiels matériaux à changement de phase, mais peu d'entre eux sont commercialisés.les matériaux à changement de phase se classent en trois grandes familles : les composés minéraux et les composés organiques et les mélanges de ces composés.

II.3. Classification des matériaux à changement de phase [5]

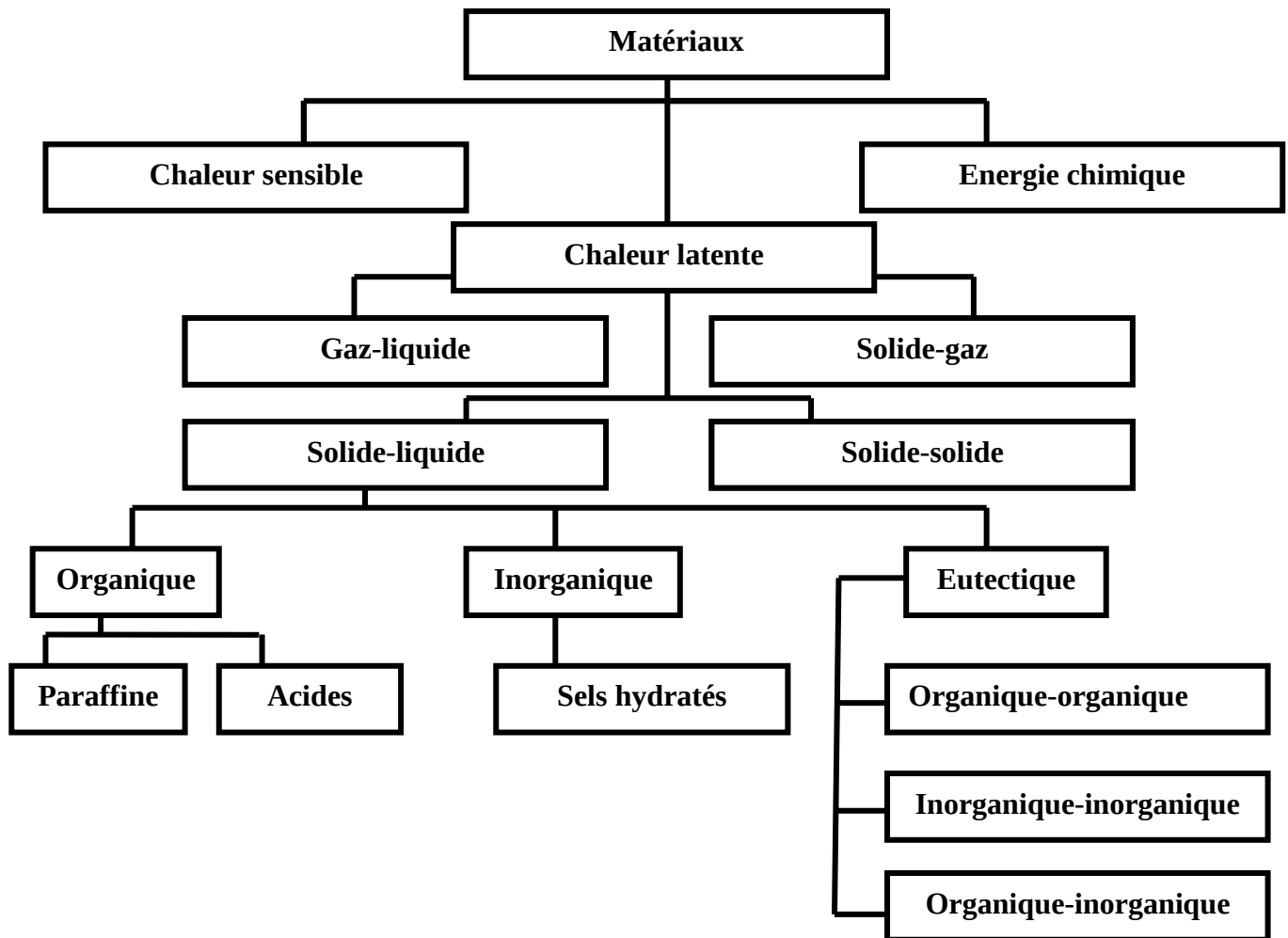


Figure II.4 : Classification des matériaux à changement de phase.

On peut classer les MCP couramment utilisés selon trois catégories :

1. Les composés organiques : paraffines, corps non- paraffiniques, polyalcools.
2. Les composés inorganiques : hydrates salins, sels, métaux, alliages.
3. Les eutectiques de corps inorganiques et/ou organique.

Les composés organiques et les composés inorganiques présentant des propriétés thermiques et chimiques très différentes qui affectent significativement la conception d'un système de stockage thermique pour une application donnée sont détaillés dans ce qui suit.

II.3.1 Les composés organiques

a. Les composés organiques paraffiniques

Les MCP organiques sont des matériaux organiques, constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés de la famille des alcanes de formule générale C_nH_{2n+2} .

Ils sont soit extraits à partir du pétrole brut, soit synthétisés 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 paraffines sont essentiellement constituées d'hydrocarbures saturés à chaîne linéaire ou parfois ramifiée avec un groupement méthyle substitué en bout de chaîne. Les paraffines pures uniquement constituées d'alcane peuvent être caractérisées par leur point de fusion.

Cependant les paraffines existent généralement sous forme de mélange, si bien qu'il n'est pas possible de parler de point de fusion mais plutôt d'une zone de fusion.

Pour des applications de stockage thermique les n-paraffines sont les plus utilisées à cause de leur capacité de stockage plus importante.

Les paraffines intéressantes pour les stockages thermique sont celles qui sont sous forme solide aux températures usuelles et elles sont qualifiées de « cires paraffiniques ».

Le point de fusion des alcanes augmente avec le nombre croissant d'atomes de carbone. Mises à part certaines caractéristiques favorables des paraffines, telles que la fusion congruente et de bonnes propriétés de nucléation elles montrent cependant certaines propriétés indésirables tels que :

- Faible conductivité thermique.
- Sont incompatibles avec les récipients en plastique.
- Sont modérément inflammables.

Tous ces effets indésirables peuvent être éliminés en partie en modifiant légèrement la cire et l'unité de stockage.

Il existe quelques méthodes développées pour augmenter la conductivité thermique. Une de ces méthodes est l'utilisation de graphite expansé.

Avantages et inconvénients des paraffines

- La surfusion est négligable. la pression de vapeur de fusion est faible même à des températures relativement hautes.
- Elles sont stable chimiquement mais il faut les protéger de l'air pour éviter l'oxydation.
- Il n'y pas de ségrégation de phase.
- La masse volumique de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850 kg/m³ et celle de la phase solide est de 800 à 900 kg/m³. La dilatation volumique est donc environ 15% pendant le processus de changement de phase. On peut éviter ou au moins réduire ce problème par un conditionnement adapté.
- Les paraffines sont souvent des mélanges d'hydrocarbures et ont un prix raisonnables.
- Les cires paraffiniques pures sont très couteuses.

Les deux principaux inconvénients sont les suivants :

- Les cires paraffiniques présentent une très faible conductivité thermique (0,18-0,25 W/m.K). cette propriété diminue le taux de stockage/déstockage de la chaleur pendant les cycles fusion/solidification. Cette faible conductivité thermique qui est habituellement un handicap, bien que dans le transport de nourriture elle soit un avantage, peut être compensée par une grande surface d'échange ou par un conditionnement adapté.
- Les cires paraffiniques sont facilement inflammables.

Conditionnement des paraffines

Bien que les paraffines aient les propriétés requises d'un MCP leur faible conductivité pénalise la cinétique de charge/décharge de l'énergie thermique.

Pour résoudre ce problème plusieurs types de conditionnement ont été proposés :

- Les nodules.
- Les cylindres avec ailettes ou non.
- La micro-encapsulation.

Une autre méthode consiste à augmenter la conductivité apparente en incorporant une matrice métallique ou des fibres de carbone

b. Les composés organiques non-paraffiniques

Les composés organiques non-paraffiniques sont les MCP les plus nombreux, avec des propriétés très variées. Chacun de ces matériaux possède ses propres propriétés, contrairement aux paraffines, qui ont des propriétés très similaires. Ces matériaux sont inflammables et ne devraient donc pas être exposés aux trop hautes températures, aux flammes ou aux agents oxydants.

Dans le **Tableau II.2** Des composés organiques non-paraffiniques sont donnés à titre d'exemple avec des propriétés thermo physiques.

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
Méthyle palmitate	29	205
Camphenilone	39	205
Docasyl bromide	40	201
Caprylone	40	259
Phénol	41	120
Heptadécane	41	201

Tableau II.2 : Propriétés thermo physiques des matières organiques non paraffiniques .

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

La formule chimique générale des acides gras est $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ et ils ont relativement une haute enthalpie de changement de phase. Les acides gras ont une haute stabilité thermique et ne subissent pas le phénomène de sous-refroidissement. Cependant, ils sont plus chers que les paraffines et sont corrosifs.

Certaines des caractéristiques de ces matériaux organiques sont les suivantes :

- Forte chaleur de fusion.
- Inflammabilité.
- Faible conductivité thermique.
- Faible point d'éclair.
- Niveau variable de toxicité.
- Instabilité à haute température.

Certains acides gras jugés d'intérêt pour les applications de stockage d'énergie thermique à basse température sont représentés avec les propriétés thermo physique dans le **Tableau II.3**

Les acides gras ont de fortes chaleurs de fusion comparables à celles des paraffines.les acides gras montrent également un processus de fusion/cristallisation réversible avec aucune surfusion (I.O.Sayler et al.1990).

Matériaux	Formule	Point de fusion (°C)	Chaleur latente (kJ/kg)
Acide acétique	CH₃COOH	16.7	174
Polyéthylène glycol 600	H(OC₂H₂)_n-OH	20-25	146
Acide caprique	CH₃(CH₂)₈-COOH	36	152
Acide elaidique	C₈H₇C₉H₁₆-COOH	47	218
Acide laurique	CH₃(CH₂)₁₀-COOH	49	178
Acide pentadécanoïque	CH₃(CH₂)₁₃-COOH	52.5	178
Tristéarine	(C₁₇H₃₅COO)C₃H₅	56	191
Acide muristique	CH₃(CH₂)₁₂-COOH	58	199
Acide palmitique	CH₃(CH₂)₁₄-COOH	55	163
Acide stéarique	CH₃(CH₂)₁₆-COOH	69.4	199
Acétamide	CH₃ CONH₂	8.1	241
Fumarate de méthyle	(CH CO₂ CNH₃)	102	242

Tableau II.3 : Propriétés thermo physiques des acides gras [7].

II.3.2 Les composés inorganiques

a)Sels hydratés

Les hydrates de sels peuvent être considérés comme des alliages de sels minéraux et d'eau formant un solide cristallin typique de formule générale AB·nH₂O.

Les plus importantes propriétés des hydrates de sels sont les suivantes :

- La température de fusion élevée.
- Une conductivité thermique élevée.
- Une haute enthalpie de fusion.

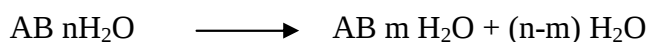
En dépit de ces propriétés les hydrates de sels ont certains inconvénients importants tels que la fusion accompagnée de la séparation de phase. Du sous-refroidissement et d'être corrosifs.

Les méthodes élaborées pour empêcher la séparation de phase pour l'utilisation des hydrates de sels comme MCP sont l'addition d'un épaississant ou d'un agent de gélification de l'hydrate salin. Dans la première méthode, l'agent épaississant est ajouté pour augmenter la

viscosité de l'hydrate de sel et dans le second, l'hydrate de sel est stabilisé dans les pores d'un polymère gel.

En outre, un agent de nucléation est ajouté pour éviter les phénomènes de surfusion [8].

