

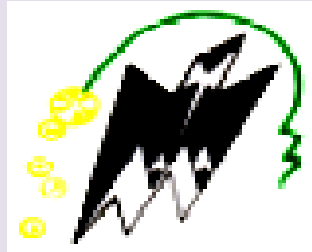
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté de génie de la construction

Département de génie mécanique



*En vue de l'obtention du diplôme de Master professionnel en Génie
Mécanique, énergétique
Option : Energies renouvelables*

Thème

***Etude et réalisation d'un Echangeur Stockeur avec
Ailettes***

Réalisé par :

MERBAH RAFIK

HADBI MOHAND SAID

Proposé et Dirigé par : *MAKHLOUF SAID*

2016/2017

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous les professeurs qui nous ont aidés tout au long de notre cursus universitaire en particulier notre directeur de mémoire Mr: S. Makhlouf pour ses conseils et l'aide qu'il nous a apportés.

Nous remercions les responsables des labos MCI (Moteur a Combustion Interne) et RDM (Résistance Des Matériaux) de la faculté de génie de la construction.

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

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

Nos derniers remerciements, vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

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

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

Tous mes frères et sœurs.

Toutes ma famille.

Tous mes enseignants.

Chaque personne qui m'a aidé chacun son nom.

MERBAH RAFIK

Dédicaces

Du profond de mon cœur, je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents

Pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être.

A mes frères

Farid, Ramdane

A tous mes amis

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection la plus sincère.

Mohand Saïd

Liste des figures

Chapitre I		
Figure. I.1	Vue du soleil	3
Figure. 1.2	Coupe du soleil	5
Figure. I.3	Mouvement de la terre autour du soleil	6
Figure. I.4	Repère horizontal	8
Figure I.5	Repère équatorial	9
Figure 1.6	Repérage d'un site sur la surface terrestre	10
Figure. 1.7	Schéma de diffusion et d'absorption dans l'atmosphère	11
Figure I.8	Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel	12
Figure I.9	Carte du gisement solaire en Algérie	13
Chapitre II		
Figure II.1	Différents modes de circulation	17
Figure II.2	Échangeur monotube en serpentin	18
Figure II.3	Échangeur coaxial	18
Figure II.4	Échangeur à tubes séparés	19
Figure II.5	Échangeur à tubes rapprochés	19
Figure II.6	Ailettes annulaires ou spiralée	20
Figure II.7	Ailettes continues ou indépendantes	20
Figure II.8	Ailettes longitudinales	21
Figure II.9	Autres types d'ailettes transversales	21
Figure II.10	Echangeurs à tubes et calandre	22
Figure II.11	Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire	23
Figure II.12	La conduction	26
Figure II.13	La convection	27
Figure II.14	Transfert de chaleur par convection (a) naturel, (b) forcée	27
Figure II.15	Le rayonnement	28
Chapitre III		
Figure III.1	Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible	34
Figure III.2	Classification des MCP	40
Figure III.3	Surfusion lors du refroidissement d'un MCP	46
Figure III.4	Pistes d'amélioration du transfert thermique dans les systèmes de stockage latent	47

Liste des figures

Figure III.5	Anneaux de Lessing	48
Figure III.6	Mousse de cuivre à imprégner de MCP	48
Figure III.7	Décharge d'un système de stockage par échange direct entre de l'érythritol et de l'huile (Wang et al)	50
Figure III.8	Décharge d'un système de stockage par échange direct entre de l'érythritol et de l'huile (Wang et al).	50
Figure III.9	Microcapsules de paraffine	51
Figure III.10	Container à lit fixe avec capsules de MCP	51
Figure III.11	Macro-encapsulation (billes de métal	52
Figure III.12	échangeur tubes et calandre baigné dans un MCP (a) simple (b) avec ailettes	52
Figure III.13	Types d'ailettes et schémas associés	53
Figure III.1	Climatisation passive et chauffage (gauche), Isolation du bâtiment (droite)	54
Figure III.15	Nouvel accumulateur de chaleur solaire développé par le DLR(© DLR - German Aerospace Center)	55
Figure III.16	MCP dans le textile	56
Figure III.17	Emballage isotherme passif transport de médicament	57
Chapitre IV		
Figure IV.1	Image des matériaux utilisés pour la préparation du composite	58
Figure IV.2	Image de la silice	59
Figure IV.3	Préparation de la silice en poudre (a) broyeur, (b) tamis	60
Figure IV.4	Pesée des différents éléments	61
Figure IV.5	Le moule utilisé pour la réalisation des pastilles	62
Figure IV.6	Les pastilles de (40x40x4 mm ³) réalisées	62
Figure IV.7	la compression des pastilles	63
Figure IV.8	Emplacement des éléments dans le récipient	64
Figure IV.9	Emplacement du récipient dans le bain-marie	64
Figure IV.10	Moule de verre	65
Figure IV.11	plaque (300× 300× 10mm ³)	65
Figure IV.12	CT mètre	66
Figure IV.13	Pesée de la masse volumique	68

Liste des figures

Figure IV.14	Les tuyaux en cuivre	69
Figure IV.15	Image représentatives des supports	70
Figure IV.16	Cannette avant et après perçage. (Vue de dessous)	70
Figure IV.17	Canette avec et sans le couvercle.	70
Figure IV.18	Tube central de diamètre $D = 16$ mm	71
Figure IV.19	Image représentative des ailettes en cuivre.	72
Figure IV.20	Image représentative des ailettes soudées sur les tuyaux	72
Figure IV.21	Le mastic de silicone	73
Figure VI.22	Collage des cannettes	73
Figure IV.23	Premier élément.	74
Figure IV.24	Isolation du boîtier avec du polystyrène	75
Figure IV.25	Couverture avec du papier aluminium	75
Figure IV.26	Réflecteur solaire.	76
Figure IV.27	Assemblage du boîtier et l'échangeur	76
Figure IV.28	Réalisation du double vitrage	77
Figure IV.29	Assemblage du boîtier vitré et des réflecteurs	77
Figure IV.30	Thermocouple couple de type K	80
Figure IV.31	Pico Technology Enregistreur de données, Température	81
Chapitre V		
Figure. V.1	Evolution de la température en fonction du temps à différents endroits de l'échangeur (charge thermique)	93
Figure. V.2	Evolution de la température du composite avec ailettes et le composite sans ailettes en fonction du temps	94
Figure. V.3	Evolution de la température d'entrée et de sortie d'eau pour les éléments avec ailettes	95
Figure. V.4	Evolution de la température d'entrée et de sortie d'eau pour les éléments sans ailettes.	96
Figure. V.5	Evolution de la température en fonction du temps à différents endroits de l'échangeur (décharge thermique)	98
Figure. V.6	Evolution de la température du composite, l'entrée et la sortie d'eau en fonction du temps	99
Figure. V.7	Evolution des températures d'eau à l'entrée, à la sortie de l'échangeur et la température du composite sans ailettes.	100
Figure. V.8	Courbe du rayonnement globale ciel clair	102

Liste des tableaux

Tableau I.1	Caractéristiques principales du soleil reçu en Algérie par régions climatique	4
Tableau I.2	Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques	13
Tableau III.1	Caractéristiques du matériau (Acétate trihydrate de sodium)	36
Tableau IV.2	Les proportions en masse des différents constituants	61
Tableau IV.3	Caractéristiques de Pico Technology Enregistreur de données, Température	81
Tableau V.1	Résultats du CT mètres	91
Tableau V.2	Températures de différents endroits de l'échangeur (charge thermique)	92
Tableau V.3	Températures de différents endroits de l'échangeur (décharge thermique)	97

Nomenclature

Caractères latins

Caractères	Signification	unités
m	masse	kg
c	Vitesse de la lumière	m/s
T	Température	(°C)
C_p	Chaleur massique	J/ (kg.K)
C_{Ps}	Chaleur spécifique du corps a l'état solide	J/ (kg.K)
C_{Pl}	Chaleur spécifique du corps a l'état liquide	J/ (kg.K)
L_f	Chaleur latente de fusion (f pour fusion)	J/kg
L_v	Chaleur latente de vaporisation (v pour vaporisation)	J/kg
ΔH	Variation d'enthalpie	J/kg
H_i	Enthalpie initial	J/kg
H_f	Enthalpie final	J/kg
ΔL_f	Enthalpie spécifique de fusion	J/kg
\dot{m}	Débit d'eau (volumique)	m^3/s
S	surface	m^2
h	Coefficient d'échange convectif	$W/m^2.K$
L	Longueur	m
X	Variable d'espace	m
P	Pression	Pa
k	Coefficient d'échange surfacique	W /m^2K
v	volume	m^3
I_{gl}	Rayonnement global	W/m^2
I_{dir}	Rayonnement direct	W/m^2
I_{dif}	Rayonnement diffus	W/m^2
I_s	Epaisseur du spécimen	m
T_p	Température de la paroi	(°C)
T_∞	Température loin de la paroi	(°C)
T_1	Température de la plaque chaude	(°C)
T_2	Température de la plaque froide	(°C)
T_i	Température initial	(°C)
T_f	Température final	(°C)
$E_{sensible}$	La quantité d'énergie stockée à l'état sensible	J/kg
E_{latent}	La quantité d'énergie stockée à l'état latent	J/kg
\bar{T}	Température moyenne	(°C)

Nomenclature

Caractères grecques

Caractères	Signification	Unités
Φ	Latitude du lieu	(°)
δ	Déclinaison du soleil	(°)
α	Azimut du soleil	(°)
ω	Angle horaire	(°)
β	Angle d'incidence	(°)
ϵ_p	Facteur d'émission de la surface	()
σ	Constante de Stefan Boltzmann	$W/(m^2 \cdot K^4)$
ρ	Masse volumique	kg/m^3
λ	Conductivité thermique	$W/m.K$
θ_z	Angle zénithal	(°)
φ	Densité de flux	W/m^2

Abréviations et indices

Symboles	Signification
Si	Silice
Pa	Paraffine
Gr	Graphite
MCP	Matériaux à changement de phase
HFM	Mesure du flux de chaleur
f	Final
i	Initial
l	Liquide
s	Solide
CS	Chaleur sensible
CL	Chaleur latente
TSV	Temps solaire vrai

Sommaire

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

Chapitre I : Gisement solaire

I.1. Introduction.....	3
I.2. Le soleil.....	3
I.3. Structure solaire.....	4
I.4. Mouvement de la terre autour du soleil.....	5
I.5. Grandeurs géographiques et astronomiques.....	7
I.5.1. Grandeurs pour le repérage du soleil.....	7
I.5.1.1 Les coordonnées horizontales.....	7
a. La hauteur du soleil (h).....	7
b. Azimut du soleil (a).....	7
I.5.1.2 Les coordonnées équatoriales.....	8
a. Angle d'inclinaison (δ).....	8
b. Angle horaire (ω).....	8
I.5.2 Grandeurs pour le repérage d'un site à la surface terrestre.....	9
a. Latitude (Φ).....	9
b. Longitude (L_e).....	10
I.5.3. Orientation d'un plan.....	10
a. Azimut du plan (α).....	10
b. Angle d'inclinaison (β).....	10
I.6. Le rayonnement solaire.....	11
a. Le rayonnement direct.....	11
b. Le rayonnement diffus.....	12
c. Le rayonnement global.....	12
I.7. Le gisement solaire en Algérie.....	12
Conclusion.....	14

Chapitre II : Généralité sur les échangeurs de chaleur et les modes de transferts thermique

II.1. Introduction.....	15
II.2. Définition générale.....	15
II.3. Critères de classement des échangeurs.....	15
II.3.1. Selon le type de contact.....	16

Sommaire

a) Échangeurs à contact direct.....	16
b) Échangeurs à contact indirect.....	16
II.3.2. Selon les types d'échange.....	16
a. Échangeur sans changement de phase.....	16
b. Échangeur avec changement de phase.....	16
II.3.3. Selon la disposition des écoulements.....	16
II.3.4. Classement fonctionnel.....	17
II.3.5. Selon la compacité de l'échangeur.....	17
II.3.6. Selon la nature du matériau de la paroi d'échange.....	17
II.3.7. Selon leurs technologies.....	17
a. Echangeurs tubulaires.....	18
b. Échangeur monotube.....	18
c. Échangeur coaxial.....	18
d. Echangeur multitubulaire.....	19
i. Échangeur à tubes séparés.....	19
ii. Échangeur à tubes rapprochés.....	19
iii. Echangeur à tubes ailettes.....	19
iv. Echangeur à tubes et calandre.....	21
e. Echangeurs à plaques.....	22
II.4. Caractéristiques des échangeurs.....	23
II.5. Etude complète d'un échangeur.....	24
a. Etude thermique.....	24
b. Etude hydraulique.....	24
c. Etude mécanique.....	24
d. Optimisation économique.....	25
II.6. Efficacité d'un échangeur.....	25
II.7. Modes de transferts de chaleur.....	25
II.7.1. Conduction.....	25
II.7.2. Convection.....	27
II.7.3. Rayonnement.....	28
II.8. Grandeurs thermiques.....	29
a. La température.....	29

Sommaire

b. Champ de température	30
c. Régime d'écoulement.....	30
d. La chaleur	30
e. Flux de chaleur	30
f. Propriétés thermo physiques des matériaux	31
g. La chaleur sensible	31
h. Chaleur spécifique.....	31
i. Chaleur latente.....	32
j. Conductivité thermique	32
Conclusion.....	32

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

III.1. Introduction	33
III.2. Principe du changement de phase	33
III.2.1. Transfer thermique par chaleur sensible	33
III.2.2. Transfer thermique par chaleur latente.....	34
III.3. Intérêt du changement de phase	38
III.4. Matériaux à changement de phase.....	38
III.4.1. Les caractéristiques idéal d'un MCP	38
a) Propriétés thermodynamiques et thermiques :	38
b) Les propriétés cinétiques	39
c) Les propriétés chimiques	39
d) Propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement).....	39
III.5. Classification des MCP	40
III.5.1. Les composés organiques.....	40
III.5.1.1 Paraffines.....	40
III.5.1.2. Acides gras	41
III.5.1.3. Alcools de sucre	42
III.5.2. Les composées inorganiques	42
III.5.2.1. Hydrates de sels :.....	42
III.5.2.2. Sels	43
III.5.2.3. Métaux	44
III.5.3. Eutectiques	44
III.6. Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage	45

Sommaire

III.6.1. La surfusion.....	45
III.6.2. La surchauffe	46
III.6.3. La dilatation.....	46
III.7. Quelques piste pour l'amélioration du transfert thermique dans le système de stockage latent	46
III.7.1. Amélioration de la conductivité global du MCP.....	49
III.7.1.1. Les structures métalliques	48
a) Matrices métalliques	48
b) Mousse métallique.....	48
c) Les nano-particules	48
III.7.2. Augmentation du transfert thermique par convection forcée.....	49
a) Echangeur actif.....	49
b) Echangeur a contact direct	49
c) Micro-encapsulation.....	49
III.7.3. Augmentation de la surface d'échange	51
a) La macro-encapsulation	51
b) Faisceau de tubes.....	52
c) Echangeurs avec ailettes.....	52
III.8. Application des Matériaux à changement de phase	53
a) L'isolation des bâtiments	54
b) La climatisation passive et le chauffage.....	54
c) Le stockage de l'énergie thermique.....	55
d) Le textile	56
e) Le Transport agroalimentaire, pharmaceutique et médicale	56
Conclusion	57

Chapitre IV : Matériels et Méthodes

IV.1 Introduction	58
IV.2 Elaboration du MCP	58
IV.2.1 Matériaux utilisés pour la préparation du composite	58
a) La paraffine (MCP)	58
b) Silice	59
c) Graphite	60
IV.2.2. Le composite MCP/Si/Gr	61

Sommaire

IV.2.2.1. La pesé des matériaux	61
IV.2.2.2. Fabrication des pastilles de dimension (40mm×40mm×4mm)	62
IV.2.2.3. La compression des pastilles :	62
IV.2.2.4. Préparation de la plaque (300mm× 300mm×10mm) pour la mesure de la conductivité thermique	63
IV.2.2.5. Calcule de la conductivité thermique de la plaque.....	65
IV.2.2.6 Mesure de la masse volumique par la méthode du pycnomètre.....	67
IV.2.2.6.1 Principe de mesure de la masse volumique d'un solide.....	67
IV.3 Réalisation de l'échangeur	68
IV.3.1.Réalisation du premier élément.....	69
a) Préparation des tuyaux	69
b) Préparation des deux supports.....	69
c) Préparation des canettes.....	70
d) Préparation des tubes centraux.....	71
e) Préparation des ailettes de cuivre.....	71
f) Fixation des ailettes sur les tuyaux en cuivre.....	72
g) Assemblage de la partie inférieure du premier élément de l'échangeur	72
h) Assemblage du premier élément de l'échangeur.....	73
i) Réalisation du boîtier	74
j) Réalisation des réflecteurs.....	75
k) Assemblage de l'échangeur.....	76
IV.4. Les quantités des matériaux utilisées	78
IV.5. La surface d'échange de la canette.....	79
IV.6. Mesure de la température des éléments de l'échangeur	80
IV.6.1. Les Thermocouples	80
IV.7. Pico Technology Enregistreur de données, Température USB TC-08	80
• Description de l'instrument.....	80
• Caractéristiques et avantages	81
IV.8. Logiciel PicoLog	82
a) Lancement de PicoLog.....	82
b) Affichage enregistreur.....	85
c) Affichage graphe	86
d) Affichage tableau	88
e) Affichage lecteur	89

Sommaire

IV.9. Etalonnage d'un instrument de mesure	90
Conclusion.....	90
Chapitre V : Résultats et discussion	91
V.1 Résultats de mesure de la conductivité thermique	
V.2 Résultats des tests effectués sur l'échangeur	
V.2.1. Discussion des résultats.....	
V.3. Bilan thermique	
Conclusion.....	
Conclusion générale.....	108
Références bibliographiques	

Introduction générale

Introduction générale

Le monde entier se pose la question : Pourquoi stocker de l'Énergie ?

Les énergies renouvelables sont des productions qui sont souvent intermittentes puisqu'elles dépendent des conditions climatiques qui ne sont pas constantes. C'est d'ailleurs un argument fort des militants anti-éolien par exemple. Un stockage de l'énergie produite permettrait, dans la majorité des cas, de lisser les productions et augmenterait sensiblement le crédit accordé aux énergies renouvelables.

Aujourd'hui, avec des énergies renouvelables ou non, la production ne s'adapte pas en fonction des consommations réelles en énergie. Cela est dû aux centrales nucléaires, les centrales pétrolières et sites gaziers qui produisent la majorité de notre énergie et qui ne peuvent pas être arrêtées ou mis en service rapidement.

Ces problèmes sont également présents dans les productions solaires puisque les productions ne sont pas constantes, elles ne peuvent pas répondre la majorité du temps aux demandes, particulièrement la nuit. Pour cela, on utilisera des stockages diurne/nocturne. On peut également remarquer l'apparition de projets de stockage d'énergie saisonnier. Il permettrait par exemple de faire un stockage d'énergie thermique d'origine solaire l'été, pour la restituer en chauffage l'hiver.

Au-delà de tout problème de réponse de la production à la consommation, le transport de l'énergie impose lui aussi de trouver des solutions performantes de stockage. On peut citer le cas des téléphones, des ordinateurs portables ou des voitures. Tous ont besoin d'une source d'énergie transportable. Or les batteries utilisées aujourd'hui sont composées majoritairement de lithium ou de plomb. Ces derniers posent de nombreux problèmes environnementaux, économiques et géopolitiques, d'où la nécessité d'utiliser à l'avenir d'autres moyens de stockage.

Dès lors, de nouveaux objectifs ont été basés sur la recherche et le développement technologique en vue d'exploiter de nouvelles formes de stockage d'énergie, dont la mise en valeur permettra dans certaines mesures de satisfaire les besoins énergétiques futurs. On s'intéresse alors 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

Introduction générale

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 ce modeste travail est d'étudier un système de stockage par chaleur latente dans un matériau dit à changement de phase. L'objectif est la réalisation d'un échangeur de chaleur (Eau/MCP), pour stocker le surplus d'énergie thermique (chaleur) en utilisant un MCP.

Ainsi, pour mener à bien notre travail nous avons commencé par un premier chapitre consacré au gisement solaire qui est la source d'énergie principale pour notre échangeur.

Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur les échangeurs de chaleur et les modes de transfert thermique.

Le troisième chapitre est consacré 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.

Le quatrième chapitre est consacré à l'élaboration du MCP (matériau à changement de phase) utilisé en suite dans l'échangeur.