La transformation solide-liquide des hydrates de sels est en réalité une déshydratation du sel, bien que ce processus ressemble thermodynamiquement à la fusion/cristallisation. Un sel hydraté se transforme habituellement en un hydrate de sel appauvri de quelques moles d'eau, soit au même sel dans sa forme anhydre selon les équations chimiques suivantes :



Au point de fusion les cristaux d'hydrates se transforment en un sel anhydre ou en un sel faiblement hydraté et de l'eau. Un problème avec la plupart des sels hydratés est celle de la fusion incongruente causée par le fait que l'eau libérée ne suffit pas à dissoudre toute la phase solide présente. En raison de la différence de densité, le sel anhydre se dépose au fond du récipient donnant lieu à une séparation des phases.

Les méthodes élaborées pour empêcher la séparation de phase dans l'utilisation des hydrates de sels comme MCP sont l'épaississement et la gélification. Dans la première méthode, un agent épaississant est ajouté pour augmenter la viscosité de l'hydrate de sel et dans le second, l'hydrate de sel est stabilisé dans les pores d'un gel polymère [8].

La plupart des sels hydratés ont aussi de pauvres propriétés de nucléation, impliquant la surfusion de la phase liquide avant la cristallisation. Une solution à ce problème consiste à ajouter un agent de nucléation, qui fournit le nucléon (germe) qui permet d'amorcer la cristallisation. Une autre possibilité consiste à conserver certains cristaux, dans une zone froide du milieu, pour servir de noyaux pour l'amorçage de la cristallisation.

Les problèmes principaux concernant la plupart des hydrates salins sont selon [6].

- ✓ La surfusion (ou sous-refroidissement) :

On traite ce problème en ajoutant un agent de nucléation.

- ✓ La ségrégation de phase :

Lorsque la fusion n'est pas congruente, on observe une ségrégation de phase. Pour prévenir ce problème plusieurs techniques ont été testées comme l'utilisation d'agents épaississants.

Comme agent épaississant on utilise de la cellulose, de la fécule, de la sciure, du gel de silice, de la silice, etc. Ces types d'agents épaississants fonctionnent bien, mais ils sont finalement soit hydratés par le sel ou décomposés par les bactéries, et ils deviennent inefficaces.

- ✓ La perte d'eau d'hydratation en répétant le cycle thermique. ce problème peut être évité en rajoutant une quantité d'eau supplémentaire dans l'hydrate et/ou en utilisant un stockage parfaitement étanche.
- ✓ Leur caractère corrosif : ce qui les rend incompatibles avec de nombreux matériaux de construction utilisés dans les bâtiments.

Ce dernier problème a reçu un début de solution en encapsulant les MCP dans des capsules métalliques ou de matière plastique. On distingue la macro-encapsulation et la micro-encapsulation.

b) La macro capsules de MCP [5]

- Evitent une séparation de phase trop importante.
- Améliorent le transfert de la chaleur.
- Fournissant une structure autoporteuse pour les MCP.

Pour le stockage de l'énergie les systèmes les moins coûteux sont les bouteilles plastiques ou les boîtes en fer blanc. Cependant la corrosion peut avoir des conséquences fâcheuses sur les boîtes en fer blanc si leur enduit n'est pas correctement appliqué.

Néanmoins l'utilisation de macro-capsules pour le stockage d'énergie dans les bâtiments ne semble pas satisfaisante.

Différents hydrates salins

Hydrates salins	Température de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
Sel de Glauber($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	32.4	252
Chlorure de calcium, hexa hydrate $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	27-30	190
Acétate de sodium tri hydrate $\text{Na CH}_3\text{COOH} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	58	170 à 264
Hydroxyde de Barium octahydrate $\text{Ba}(\text{OH}) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	78	301
$\text{NH}_4\text{AL}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	95	238.5
Phosphate de sodium dodécahydrate $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	77	213
Pyrophosphate de sodium déca hydrate sous forme de capsules (Calotherm 70)	70	184

Tableau II.4 : Différents hydrates salins [6].

II.3.3 Les eutectiques [5]

Les eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs corps qui, par définition, ont des températures de fusion précises. Ils ont un comportement similaire au comportement des hydrates salins à fusion congruente.

Les eutectiques ont un potentiel important pour les applications de stockage thermique de l'énergie. Quelques eutectiques sont utilisés pour le refroidissement et dans les systèmes passifs de stockage de l'énergie solaire.

Les eutectiques sont classés en eutectiques inorganiques, eutectiques organiques et les eutectiques inorganiques-organiques.

Sur le **Tableau II.5**, on donne quelques eutectiques déjà utilisés pour les applications de stockage thermique.

Eutectiques inorganique	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
49.3%MgCl ₂ .6H ₂ O+50.7%Mg(NO ₃).6H ₂ O	58	132.3
61.5%Mg(NO ₃) ₆ H ₂ O+38.5%NH ₄ NO ₃	51	131.1
58.3%Mg(NO ₃) ₆ H ₂ O+41.7%MgCl ₂ .6H ₂ O	58	106
CaCl ₂ .6H ₂ O+CaBr ₂ .H ₂ O	14	140
Acide caprique-laurique	18	120
Acides palmitique-laurique	33	145
Acides stéarique, laurique	34	150

Tableau II.5 : Liste de quelques eutectiques [5]

II.4 Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique

Le conditionnement des MCP pour leur application dans le dispositif des systèmes de stockage thermique doit obéir à certaines exigences :

- Le matériau du conteneur de conditionnement doit être compatible avec le MCP et ne doit subir ni oxydation, ni ramollissement ou toutes autres dégradations.
- Le conteneur de conditionnement doit assurer une parfaite étanchéité quand le MCP change de l'état solide à l'état liquide.
- Le conteneur doit pouvoir résister à la dilatation et au changement de volume de MCP en phase liquide : ce changement peut casser le conteneur si celui-ci ne peut pas absorber le changement de volume.

Il existe deux techniques pour conditionner les MCP :

• La macro-encapsulation

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

Il existe des procédés industriels qui utilisent le conditionnement dans des sphères de matière plastique ou nodules. ces nodules sont manufacturés dans trois diamètres (77-78 et 98 mm) pour des usages respectivement aux faibles températures de changement d'état (-3à-15°C), aux températures intermédiaires (-3 à 15°C) et à la température de stockage de la Glace (0°C). certains nodules spéciaux ont des températures de changement d'état de (27°C) et plus.

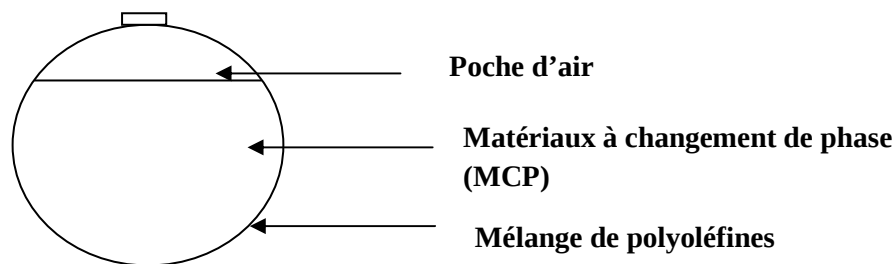


Figure II.5 : Conditionnement des MCP dans un nodule



Figure II.6 : Conditionnement en briquette plastique.

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 1 à 1000 μm de diamètre.

Les procédés physiques sont le séchage de sprays, la centrifugation ou l'utilisation de lits fluidisés ou des procédés de revêtement divers. Ces procédés chimiques consistent en des encapsulations in-situ comme les polycondensations inter faciales qui conduisent à des

polyamides ou des polyuréthanes comme coquilles, des précipitations dues à la polycondensation de résines aminées etc...

II.5.Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux généralités sur les matériaux à changement de phase MCP ou on a défini le principe de changement de phase et parlé des propriétés de ces matériaux ainsi que leur classification.

CHAPITRE III

PARTIE EXPERIMENTALE

III.1 Introduction :

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur latente est largement utilisé dans le secteur du bâtiment en raison de la capacité de stockage élevée à température constante dans un volume réduit de matériau de construction. Le stockage se fait par l'intermédiaire d'un matériau dit à changement de phase (MCP).

Notre projet a pour objectif de réaliser un composite à base de paraffine /graphite / silice afin de l'utiliser dans l'étude d'un échangeur thermique pour le stockage d'énergie par chaleur latente. Ce chapitre est divisé en deux parties :

- Partie (1) : Elaboration du MCP
- Partie (2) : Réalisation de l'échangeur.

III.2 Elaboration du MCP

III.2.1 Matériaux utilisés pour la préparation du composite

Le matériau à changement de phase utilisé dans cette étude est la paraffine (Pa, Figure II.1a), le gel de silice (Si, Figure III.1b), ainsi que le graphite en poudre pour améliorer la conductivité thermique (Gr, Figure III.1c).



a) Paraffine

b) Silice

c) Graphite

Figure III.1 : Image des matériaux utilisés pour la préparation du composite

La paraffine (MCP):

Le premier critère de choix à retenir pour un MCP concerne la température de transition solide-liquide puisqu'elle doit être conforme au procédé. Parmi tous les produits ayant une température de fusion acceptable, il est plus judicieux de choisir celui qui présentera la plus grande chaleur latente.

La paraffine disponible sur le marché national et qu'on a utilisée est destinée à la fabrication de bougies, comportant des additifs chimiques inconvenables (présence entre autres de +20% de stéarine) et ayant un point de fusion situé entre 64 et 68°C.

Silice :

Le silice est un hydroxyde de silicium $\text{Si}(\text{OH})_4$, polymère d'acide silicique préparé à partir de silicate de sodium. L'intérieur de chaque grain de silice est composé d'atomes de silicium reliés entre eux par des atomes d'oxygène (un silicate). En surface, des groupes silanol ($\text{Si}-\text{OH}$) subsistent et sont responsables de la très forte polarité de la silice. En présence d'eau, cette surface s'hydrate. Ce qui provoque une diminution de la polarité. Les grains de silice sont poreux et la taille des grains et des pores dépend très fortement de la méthode de préparation utilisée. Cette structure est responsable de la très grande surface spécifique, typiquement $500\text{-}600\text{ m}^2/\text{g}$.



Figure III.2 : image de la silice

Propriétés chimiques	Propriétés physiques
Formule brute : SiO_2	T° fusion : $1650\text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 75\text{ }^\circ\text{C}$)
Masse molaire : $60,0843 \pm 0,0009\text{ g/mol}$	T° ébullition : $2230\text{ }^\circ\text{C}$
O : 53,26%	Solubilité : $0,12\text{ g/l}$ (eau)
Si : 46,74%	

Tableau III.1 : Propriétés chimiques et physiques

Préparation de silice en poudre :

La silice est d'abord broyée dans un moulin, puis tamisée plusieurs fois jusqu'à en avoir une poudre très fine. La poudre obtenue est ensuite séchée dans une étuve à 105°C pendant 24 h.

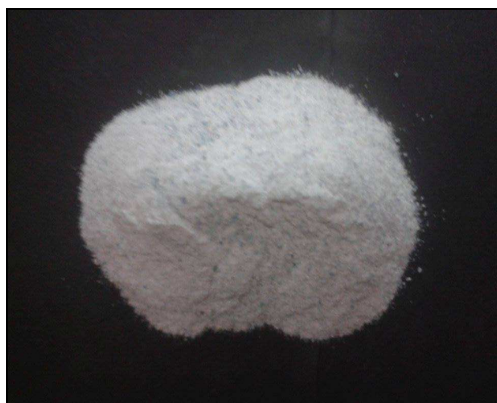


Figure III.3 : La Silice en poudre



Figure III.4 : Etuve

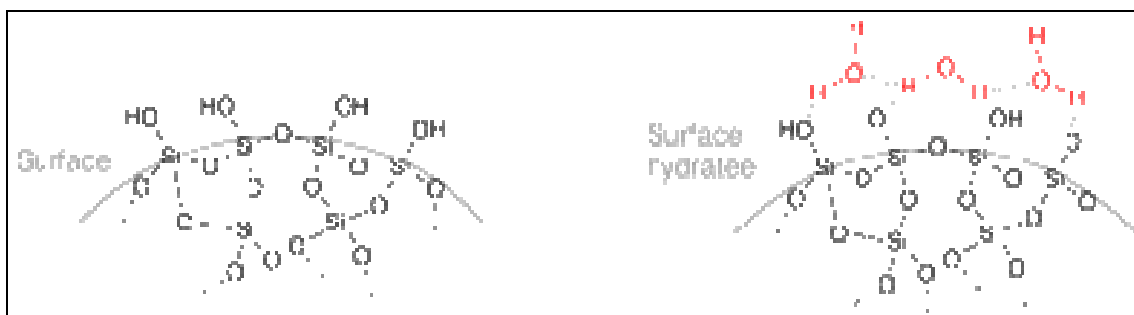


Figure III.5 : Structure chimique de la silice sec et hydraté

Graphite :

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, d'éclat métallique et d'aspect gras et luisant caractérisé par :

- une densité faible qui varie de 2,1 à 2,3;
- un point de fusion très élevé (3 500 °C).

Dans notre étude, le carbone synthétique qui a été utilisé, est de même composition que le graphite naturel. Il est obtenu par la graphitisation (cuisson entre 2 600° et 3 000 °C) d'un mélange de coke de pétrole et de brai (bitume) précuit. Il est plus pur (environ 99 % de carbone) que le graphite naturel et offre une meilleure conductivité électrique ainsi qu'une plus grande résistance chimique.

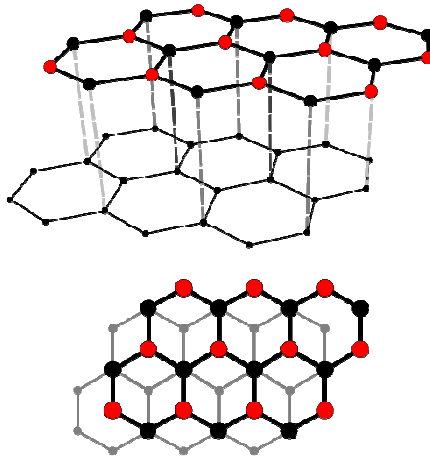


Figure III.6 : Structure du graphite

III.2.2 Préparation du composite MCP/Si/Gr et MCP/Si :

Pour la préparation du composite on commence par :

- la pesée des différents éléments attribués dans le MCP (paraffine, silice, graphite) avec la balance électronique de précision (**Figure III.7**). La proportion en masse de paraffine a été modifiée, de 95% à 50 % pendant la préparation des composites, de façon à ne pas avoir de fuite du MCP lors du processus de chauffage (**Tableau III.2**).
- On place ces éléments dans un récipient couvert du papier aluminium pour éviter toute infiltration de l'eau (**Figure III.8**).
- Le récipient est placé dans un bain-marie réglé à 75°C pour faire fondre la paraffine. Après fusion, les différents constituants sont bien mélangés pour assurer un mélange homogène (**Figure III.9**).
- On verse le mélange homogène dans un moule pour la fabrication des pastilles de (40x40x4 mm³) (**Figure III.10**).



Figure III.7 : Pesée des différents éléments

N°	Matrice		MCP		Graphite		Composite
1	Silice (Si)	2.5%	Paraffine (Pa)	95%	Graphite (Gr)	2.5%	Si 2.5, Pa 95, Gr 2.5
2		5%		90%		5%	Si 5, Pa 90, Gr 5
3		10%		80%		10%	Si 10, Pa 80, Gr 10
4		12.5%		75%		12.5%	Si 12.5, Pa 75, Gr 12.5
5		15%		70%		15%	Si 15, Pa 70, Gr 15
6		17.5%		65%		17.5%	Si 17.5, Pa 65, Gr 17.5
7		20%		60%		20%	Si 20, Pa 60, Gr 20
8		22.5%		55%		22.5%	Si 22.5, Pa 55, Gr 22.5
9		25%		50%		25%	Si 25, Pa 50, Gr 25
10		35%		65%		0%	Si 35 Pa 65, Gr 0
11		40%		60%		0%	Si 40, Pa 60, Gr 0

Tableau III.2 : Les proportions en masse des différents constituants



Figure III.8 : Emplacement des éléments dans le récipient



Figure III.9 : Emplacement du récipient dans le bain-marie



Figure III.10 : Fabrication des pastilles.

III.2.3 Fabrication des pastilles de dimension $(40 \times 40 \times 6 \text{ mm}^3)$

Le mélange homogène obtenu à la sortie du bain-marie est versé dans un moule de forme parallélépipédique.



Figure III.11 : Le moule utilisé pour la réalisation des pastilles

Après cristallisation de la paraffine du composite, le démoulage est effectué et des pastilles de dimension $(40 \times 40 \times 4 \text{ mm}^3)$ obtenues sont illustrées sur la figure ci-dessous.

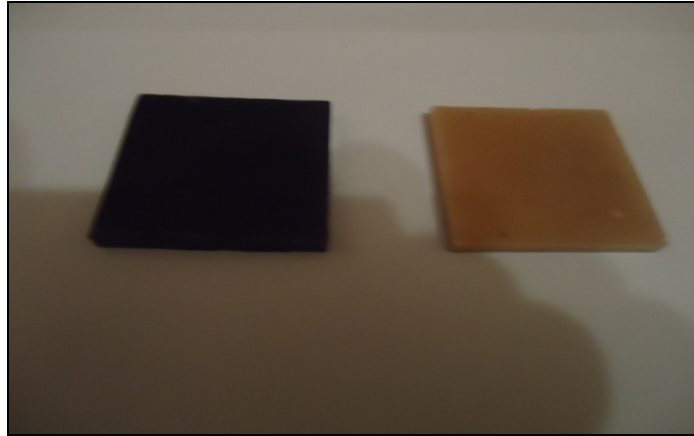


Figure III.12 : Les pastilles de (40x40x4 mm³) réalisées.

La compression des pastilles :

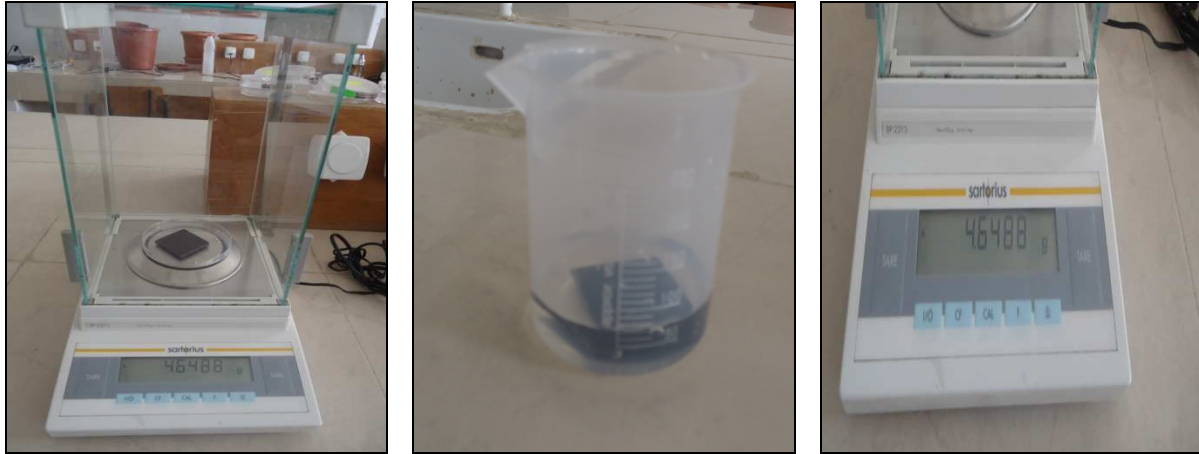
Les pastilles obtenues sont soumises à une compression unidirectionnelle à 70 kN pour minimiser l'existence des bulles d'air qui peuvent se former lors de la cristallisation, et pour avoir une masse volumique plus élevée pour stocker plus d'énergie.



Figure III.13 : La compression des pastilles.

Test de perméabilité à l'eau :

Une pastille, parmi celles réalisés, est pesée comme nous montre la **Figure III.14a**. Elle est par la suite plongée dans un récipient rempli d'eau (**Figure III.14.b**). Après 24 h, la pastille est retirée de l'eau et elle est pesée à nouveau (**Figure III.14c**). La masse de l'échantillon reste invariante, ce qui explique que le matériau est imperméable à l'eau.



a) Pesée avant immersion b) Immersion de la pastille c) Pesée après immersion de 24h
Figure III.14 : Test de perméabilité à l'eau.

III.2.3 Préparation des échantillons pour le MEB et FT-IR et DSC :

a) Méthodes de caractérisation par le MEB :

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière.



Figure III.15 : La microscopie électronique à balayage

- **Principe de fonctionnement :**

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 permet l'observation dans un vide allant jusqu'à 30 mbars, rendant ainsi possible l'examen d'échantillons qui peuvent supporter le vide sans le polluer.

- **Préparation de l'échantillon :**

Pendant la réalisation des pastilles de ($40 \times 40 \times 4 \text{ mm}^3$) une quantité du composite réalisé est utilisée pour la fabrication des petites pastilles de forme circulaire pour les différents tests (MEB et FT-IR). La qualité des images obtenues en microscopie électronique à balayage dépend grandement de la qualité de l'échantillon analysé. Idéalement, celui-ci doit être absolument propre, si possible plat et doit conduire l'électricité afin de pouvoir évacuer les électrons. Il doit également être de dimensions relativement modestes, de l'ordre de 1 à 2 centimètres. Toutes ces conditions imposent donc un travail préalable de découpe et de polissage et pour cela, on a utilisé l'une des petites pastilles réalisées (**Figure III.16**).



Figure III.16 : Les pastilles réalisées

b) Méthodes de caractérisation par la FT-IR :

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ou spectroscopie (FT-IR) est une technique utilisée pour obtenir le spectre d'absorption, d'émission, la photoconductivité ou la diffusion Raman dans l'infrarouge d'un échantillon solide, liquide ou gazeux.

Le terme « spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier » vient du fait qu'il est nécessaire de passer par une transformation de Fourier pour convertir les données brutes en résultat spectral réel.



Figure III.17 : Le spectromètre utilisé

Un spectromètre FT-IR permet de collecter simultanément les données spectrales sur un spectre large. Ceci lui confère un avantage significatif sur les spectromètres à dispersion qui ne peuvent mesurer l'intensité que dans une gamme réduite de longueurs d'onde à un instant donné.

- **Principe de fonctionnement :**

Le but de toute spectroscopie d'absorption (FT-IR, ultraviolet-visible ...) est de mesurer combien un échantillon absorbe la lumière, en fonction de l'onde. Le principe de la spectroscopie par transformée de Fourier est une façon moins intuitive d'obtenir la même information. Plutôt que d'illuminer l'échantillon avec un faisceau de lumière monochromatique, cette technique utilise un faisceau contenant une combinaison de multiples fréquences de la lumière, et on mesure l'absorption par l'échantillon. Le faisceau est ensuite modifié pour contenir une combinaison de fréquences différentes, on mesure de nouveau l'absorption par l'échantillon, et l'opération est répétée de nouveau plusieurs fois. Une fois toutes les données acquises, un ordinateur prend toutes ces données et calcule à rebours pour en déduire l'absorption à chaque longueur d'onde.

Préparation de l'échantillon :

Une partie des pastilles cylindriques réalisées (**Figure III.16**) est réduite sous forme de poudre (1/10) mg qu'on mélange avec 100 mg de KBr (bromure de potassium) et on exerce une compression allant de 60 et 80 kN pour former des pastilles plus fines pour les tests FT-IR.