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

Une conclusion qui reprend l'essentiel des résultats obtenus.

Chapitre I

Gisement solaire

I.1. Introduction

Les besoins énergétiques ne cessent de croître dans le monde. Malgré son énorme potentiel, l'énergie solaire ne correspond qu'à une infime partie de la production et de la consommation d'énergie en Algérie. Pourtant, l'exploitation du rayonnement solaire est compétitive à plusieurs niveaux par rapport aux autres sources d'énergies renouvelables. Il s'agit de la source d'énergie la plus répandue et la plus accessible sur terre. Chaque jour, le soleil envoie vers la Terre 10 000 fois la quantité totale d'énergie consommée à l'échelle de la planète. Aussi, la quantité d'énergie libérée par le soleil pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an [1].

I.2. Le soleil

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1 391 000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de $2 \cdot 10^{27}$ tonnes.

Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermonucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde $564,10^6$ tonnes d'hydrogène en $560,10^6$ tonnes d'hélium, la différence (4 millions de tonnes) est dissipée sous forme d'énergie ($E = mC^2$), ce qui représente une énergie totale de $36 \cdot 10^{22}$ kJ. La terre étant à une distance de $150 \cdot 10^6$ km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de $1,8 \cdot 10^{14}$ kW [1].

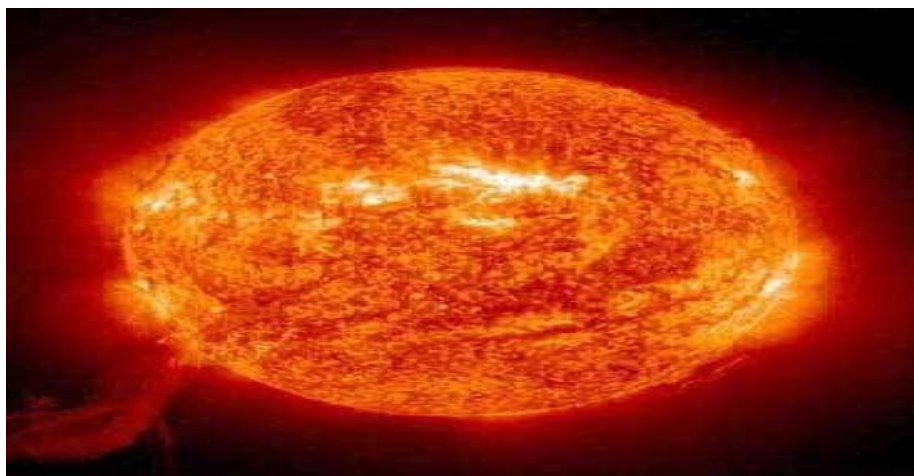


Figure. I.1: Vue du soleil [1]

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil [2].

Diamètre (km)	14×10^5
Masse (kg)	2×10^{30}
Surface (km ²)	6.09×10^{12}
Volume (km ³)	1.41×10^{18}
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	2.5×10^{17}

I.3. Structure solaire

La quantité d'énergie libérée par les réactions thermonucléaires au niveau du noyau est transportée sous forme de rayons gamma et de rayon X sur une distance correspondante au deux tiers de rayon du soleil. A partir de là, le transport d'énergie se fait par convection.

La photosphère transmet la lumière. Son épaisseur ne dépasse pas les 300 km. La température moyenne de région est environ 5800 K. Elle émet 99 % du rayonnement total, principalement dans le visible, et c'est elle l'œil humain perçoit. la couche suivante n'est pas visible et porte le nom chromosphère. Elle est épaisse d'environ 2500 km.

Le minimum de la température de l'atmosphère solaire se trouve à la jonction entre la photosphère et la chromosphère, à partir de là, la température monte de nouveau est atteint plusieurs centaines de milliers de degrés. la dernière couche solaire est la couronne, elle a plusieurs millions de km d'épaisseur [3].

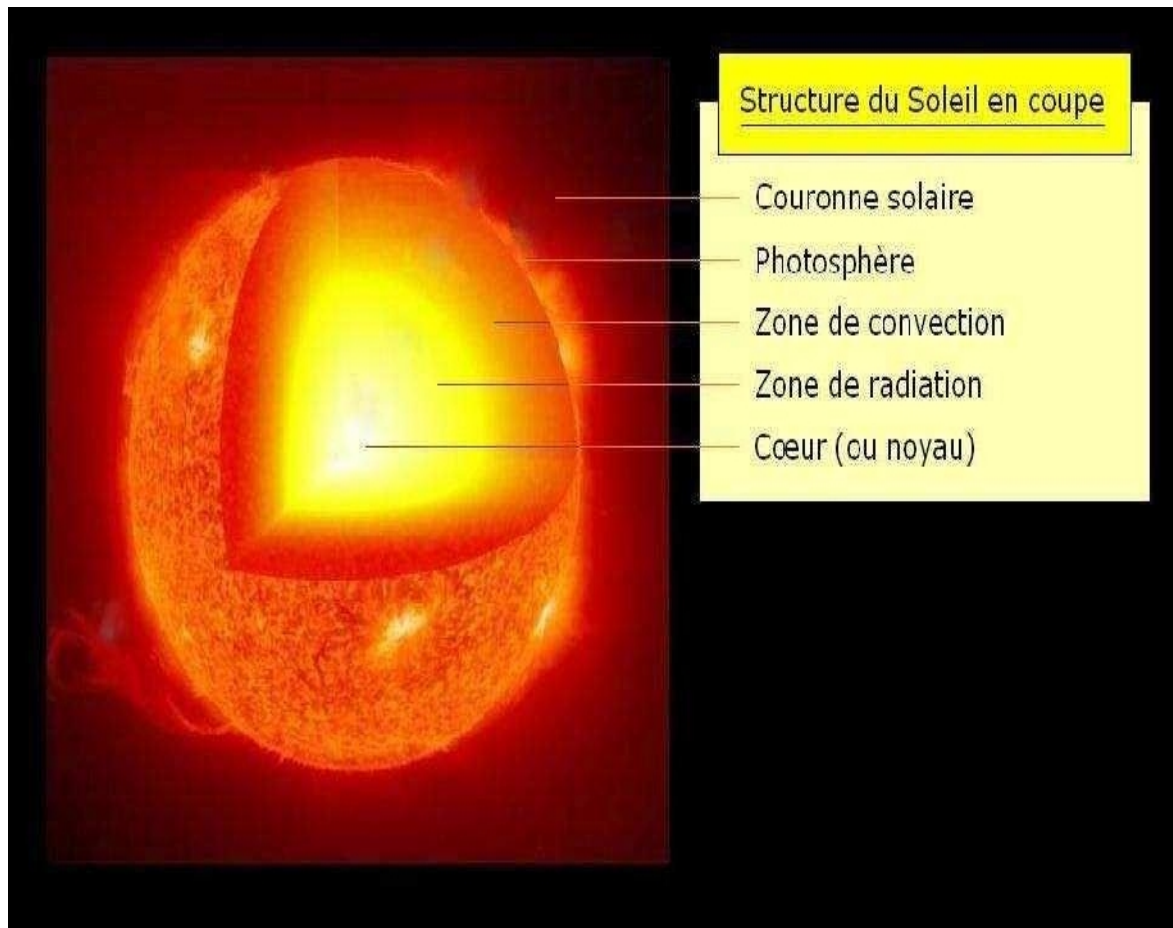


Figure. 1.2: Coupe du soleil [3].

La photosphère transmet la lumière. Son épaisseur ne dépasse pas les 300 km. La température moyenne de région est environ 5800 K. Elle émet 99 % du rayonnement total, principalement dans le visible, et c'est elle que l'œil humain perçoit. La couche suivante n'est pas visible et porte le nom de chromosphère. Elle est épaisse d'environ 2500 km.

Le minimum de la température de l'atmosphère solaire se trouve à la jonction entre la photosphère et la chromosphère. A partir de là, la température monte de nouveau et atteint plusieurs centaines de milliers de degrés. La dernière couche solaire est la couronne, elle a plusieurs millions de km d'épaisseur.

I.4. Mouvement de la terre autour du soleil

Le soleil est l'astre central de notre système planétaire, la terre est la troisième planète de notre système solaire. Son diamètre à l'équateur est de 12700 km. Elle tourne autour du soleil une fois par an (exactement en 365.25 jours) sur une orbite elliptique où le soleil est considéré comme un point fixe au milieu de cette ellipse [4].

On note cependant une variation de distance durant son parcours annuel d'environ 3.3% entre les valeurs suivantes :

- Distance maximum 152 millions km
- Distance minimum 147 millions km

La distance moyenne est de 149,5 millions de km. A la vitesse de la lumière, cette distance correspond à 8,32 minutes. Cela signifie que la lumière solaire atteint la terre après 8.32 min. La variation de la distance entre le soleil et la terre influence l'intensité de l'irradiation sur le sol terrestre. Elle est également l'une des causes de la variation des saisons.

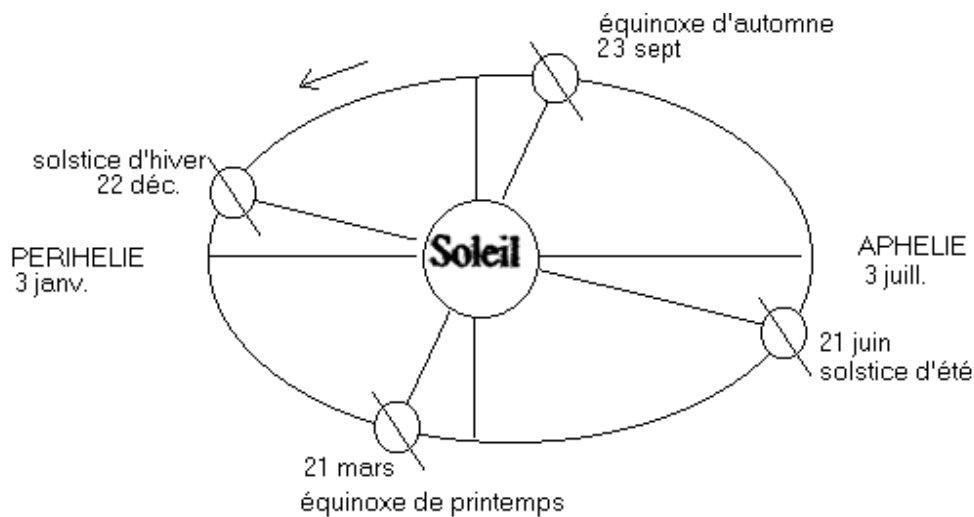


Figure I.3 : Mouvement de la terre autour du soleil [4].

Le point de l'orbite terrestre plus proche du soleil porte le nom de périhélie. Il a une distance de 147 millions de km et tombe le 3 janvier. À cette période de l'année l'hémisphère Nord c'est l'hiver pendant que dans l'hémisphère Sud c'est l'été.

Par contre le point le plus éloigné du soleil l'aphélie est atteint le 3 juillet avec une distance de 152 millions de km. Dans cet hémisphère sud c'est l'hiver et dans l'hémisphère Nord c'est l'été.

I.5. Grandeurs géographiques et astronomiques

I.5.1. Grandeurs pour le repérage du soleil

La position du soleil dans le ciel n'est pas fixe, elle change à travers le jour et la saison.

Ce changement de position est engendré par la rotation de la terre sur elle-même (autour de son axe), et de son mouvement autour du soleil (dans son orbite).

Afin de déterminer cette position, il est d'usage d'utiliser deux repères : le repère horizontal et le repère équatorial [5].

I.5.1.1 Les coordonnées horizontales

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu.

Dans ce repère, les coordonnées du soleil sont :

a. La hauteur du soleil (h)

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal.

Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(h) = \sin(\Phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\Phi) \cdot \cos(\delta) \quad (\text{I.1})$$

Φ : La latitude du lieu.

δ : La déclinaison du soleil.

b. Azimut du soleil (a)

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction Sud. L'azimut est compté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est.

Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(a) = (\cos(\delta) \sin(\omega)) / \cos(h) \quad (\text{I.2})$$

ω : Angle horaire.

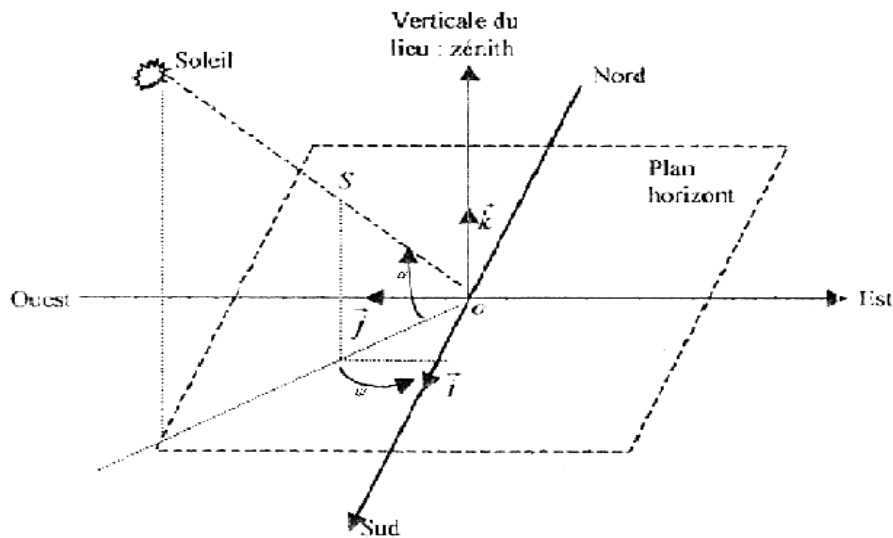


Figure I.4: Repère horizontal [5].

I.5.1.2 Les coordonnées équatoriales

Dans ce repère, la position du soleil dans le ciel est déterminée par deux grandeurs [5].

a. La déclinaison (δ)

C'est l'angle entre la direction soleil-terre et le plan de l'équateur terrestre. Elle est nulle aux équinoxes et maximale aux solstices, elle varie de $-23,27^\circ$ au solstice d'hiver à $+23,27^\circ$ au solstice d'été.

Elle peut être évaluée en première approximation par la relation suivante :

$$\delta = 23,27 \sin [360 / 365(j + 284)] \quad (\text{I.3})$$

j : est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

b. Angle horaire (ω)

C'est l'angle compris entre le méridien origine passant par le Sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel. Il est donné par la relation suivante :

$$\omega = 15 (TSV - 12) \quad (\text{I.4})$$

TSV : Temps solaire vrai.

Il vaut 0° à midi solaire, ensuite chaque heure correspond à une variation de 15° , car la période de la terre dans sa rotation sur elle-même est égale à 24 h. Compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'Est et positivement le soir.

Le temps solaire vrai est égal au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence.

$$TSV = TU + 4(LSt - Lg) + ET \quad (I.5)$$

TU : Temps universel standard (mn)

LSt : Méridien standard du lieu ($^\circ$)

Lg : Méridien local du lieu ($^\circ$)

ET : Correction de l'équation du temps, donnée par la relation suivante :

$$ET = 9,87 \sin(2JD) - 7,35 \cos(JD) - 1,5(JD) \quad (I.6)$$

Avec :

$$JD = (J - 81) \times (360/365) \quad (I.7)$$

J : Nombre de jours à partir du premier janvier.

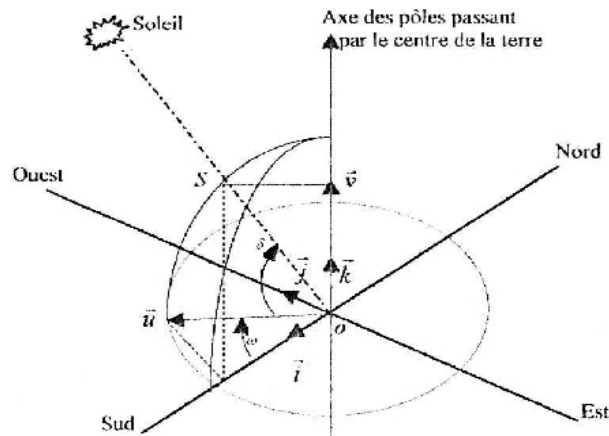


Figure. I.5 Repère équatorial [5].

I.5.2 Grandeurs pour le repérage d'un site à la surface terrestre

Un point quelconque d'un lieu donné du globe peut être défini par les coordonnées suivantes :

a. La latitude (Φ)

Correspond à l'angle entre le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu et le plan équatorial.

Elle varie de -90° à $+90^\circ$, elle est positive vers le Nord.

b. La longitude (Le)

Représente l'angle entre le plan méridien passant par ce lieu et le plan méridien origine (Greenwich).

L'altitude est la distance verticale entre ce point et une surface théorique de référence (surface de la mer) [4].

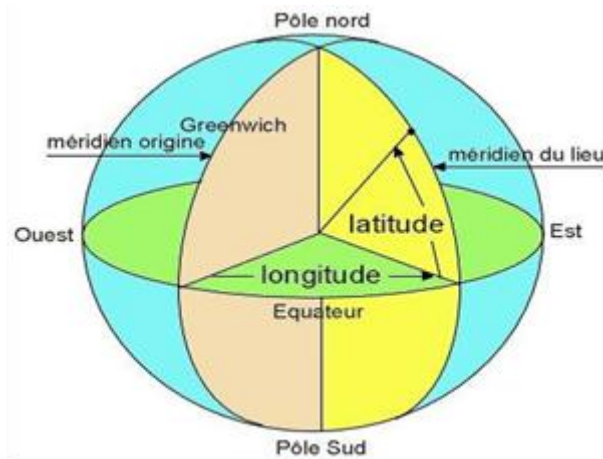


Figure 1.6 : Repérage d'un site sur la surface terrestre [4].

I.5.3. Orientation d'un plan

L'orientation d'un plan quelconque est définie par deux angles (α , β) [6].

a. Azimut du plan (α)

C'est l'angle que fait la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction du Sud et il désigne l'orientation de la surface de telle sorte que:

- $\alpha = -90^\circ$ pour une orientation Est.
- $\alpha = 0$ pour une orientation Sud.
- $\alpha = 90^\circ$ pour une orientation Ouest.
- $\alpha = 180^\circ$ pour une orientation Nord.

b. Angle d'inclinaison β

C'est l'angle que fait la surface avec le plan horizontal. L'inclinaison de la surface est désignée par la variable β , choisie de telle sorte que :

$\beta = 0$ pour une surface horizontale.

$\beta = 90^\circ$ pour un plan vertical.

$\beta = 180^\circ$ pour un plan horizontal tourné vers le bas.

I.6. Le rayonnement solaire:

L'énergie reçue au niveau du sol est inférieure à 1367 W/m^2 qui est la constante solaire, car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15 %) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6 %). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée...etc. [1].

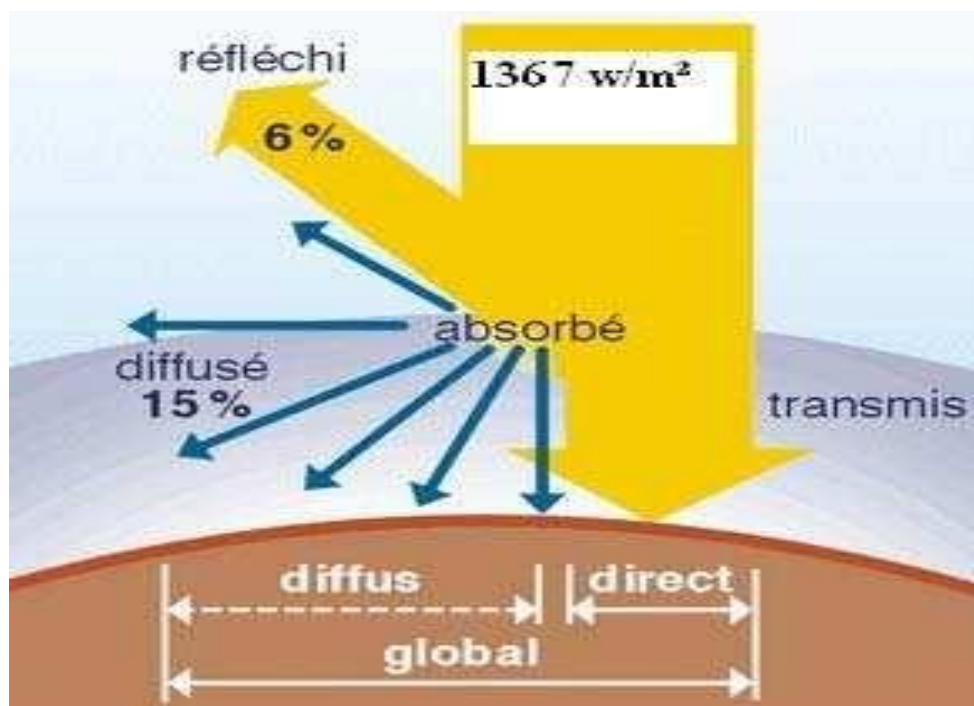


Figure. 1.7: Schéma de diffusion et d'absorption du rayonnement dans l'atmosphère [1].

a. Le rayonnement direct

C'est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications. Il provient du disque solaire seulement à l'exclusion de tout rayonnement diffusé, réfléchi ou réfracté par l'atmosphère.

b. Le rayonnement diffus

C'est la part du rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, à l'exception du disque solaire, et diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.

c. Le rayonnement global

C'est le rayonnement reçu sur une surface horizontale, provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

$$I_{gl} = I_{dir} + I_{dif} \quad (I.8)$$

I_{gl} rayonnement global

I_{dir} rayonnement direct

I_{dif} rayonnement diffus

I.7. Le gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible, compte tenu de la demande à satisfaire.