Figure III.18 : Les pastilles formées

c) Méthodes de caractérisation par la DSC

La calorimétrie différentielle à balayage (en anglais, *Differential Scanning Calorimetry* ou DSC) est une technique d'analyse thermique. Elle mesure les différences des échanges de chaleur entre un échantillon à analyser et une référence (par exemple alumine, mais peut aussi être de l'air).

Elle permet de déterminer les transitions de phase :

- La température de transition vitreuse (T_g) des polymères, des verres métalliques et des liquides ioniques ;
- Les températures de fusion et de cristallisation ;
- Les enthalpies de réaction, pour connaître les taux de réticulation de certains polymères.

Principe de fonctionnement de l'appareil :

Les analyses sont réalisées sous balayage d'un gaz inerte (par exemple, l'azote ou l'argon) pour éviter toute réaction du matériau à étudier avec l'atmosphère du four.

L'appareil subit des changements de température importants. Par conséquent, la position de certains éléments de la DSC va varier. L'ensemble des calculs réalisés par l'interface informatique se fait par rapport au thermocouple positionné entre l'échantillon et la référence. En bougeant, les résultats vont être faussés. Il est donc nécessaire de calibrer régulièrement en vérifiant par exemple les températures de fusion à l'aide de l'indium, du zinc ou du plomb (généralement, on utilise l'indium - $T_f = 156,6\text{ °C}$; $\Delta H = 28,45\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$).

Cette technique se base sur le fait que lors d'une transformation physique, telle qu'une transition de phase, une certaine quantité de chaleur est échangée avec l'échantillon pour être maintenu à la même température que la référence. Le sens de cet échange de chaleur entre l'échantillon et l'équipement dépend de la nature endothermique ou exothermique du processus de transition. Ainsi, par exemple, un solide qui fond va absorber plus de chaleur pour pouvoir augmenter sa température au même rythme que la référence. La fusion (passage de l'état solide à l'état liquide) est en effet une transition de phase endothermique car elle absorbe la chaleur. De même, l'échantillon peut subir des processus exothermiques, tels que la cristallisation, lorsqu'il transmet de la chaleur au système.

En mesurant la différence de flux de chaleur entre l'échantillon et la référence, un calorimètre différentiel à balayage peut mesurer la quantité de chaleur absorbée ou libérée

au cours d'une transition. Cette technique peut également être utilisée pour observer des changements de phase plus subtils, comme les transitions vitreuses.

La DSC est largement utilisée en milieu industriel en contrôle qualité en raison de son applicabilité dans l'évaluation de la pureté d'échantillons ou dans l'étude du durcissement de polymères.



Figure III.19 : Image représentative de l'appareil utilisé pour la DSC

III.2.4 Préparation de la plaque ($300 \times 300 \times 6 \text{ mm}^3$) pour la mesure de la conductivité thermique:

Un mélange de trois constituants du composite de masse $m = 820 \text{ g}$ est préparé suivant les pourcentages : 60% paraffine, 30% de silice, 10% de graphite.

Pour obtenir une plaque de dimension ($300 \times 300 \times 6 \text{ mm}^3$), on suit les étapes suivantes :

- Les différents éléments utilisés sont placés dans un récipient après la pesée.
- Le mélange est par la suite placé dans un bain-marie réglé à 70°C (**Figure III.1.20**)
- Le contenu du récipient est remué pour avoir un mélange homogène jusqu'à fusion totale de la paraffine (**Figure III.20**).
- A la sortie du récipient du bain-marie, son contenu est rapidement versé dans le moule en verre fabriqué à cet effet (**Figure III.21**) pour éviter la solidification du composite à l'intérieur du récipient.
- Enfin, la partie supérieure du moule est placée sur la partie femelle du moule et une force manuelle est appliquée dessus pour éviter la formation des bulles d'air entre le matériau et les parois du moule, et pour améliorer l'état de surface de la plaque.

- Le tout est laissé à l'air libre pour être refroidi et permettre la cristallisation du composite. Au démoulage, une plaque de dimensions $(300 \times 300 \times 6 \text{ mm}^3)$ qui va nous servir à mesurer la conductivité thermique est obtenue (**Figure III.22**).



Figure III.20 : Le récipient dans le bain-marie.



Figure III.21 : Le moule en verre



Figure III.22 : La plaque de dimension $(300 \times 300 \times 6 \text{ mm}^3)$

- **Le CT mètre :**

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.23**)

- **Description de l'appareil :**

Une armoire à charnières en fibres 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 isothermique.

Le débitmètre thermique donne une sortie en millivolt, 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 voyant rouge clignotant. La plaque est levée et abaissée par le mécanisme à poignée à vis situé 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 de l'épaisseur jusqu'à 75 mm. La plaque chaude est protégée par un interrupteur de haute température (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.



Figure III.23 : CT mètre

Méthode d'essai :

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

La résistance thermique se situe entre 0,1 et 1,4 m².K/W. 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 le 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% lorsqu'elle ne change pas.

A chaque intervalle d'échantillonnage, on note les valeurs de T₁ et T₂ et de la sortie du débitmètre thermique. La température moyenne et la différence de température entre T₁ et T₂ sont calculées.

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

$$\lambda = \frac{Is[(K_1 + (K_2 * T)) + ((K_3 + (K_4 * T) * HFM)) + ((K_5 + (K_6 * T)) * HFM^2)]}{dT} \quad (III.1)$$

avec :

λ : conductivité thermique

I_s : épaisseur du spécimen en m

dT : différence de température en °C (T₁-T₂)

T : température moyenne en °C (T₁+T₂)/2

HFM : sortie du débitmètre (Heat Folowmetre Reading) en mV.

T₁ : température de la plaque chaude.

T₂ : température de la plaque froide.

Avec silicone :

$$K_1 = 88.1389$$

$$K_4 = 0.8037$$

$$K_2 = -2.7829$$

$$K_5 = 0.7954$$

$$K_3 = -21.3064$$

$$K_6 = -0.0189$$

III.2.5 Mesure de la masse volumique par la méthode du pycnomètre

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

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

Le flacon utilisé pour mesurer la masse volumique 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.

III.2.5.1 Principe de mesure de la masse volumique d'un solide

La mesure de masse volumique se fait par une série de trois pesées successives (**Figure III.24**)

- on remplit la fiole de liquide jusqu'au repère. On mesure une masse M_e .
- on ajoute à côté de la fiole une petite quantité du solide à mesurer. On mesure une masse M_1 .
- on met le solide dans le pycnomètre et on ajuste le volume de liquide jusqu'au repère. On mesure une masse M_2 .

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 :

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



Figure III.24 : Pesée de la masse volumique

III.3 Réalisation de l'échangeur

La présente réalisation concerne un modèle expérimental d'échangeur de chaleur thermique. Le choix des différents matériaux a été fait en fonction de :

- L'impact positif sur l'environnement (récupération de cannettes dans la nature).
- La disponibilité sur le marché des matériaux utilisés.
- La possibilité technique de fabrication.

III.3.1 Mise en œuvre du prototype de l'échangeur étudié :

Notre objectif de départ est de réaliser un échangeur de chaleur thermique écologique, à base de cannettes de récupération qui abriteront le MCP élaboré à cet effet dans la première partie de notre travail (**Figure III.25**).



Figure III.25 : Image représentative du prototype réalisé.

Le dispositif expérimental (**Figure III.25**) est réalisé au niveau du hall technologie de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou où soudure et assemblage ont été effectués.

Le matériel nécessaire utilisé pour la réalisation du modèle d'échangeur est le suivant :

- Deux tubes centraux.

- Deux supports.
- Une pompe.
- De la tuyauterie.
- Une plaque de cuivre.
- Un réservoir d'eau.
- Du mastic de silicone.

Notre échangeur est constitué des éléments suivants :

- Cinq (05) tuyaux sur lesquels on place quatre (04) canettes sur chacun, peintes en noir mat.
- Deux supports qui vont maintenir les tuyaux et assurer la fixation et l'étanchéité des cannettes.
- Des ailettes en cuivre de ($L = 110 \text{ mm}$, $l = 16 \text{ mm}$) soudées sur les tuyaux pour avoir une plus grande surface d'échange.

La réalisation de l'échangeur passe par les étapes suivantes :

a) Préparation des tuyaux :

On coupe un tube en cuivre ($d = 14 \text{ mm}$) pour avoir cinq tuyaux de longueur ($L = 680 \text{ mm}$) (Figure III.26)



Figure III.26 : Les tuyaux en cuivre

b) Préparation des deux supports :

On prépare deux supports de ($386 \times 60 \times 30 \text{ mm}^3$) sur lesquels on effectue cinq perforations chacune avec un espace de ($L = 55 \text{ mm}$) entre deux trous (Figure III.27)



Figure III.27 : Images représentatives des supports

c) Préparation des canettes :

Les canettes doivent d'abord subir une modification de leur forme initiale où un des couvercles est totalement ouvert par un côté, et l'autre percé au milieu avec un diamètre de ($d = 15 \text{ mm}$) de l'autre côté pour éviter au maximum la fuite du MCP à l'état liquide tout autant laisser passer les tuyaux avec les ailettes soudées dessus (**Figure III.28** et **Figure III.29**).



Figure III.28 : Cannette avant et après perçage. (Vue de dessous)



Figure III.29 : Canette avec et sans le couvercle (vue de dessus).

d) Préparation des tubes centraux :

On procure 10 tubes qui ont la forme d'un « T » de dimensions $D = 22 \text{ mm}$, $d = 14 \text{ mm}$. Puis on soude des petits tubes de diamètre $D = 22 \text{ mm}$ et de longueur $L = 55 \text{ mm}$ entre les « T », pour former un tube central de diamètre $D = 22 \text{ mm}$ qui permettra le passage de l'eau dans les tubes en cuivre de diamètre $D = 14 \text{ mm}$ (**Figure III.30**).



Figure III.30 : Tube central de diamètre $D = 22 \text{ mm}$.

e) Préparation des ailettes de cuivre :

Pour avoir une meilleure conductivité thermique et une plus grande surface d'échange, on soude des ailettes de cuivre de dimensions, $L = 110 \text{ mm}$ et $l = 16 \text{ mm}$, qui est un bon conducteur thermique sur les tuyaux dans lesquels le fluide caloporteur circulera (**Figure III.31**).

Ce choix revient aux caractéristiques suivantes du cuivre :

- Une bonne conductivité thermique
- Facile à manipuler
- Possibilité de souder avec différents matériaux de soudage (brasure, étain, ...etc).

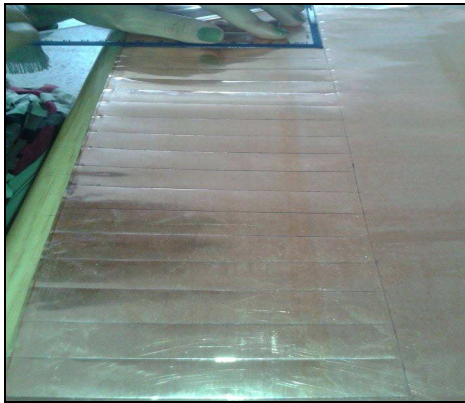


Figure III.31: Image représentative des ailettes en cuivre.

f) Fixation des ailettes sur les tuyaux en cuivre :

Après avoir préparé les ailettes en cuivre on va les souder sur les tubes en cuivre de manière à voir 4 ailettes dans chaque canette. En résumé, on disposera de 80 ailettes sur tout l'échangeur (**Figure III.32**).



Figure III.32 : Image représentative des ailettes soudées sur les tuyaux.

g) Assemblage de la partie inférieur de l'échangeur :

Tout d'abord on commence par souder les 5 tuyaux en cuivre ($d = 14 \text{ mm}$) avec le premier tube central ($d = 22 \text{ mm}$) de façon à ne pas avoir de fuite, puis on fait glisser les tuyaux dans les premiers supports (**Figure III.33**).



Figure III.33 : Image représentative de la fixation de la partie inférieure.

h) Préparation du MCP :

Dans les expériences précédentes nous avons montré que pour obtenir un meilleur compromis pour le composite les concentrations à utiliser sont (60%Pa, 30%Si, 10%Gr).