De part sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.8 ci-dessous [7] :

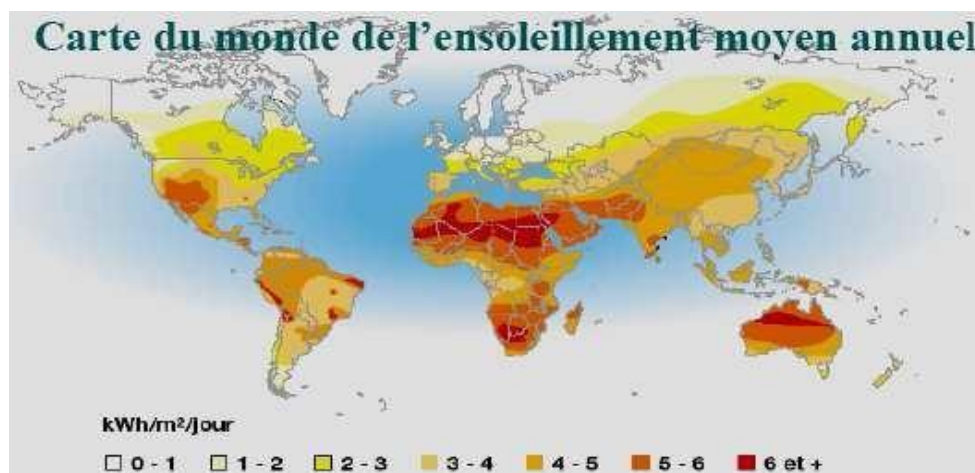


Figure I.8 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [7].

Compte tenu d'une évaluation faite par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel.

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.5 selon l'ensoleillement reçu annuellement :

Tableau I.2. Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [7].

Régions	Région côtières	Haute plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême Sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale.



Figure I.9 : Carte du gisement solaire en Algérie [7].

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons abordé quelques notions indispensables sur le gisement solaire. Le prochain chapitre sera consacré aux généralités sur les échangeurs de chaleur et les modes de transferts de chaleur.

Chapitre II

**Généralités sur les
échangeurs de
chaleur et les modes
de transfert
thermique**

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

II.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.), du transport (automobile, aéronautique), 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 des procédés.

II.2. Définition d'un échangeur de chaleur

Comme leur nom l'indique, les échangeurs thermiques sont des dispositifs destinés à favoriser l'échange thermique entre deux fluides, sans pour autant que les fluides ne se mélangent (dans la plus part des cas). Le principe le plus général consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique. Généralement pour assurer efficacement cet échange de chaleur au moins un des fluides est mis en mouvement (pompe, ventilateur). Pour augmenter cet échange, et donc le transfert d'énergie, il peut être fait appel au changement de phase (condenseurs, évaporateurs, bouilleurs...), système utilisé couramment dans les machines thermiques ou dans les caloducs [8].

II.3. Critères de classement des échangeurs

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs. Énumérons les principaux [8].

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

II.3.1. Selon le type de contact

- a. **Échangeurs à contact direct** : Le type le plus simple comprend un récipient ou canalisation dans lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent la même température finale.
- b. **Échangeurs à contact indirect** : les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi.

II.3.2. Selon les types d'échange

a. Échangeur sans changement de phase

Les échangeurs de chaleur sans changement de phase correspondent aux échangeurs dans lesquels l'un des fluides se refroidit pour réchauffer le deuxième fluide sans qu'il y ait changement de phase. Les températures des fluides sont donc variables, tout le long de l'échangeur.

b. Échangeur avec changement de phase

Les échanges avec changement de phase sont caractérisés par trois cas différents :

- L'un des fluides se condense alors que l'autre se vaporise : ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques.
- Le fluide secondaire se vaporise en recevant de la chaleur du fluide primaire, lequel ne subit pas de changement d'état. Ils sont appelés évaporateurs.
- Le fluide primaire se condense en cédant sa chaleur latente au fluide secondaire plus froid, lequel ne subit pas de transformation d'état.

II.3.3. Selon la disposition des écoulements

Dans les échangeurs à fluides séparés, les modes de circulation des fluides peuvent se ranger en deux catégories [8] :

- Même sens « co-courant ».
- Sens contraire « contre-courant ».
- Les vecteurs vitesses sont perpendiculaires l'un à l'autre; il s'agit de « courants croisés»

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

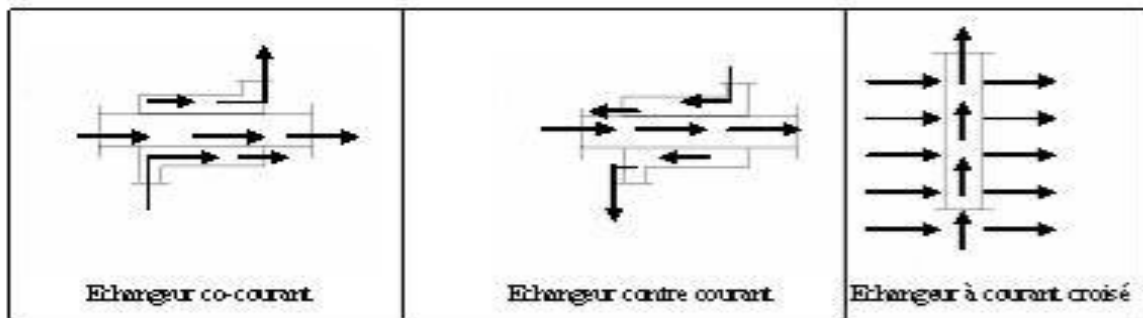


Figure II.1 : Différents modes de circulation [8].

II.3.4. Classement fonctionnel

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 a un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs ;

II.3.5. Selon 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. Un échangeur est considéré comme compact si sa compacité est supérieure à $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$; cette valeur est susceptible de varier de 500 à $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

II.3.6. Selon la nature du matériau de la paroi d'échange

On citera 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.

II.3.7. Selon leurs technologies

Les types d'échangeurs rencontrés sont les suivants [9] :

- À tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires ;
- À plaques : à surface primaire ou à surface secondaire ;

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

a. Échangeurs tubulaires

Comme leur nom l'indique, les échangeurs tubulaires sont constitués de tubes dont la paroi forme la surface d'échange. Ils comportent soit un tube unique en serpentin placé à l'intérieur d'un réservoir, soit deux tubes concentriques où le fluide chaud (ou le fluide à haute pression) s'écoule dans le tube interne, soit un faisceau de tubes enfermés dans une enveloppe appelée calandre. Ce type d'échangeurs type existe sous quatre formes :

b. Échangeur monotube

C'est un échangeur dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentin comme montré sur la figure II.2 ci-dessous.

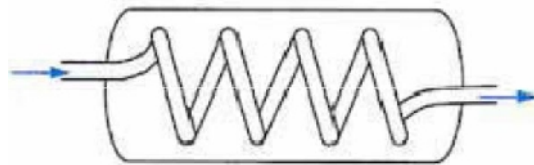


Figure II.2 : Échangeur monotube en serpentin [9].

c. Échangeur coaxial

C'est un échangeur dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur comme montré sur la figure II.3 ci-dessous.

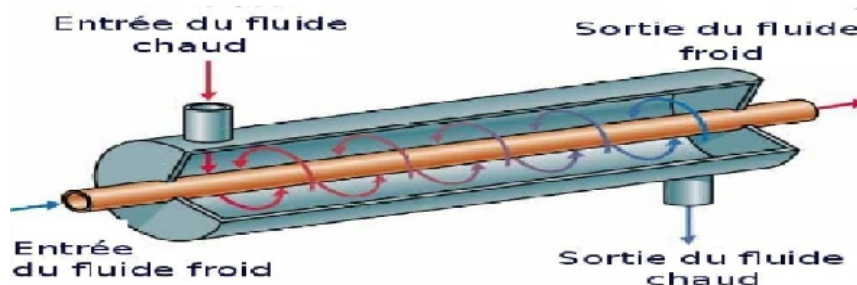


Figure II.3 : Échangeur coaxial [9].

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

d. Echangeur multitubulaire

On peut trouver quatre types :

i. Échangeur à tubes séparés

À l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm) maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé.

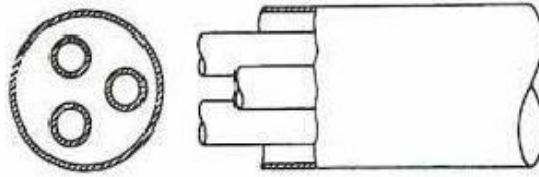


Figure II.4: Échangeur à tubes séparés [9].

ii. Échangeur à tubes rapprochés

Pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans.

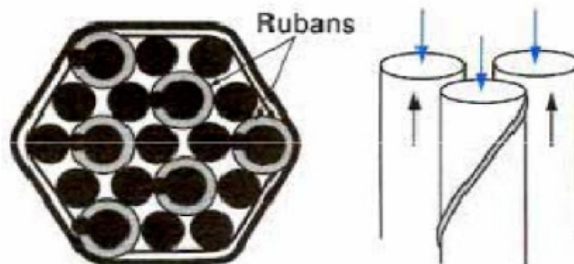


Figure II.5: Échangeur à tubes rapprochés [9].

iii. Echangeur à tubes ailettes

Les ailettes peuvent être disposées de différentes façons :

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

• Ailettes transversales

On ne considère que les ailettes extérieures aux tubes ; elles peuvent être continues ou indépendantes.

✓ 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 [10] :

- Ailettes annulaires, en principe des ailettes pleines
- Ailette hélicoïdale (spiralée), 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.

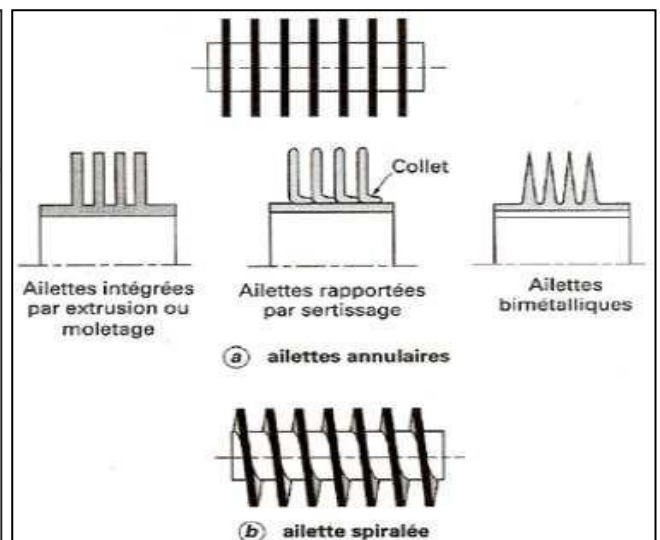
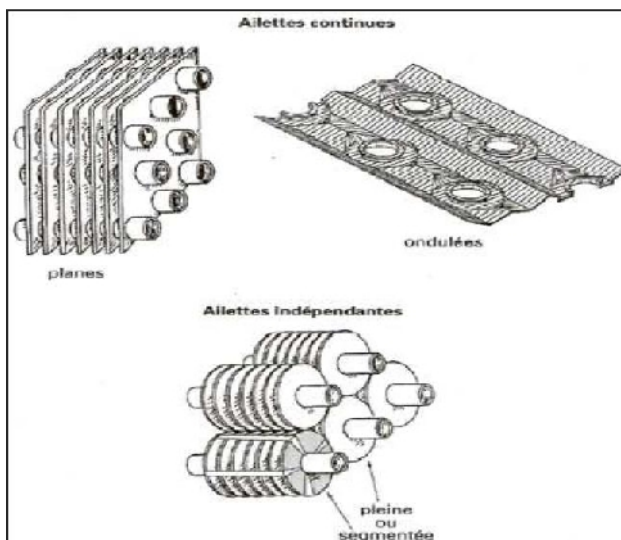


Figure II.6 : Ailettes continues ou indépendantes [10]. **Figure II.7 :** Ailettes annulaires ou Spiralée [10].

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

✓ Ailettes longitudinales

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

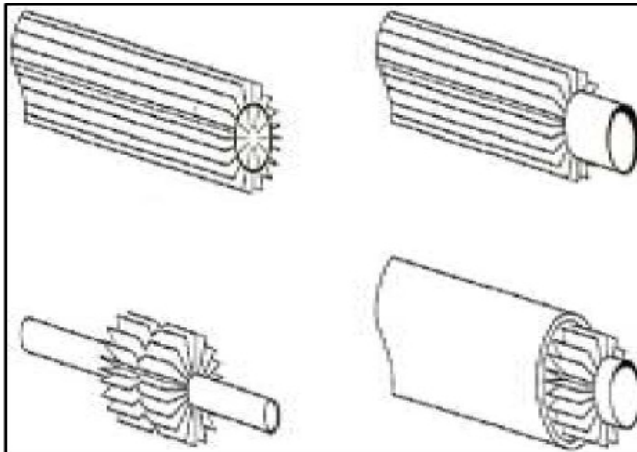


Figure II.8 : Ailettes longitudinales [10]

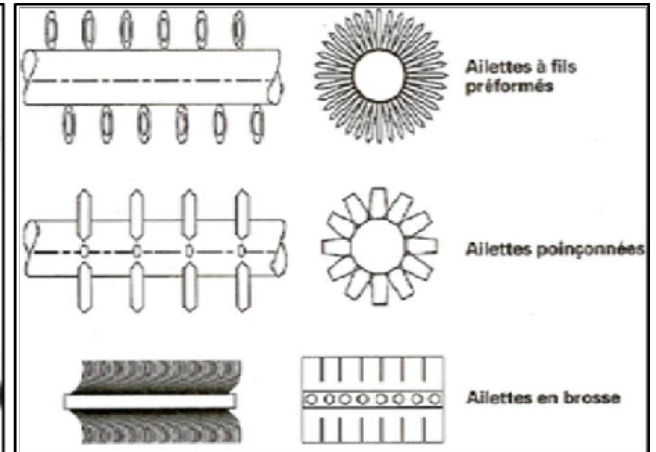


Figure II.9 : Autres types d'ailettes

Transversal [10].

iv. Echangeur à tubes et calandre

En ce qui concerne les échangeurs à faisceau de tubes et calandre, on peut citer parmi les dispositions les plus courantes le faisceau rectiligne et le faisceau en U. Ce dernier est mieux adapté aux forts gradients de température puisqu'il permet une libre dilatation des tubes. L'implantation de chicanes transversales permet d'allonger le trajet du fluide en calandre et d'augmenter le flux de chaleur échangé [10].

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

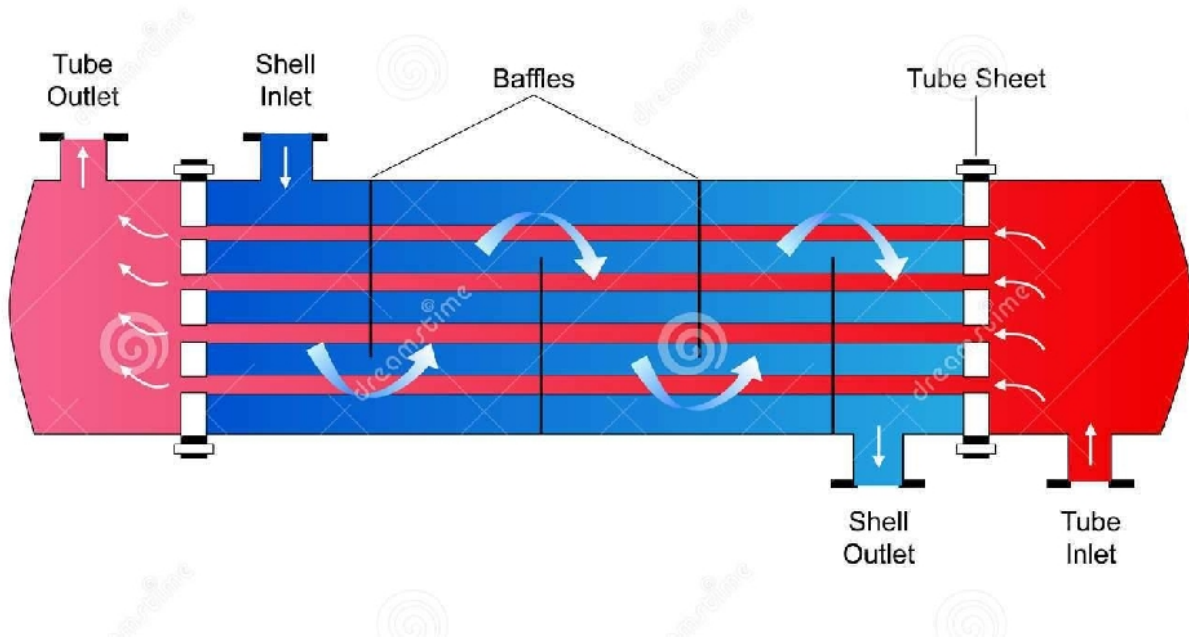


Figure II.10 : Echangeurs à tubes et calandre [10].

e. Echangeurs à plaques

Les échangeurs de cette famille sont constitués par un empilement de plaques garnies de joints d'étanchéité à leur périphérie ; les fluides s'écoulent entre ces plaques.

• Echangeurs à surface primaire

Les échangeurs à surface primaire sont constitués de plaques corruguées, nervurées ou picotées.

Le dessin du profil de plaques peut être assez varié mais il a toujours un double rôle d'intensification du transfert de chaleur et de tenue à la pression par multiplication des points de contact.

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

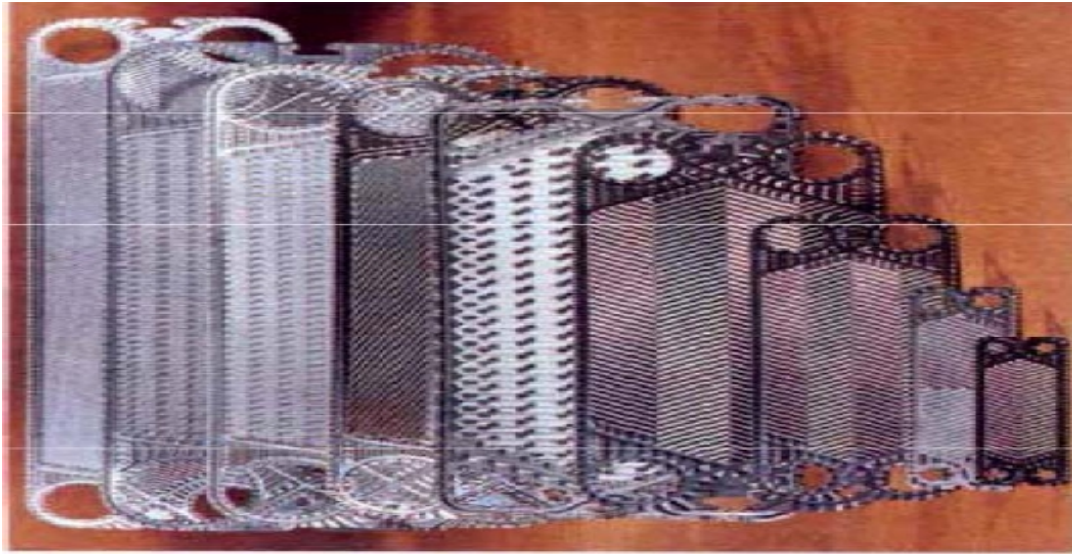


Figure II.11: Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire [10].

- **Échangeurs à surface secondaire**

Ces échangeurs sont réalisés en aluminium ou en acier inoxydable ; ils sont constitués par un empilage de tôles ondulées formant des ailettes séparées par des tôles planes.

II.4. Caractéristiques des échangeurs

Les échangeurs de chaleur sont caractérisés, essentiellement, par [8] :

- 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.

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

- 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).

II.5. Etude complète d'un échangeur

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

a. 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.

b. Etude hydraulique

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

c. Etude mécanique

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

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

d. 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.

II.6. Efficacité d'un échangeur

L'efficacité d'un échangeur, notion similaire à celle d'un rendement, est très utile pour caractériser la qualité d'un échangeur.

Lorsque l'on cherche à transférer de l'énergie d'un fluide vers un autre, l'échangeur idéal est celui qui permet l'échange maximum.

Par exemple, si le fluide chaud pénètre à la température T_{ce} (température entre chaud), l'idéal serait qu'il sorte de l'échangeur à la température d'entrée du fluide froid T_{fe} (température eau froid). L'efficacité d'un échangeur est alors définie par :

$$E = \frac{\text{Puissance thermique réellement échangé}}{\text{Puissance maximale échangeable}} = \frac{\varphi_{réel}}{\varphi_{max}} \quad (\text{II.1})$$

II.7. Modes de transferts de chaleur

II.7.1. Conduction

Ce mode de transfert réside dans la propagation de la chaleur de molécule à molécule dans un ou plusieurs corps contigus, opaques et solides (sans déplacement appréciable des particules de ce corps).

Exemple : propagation de la chaleur à travers une paroi entre l'intérieur de bâtiment chauffé et l'extérieur.

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

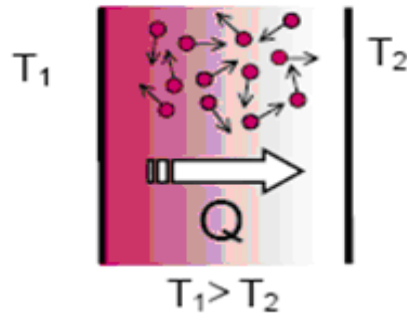


Figure II.12 : la Conduction [12].

La théorie de la conduction repose sur la loi de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température [13] :

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{II.2})$$

Ou sous forme algébrique unidirectionnel :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial X} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

- φ Flux de chaleur transmis par conduction (W)
- λ Conductivité thermique du milieu ($W / m K$)
- X Variable d'espace dans la direction du flux (m)
- S Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

Applications

Le transfert de chaleur par conduction caractérise tous les transferts de chaleur qui s'effectuent dans les parois séparant deux corps à des températures différentes.

C'est le cas des surfaces d'échange des échangeurs de chaleur, mais c'est aussi celui des murs et vitrages d'un bâtiment des cuves contenant des liquides chauds ou froids, des parois des fours...etc.

II.7.2. Convection

La convection caractérise la propagation de la chaleur dans un fluide gazeux ou liquide en mouvement. L'étude de la convection (naturelle ou forcée) est liée à l'écoulement des fluides.

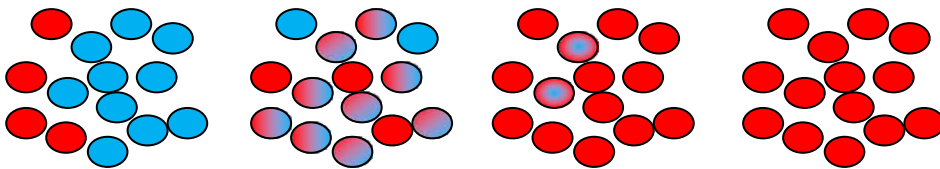


Figure II.13 : La convection [12].

On distingue deux types de convection :

La convection forcée : le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, un ventilateur, ...)

La convection naturelle : le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par les variations de température au sein du fluide. C'est un mode de transfert rapide en général.

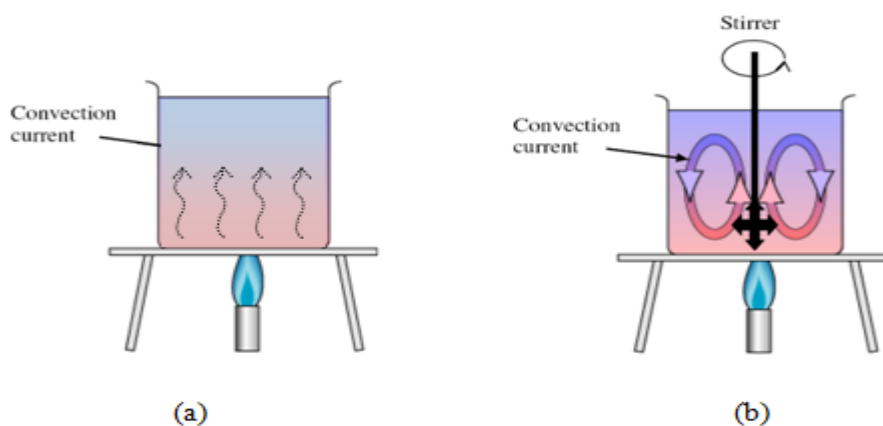


Figure II.14 : Transfert de chaleur par convection (a) naturelle, (b) forcée [12].

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton [13] :

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

Avec :

φ Flux de chaleur transmis par convection (W)

h Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W / (m^2 \cdot K)$)

T_p Température de surface du solide ($^{\circ}C$)

T_∞ Température du fluide loin de la surface du solide ($^{\circ}C$)

S Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2)

Applications

Les applications du transfert de chaleur par convection sont beaucoup plus nombreuses pour que l'on puisse envisager de les citer toutes.

Elles interviennent chaque fois que l'on chauffe ou que l'on refroidit un liquide ou un gaz, qu'il s'agisse de faire bouillir de l'eau dans une casserole, du radiateur de chauffage central, du radiateur associé au moteur d'une voiture ou de l'échangeur dans un procédé, évaporateur ou condenseur.

II.7.3. Rayonnement

Le rayonnement thermique est un phénomène se caractérisant par un échange d'énergie électromagnétique sans que le milieu intermédiaire ne participe nécessairement à cet échange. Par exemple, le rayonnement solaire est capable d'échauffer la terre bien que le milieu traversé soit à une température plus basse que la terre.

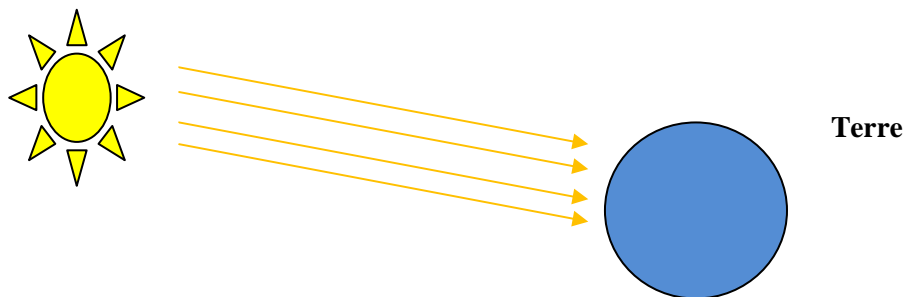


Figure II.15 : Le rayonnement [13].

Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation [13] :

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II.5})$$

Avec :

φ	Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)
σ	Constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8} W / (m^2 \cdot K^4)$)
ε_p	Facteur d'émission de la surface
T_p	Température de la surface (K)
T_∞	Température du milieu environnant la surface (K)
S	Aire de la surface (m^2)

Applications

Le rayonnement est appliqué dans de très nombreux procédés industriels. Son action sur la matière est essentiellement thermique est ces quelques applications sont :

- Le séchage (papier, carton, textile, etc.) ;
- La cuisson (teintures, apprêts, enductions...)
- Le chauffage (traitements thermiques, soudage, chauffage de postes de travail...)

II.8. Grandeurs thermiques

a. La température

C'est une grandeur physique liée à la notion immédiate de chaud et de froid.

Deux corps en contact ont tendance à égaliser leurs températures, par échange de chaleur (équilibre thermique). Les thermomètres fournissent une mesure de la température en utilisant des phénomènes comme la variation de la pression des gaz, ou la dilatation thermique des corps.

L'unité S.I de température est le Kelvin; le degré de Celsius est couramment utilisé.

La physique statistique montre que la température est la manifestation, à l'échelle macroscopique, des mouvements des atomes et molécules. Elle est directement liée à l'énergie cinétique moyenne des constituants microscopiques de la matière.

En thermodynamique, la température est considérée comme une variable d'état intensive. Sa valeur détermine, avec celle de la pression, l'état des corps purs [11].

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

b. Champ de température

En tout point de l'espace ou se trouve de la matière, on définit une fonction scalaire température $T(x, y, z, t)$, fonction des coordonnées du point ainsi que du temps. L'ensemble des valeurs instantanées de la température dans tout l'espace est appelé champ de température.

c. Régime d'écoulement

Nous distinguons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou instationnaire.

d. La chaleur

La chaleur dans le sens commun a longtemps été confondue avec la notion de température, car à pression constante, c'est une fonction croissante de la température : par exemple tous les corps purs dans l'état solide, liquide ou gazeux ont une capacité calorifique molaire à pression constante $C_P(T)$, positive. Dans ces conditions, comme à l'air libre, la pression est quasi constante ($P \approx 1,01325 \cdot 10^5$ pascals), chauffer un corps engendre une élévation de sa température. Mais cela n'est pas toujours vrai notamment lors d'un changement d'état physique : quand on chauffe de la glace, elle fond à 0°C sous la pression d'une atmosphère, à température constante. Il y a dans ce cas, apport de chaleur sans élévation de température. Mais la thermodynamique donne un sens à la notion de chaleur [11].

e. Flux de chaleur

Le flux de chaleur est une transmission de chaleur (ou énergie thermique) à travers un corps. Le flux de chaleur s'exprime en W/m^2 .

Dans un solide, le flux de chaleur est décrit par l'équation de Fourier. On appelle flux de chaleur traversant une surface donnée, la quantité de chaleur qui s'écoule, pendant l'unité de temps. La chaleur se déplace du corps le plus chaud vers le plus froid jusqu'à ce que la température se stabilise. Tous les corps (solide, liquide ou gazeux) subissent ce phénomène

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

d'échange de chaleur. L'utilisation de matériaux isolants ou d'un matériau conducteur permet d'intervenir sur l'intensité de la chaleur transmise. Le premier ralentit le passage de la chaleur, le deuxième le facilite. La chaleur se transmet par conduction, rayonnement et convection. Ces modes d'échange sont bien souvent "cumulés".

f. Propriétés thermo physiques des matériaux

Les échanges thermiques par conduction sont caractérisés essentiellement par trois propriétés thermo physiques des matériaux qui sont liées entre elles :

- La conductivité thermique caractérise l'aptitude du matériau à transmettre la chaleur.
- La diffusivité thermique caractérise la vitesse de propagation de la chaleur dans le matériau.
- La capacité thermique massique caractérise l'aptitude du matériau à emmagasiner de la chaleur.

g. La chaleur sensible

Lorsqu'un corps reçoit ou cède de la chaleur s'échauffe ou se refroidit sans changer d'état, on parle de chaleur sensible. La variation de température T que va subir un corps de masse m est reliée à la quantité de chaleur Q par le coefficient de proportionnalité C_p (chaleur spécifique, ou capacité calorifique) [11].

h. Chaleur spécifique

Par définition, la chaleur spécifique C_p correspond à la quantité de chaleur qu'il faut fournir à un matériau de masse d'1 kilogramme pour que sa température s'élève d'un degré. La quantité de chaleur échangée entre deux corps respectivement aux températures T_1 et T_2 ($T_1 > T_2$) s'exprime par :

$$C_p = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

C_p	La chaleur spécifique	(J/kg.K)
m	La masse en kilogramme	(kg)
T	La température en kelvin	(K)
Q	Quantité de chaleur	(J)

Chapitre II Généralités sur les échangeurs de chaleur et les Modes de transfert thermique

i. Chaleur latente

On parle de chaleur latente lorsque un corps qui reçoit ou cède de la chaleur l'utilise pour changer d'état, sans que sa température ne varie.

C'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à un matériau de masse m donnée pour que, à température constante, celui-ci change d'état [11].

j. Conductivité thermique

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors de la conduction. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous l'effet d'un gradient de température.

La conductivité thermique est exprimée en watts par mètre, ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) où :

Le Watt est l'unité de puissance

Le mètre est l'unité de longueur

Le Kelvin est l'unité de température

La conductivité dépend principalement de : la nature du matériau et de la température.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mettre en évidence les différents échangeurs de chaleur et les modes de transferts thermiques. Le prochain chapitre sera consacré aux généralités sur les matériaux à changement de phase.

Chapitre III

Généralités sur les matériaux à changement de phase

III.1. Introduction

Les Matériaux à Changement de Phase MCP (PCM Phase Change Matériel) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. La chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide (et vice versa).

Les MCP reposent sur l'application d'un principe physique simple. Au-delà d'une certaine température caractéristique de chaque matériau, ils se liquéfient en absorbant la chaleur de l'atmosphère ambiante et les restituent lorsque la température baisse.

III.2. Principe du changement de phase

Tout matériau, solide ou liquide (ou gazeux) possède une capacité à stocker ou à céder de l'énergie sous forme de chaleur. On distingue deux types de transfert de chaleur (ou transfert thermique) [14] :

- **Transfert thermique par chaleur sensible**
- **Transfert thermique par chaleur latente**

III.2.1. 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 chaleur sensible échangée par un matériau est la chaleur massique, notée C_p et exprimée en $J/(kg.K)$.

Exemple : si on prend le C_p de l'eau qui est égale à $4186 J/kg.K$, cela signifie que pour élever $1kg$ d'eau de $1\text{ }^\circ C$, il faut utiliser une quantité de chaleur de $4186 J (kg.K)$. La quantité d'énergie stockée dans une masse m de matériau lorsque sa température évolue de la température T_1 à T_2 , à pression constante, peut être exprimée par la relation :

$$E_{sensible} = \Delta H = H_{final} - H_{initial} = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot C_p(T) dT \quad (III.1)$$

Si la capacité calorifique est indépendante de la température, la chaleur spécifique est constante dans l'intervalle de températures entre T_1 et T_2 . Cette relation devient :

$$E_{sensible} = \Delta H = m \cdot C_p(T_2 - T_1) \quad (III.2)$$

Chapitre III Générales sur les matériaux à changement de phase

Lorsqu'un matériau est chauffé, il accumule d'abord une quantité d'énergie sensible, lui permettant d'atteindre la température de changement de phase. A ce stade, l'énergie apportée au matériau cesse de le chauffer et est utilisée à la place pour accomplir le changement de phase. La chaleur est stockée de façon isotherme (pour un corps pur) sous forme de chaleur latente. Une fois que la transformation est complète, la température augmente de nouveau proportionnellement à l'énergie apportée jusqu'à atteindre la température de la source de chaleur. Il est donc impossible de ne stocker que la chaleur latente puisque pour arriver au point de changement de phase, le matériau doit subir une montée en température, stockant inévitablement une part d'énergie sensible. La quantité d'énergie stockée peut être exprimée pour le cas de la transition solide-liquide selon l'équation **(III-4)** :

$$Q = \int_{T_{initial}}^{T_{fusion}} m C_{p,s} dT + m \Delta h_{S-L} + \int_{T_{initial}}^{T_{final}} m C_{p,L} dT \quad \text{(III.4)}$$

Q	La quantité d'énergie stockée	(J/kg)
m	La masse du matériau	(kg)
$C_{p,s}$	La chaleur spécifique a l'état solide	J/(kg.K)
$C_{p,L}$	La chaleur spécifique a l'état liquide	J/(kg.K)
Δh_{S-L}	L'enthalpie spécifique (solide-liquide)	

Les matériaux utilisés pour le stockage thermique latent sont connus sous le nom de Matériaux à Changement de Phase (MCP). Les MCPs peuvent être employés pour leur transition solide-solide, solide-liquide ou liquide-gaz.

Il est important de noter que les quantités d'énergie mises en jeu dans le processus de changement de phase sont énormément plus importantes que celles qui interviennent lors des transferts sensibles (étant donné qu'on travaille sur des intervalles restreints de températures). C'est grâce à ces transferts latents qu'il est actuellement envisageable de diminuer énormément le volume d'un élément de stockage d'énergie (Compacité), ou encore d'augmenter particulièrement fortement la quantité d'énergie contenue dans un même volume de stockage (Densité Énergétique) [14].

Exemple :**Tableau III.1 :** Caractéristiques physiques du MCP

<i>Nom</i>	Acétate trihydrate de sodium
T_{fusion}	55-58 °C
L_f	242, 85.10 ³ J/kg
$C_{p,\text{solide}}$	3, 31.10 ³ J/ (kg. K) à 30 °C
$C_{p,\text{liquide}}$	3, 06.10 ³ J/ (kg. K) à 70 °C
ρ_{solide}	1392 kg/m ³ à 30 °C
ρ_{liquide}	1279 kg/m ³ à 70 °C

Densité

L'énergie E_{30-70} accumulée par 1 m³ de ce MCP entre 30 °C et 70 °C vaut :

$$E_{MCP} = V_s \cdot \rho_{\text{Solide}} \cdot C_{p,MCP,\text{solide}} \cdot \Delta T + V_s \cdot \rho_{\text{Solide}} \cdot L_f + V_l \cdot \rho_{\text{Liquide}} C_{p,MCP,\text{liquide}} \cdot \Delta T \quad \text{(III.5)}$$

$$E_{MCP} = [1 \cdot 1392 \cdot 3.31 \cdot 10^3 \cdot (55 - 30)] + [1 \cdot 1392 \cdot 242.85 \cdot 10^3] \\ + [1.07 \cdot 1279 \cdot 3.06 \cdot 10^3 \cdot (70 - 58)]$$

$$= 5.00 \cdot 10^8 J = 139 \text{ KWh}$$

E_{MCP}	Chaleur stockée par le matériau à changement de phase	(kWh)
V	Volume du MCP	(m ³)
$C_{p,MCP,\text{Solide}}$	Chaleur spécifique massique du MCP à l'état solide	J/ (kg. K)
ΔT	Différence de température	(K)
ρ_{Solide}	Masse volumique du MCP à l'état solide	(kg/m ³)
ρ_{liquide}	Masse volumique du MCP à l'état liquide	(kg/m ³)
L_f	Chaleur latente de fusion du MCP	(J/Kg)

Chapitre III Générales sur les matériaux à changement de phase

$C_{p,MCP,liquide}$ Chaleur spécifique massique du MCP à l'état liquide $J/(kg \cdot K)$

Sur le même intervalle de température, le même volume d'eau (1 m^3) accumulerait une quantité $E_{eau30-70}$:

$$E_{eau30-70} = V \cdot \rho_{eau} \cdot C_{p,eau,liquide} \cdot \Delta T \quad (\text{III.6})$$

$$E_{eau30-70} = 1 \cdot 1000 \cdot 4186 \cdot (70 - 30)$$

$$= 1.67 \cdot 10^8 J = 46.4 \text{ kWh}$$

ρ_{eau} Masse volumique de l'eau (k/m^3)

$C_{p,eau,liquide}$ Chaleur spécifique massique de l'eau $J/(kg \cdot K)$

Le MCP a par conséquent permis de stocker plus de 3 fois plus d'énergie pour un même volume. Il possède par conséquent une plus grande Densité Énergétique.

Compacité

De la même manière, pour stocker 100 kWh de 55°C à 58°C , nous avons besoin des volumes V_{eau} et V_{MCP} suivants :

$$V_{eau} = \frac{100000 \cdot 3600}{C_{p,eau} \cdot (58 - 55) \cdot \rho_{eau}} \quad (\text{III.7})$$

$$= \frac{100000 \cdot 3600}{4186 \cdot (58 - 55) \cdot 1000} = 28.7 \text{ m}^3$$

$$V_{MCP} = \frac{100000 \cdot 3600}{L_{f,MCP} \cdot \rho_{MCP}} \quad (\text{III.8})$$

$$= \frac{100000 \cdot 3600}{242.85 \cdot 10^3 \cdot 1293} = 1.1 \text{ m}^3$$

Le volume du MCP utilisé pour stocker 100 kWh entre 55°C et 58°C est par conséquent plus de 27 fois plus petit que celui de l'eau. Il possède par conséquent une plus grande Compacité.

III.3. Intérêt du changement de phase

Le caractère isotherme ou quasi isotherme de la charge et de la décharge énergétique d'un MCP permet son utilisation en tant que régulateur de température : en effet, si l'on intègre ce dernier à l'enveloppe (murs extérieurs, plancher, plafond, ...) d'un bâtiment, il devient alors possible de stocker de la chaleur lorsque celle-ci est surabondante (été) ou présente au mauvais moment (dans la journée l'hiver).