Pour préparer le composite on a suivi les mêmes étapes que celles de la préparation des pastilles qu'on a déjà cité dans le chapitre précédent.

i) Remplissage des canettes :

Pour commencer, on place les cinq premières canettes sur le support inférieur. Chacune de ces canettes sera traversée par un tuyau de (14 mm) sur lequel sont soudées quatre ailettes de cuivre. On remplit ensuite les canettes avec le composite en fusion.

Ensuite on commence à empiler les autres canettes remplies de MCP les unes après les autres on les relie entre elles avec une colle spéciale. Ainsi de suite jusqu'à placer les vingt canettes remplies de MCP.

Pour coller les canettes on utilise le mastic de silicone (**Figure III.34**) pour éviter toute fuite du MCP à l'état liquide. Il est souvent utilisé en menuiserie, couverture, électricité, sanitaire ... joints étanches.



Figure III.34 : Le mastic de silicone

j) Assemblage de la partie supérieure de l'échangeur :

Après avoir placé tous les éléments constituant de l'échangeur, on soude la partie supérieure de l'échangeur qui est le support et le tube central supérieur et on procède de la même manière que l'assemblage de la partie inférieure qu'on a déjà illustrée.

Illustration de l'échangeur sur SolidWorks

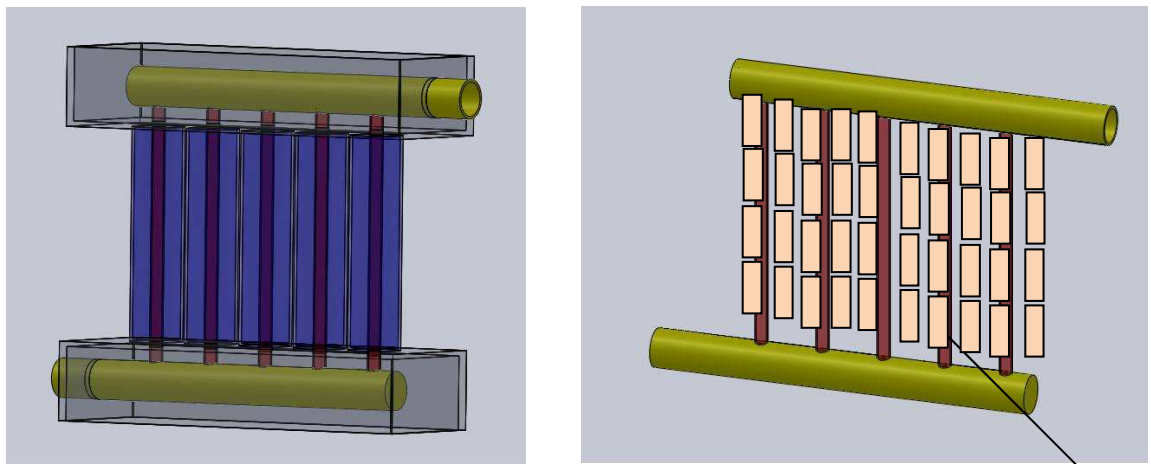


Figure III.35: Image de l'échangeur sur SolidWorks

Ailette

III.4 Conclusion :

Ce chapitre est divisé en deux parties principales, la première est consacrée à l'illustration des étapes suivies pour l'élaboration du MCP et les essais effectués sur ce dernier, la seconde a permis de retracer en détails les différentes étapes suivies lors de la réalisation de chaque élément constituant le prototype de l'échangeur de chaleur réalisé.

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des tests effectués sur le composite MCP/Si/Gr.

IV.1 Résultats du MEB

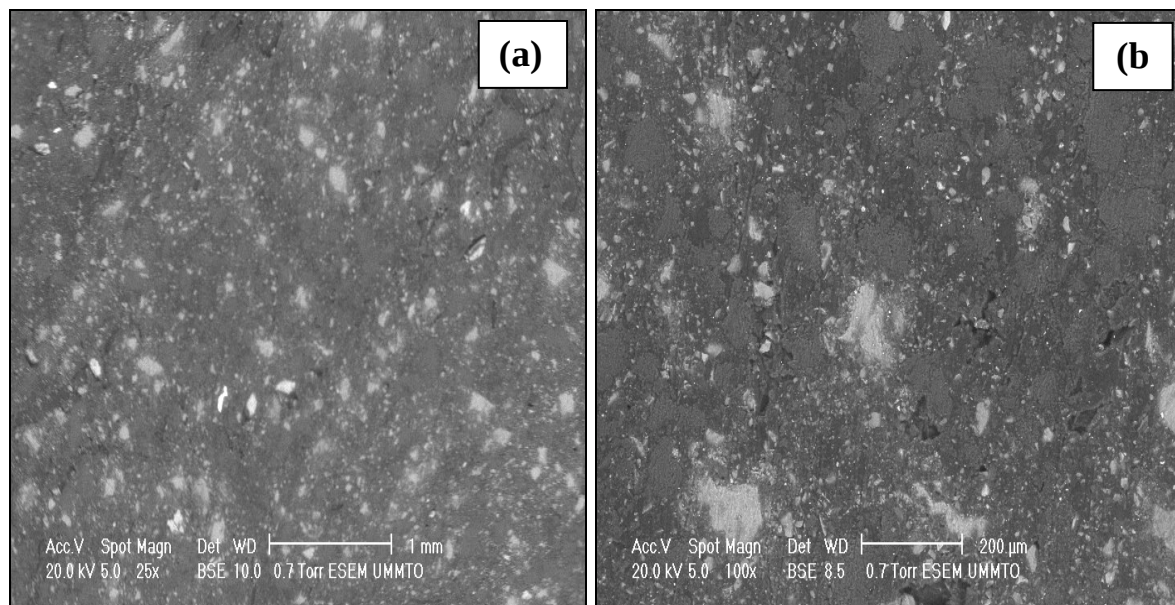


Figure IV.1 : Images MEB représentatives des échantillons analysés

- **Discussion :**

Les images MEB montrent que les composants les plus denses présentent plus de luminosité. En ce qui concerne les composants utilisés dans notre échantillon, la paraffine et le graphite sont constitués en grande partie de carbone, ce qui justifie le fait qu'on ne peut pas les distinguer les uns des autres sur la figure. Par contre, la silice, qui d'après le tableau périodique est plus dense que le carbone, représente les particules lumineuses réparties sur toute la surface analysée. Ce qui montre que le composite est quasi homogène.

IV.2 Résultats de la conductivité thermique

L'utilisation de CT mètre pour la mesure de la conductivité thermique a donné les résultats suivants :

Epaisseur : $Is = 7.5 \text{ mm}$

Différence de température : $T = T_1 - T_2 = 13.5^\circ\text{C}$

Température moyenne : $\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} = 27.65^\circ\text{C}$

Pour le calcul de la conductivité thermique, on a utilisé l'équation (III.1) qui donne pour valeur de λ : $\lambda = 0.33 \text{ W/(m.K)}$.

T_1	34.4°C
T_2	20.9°C
HFM	45.3 mV
e_1	83.1 mm
e_2	86.1 mm
I_s	7.5 mm
dT	13.5 °C
$\bar{T}$	27.65 °C
λ	0.33W / (m.K)

Tableau IV.1 : Résultats du CT mètre

Avec :

T_1 : Température de la plaque chaude du CT mètre.

T_2 : Température de la plaque froide du CT mètre.

e_1 : Epaisseur des deux feuilles de silicone sans la plaque (300×300)

e_2 : Epaisseur de l'ensemble silicone et la plaque (300×300)

I_s : Epaisseur de la plaque

- **Discussion :**

Comme on a déjà démontré dans le deuxième chapitre, la conductivité thermique de la paraffine est située entre (0.18 W/m.K et 0.25 W/m.K). D'après les résultats obtenus de la plaque (300×300×6) mm, la conductivité thermique est de 0.33 W/m.K. On constate, après comparaison, que la conductivité thermique est améliorée de près de 34.84 %. Ce qui semble intéressant pour la cinétique de charge et décharge.

IV.3 Résultats FT-IR

Les images des spectres FT-IR ont été obtenues pour la silice, le graphite, la paraffine et le composite. Elles sont représentées sur les figures ci-dessous.