En été, l'énergie solaire apportée au cours de la journée est stockée au fur et à mesure par les parois et ce, sans fluctuation excessive de la température à l'intérieur du bâtiment. Il est alors possible d'écrêter de 3 °C à 5 °C les pics de température d'une pièce.

En hiver, on peut de la même manière stocker la chaleur apportée par le soleil dans les MCP incorporés aux parois ; ceux-ci restitueront la chaleur accumulée dans la journée à la fin de la journée et pendant la nuit.

Par ailleurs, tout MCP peut servir de déphaseur thermique : tout apport ou perte énergétique (variation de température, rayonnement solaire...) en provenance du milieu ambiant peut provoquer la fusion ou la cristallisation du matériau à température quasi constante. Dès lors, le milieu situé de l'autre côté du MCP ne ressent pas aussitôt l'effet de cet apport ou de cette perte, mais ne commencera à le ressentir qu'après la fusion ou la cristallisation totale du matériau [17].

III.4. Matériaux à changement de phase

III.4.1. Les caractéristiques idéales d'un MCP

Les caractéristiques idéales d'un MCP sont présentées à titre indicatif et classées en quatre catégories : propriétés thermodynamiques et thermiques, propriétés cinétiques, propriétés chimiques, propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement) [16].

a) Propriétés thermodynamiques et thermiques

- Une température de fusion dans la gamme de températures désirée.
- Une chaleur latente de fusion par unité de masse importante.
- Une haute densité, pour diminuer le volume du stockage.
- Une bonne conductivité thermique, pour améliorer les transferts thermiques et diminuer les gradients de température requis à la charge et à la décharge.

- Une bonne chaleur spécifique, pour bénéficier des effets du stockage en chaleur sensible.
- Une faible variation de volume pendant le changement de phase, pour pouvoir utiliser des géométries simples de capsules et d'échangeurs.

b) Les propriétés cinétiques

- Le matériau ne doit pas présenter de surfusion pour que la chaleur stockée puisse être restituée à la même température que la température de stockage. La surfusion est la capacité du MCP à descendre sous le point de cristallisation tout en restant sous forme liquide. Il s'agit d'un état métastable qui est rompu soit par une perturbation extérieure (choc, impureté), soit par abaissement de la température jusqu'au point de nucléation, c'est-à-dire lorsque le premier germe de solide apparaît. Ainsi, si cette surfusion est assez importante, la chaleur est restituée à une température plus faible que la température de stockage. Il est remarqué dans la littérature qu'un degré de surfusion de 5-10 °C peut aller jusqu'à empêcher la décharge du système de stockage.
- Par ailleurs, la vitesse de cristallisation est déterminante pour la puissance du système de stockage. Si le produit est long à cristalliser, il rendra sa chaleur très lentement et limitera la puissance échangée avec le fluide caloporteur.

c) Les propriétés chimiques

- Vis à vis de la température : Pas de décomposition chimique dans la gamme de température de fonctionnement du stockage. Une fusion congruente, pour que la composition chimique du MCP ne change pas au cours du temps.
- Vis à vis du milieu environnant : Pas de corrosion avec les matériaux de construction, pas de risque d'inflammabilité ni d'explosion en contact avec l'atmosphère.

d) Propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement)

- Le MCP doit être disponible en grandes quantités.
- Être bon marché.
- Être non toxique pour les êtres vivants.
- Être recyclable en fin de vie.

III.5. Classification des MCPs

En 1983, Abhat [25] a donné une classification générale des matériaux, utilisée depuis par la communauté scientifique du stockage latent. Cette classification est illustrée sur la Figure III.2 [15] :

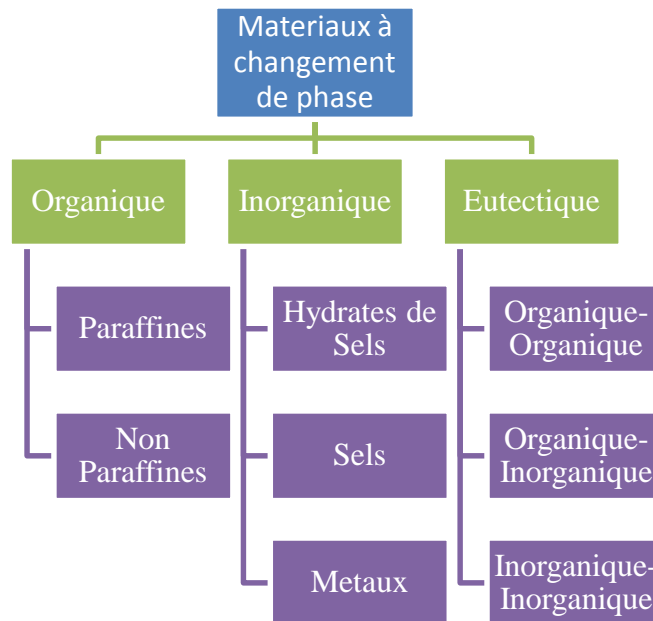


Figure III-2 : Classification des MCP [15].

On peut classer les MCPs selon trois catégories :

- Les composés organiques : paraffines, corps non-paraffiniques.
- Les composés inorganiques: hydrates de sels, sels et métaux.
- Les eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques.

III.5.1. Les composés organiques

III.5.1.1 Paraffines

Les paraffines sont une famille d'hydrocarbures saturés de formule brute C_nH_{2n+2} , aux propriétés très similaires. Parmi les MCPs solide-liquide, elles sont les plus utilisées, surtout pour les applications à basse température (de -10 à 100 °C) car elles offrent l'avantage d'avoir une chaleur latente qui dépend de la masse molaire et des températures de changement de phase variables, donnant de la flexibilité pour choisir le MCP approprié à chaque application.

Chapitre III Générales sur les matériaux à changement de phase

Dans cette catégorie, on peut citer notamment les paraffines n-Hexadecane ($T_{\text{fusion}} = 22 \text{ °C}$), n-Nonacosane ($T_{\text{fusion}} = 63,4 \text{ °C}$) ou encore le n-Triacontane ($T_{\text{fusion}} = 65,4 \text{ °C}$) [18].

a) Avantages

- Plus la longueur moyenne de la chaîne hydrocarbonée est élevée, plus la température de fusion et la chaleur latente sont élevées.
- Les paraffines ne montrent pas de tendance à la ségrégation des phases lors de leur transition et sont chimiquement stables.
- Elles ont une faible pression de vapeur saturante qui limite les risques de vaporisation.
- Certaines sont considérées comme non toxiques, inoffensives écologiquement et compatibles avec les réservoirs métalliques car elles ne provoquent pas ou peu de corrosion.
- Facilement disponibles et peu coûteuses.

b) Inconvénients

- Leur conductivité thermique reste très faible ($\approx 0,25 \text{ W/m.K}$).
- Elles présentent une expansion volumique assez élevée ($\approx 15 \%$).
- Une densité peu importante. ($\approx 800 \text{ kg/m}^3$).

Les paraffines ont tendance à s'infiltrer dans certains plastiques et à les ramollir.

III.5.1.2. Acides gras

Les acides gras sont caractérisés par la formule chimique $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ et ont à peu près les mêmes propriétés thermo-physiques que les paraffines. L'intérêt d'utiliser les acides gras comme MCP est de couvrir une gamme de température allant de 40 à 150 °C selon la longueur de la chaîne carbonée. Les acides gras les plus connus pour leur utilisation comme MCP sont l'acide stéarique ($T_{\text{fusion}} = 57,5 \text{ °C}$), l'acide sébacique ($T_{\text{fusion}} = 132 \text{ °C}$), l'acide palmitique ($T_{\text{fusion}} = 61-63 \text{ °C}$) et l'acide myristique ($T_{\text{fusion}} = 51,5-53,6 \text{ °C}$) [19].

a) Avantages

Les acides gras présentent une chaleur latente de fusion du même ordre que celle des paraffines, voire légèrement en-dessous et un comportement similaire lors de la transition de phase, avec pas ou très peu de surfusion et une variation de volume du même ordre de grandeur. Par ailleurs, plus le nombre d'atomes de carbone dans leur chaîne carbonée est

Chapitre III Générales sur les matériaux à changement de phase

élevé, plus la température de fusion, la chaleur latente ainsi que le degré de cristallisation sont grands. La possibilité d'obtenir des mélanges eutectiques d'acides gras a permis d'élargir la plage de température des matériaux et ainsi la plage des applications. Les acides gras sont facilement produits à partir d'huiles végétales et animales. Ainsi, ils donnent l'assurance d'un approvisionnement bio-sourcé.

b) Inconvénients

Quelques auteurs constatent un problème de stabilité des acides gras au-dessus du point de fusion. Cette dégradation peut être cependant due à la vaporisation du produit lorsqu'il est sous forme liquide et non à une réelle dégradation du produit.

III.5.1.3. Alcools de sucre

Les alcools de sucre sont des composés organiques appartenant à la famille des polyols. Les plus connus sont le sorbitol, le mannitol, le xylitol, le lactitol, le malitiol et l'érythritol. Ces produits sont extraits des plantes et peuvent être qualifiés de bio-sourcés. Par exemple, le mannitol provient des algues alors que le sorbitol est extrait du sirop de maïs [20].

a) Avantages

- Les alcools de sucre possèdent des valeurs d'enthalpie de phase élevées.
- Ils présentent une grande masse volumique de l'ordre de 1500 kg/m^3 , ce qui conduit à une densité énergétique très élevée.
- Des produits peu coûteux et non toxiques.

b) Inconvénients

- Les alcools de sucre présentent une surfusion.
- Certains alcools de sucre présentent des problèmes de compatibilité avec l'air ambiant car ils réagissent avec l'oxygène.

III.5.2. Les composées inorganiques

Les matériaux inorganiques sont classés en trois catégories : les sels, les hydrates de sels et les métaux [21].

III.5.2.1. Hydrates de sels :

Chapitre III Générales sur les matériaux à changement de phase

Les hydrates de sels peuvent être considérés comme des alliages de sels minéraux et d'eau formant un solide cristallin typique de formule générale $AB \cdot nH_2O$.

Le sel hydraté le plus utilisé par son faible coût est le $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ ($T_{\text{fusion}} = 28-30 \text{ }^\circ\text{C}$). On peut citer aussi le $Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ pour les applications de climatisation.

a) avantages

- Les hydrates de sels sont appropriés pour leur utilisation dans le stockage thermique parce qu'ils présentent une grande chaleur latente ($\approx 100-300 \text{ kJ/kg}$).
- Une température de fusion adaptée aux applications à basse température ($\approx 8-100 \text{ }^\circ\text{C}$) et sont largement compétitifs en termes de coût et de rentabilité.
- Ils présentent une conductivité thermique plus élevée que les paraffines (environ $0,5 \text{ W/m.K}$).

b) Inconvénients

Le principal problème qui se pose lors de l'utilisation des hydrates de sels est leur fusion non congruente, ce qui veut dire que le sel n'est pas totalement soluble dans l'eau d'hydratation au niveau du point de fusion. Ainsi, au moment de la fusion, il peut se former une solution aqueuse saturée en sel et le surplus de solide peut se déposer au fond du container par sa différence de masse volumique, ce qui empêche la solidification. Un autre inconvénient des hydrates de sel est la surfusion.

Certains hydrates de sels peuvent montrer des problèmes de corrosion des structures métalliques des systèmes de stockage.

III.5.2.2. Les sels

Les sels sont des composés ioniques neutres formés à partir de cations et d'anions. Les sels purs et les mélanges de sels non eutectiques présentent généralement un large spectre de températures de fusion et une chaleur latente variant selon leur type.

Les sels les plus connus sont les nitrates comme le $NaNO_3$ ($T_{\text{fusion}} = 307 \text{ }^\circ\text{C}$), le KNO_3 ($T_{\text{fusion}} = 333 \text{ }^\circ\text{C}$) ou encore le $LiNO_3$ ($T_{\text{fusion}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$) [21].

a) Avantages

Chapitre III Générales sur les matériaux à changement de phase

- Ces matériaux sont très intéressants pour leur utilisation dans le stockage thermique à haute température, car ils possèdent une température de fusion entre 250 et 1680 °C
- Des chaleurs latentes de fusion entre 68 et 1040 kJ/kg.
- Ils présentent une expansion volumique beaucoup plus faible que les composés organiques (de l'ordre de 7 %)
- Leur coût relativement faible devant les composés organiques.

a) Inconvénients

Certains sels peuvent aussi présenter un peu de surfusion. Un autre point non négligeable est leur aptitude à corroder les métaux, ce qui rend la conception des réservoirs de stockage plus compliquée. Par ailleurs, les sels peuvent être des oxydants puissants et sont donc incompatibles avec les huiles thermiques, dont l'utilisation comme fluide caloporteur sera à proscrire. Enfin, quelques sels présentent des problèmes de stabilité thermique, leurs propriétés pouvant s'altérer avec le temps.

III.5.2.3. Métaux

Quelques auteurs se sont attardés sur l'utilisation de métaux en tant que MCP, notamment J. P. Kotzé *et al.* Ou encore H. Ge *et al.*. On peut citer notamment le Potassium ($T_{\text{fusion}} = 63.2$ °C), le Bi₅₈Sn₄₂ ($T_{\text{fusion}} = 138$ °C) ou encore le Lithium ($T_{\text{fusion}} = 186$ °C) [21].

a) Avantages

Les avantages que présentent les métaux sont leur conductivité thermique bien plus grande que les autres types de MCP, leur chaleur latente très élevée mais également leur stabilité à long terme. Toutes ces caractéristiques permettent un stockage rapide de la chaleur avec une faible expansion volumique.

b) Inconvénients

Leur utilisation est encore à un stade de recherche et ils ne sont pas encore sérieusement envisagés pour une application industrielle en raison de la contrainte de masse. De plus, ils présentent aussi des problèmes de corrosion. Les quelques MCP envisagés sont le gallium ou encore le plomb-bismuth.

III.5.3. Eutectiques

Les MCP eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs substances qui se comportent comme un corps pur, c'est-à-dire que leur température de changement d'état est unique. En général, les eutectiques sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques.

On peut citer les eutectiques de nitrates tel que $\text{LiNO}_3\text{-NH}_4\text{NO}_3\text{-NaNO}_3$ avec une composition massique de 25%-65%-10% ($T_{\text{fusion}} = 80.5 \text{ }^\circ\text{C}$) ou encore les eutectiques d'organiques tel que $\text{CH}_3\text{CONH}_2\text{-C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ avec une composition massique de 50%-50% ($T_{\text{fusion}} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$), les eutectiques d'hydrates de sels comme le mélange isomassique $\text{Mg}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}\text{-MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($T_{\text{fusion}} = 59.1 \text{ }^\circ\text{C}$) et enfin les eutectiques de polyols comme le mélange à 25 % molaire d'érythritol et 75% de xylitol, ($T_{\text{fusion}} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$)[25].

a) Avantages

- Leur changement de phase se fait sur une plage de température restreinte comparable à celle des corps purs.
- Leur chaleur latente est supérieure à celle des composés purs.
- Ils ne présentent pas de ségrégation de phase contrairement aux hydrates de sels.

b) Inconvénients

L'inconvénient majeur de ce type de mélange est de réussir à déterminer le point eutectique exact afin d'avoir une température de fusion unique, comme pour un corps pur.

III.6. Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage

III.6.1. La surfusion

Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de fusion. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés au dessous de la température de changement d'état. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande et les échanges de chaleur avec l'extérieur faibles le déclenchement de la solidification provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement d'état. Ce phénomène réduit l'efficacité thermique des unités de stockage par chaleur latente par rapport à ceux par chaleur sensible. En effet, la décharge de la chaleur (pendant la

solidification) a lieu à des températures inférieures de celles où le stockage de cette chaleur a eu lieu. On a donc une différence entre la chaleur absorbée pendant le chauffage et celle restituée pendant le refroidissement [24].

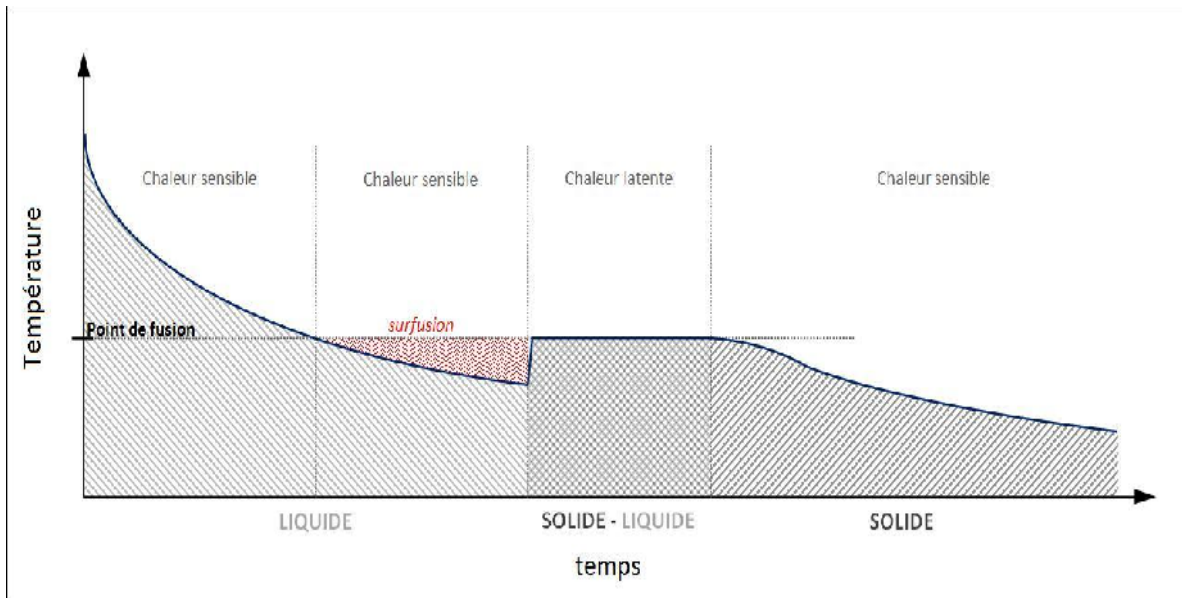


Figure III.3 : Surfusion lors du refroidissement d'un MCP [25].

III.6.2. La surchauffe

La surchauffe d'un corps est le réchauffement de ce corps après son changement d'état (réchauffement de la phase liquide après la fusion du corps, de la phase vapeur après la vaporisation du corps). Si cette surchauffe s'effectue pendant une courte durée, elle n'est considérée que comme une chaleur sensible supplémentaire stockée dans le système.

Si elle s'effectue pendant une longue durée, le stockage par chaleur latente perd l'essentiel de ses avantages par rapport au stockage par chaleur sensible [24]

III.6.3. La dilatation

Pendant le changement de phase solide- liquide, le matériau change de densité et donc de volume. Ceci peut poser problème dans quelques applications en particulier quand on utilise un conteneur fermé qui doit supporter l'augmentation de pression.

III.7. Quelques pistes pour l'amélioration du transfert thermique dans un système de stockage latent

Chapitre III Générales sur les matériaux à changement de phase

L'utilisation des MCP en tant que matériaux de stockage et plus particulièrement de la transition solide-liquide présente l'inconvénient d'une faible conductivité thermique. Lors du processus de décharge, l'énergie libérée par la solidification du MCP doit être transportée de l'interface solide-liquide à travers la couche de solide naissante autour de la surface de transfert vers le fluide caloporteur. De cette façon, le coefficient de transfert global est limité par la conductivité thermique du MCP solide à la décharge qui est souvent le processus dimensionnant dans de nombreuses applications. Ils ainsi possible [23] :

- D'agir sur le MCP pour améliorer sa conductivité thermique ou encore le coefficient d'échange global dans le réservoir.
- De mettre en mouvement le MCP grâce à des technologies innovantes afin de provoquer la convection forcée du MCP autour d'une surface de transfert et ainsi d'améliorer le coefficient d'échange global.
- D'intégrer le MCP dans un échangeur de chaleur ou dans des capsules et d'améliorer le transfert thermique en augmentant la surface d'échange.

Dans la figure ci-dessous on peut voir les pistes envisagées à ce jour pour améliorer le transfert thermique dans un system de stockage par chaleur latente :

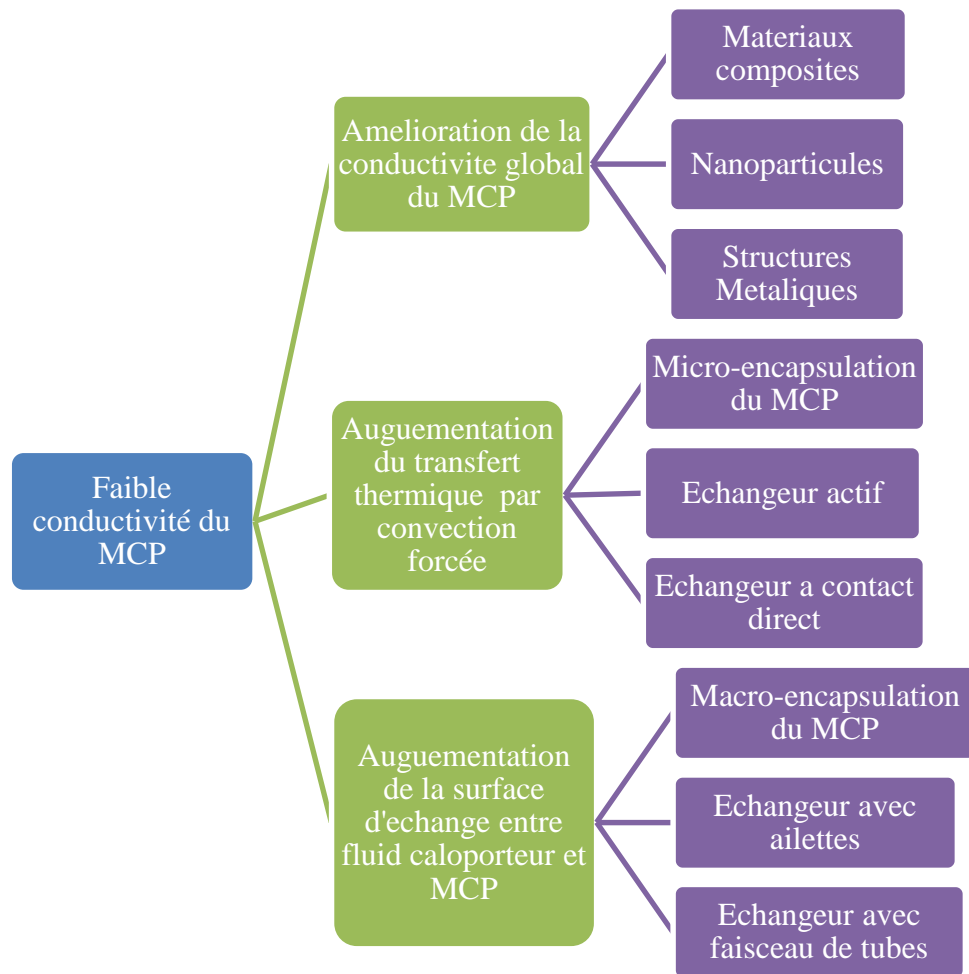


Figure III-4 : Pistes d'amélioration du transfert thermique dans les systèmes de stockage par chaleur latente [23].

III.7.1. Amélioration de la conductivité globale du MCP

III.7.1.2. Les structures métalliques

a) Matrices métalliques

Parmi toutes les matrices métalliques testées expérimentalement dans des unités de stockage latent, les anneaux de Lessing en métal sont les plus efficaces puisque la conductivité thermique de l'ensemble anneaux-paraffine (2 W/m.K) est dix fois plus supérieure à la conductivité thermique de la paraffine seule ($0,2 \text{ W/m.K}$). Cette structure est visible sur la Figure III.5 :

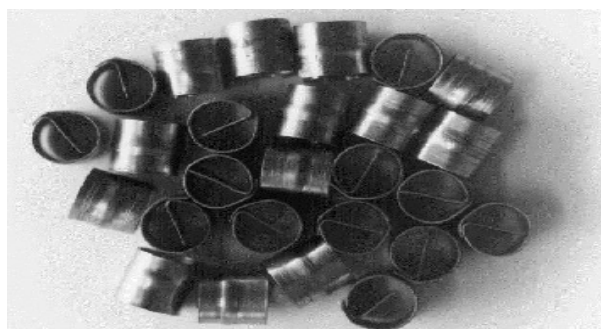


Figure III-5 : Anneaux de Lessing [23].

b) Mousse métallique

Une autre des techniques développées consiste à réunir une mousse ou une structure de métal ayant une porosité de l'ordre de 90 % avec un MCP par compression ou imprégnation. Plusieurs auteurs ont déjà appliqué cette technique principalement avec du cuivre. Un exemple de mousse de cuivre est présenté sur la Figure III.6 :



Figure III.6 : Mousse de cuivre à imprégner de MCP [23].

c) Les nano-particules

Cette méthode consiste à disperser des particules de graphite et créer ainsi un matériau composite plus conducteur. L'amélioration de la conductivité thermique du MCP composite est fonction de la quantité de matériau conducteur inséré dans le MCP [23].

III.7.2. Augmentation du transfert thermique par convection forcée

a) Echangeur actif

Un échangeur actif, par opposition à un échangeur passif, est constitué de pièces mobiles qui mettent en mouvement le MCP. Ainsi, le stockage thermique par changement de phase d'un matériau est dit « actif » dès lors que le dit MCP est en mouvement forcé [24].

b) Echangeur à contact direct

Chapitre III Générales sur les matériaux à changement de phase

Les échangeurs à contact direct utilisent un MCP et un fluide caloporteur immiscibles lors d'une fusion et permettent ainsi de supprimer la paroi d'échange ou l'étape de fabrication d'un coulis. Ils constituent une technique attractive grâce aux avantages suivants [24] :

- La chaleur peut être échangée plus rapidement que dans un échangeur à contact indirect puisque les surfaces de transfert sont augmentées et la résistance thermique peut être négligée en l'absence de paroi de transfert.
- La structure d'un tel échangeur est simple puisqu'il suffit d'avoir un réservoir rempli de MCP avec une entrée et une sortie pour le fluide caloporteur et éventuellement un séparateur de phase à la sortie.
- La simplicité de la structure résulte en une grande capacité de stockage.
- Ce système peut être utilisé en tant que stockage fixe dans une installation mais peut également servir de moyen de transport pour approcher les réservoirs de stockage de l'endroit où la chaleur sera utilisée.

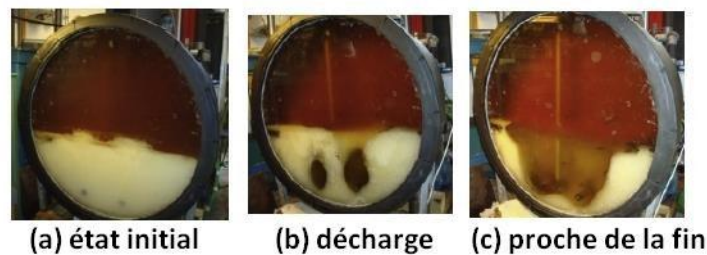


Figure III.7 : Charge d'un système de stockage par échange direct entre de l'érythritol et de l'huile (Wang et al) [24].

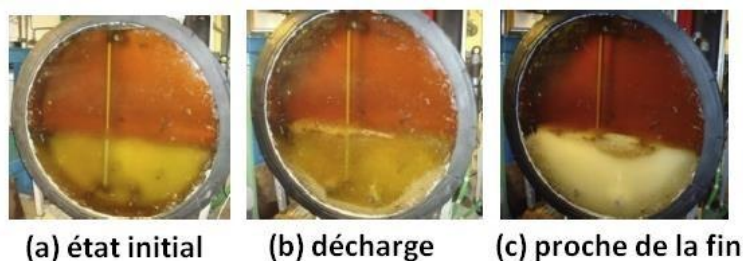


Figure III.8 : Décharge d'un système de stockage par échange direct entre de l'érythritol et de l'huile (Wang et al) [24].

c) Micro-encapsulation

Comme son nom l'indique, la micro-encapsulation consiste à piéger du MCP dans des microcapsules et utiliser un deuxième fluide pour les transporter. L'enveloppe peut être fabriquée avec une grande gamme de matériaux, tels que les polymères naturels ou synthétiques.

L'avantage des microcapsules est d'augmenter considérablement la surface d'échange. De plus, le MCP est contenu dans de si petits espaces que la couche de solide créée lors de la solidification n'a pas une dimension caractéristique très grande et ne constitue pas une résistance thermique qui empêcherait le bon transfert thermique. Un des autres avantages est que le fluide créé ne fige pas autour des parois d'un échangeur ou d'un container et que cette masse micro-encapsulée peut alors être assimilée à un fluide que l'on peut mettre en mouvement [17].

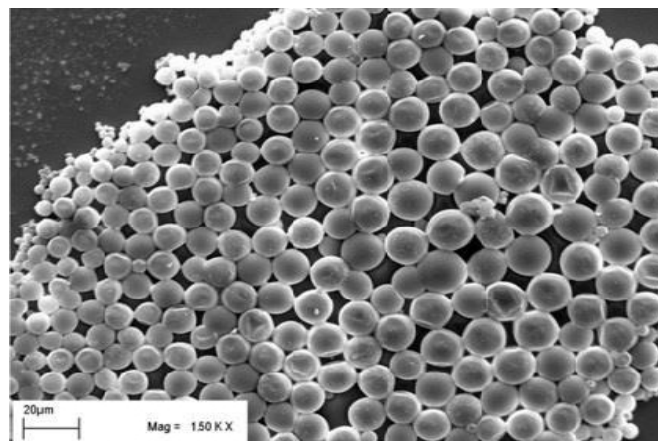


Figure III.9 : Microcapsules de paraffine [17].

III.7.3. Augmentation de la surface d'échange

a) La macro-encapsulation

La macro-encapsulation consiste à piéger une quantité significative de MCP dans des capsules de différentes géométries et de les utiliser dans un échangeur à lit fixe. C'est en faisant circuler le fluide caloporteur dans ce lit fixe que l'échange se fait, comme illustré sur la Figure III-7 [17] :

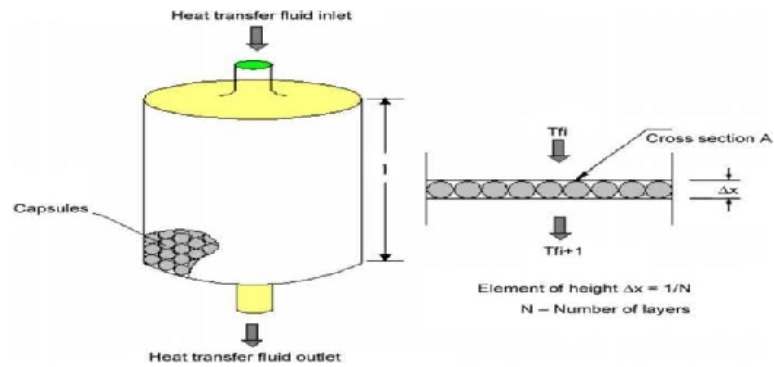


Figure III.10 : Container à lit fixe avec capsules de MCP [17].



Figure III.11: Macro-encapsulation (billes de métal) [17].

b) Faisceau de tubes

Une autre façon simple d'augmenter la surface d'échange est d'utiliser un faisceau de tubes ou plusieurs tubes en U. Cette technique permet de multiplier les passages du fluide caloporteur dans le MCP et ainsi de maximiser l'échange par augmentation de la vitesse, en comparaison avec le même volume et le tube lisse simple.

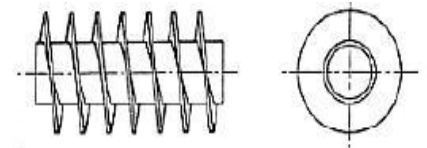


Figure III.12 : Echangeur tubes et calendre baigné dans un MCP (a) simple (b) avec ailettes [25].

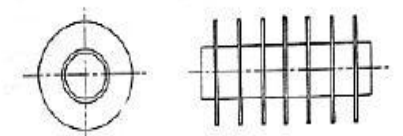
c) Echangeurs avec ailettes

L'amélioration des transferts thermiques par l'ajout d'ailettes se décompose en deux facteurs. Le premier est l'augmentation de la surface d'échange et le second est la diminution de la distance caractéristique de solidification. Les différents types d'ailettes sont représentés ci-dessus [22] :

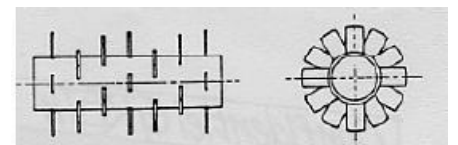
Ailettes hélicoïdales, les plus courantes, appelées ailettes transverses



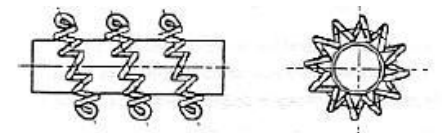
Ailettes annulaires



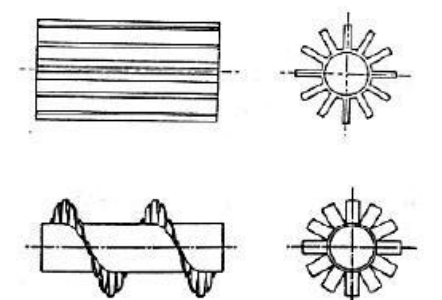
Ailettes à piquant



Ailettes en fil préformé



Ailettes longitudinales



Ailettes hélicoïdales segmentées

Figure III.13 : Types d'ailettes et schémas associés [22].

III.8. Application des Matériaux à changement de phase

Les principales applications industrielles des matériaux à changement de phase sont les suivantes [25] :

- Isolation des bâtiments.
- Climatisation passive.
- Stockage d'énergie thermique.
- Refroidissement et transport de produits alimentaires ou produits sensibles pharmaceutiques ou médicaux.
- Industrie Textiles.

a) L'isolation des bâtiments

On trouve les matériaux à changement de phase dans le bâtiment principalement sous la forme de plaques ou les MCP sont encapsulés. L'énergie stockée dans les parois n'est pas transmise à l'intérieur de l'édifice. En période de surchauffe, le MCP fond et la chaleur est emmagasinée, lorsque le bâtiment se refroidit, le MCP se solidifie et l'énergie stockée est restituée. Dans une certaine gamme de température, le MCP accroît donc l'inertie thermique du bâtiment.

b) La climatisation passive et le chauffage

Selon une étude du CSTB (les matériaux à changement de phase : une innovation pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments, Daniel Quenard), en intégrant les MCPs dans des parois des bâtiments (cloisons, briques, carreaux de plâtre...), il est alors possible de diminuer la température de 3 à 5 °C, ce qui limite le recours aux systèmes de climatisation coûteux en énergie. Le changement de phase a lieu, selon les matériaux, entre 19 °C et 27 °C, températures correspondantes aux valeurs limites respectivement fixées pour le confort d'hiver et d'été. Un système de ventilation nocturne associé permet de régénérer plus efficacement les MCPs (restitution de calories).

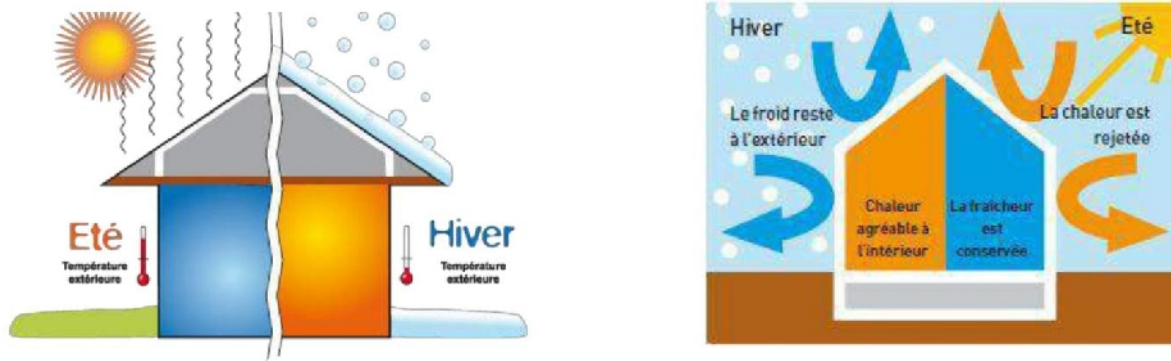


Figure III.14 : Climatisation passive et chauffage (gauche), Isolation du bâtiment (droite) [25].

c) Le stockage de l'énergie thermique

Les MCPs stockent de l'énergie en changeant de phase de solide à liquide (il fond). Puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide à solide (gèle). Le choix du MCP le plus approprié est fondé sur un certain nombre de facteurs, incluant le prix, la chaleur latente et la conductivité thermique tant sur les phases liquides que solides.

Un MCP connu pour cette application est l'acétate de sodium tri-hydraté ayant un point de fusion vers 58 °C. Ce matériau a été mis en œuvre dans des conteneurs déplaçables (par camions) pour stocker la chaleur évacuée d'incinérateur d'ordures ménagères. La restitution de l'énergie se fait alors à distance sur des stations équipées, à une température d'environ 50 °C.

Ces dispositifs sont souvent utilisés en complément d'une installation solaire ou d'un échangeur thermique.



Figure III.15 : Nouvel accumulateur de chaleur solaire développé par le DLR

(© DLR - German Aerospace Center) [25].

d) Le textile

On trouve également des MCPs dans l'industrie textile où ils sont utilisés sous forme de microcapsules placées au cœur des fibres, qui absorbent, stockent et libèrent l'énergie de façon réactive afin de réchauffer lorsqu'il fait froid ou de rafraîchir lorsqu'il fait chaud. Les MCP interviennent pour réguler les transferts de chaleur entre le corps humain et l'extérieur.

Les applications les plus nombreuses dans ce domaine se font actuellement autour :

- Des vêtements de montage et de sport.
- Des textiles techniques à usage médical.
- Des vêtements de travail et de sécurité.

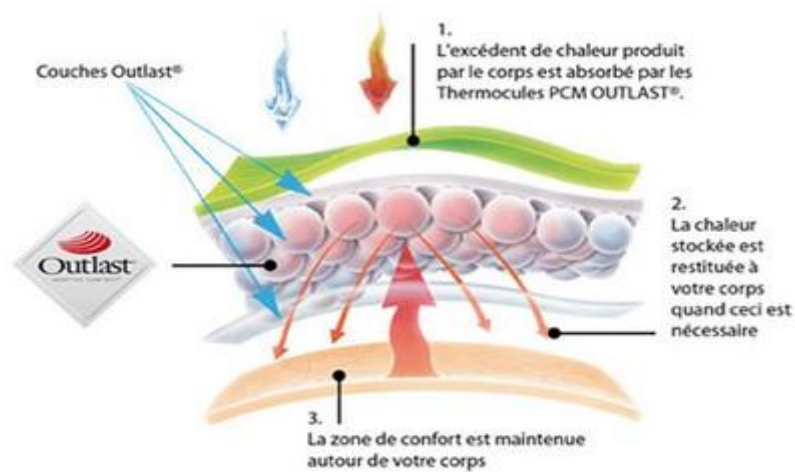


Figure III.16 : MCP dans le textile [25].

e) Le Transport agroalimentaire, pharmaceutique et médicale

Les MCP sont utilisés pour limiter au maximum les variations de températures que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles comme par exemple dans le cas du transport du sang. Ils se présentent la plupart du temps sous la forme de petits sacs plastiques contenant le MCP choisi, qui sont disposés au plus près du produit à conserver.

Les MCP sont également utilisés dans l'industrie de la restauration (exemple plateau repas). Le point de fusion du MCP dépend de la température à laquelle les aliments doivent être maintenus : 60° à 70°C sont les températures optimales que les aliments ne continuent pas à cuire mais soient chauds pour être mangés.



Figure III.17 : Emballage isotherme passif transport de médicament [25].

Chapitre III Générales sur les matériaux à changement de phase

Conclusion :

Ce chapitre a été consacré aux généralités sur les matériaux à changement de phase MCP où on a défini le principe de changement de phase et parlé des propriétés de ces matériaux ainsi que leur classification. Nous avons aussi cité quelques phénomènes ayant un impact sur le changement de phase et quelques pistes envisagées à ce jour pour améliorer le transfert thermique dans un système de stockage latent. Le prochain chapitre sera consacré à la partie expérimentale de notre travail.

Chapitre IV

Matériels et méthodes

IV.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 /silice /graphite 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.