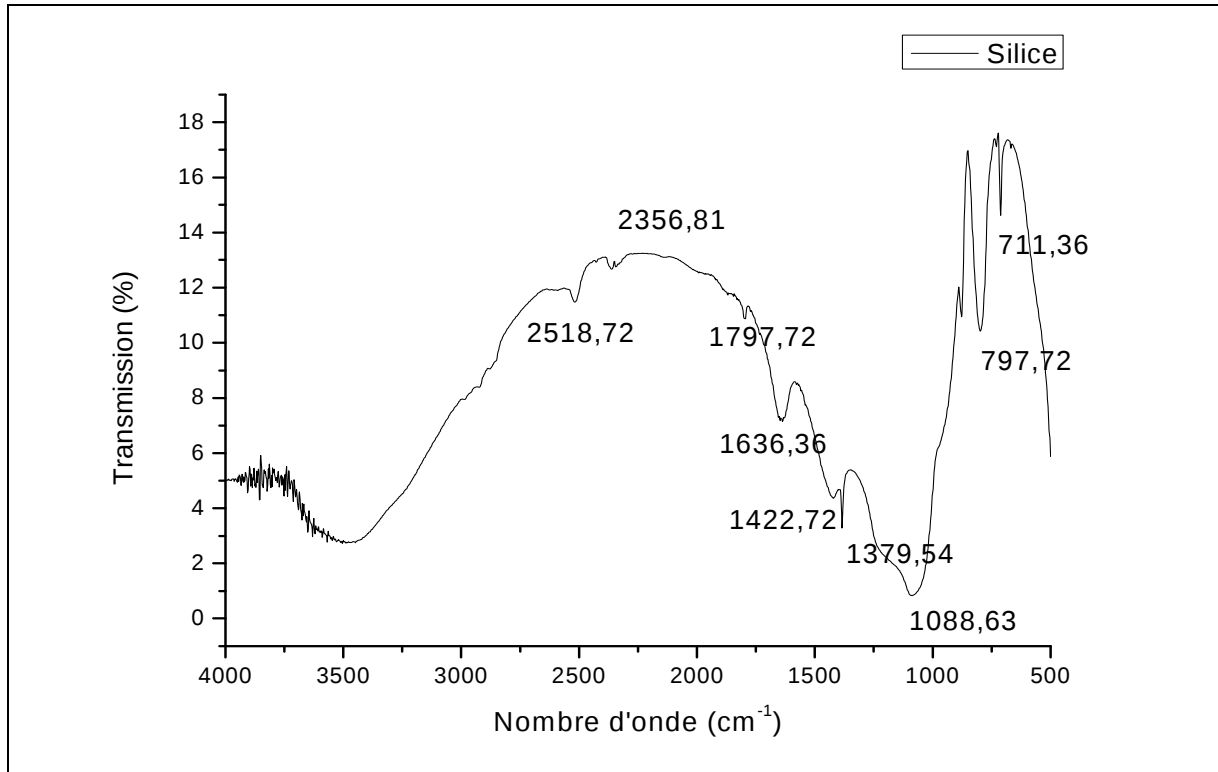


Figure IV.2: Spectre FT-IR de la silice

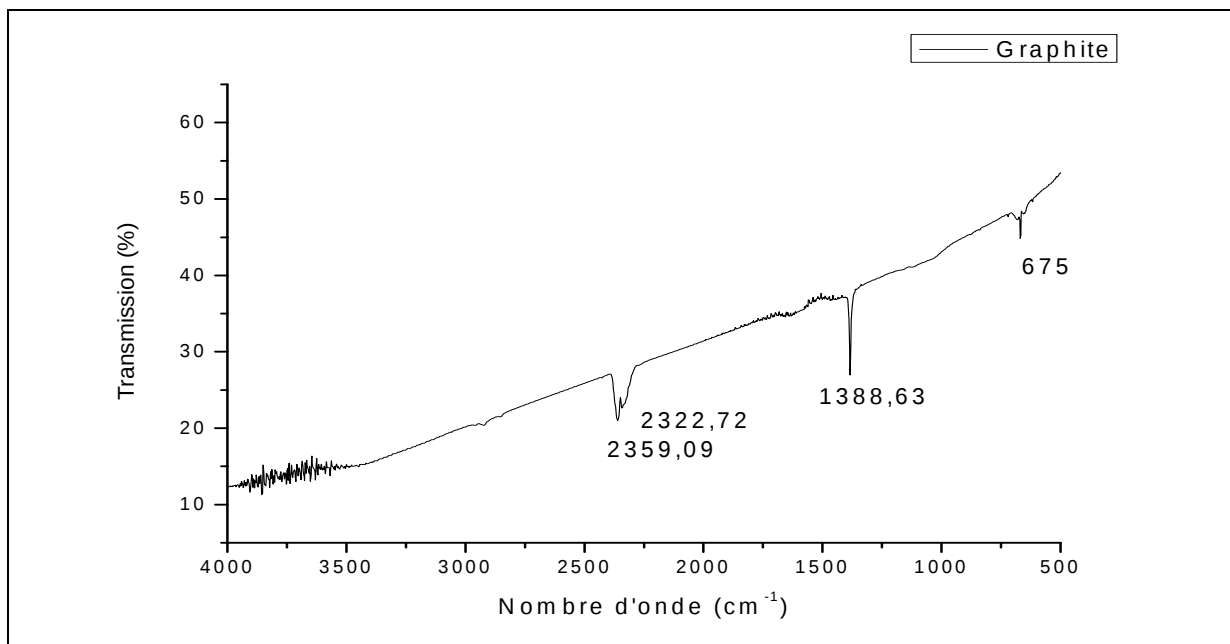


Figure IV.3: Spectre FT-IR du graphite.

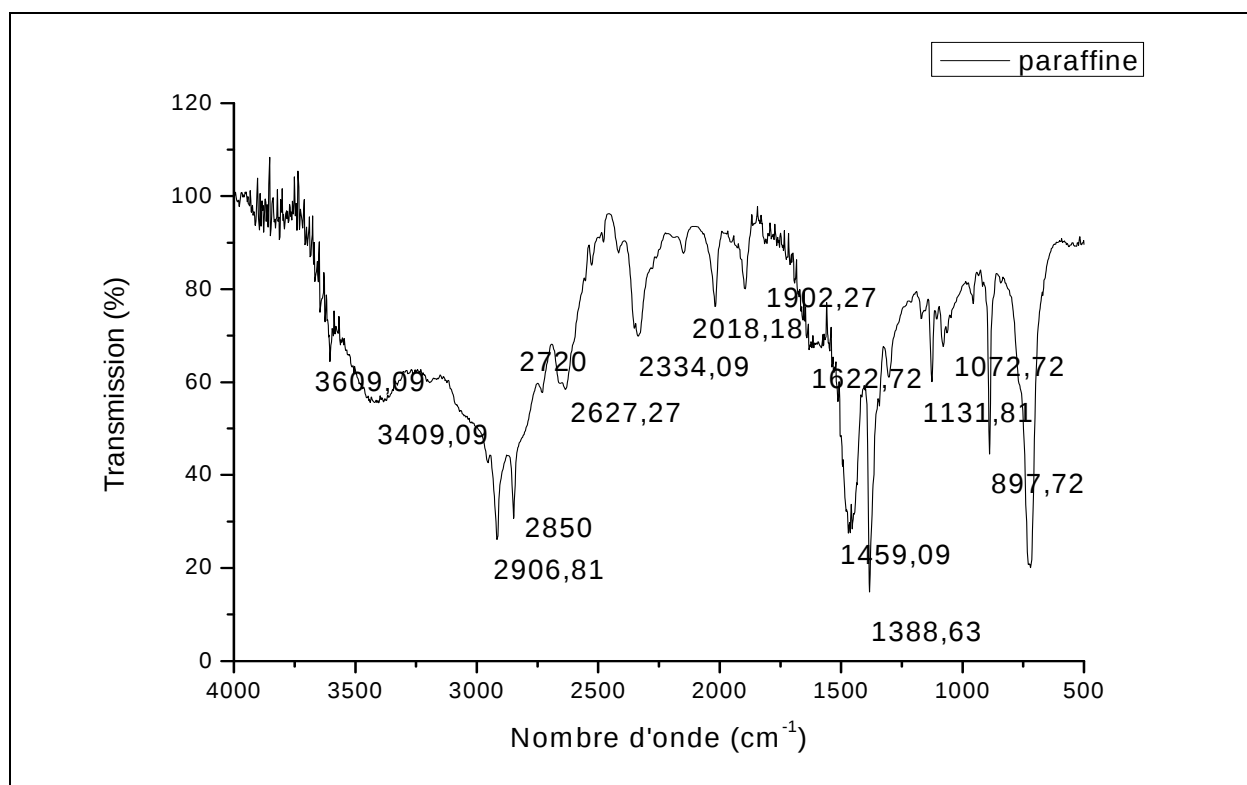


Figure IV.4: Spectre FT-IR de la paraffine

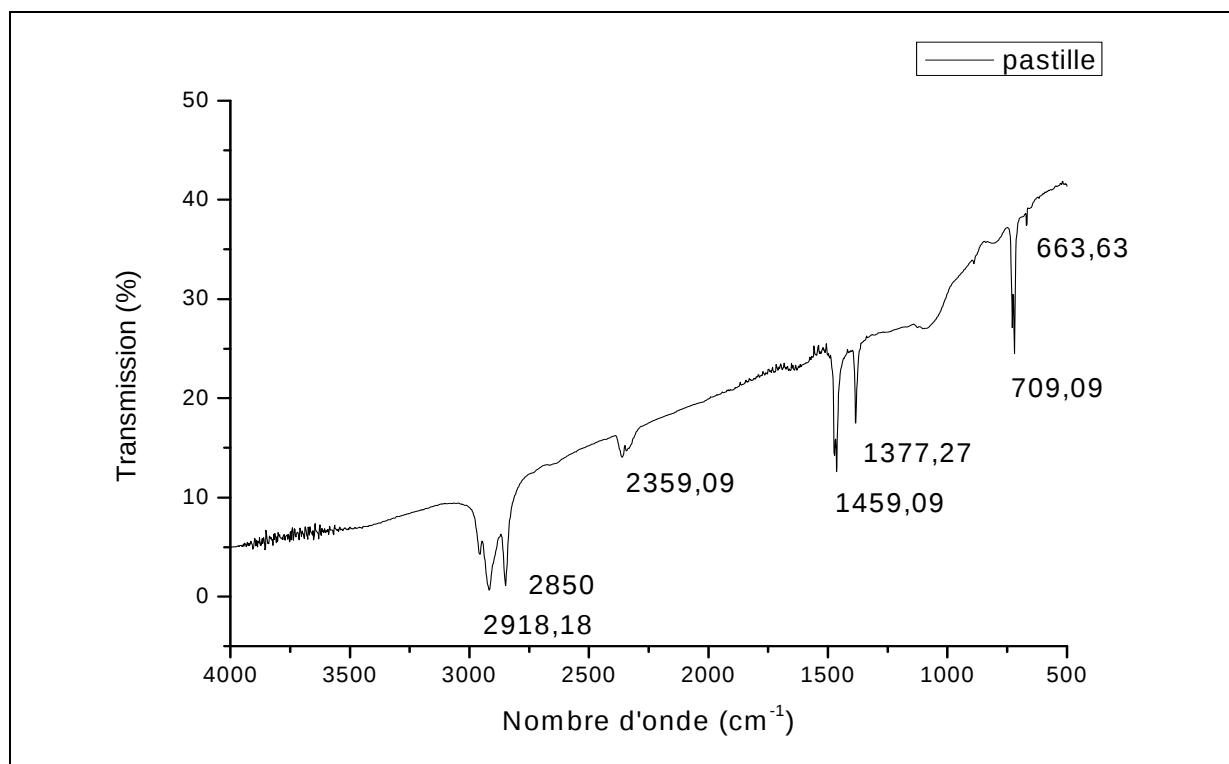


Figure IV.5: Spectre FT-IR de la pastille

- **Spectre de la Pastille**

- 2906.81 cm^{-1} représente la vibration d'élongation CH_3CH_2 et CH avec une forte intensité d'absorption.
- 2850 cm^{-1} représente la même chose.
- 2359.09 cm^{-1} représente la liaison silane Si et H avec une forte intensité d'absorption.
- 1459.09 cm^{-1} représente la vibration de déformation des alcanes CH_2 et CH_3 avec une moyenne intensité d'absorption.
- 1388.63 cm^{-1} représente la vibration de déformation des alcanes CH_3 avec une moyenne intensité d'absorption.
- 709.09 cm^{-1} représente la vibration des déformations des alcanes RCH=CHR avec une moyenne intensité d'absorption.
- 675 cm^{-1} représente la vibration de déformation des alcanes cis-RCH=CHR avec une moyenne intensité d'absorption.

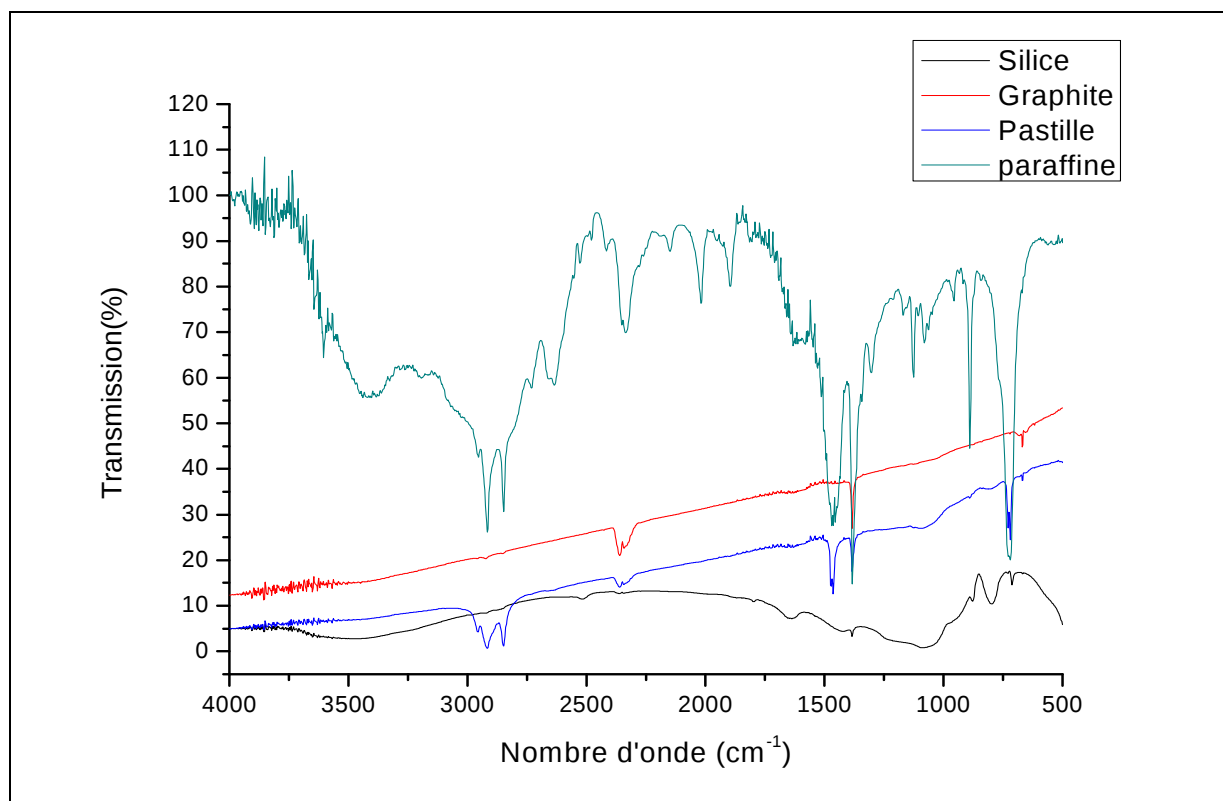


Figure IV.6 : Spectre FT-IR de la pastille et de ses composants

- **Discussion :**

D'après l'observation des résultats des spectres FT-IR on remarque que pour le spectre du composite il y a apparition des mêmes pics qui se trouvaient déjà dans ceux des graphes des trois constituants (Paraffine, Silice et Graphite). Les principaux pics qui sont 2906.81cm^{-1} , 2850 cm^{-1} , 2359.09 cm^{-1} , 1459.09 cm^{-1} , 1388.63 cm^{-1} , 709.09 cm^{-1} et 675 cm^{-1} révèlent qu'il n'y a pas apparition de nouveaux pics synonymes de réaction chimique entre les composants.