IV.2 Elaboration du MCP

IV.2.1 Matériaux utilisés pour la préparation du composite

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

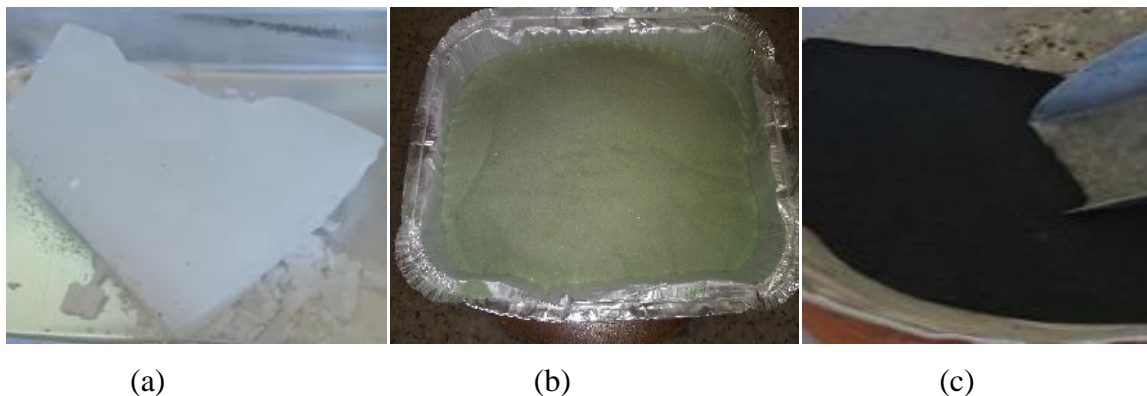


Figure IV.1 : Image des matériaux utilisés pour la préparation du composite

a) 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 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.

b) Silice

La 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 500-600 m^2/g .



Figure IV.2 : Image de la silice

Tableau IV.1 : Propriétés chimiques et physiques

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

- **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.



(a)



(b)

Figure IV.3 : Préparation de la silice en poudre (a) broyeur, (b) tamis

c) 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.

IV.2.2. Le composite MCP/Si/Gr

IV.2.2.1. La pesée des matériaux

Pour la préparation du composite nous commençons par la pesée des différents matériaux utilisés dans le composite-MCP (paraffine, silice, graphite) avec la balance électronique de précision (**Figure IV.4**).



Figure IV.4 : Pesée des différents éléments

La proportion en masse de paraffine a été modifiée, de 95% à 45 % pendant la préparation des composites, de façon à ne pas avoir de fuite du MCP lors du processus de fusion (**Tableau IV.2**).

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

N°	Matrice		MCP		Graphite		Composite
1	Silice (Si)	5%	Paraffine (Pa)	95%	Graphite	0%	Si 5, Pa 95, Gr 0
2		0%		95%		5%	Si0, Pa 95, Gr 5
3		5%		85%		10%	Si 5, Pa 85, Gr 10
4		10%		75%		15%	Si 10, Pa 75, Gr 15
5		15%		70%		15%	Si 15, Pa 70, Gr 15
6		20%		65%		15%	Si 20, Pa 65, Gr 15
7		25%		60%		15%	Si 25, Pa 60, Gr 15
8		30%		55%		15%	Si 30, Pa 55, Gr15
9		35%		50%		15%	Si 35, Pa 50, Gr 15
10		40%		45%		15%	Si 40 Pa 45, Gr15

IV.2.2.2. Fabrication des pastilles de dimension $(40 \times 40 \times 4) \text{ mm}^3$

Les mélanges des différents pourcentages obtenus à la sortie du bain-marie sont versés dans un moule de forme parallélépipédique (**Figure IV.5**).



Figure IV.5 : Le moule utilisé pour la réalisation des pastilles

Après solidification du mélange, 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 IV.6**).

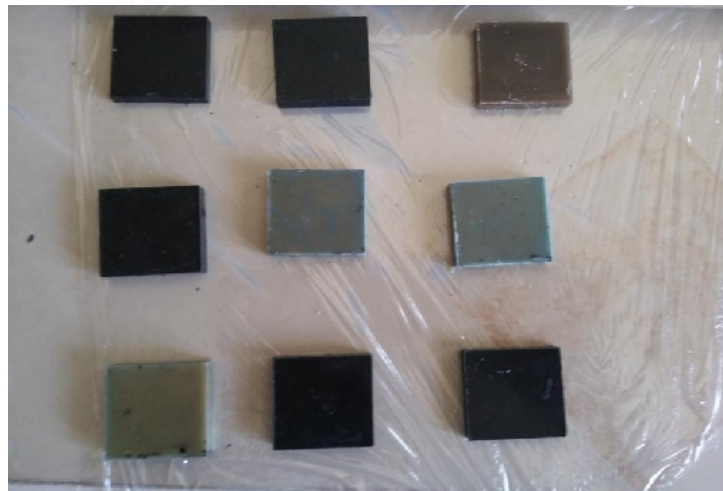


Figure IV.6 : Les pastilles de $(40 \times 40 \times 4) \text{ mm}^3$ réalisées.

IV.2.2.3. La compression des pastilles

Les pastilles obtenues sont en suite mises dans une compression unidirectionnelle 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 IV.7**).



Figure IV.7 : la compression des pastilles.

IV.2.2.4. Préparation de la plaque (300mm× 300mm×10mm) pour la mesure de la conductivité thermique

Un mélange de trois constituants du composite est préparé suivant les pourcentages : 45% paraffine, 40% de silice, 15% de graphite.

Pour obtenir une plaque de dimension (300× 300× 10) mm³, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Préparation du moule en verre (partie inférieur, partie supérieur), à la base du moule, nous avons mis une feuille de papier cuisson, pour éviter qu'elle soit collée sur le verre après le démoulage.
- Le mélange est ensuite mis dans un récipient après la pesée.
- Le mélange est placé dans un bain-marie réglé à 70 °C pour subir une fusion
- Le contenu du récipient est mélangé jusqu'à obtention d'un mélange homogène (fusion totale de la paraffine).
- Après la fusion totale du mélange, son contenu est rapidement versé dans le moule en verre qui a été fabriqué à cet effet (**Figure IV.11**) pour éviter la solidification du composite à l'intérieur du récipient.



Figure IV.8: Emplacement des éléments dans le récipient



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

- Enfin, la partie supérieure du moule est placée sur la partie supérieure de la presse 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 avoir une surface lisse de la plaque.
- Le tout est laissé à l'air libre pour être refroidi et permettre la cristallisation du composite.
- Au démoulage, une plaque homogène et lisse en surface de dimensions $(300 \times 300 \times 10) \text{ mm}^3$ est obtenue (**Figure IV.12**).

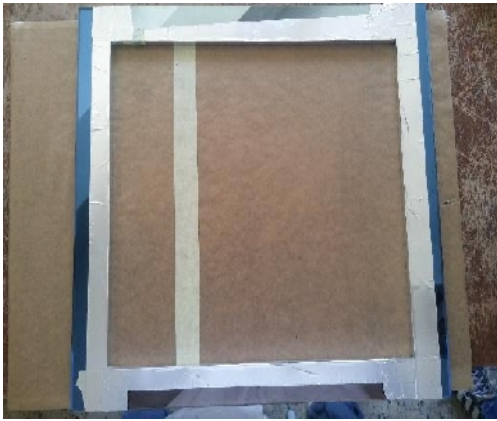


Figure IV.10: Moule de verre



Figure IV.11 : plaque (300× 300× 10mm³)

IV.2.2.5. Calcule de la conductivité thermique de la plaque

Pour la mesure de la conductivité thermique du matériau composite, nous avons utilisé un CT mètre.

•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 IV.12**)

•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 dont 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 IV.12 : 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 est de 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 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 T_1 et T_2 et de la sortie du débitmètre thermique. La température moyenne et la différence de température entre T_1 et T_2 sont calculées.

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

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

Avec :

λ : conductivité thermique

I_s : épaisseur du spécimen en m

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

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

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

T_1 : température de la plaque chaude.

T_2 : température de la plaque froide.

$K_1 = 88.1389$

$K_4 = 0.8037$

$K_2 = -2.7829$

$K_5 = 0.7954$

$K_3 = -21.3064$

$K_6 = -0.0189$

IV.2.2.6 Mesure de la masse volumique par la méthode du pycnomètre

La masse volumique représente la masse d'une substance par unité de volume (kg/m^3).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{IV.2})$$

Le flacon utilisé pour mesurer la masse volumique s'appelle un pycnomètre. Il est constitué d'un petit ballon (d'environ 50 cm^3) sur lequel vient s'adapter un bouchon rodé creux surmonté d'un tube capillaire et d'une ampoule de garde.

IV.2.2.6.1 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 IV.13**)

- 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 pour lequel on veut déterminer la masse volumique. On mesure une masse M_1 .
- On met le solide dans le pycnomètre et on ajuste le volume de liquide jusqu'au niveau du repère sur la fiole. 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 :

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



Figure IV.13 : Pesée de la masse de la fiole avec et sans le matériau

IV.3 Réalisation de l'échangeur

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

- Deux supports.
- 2 pompes.
- De la tuyauterie.
- Une plaque de cuivre.
- 2 bassins d'eau.
- Du mastic de silicone.

L'échangeur élaboré est constitué des éléments suivants :

- Six (06) tuyaux sur lesquels nous plaçons six (06) canettes, peintes en noir mat, sur chaque canal.

- Deux supports qui vont maintenir les tuyaux et assurer la fixation et l'étanchéité des cannettes.
- Des ailettes en cuivre soudées sur les 3 premiers tuyaux pour avoir une plus grande surface d'échange côté MCP, formera le premier élément de l'échangeur.

La réalisation de l'échangeur passe par plusieurs étapes.

IV.3.1. Réalisation du premier élément

a) Préparation des tuyaux

On coupe 3 tubes en cuivre de ($d = 14 \text{ mm}$) pour chacun des tubes de longueur ($l = 830 \text{ mm}$) (Figure IV.14).



Figure IV.14 : 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 six perforations. Dans chacune un espace de ($l = 50 \text{ mm}$) entre deux trous est laissé (Figure IV.15).



Figure IV.15 : Images représentatives des supports

c) Préparation des canettes

Les canettes doivent d'abord subir une modification de leur forme initiale, un des couvercles est totalement ouvert par un côté, et l'autre est percé au milieu avec un diamètre de ($d = 15$ mm) pour éviter au maximum la fuite du MCP à l'état fusion tout en laissant passer les tuyaux avec les ailettes soudées dessus (**Figure IV.16** et **Figure IV.17**).

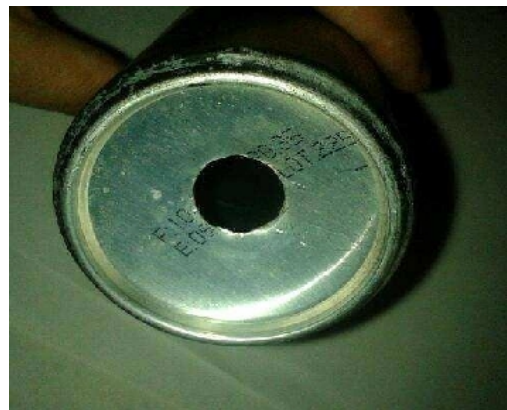


Figure IV.16 : Canette avant et après perçage. (Vue de dessous)



Figure IV.17 : Canette avec et sans le couvercle.

d) Préparation des tubes centraux

Quatre tubes en forme d'un « T » de dimensions $d = 16$ mm, $d = 14$ mm ont été réalisés. Puis des petits tubes de diamètre $d = 16$ mm et de longueur $l = 50$ mm entre les « T » sont soudés, pour former un tube central de diamètre $d = 16$ mm qui permettra le passage de l'eau dans les tubes en cuivre de diamètre $d = 14$ mm (**Figure IV.18**).

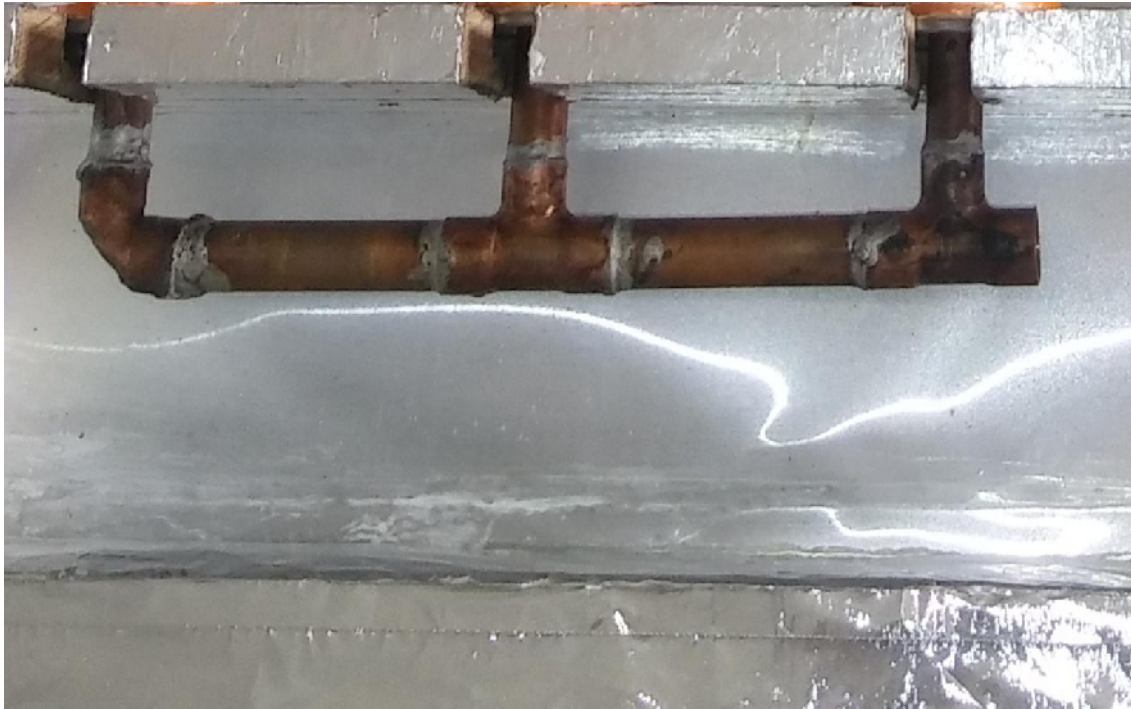


Figure IV.18 : Tube central de diamètre $D = 16$ mm

e) Préparation des ailettes de cuivre

Pour avoir une meilleure diffusivité thermique et une plus grande surface d'échange, on soude des ailettes de cuivre, qui est un bon conducteur thermique, sur les tuyaux dans lesquels le fluide caloporteur circulera (**Figure IV.19**).

Le choix du cuivre revient aux caractéristiques intéressantes qu'offre celui-ci et qui sont les suivantes:

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



Figure IV.19: Image représentative des ailettes en cuivre.

f) Fixation des ailettes sur les tuyaux en cuivre

Après avoir préparé les ailettes en cuivre, elles sont soudées sur les tubes en cuivre de manière à avoir un serpentín hélicoïdal. En résumé, nous disposerons d'ailettes sur tout l'échangeur (**Figure IV.20**).



Figure IV.20 : Image représentative des ailettes soudées sur les tuyaux

g) Assemblage de la partie inférieure du premier élément de l'échangeur

D'abord, nous commençons par souder les 3 tuyaux en cuivre ($d = 14$ mm) avec le premier tube central ($d = 16$ mm) de façon à ne pas avoir de fuite. Ensuite, les tuyaux sont glissés dans les premiers supports.

▪ Préparation du MCP :

Après avoir trouvé la formule stabilisatrice du MCP dans les expériences précédentes, nous avons obtenu les proportions suivantes : 45%Pa, 40%Si et 15%Gr.

▪ Remplissage des canettes

- Pour commencer, on place les trois premières canettes sur le support inférieur. Chacune de ces canettes sera traversée par un tuyau de (14 mm) sur lequel sont soudées les ailettes de cuivre.
- Nous avons rempli ensuite les canettes avec le composite en fusion.
- Après ça, les autres canettes remplies de MCP sont empilées les unes après les autres et sont ensuite reliées entre elles avec une colle spéciale, ainsi de suite jusqu'à placer les dix-huit canettes remplies de MCP.

Pour coller les canettes, nous avons utilisé le mastic de silicone (**Figure IV.21**) pour éviter toute fuite du MCP à l'état fusion. Il est souvent utilisé en menuiserie, couverture, électricité, sanitaire, joints étanches...etc.



Figure IV.21: Le mastic de silicone

Figure VI.22 : Collage des canettes

h) Assemblage du premier élément de l'échangeur

On pose le deuxième support. Après avoir placé tous les éléments constituant de l'échangeur, on soude un bassin pour avoir le premier élément (**Figure IV.23**).



Figure IV.23 : Premier élément.

Pour le deuxième élément, nous avons suivi les mêmes étapes que le premier élément mais sans souder d'ailettes.

i) Réalisation du boîtier

Pour la réalisation de notre boîtier nous avons utilisé du bois de récupération.

Afin de diminuer les pertes de chaleur, nous avons isolé le boîtier avec du polystyrène (**Figure IV.24**).



Figure IV.24 : Isolation du boîtier avec du polystyrène

On couvre le tout avec du papier aluminium pour renvoyer le rayonnement solaire sur la surface de l'absorbeur (**Figure IV.25**).



Figure IV.25 : Couverture avec du papier aluminium

j) Réalisation des réflecteurs

Nous avons fabriqué un cadre en bois que nous avons couvert avec du papier aluminium (**Figure IV.26**).



Figure IV.26: Réflecteur solaire.

k) Assemblage de l'échangeur

Après avoir fini avec la réalisation des différents éléments, nous sommes passés à l'assemblage.

- Assemblage du boîtier et l'échangeur (**Figure IV.27**)



Figure IV.27 : Assemblage du boîtier et l'échangeur

- Réalisation d'un double vitrage afin de créer l'effet de serre (**Figure IV.28**).



Figure IV.28 : Réalisation du double vitrage

- Assemblage du boîtier vitré et des réflecteurs (**Figure IV.29**).



Figure IV.29 : Assemblage du boîtier vitré et des réflecteurs

IV.4. Les quantités des matériaux utilisées

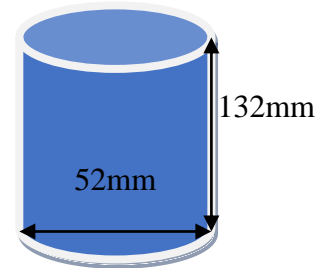
Les quantités de matériaux utilisées sont en fonction du volume et du nombre de cannettes qui constituent l'échangeur. Sachant que le volume d'une cannette est :

$$V = \pi \times r^2 \times L \quad (\text{IV.3})$$

V : volume de la cannette.
L : longueur de la cannette.
r : rayon de la cannette.

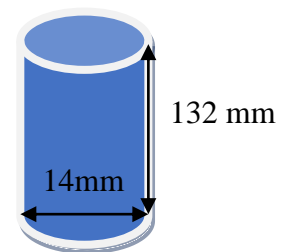
Après calcul, on trouve :

$$V_c = 2,8 \times 10^{-4} m^3$$



Pour le volume du tube (cylindrique), on utilise la même équation (VI.3) mais le diamètre change.

$$V_t = 2,62 \times 10^{-5} m^3$$



Pour le volume qu'on veut remplir avec le composite on a :

$$V_{c-t} = V_c - V_t \quad (\text{IV.4})$$

$$V_{c-t} = 2,53 \times 10^{-4} m^3$$

Avec :

V_c est le volume de la cannette,

V_t est le volume du tube en cuivre,

V_{c-t} est le volume de la cannette sans le volume du tube.

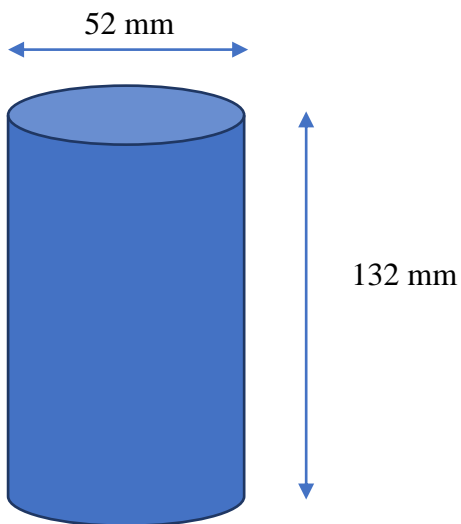
La quantité totale utilisée de matériaux pour l'élaboration des composites du MCP est estimée à **10,8 kg**.

$$Pr = 0,45 \times 10,8 \text{ kg} = 4,86 \text{ kg}$$

$$Si = 0,40 \times 10,8 \text{ kg} = 4,32 \text{ kg}$$

$$Gr = 0,15 \times 10,8 \text{ kg} = 1,62 \text{ kg}$$

IV.5. La surface d'échange de la canette



La surface d'une canette (cylindrique) s'écrit :

$$S = 2\pi rL \tag{IV.5}$$

Alors :

$$Sc = 2 \times 3,14 \times 2,6 \times 10^{-2} \times 13,2 \times 10^{-2}$$

$$Sc = 2,155 \times 10^{-2} m^2$$

Avec :

Sc la surface de la canette en m^2

Si on suppose que la surface d'échange est de $\frac{1}{2}$ de la surface globale alors :

$$S_{d'exchange} = \frac{1}{2}(2\pi rL) \tag{IV.6}$$

$$S_{d'exchange} = \frac{1}{2}(2,155 \cdot 10^{-2})$$

$$S_{d'exchange} = 1,05 \cdot 10^{-2} m^2$$

Avec :

$S_{d\acute{e}change}$ Surface d'échange en m^2

IV.6. Mesure de la température des éléments de l'échangeur

Pour mesurer la température des différents éléments de l'échangeur on a eu recours aux thermocouples.