IV.4 Résultats de la mesure de la masse volumique

Pour le calcul de la masse volumique on a utilisé l'équation (III.7) :

Numéro de la pastille	Me (g)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	ρ (kg/m ³)
01	71.502	72.170	71.901	2481.480
02	71.930	72.060	71.919	921.985
03	71.960	72.159	71.947	938.680
04	71.921	72.222	71.957	1135.850
05	71.941	72.145	71.936	976.076
06	71.922	72.194	71.919	989.090
07	71.902	72.225	71.932	1102.389
08	71.938	72.245	71.968	1108.303
09	71.920	72.246	74.993	1288.537
10	71.944	72.371	71.979	1089.285
11	71.942	72.313	72.002	1192.926
12	71.945	72.220	71.904	843.908

Tableau IV.2 : Résultats de la mesure de la masse volumique

Le tableau ci-dessous représente les résultats de la mesure de la masse volumique effectuée sur les différents pourcentages des composants de chaque échantillon élaboré.

IV.5 Résultats de la DSC

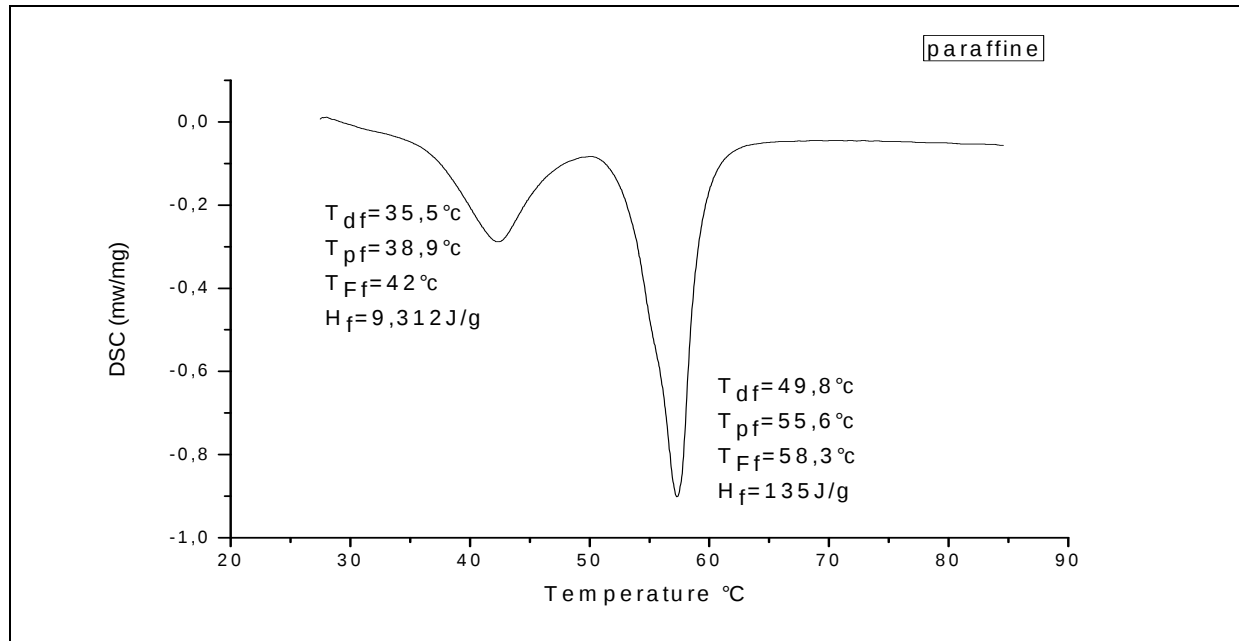


Figure IV.7: Analyse DSC de la paraffine.

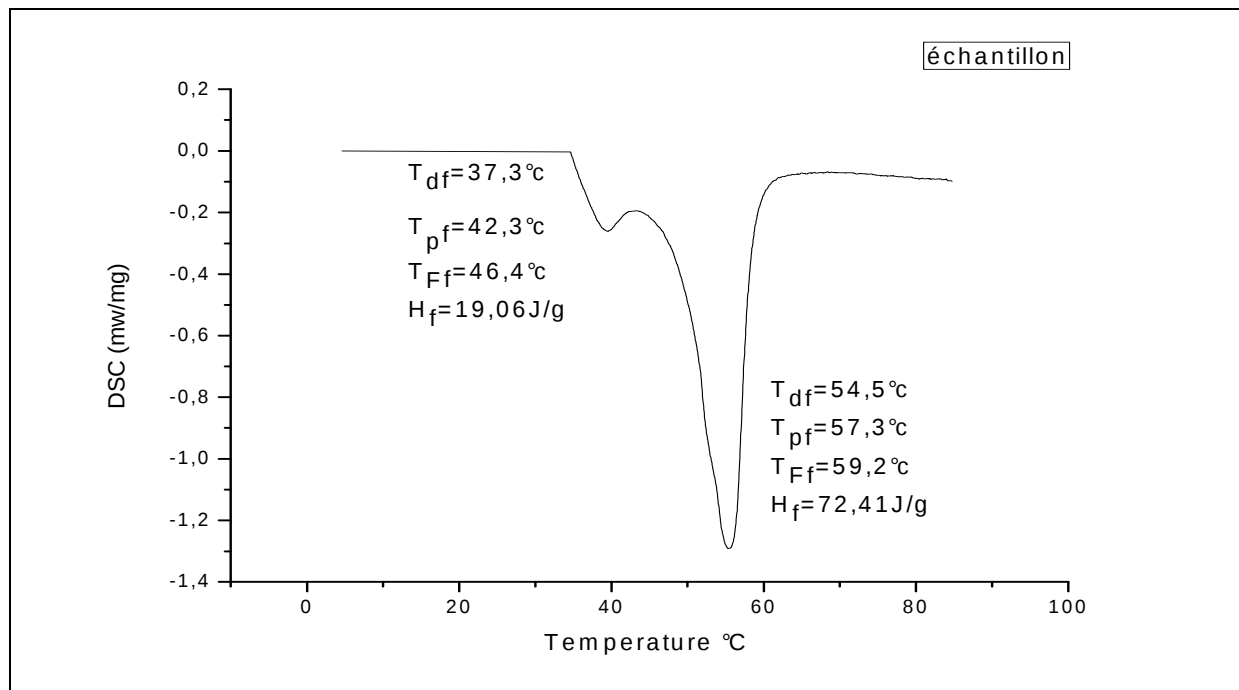


Figure IV.8: Analyse DSC de l'échantillon.

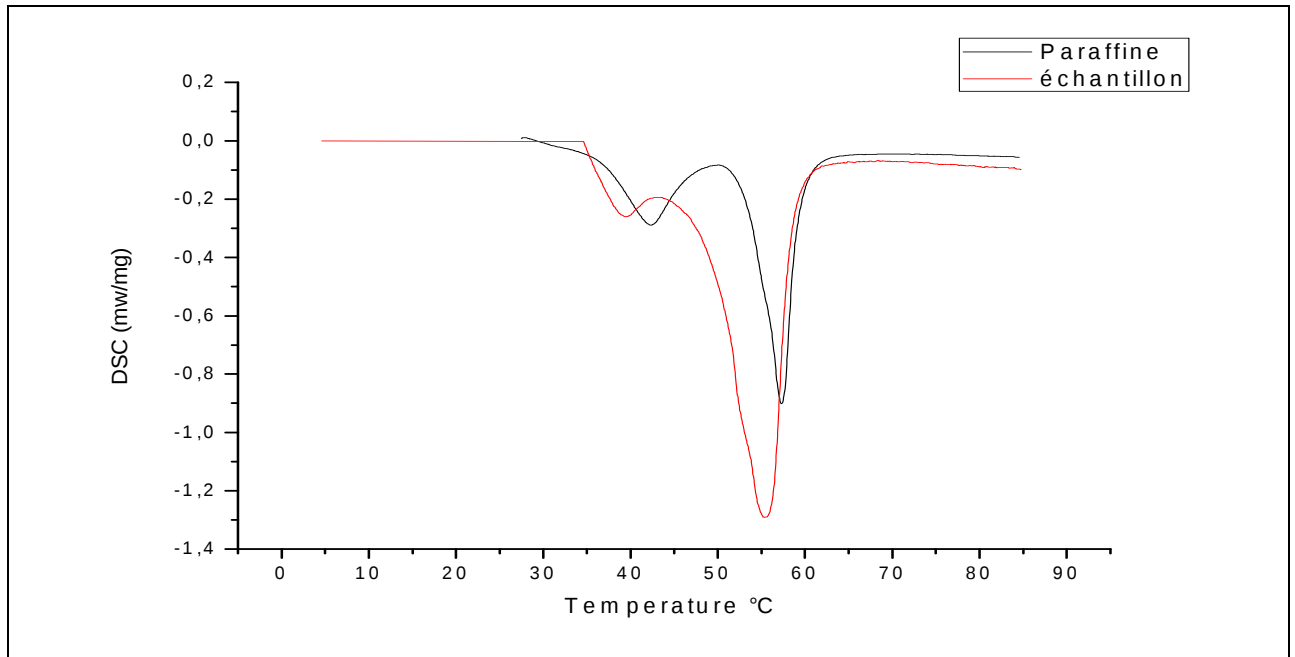


Figure IV.9: Analyse DSC de l'échantillon et de la paraffine

	Enthalpie et température de fusion							
	Fusion solide/solide				Fusion solide/liquide			
	Température début de fusion (°C)	Température du pic (°C)	Température fin de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (H_f , J/g)	Température début de fusion (°C)	Température du pic (°C)	Température fin de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (H_F , J/g)
Paraffine	35.5	38.9	42	9.312	49.8	55.6	58.3	135
Echantillon	37.3	42.3	46.4	19.06	54.5	57.3	59.2	72.41

Tableau IV. 3 : Résultats de l'analyse DSC

- **Discussion :**

On remarque sur les deux courbes qu'on a deux pics de fusion, le premier correspond à la transition solide/solide, le deuxième à la fusion solide/liquide. La courbe de la paraffine a été faite dans le but de la comparer avec celle de l'échantillon. Dans notre travail on a utilisé une vitesse d'échauffement égale 5°C/min, et une température ambiante qui se situe entre (25 °C et 80 °C). La comparaison a été faite sous forme de tableau. **La Figure IV.9** représente la courbe DSC de la paraffine et celle du composite MCP/Si/Gr. La courbe étant négative car elle correspond à la fusion, dans cette courbe le premier pic représente le changement de phase solide/solide et le deuxième pic représente le changement de phase solide/liquide ou la température début de fusion de la paraffine est de 49.8 °C et celle du pic est de 55.6 °C, la température de fin de fusion est de 58.3 °C et sa chaleur latente de changement de phase est estimée à -135 J/g.

En comparaison avec la paraffine, un large pic de changement de phase à été observé pour le composite Pa/Si/Gr où les températures du début de fusion et du pic de fusion sont respectivement 54.5 °C, 57.3 °C. Sa chaleur latente est de l'ordre de -72.41 J/g. On remarque qu'elle est relativement inférieure par rapport à celle de la paraffine pure.

IV.6 Résultats de la simulation d'un tube avec et sans ailettes rempli d'un MCP avec FLUENT

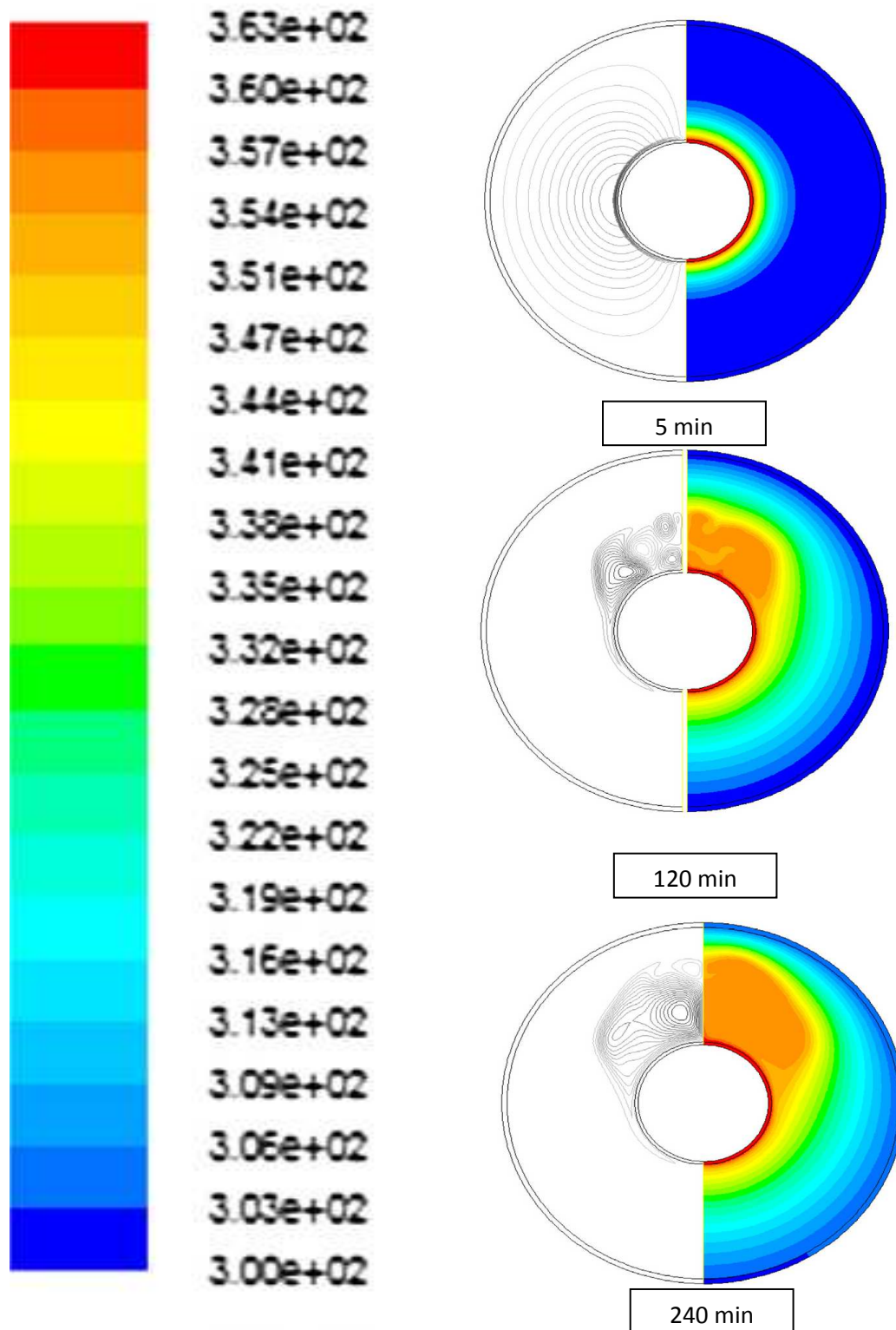


Figure IV.10 : Image représentative des résultats sur FLUENT (sans ailettes) [9]

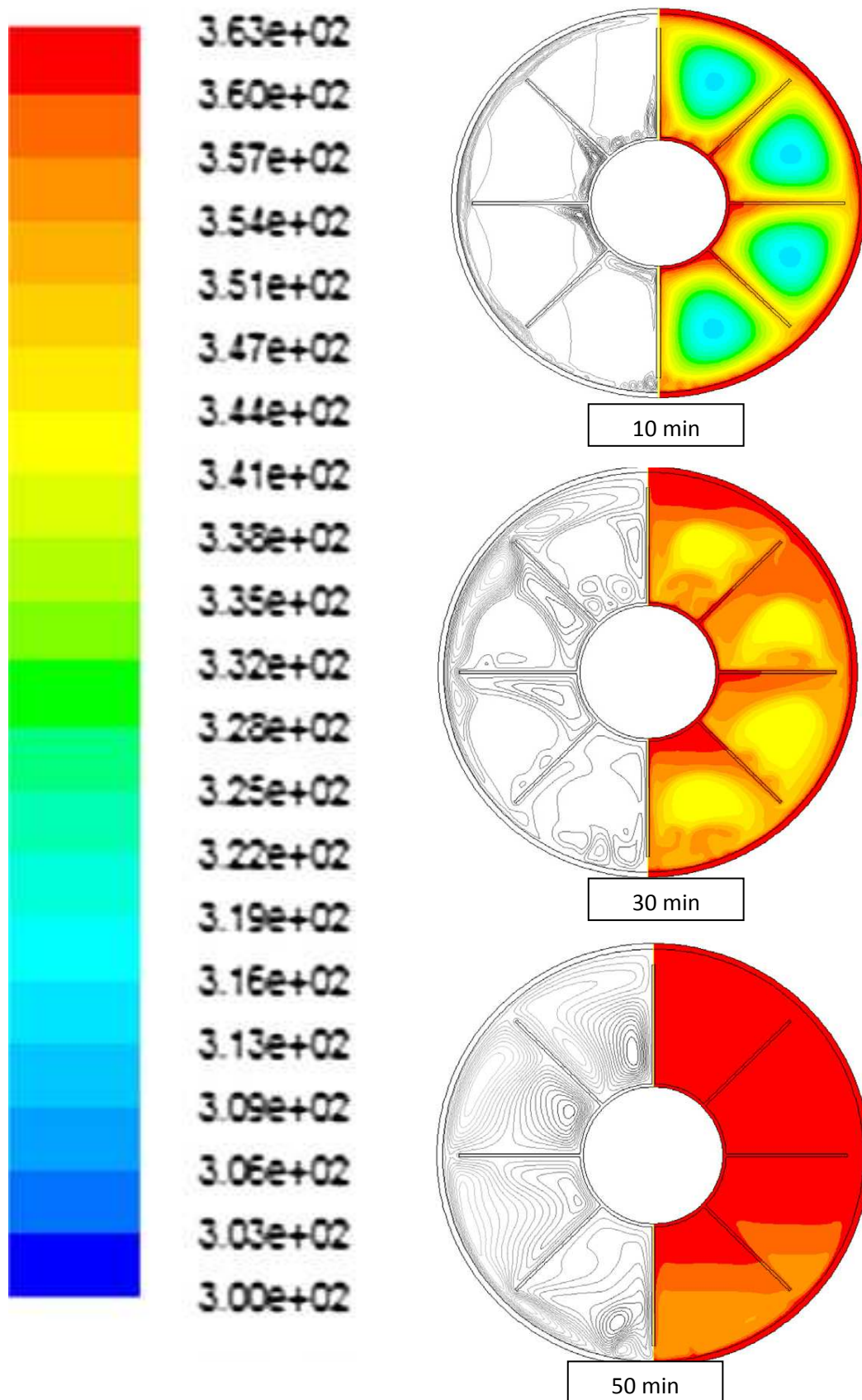


Figure IV.11 : image représentative des résultats sur fluent (avec ailette) [9]

- **Discussion**

Après observation de la figure ci-dessus on remarque que dans le premier cas (sans ailettes) la fusion du MCP prend plus de temps que dans le deuxième cas ce qui montre que la présence des ailettes améliore la surface d'échange.

Conclusion générale

Le travail que nous avons entrepris, nous a permis de mettre en application nos connaissances théoriques sur les échangeurs à base de chaleur latente. Le but de notre projet est d'étudier un système de stockage de chaleur latente de fusion dans un matériau à changement de phase. L'objectif est la réalisation d'un échangeur de chaleur (air/eau /MCP), pour stocker le surplus d'énergie thermique (chaleur) en utilisant un MCP, les résultats des différents tests effectués dans ce but étaient comme suit :

- Les observations au MEB ont montré que la paraffine a été bien retenue dans le gel de silice utilisé comme support de stockage.
- Les résultats FT-IR ont montré l'existence d'une bonne comptabilité entre le MCP et les composants de notre composite.
- Les résultats de l'analyse par DSC des composites MCP/Si/Gr, dont la température de début de fusion est de 54.5°C avec une chaleur latente de 72.41 J/g est approprié pour des applications de stockage d'énergie.
- Les résultats du CT mètre ont montré que la conductivité thermique de la paraffine a été améliorée avec l'ajout du graphite.
- Les ailettes soudées sur les tuyaux augmentent la surface d'échange, ce qui est prouvé par la simulation sur FLUENT.

En conclusion notre élément de stockage MCP peut être l'une des méthodes de stockage d'énergie dont la mise en valeur permettra dans certaines mesures de satisfaire les besoins énergétiques futurs.

Perspectives

- Dans l'échangeur réalisé le débit d'air qui circule autour des canettes ne suffit pas pour le refroidissement de l'eau qui circule dans les tuyaux d'où l'ajout du MCP. Faute de temps et de moyens on n'a pas pu aboutir à notre étude et essayer le prototype réalisé.
- En ajoutant une vitre transparente en dessus et un isolant en dessous de l'échangeur réalisé dans cette étude, ce dernier pourra être utilisé comme capteur solaire où les canettes joueront le rôle d'un absorbeur, et dans ce cas le MCP réchauffera le fluide qui circulera dans les tuyaux.
- Notre composite peut être utilisé comme un nouveau matériau à changement de phase (MCP) à forme stabilisée pour les applications de stockage d'énergie dans le bâtiment.

Références Bibliographiques

- [1] C. BOUGRIOU ; « Calcul et technologie des échangeurs de chaleur » ; Office des publications universitaires ; Alger ; 2012.
- [2] Echangeur de chaleur- définition et principes généraux- catégorie : Génie énergétique, be 9515, technique d'ingénieur, 10/01/2014.
- [3] Echangeur de chaleur – description des échangeurs – catégorie : Génie énergétique, be 9516, technique d'ingénieur ,10/01/2014.
- [4] http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89changeur_de_chaleur
- [5] Amina Akrouche ; “ Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase » ; mémoire de Magister ; Université M'Hamed BOUGARA, Boumerdes ; ALGERIE
- [6] C.K Jotshi, D.Y. Goswami and J.J. Tomlinson, Solar thermal energy storage in phase Change materials, in proc. 1992 ASES Annual Connf USA, 1992.
- [7] I.O.SAYLER, A.K. SIRCAR; “Phase change materials for heathing and cooling”; Poceeding of the 28th intersociety Energy Conversion Engineering conference.
- [8] Lane, Solar heat storage: latent heat material, Volume 1, 1983.
- [9] Sohif Mat, Abduljalil A. Al-Abidi, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, Abdulrahman Th Mohammad ; Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal–external fins ; Energy Conversion and Managemnt ; 2013.