IV.6.1. Les Thermocouples

Un thermocouple est un capteur servant à mesurer la température. Il se compose de deux métaux de natures différentes reliés à une extrémité. Quand la jonction des métaux est chauffée ou réfrigérée, une tension variable est produite, qui peut être ensuite transcrite en température. Les alliages thermocouple sont généralement disponibles en fils.



Figure VI.30 : Thermocouple couple de type K

Pour collecter les données fournies par les thermocouples on a utilisé un instrument de d'enregistrement de données basé sur PC. « Pico Technology Enregistreur de données, Température »

IV.7. Pico Technology Enregistreur de données, Température USB TC-08

- **Description de l'instrument**

Cet enregistreur de données de température basé sur PC est facile à utiliser, et permet la collecte, l'analyse et l'affichage de 8 thermocouples maximum. L'enregistreur de données peut être utilisé avec tout un éventail de types de thermocouples, ce qui en fait un choix idéal pour la plupart des besoins. Il offre également une connectivité USB et des alarmes programmables nous permettant de fixer des limites pour chaque canal.



Figure IV.31: Pico Technology Enregistreur de données, Température

- **Caractéristiques et avantages**

- Fonctionne avec les thermocouples de type B, E, J, K, N, R, S et T.
- Large plage de températures, avec résolution verticale 20 bits.
- Compensation de soudure froide intégrée.
- Aucune alimentation requise, puissance provenant du port USB.
- Affichage ou exportation des données au format graphique et numérique.
- Enregistrement et affichage des valeurs Min./Max./Moyenne ou filtrées.
- Limites d'alarme Max/Min réglables pour chaque canal

Tableau IV.3: Caractéristiques de Pico Technology Enregistreur de données, Température

Nombre de voies	8 entrées de thermocouples miniatures
Précision	Somme de $\pm 0,2\%$ et $0,5\text{ °C}$
Protection contre les surcharges.	$>\pm 30\text{ V}$
Plage de tensions d'entrée	$\pm 70\text{ mV}$
Fréquence d'échantillonnage maximum	10 relevés par seconde (100 ms)
Résolution	20 bits
Connecteurs de sortie	USB 1 – cordon fourni


Dimensions		85 x 145 x 25 mm	
Caractéristiques techniques principales			
Type de thermocouple	Plage globale en °C	0,1°C Résolution	Résolution de 0,025 °C
B	-20 → +1 820	-20 → +1 820	600 → 1 820
E	-270 → +910	-270 → +910	-260 → +910
J	-210 → +1 200	-210 → +1 200	-210 → +1 200
K	-270 → +1 370	-270 → +1 370	-250 → +1 370
N	-270 → +1 300	-270 → +1 300	-230 → +1 300
R	-270 → +1 300	-270 → +1 300	-20 → +1 760
S	-50 → +1 760	-50 → +1 760	-200 → +1 760
T	-270 → +400	-270 → +400	-250 → +400

VI.8. Logiciel PicoLog

On ne va citer que quelques étapes de ce logiciel.

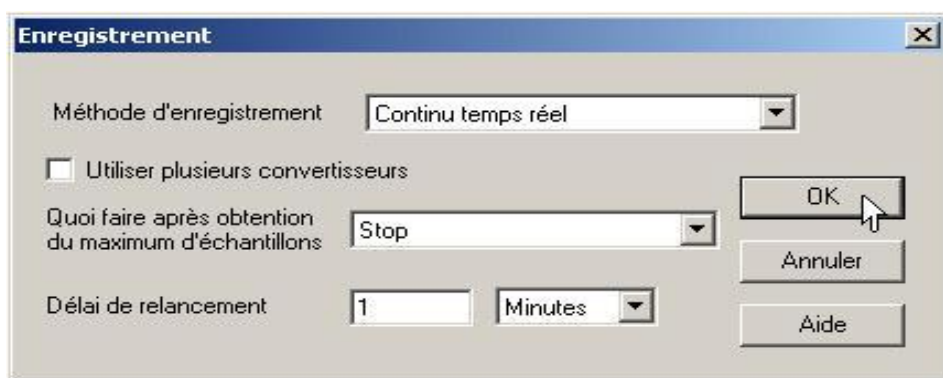
a) Lancement de PicoLog

Pour contrôler le bon fonctionnement de l'enregistreur de données, lancer l'application PicoLog de la façon suivante :

- Lancer PicoLog (cliquer sur l'icône PicoLog  PicoLog Recorder dans le menu **Démarrer** de Windows.)
- Cliquer sur **Fichier**
- Cliquer sur **Nouveaux réglages**



- Dans la boîte de dialogue **Enregistrement**, cliquer sur **OK** :



- Dans la boîte de dialogue **Échantillonnage**, cliquer sur **OK** :

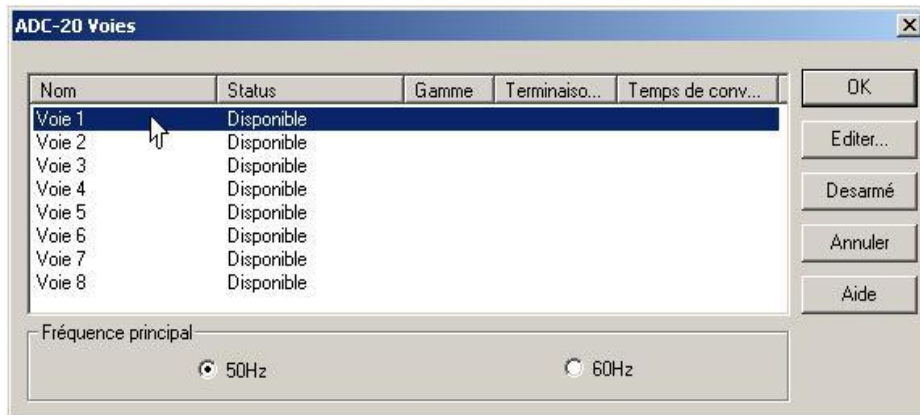


- Dans la boîte de dialogue **Détails du Convertisseur**, choisir **Enregistreur à Haute Résolution** dans **Type de Convertisseur**. Le type de matériel et son numéro de série apparaissent dans la liste des **Matériels USB**. L'indicateur de **Progression**

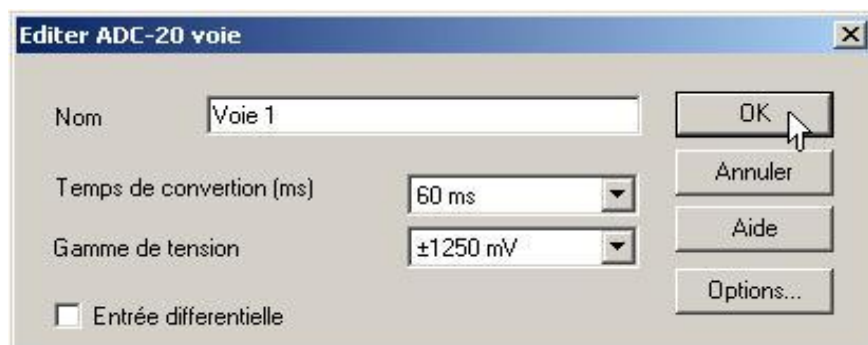
d'énumération USB se déplace vers les 100%. Si l'indicateur de progression ne bouge pas, débrancher puis rebrancher l'unité et cliquer sur **Actualiser**.



- Cliquer sur **OK**
- Dans la boîte de dialogue **Voies ADC-20** (ou **ADC-24**), double-cliquer sur «Voie 1»:



- Dans la boîte de dialogue **Editer voie ADC-20** (ou **ADC-24**), cliquer sur **OK** :



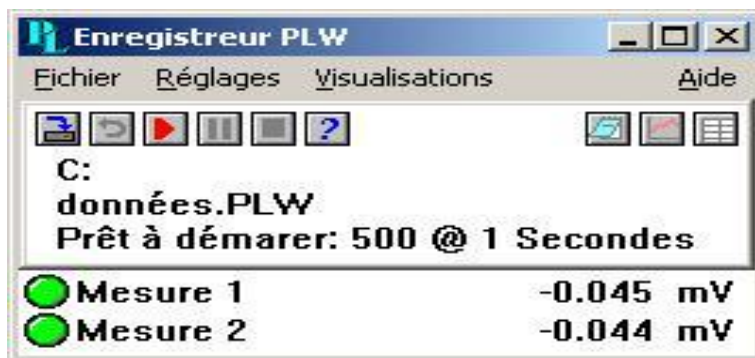
- A nouveau dans la boîte de dialogue **Voies ADC-20** (ou **ADC-24**), cliquer sur **OK**
- L'écran **Enregistreur PLW** affiche maintenant la tension sur la voie 1 (proche de 0 mV si aucun appareil n'est connecté) :



- Brancher une tension adéquate (par exemple une pile de 1,5V) sur la voie. Les connexions à broches sont indiquées sur l'enregistreur et également listées dans le chapitre Connecteur analogique.

b) Affichage enregistreur






Lorsqu'on lance PicoLog pour Windows en utilisant l'icône Enregistreur, une fenêtre comme celle-ci s'ouvre:






Cet affichage dispose d'un menu donnant accès aux fonctions de gestion de fichiers, aux réglages d'enregistrement et à d'autres affichages.

Au dessous figure une fenêtre contenant des informations sur l'état courant d'enregistrement, ainsi que des boutons permettant de contrôler l'enregistrement.

Les boutons en haut à gauche permettent de spécifier le nom du fichier et de commencer ou d'arrêter l'enregistrement. Les boutons sont les suivants :

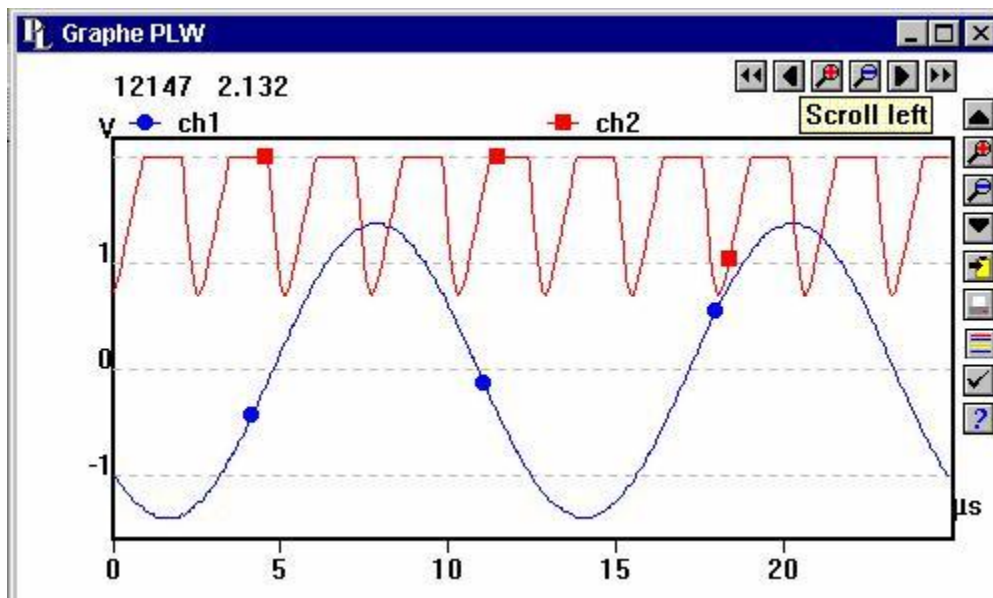
-  Spécifier un nouveau fichier sur lequel enregistrer.
-  Remettre le fichier courant au début afin de le réenregistrer.
-  Commencer l'enregistrement.
-  Arrêt momentané.
-  Arrêter l'enregistrement.

Les boutons en haut à droite permettent d'activer d'autres affichages:







-  Activer un affichage de notes.
-  Activer un affichage graphe.
-  Activer un affichage tableur.

c) Affichage graphe

Quand on sélectionne l'option **Graphe** du sous-menu **affichage**, le programme ouvre une fenêtre comme celle-ci :







Il y a plusieurs touches en haut à gauche de l'écran. Le groupe de touches horizontal permet de changer l'intervalle de temps affiché.

-  Déplace l'affichage d'un intervalle entier (plus tôt).
-  Déplace l'affichage d'un quart d'intervalle (plus tôt).
-  Multiplie le centre de l'intervalle par deux (agrandissement).
-  Divise l'affichage courant par deux (réduction).
-  Déplace l'affichage d'un quart d'intervalle (plus tard).
-  Déplace l'affichage d'un intervalle entier (plus tard).






Le groupe de touches vertical supérieur permet de changer la gamme de valeurs pour l'axe vertical.

Si plus d'un graphe est affiché, les touches contrôlent le graphe aux bords épais. Pour passer à un autre graphe, placer le curseur dans le nouveau graphe et cliquer avec le bouton gauche de la souris.

-  Déplacer d'un intervalle entier vers le haut.
-  Multiplie le centre de l'intervalle par deux (agrandissement)
-  Divise l'affichage courant par deux (réduction).

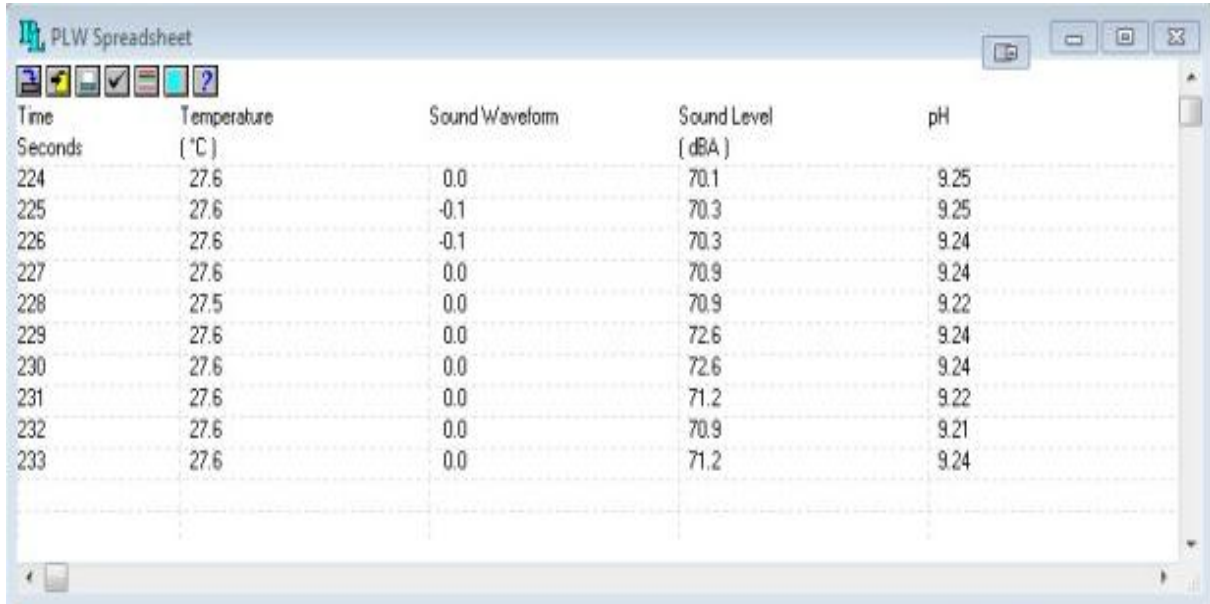
-  Déplacer d'un intervalle entier vers le bas.

Les autres touches verticales sont:

-  Copier le graphe sur le presse-papier.
-  Imprimer le graphe.
-  Sélectionner les capteurs à afficher.
-  Préciser les options pour le graphe.
-  Afficher les informations aide sur le graphe.

d) Affichage tableau


Quand on sélectionne l'option tableau du sous-menu affichage, le programme ouvre une fenêtre comme celle-ci:



The screenshot shows a window titled "PLW Spreadsheet" with a toolbar and a table of data. The table has five columns: Time (Seconds), Temperature (°C), Sound Waveform, Sound Level (dBA), and pH. The data is as follows:



Time Seconds	Temperature (°C)	Sound Waveform	Sound Level (dBA)	pH
224	27.6	0.0	70.1	9.25
225	27.6	-0.1	70.3	9.25
226	27.6	-0.1	70.3	9.24
227	27.6	0.0	70.9	9.24
228	27.5	0.0	70.9	9.22
229	27.6	0.0	72.6	9.24
230	27.6	0.0	72.6	9.24
231	27.6	0.0	71.2	9.22
232	27.6	0.0	70.9	9.21
233	27.6	0.0	71.2	9.24

Il y a une ligne pour chaque lecture. La première colonne indique le moment d'enregistrement de la lecture. Les autres colonnes indiquent les paramètres choisis

-  Ouvre un dialogue pour sélectionner les paramètres à afficher.
- Préciser l'affichage, soit des lectures individuelles, soit un résumé des lectures dans la gamme (la première lecture, la moyenne, le minimum et le maximum).

La barre de défilement sur la droite permet de sélectionner la gamme de temps.

Après avoir sélectionné une gamme de lectures, on peut utiliser les touches suivantes:

-  Sauvegarder les lectures en format texte dans un fichier
-  Copier les lectures sur le presse-papier

Si toutes les lectures que l'on souhaite sélectionner sont sur l'écran:

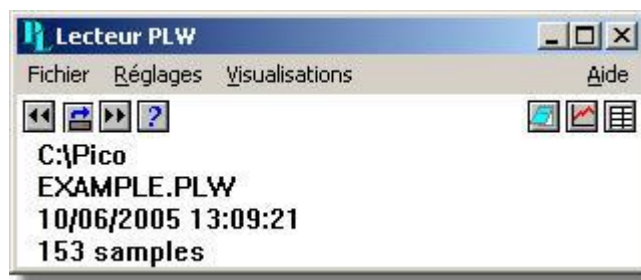
- Placer le pointeur sur la première lecture.
- Tenir enfoncé le bouton gauche de la souris.
- Déplacer le curseur jusqu'à la dernière lecture: les lectures sélectionnées seront mises en surbrillance au fur et à mesure.
- Relâcher le bouton de la souris.

Si l'on souhaite sélectionner un grand nombre de lectures :

- Positionner le pointeur sur la première lecture.
- Cliquer le bouton gauche de la souris: la première lecture sera mise en surbrillance.
- Avancer jusqu'à la dernière lecture.
- Positionner le pointeur sur la dernière lecture.
- Tenir enfoncé la touche majuscule et cliquer sur le bouton gauche de la souris: toute la gamme sera mise en surbrillance.




e) Affichage lecteur

Quand on sélectionne l'option **affichage | Lecteur**, une nouvelle fenêtre comme celle-ci s'ouvre:






Elle indique le nom du fichier d'enregistrement courant et le nombre d'échantillons recueillis.

Les boutons en haut à gauche servent à sélectionner un fichier et de passer d'un fichier à l'autre. Les boutons sont les suivants:

-  Chargement d'un nouveau fichier dans le lecteur.
-  Retour au fichier précédent.
-  Avance au fichier suivant.

Les boutons en haut à droite permettent d'activer d'autres affichages:

-  Activer un affichage de notes.
-  Activer un affichage graphe.
-  Activer un affichage tableur.

VI.9. Etalonnage d'un instrument de mesure

Cette opération consiste à mesurer la même grandeur avec l'équipement à étalonner et l'équipement étalon, et à comparer les indications des deux instruments, puis à exploiter les résultats de cette comparaison.

Prenons par exemple l'étalonnage d'un thermomètre, que nous allons simplifier. Dans un milieu homogène, à une température stabilisée (four ou bain thermostaté), nous plongeons deux instruments, l'un à étalonner (thermomètre) et un étalon (thermomètre de référence, accompagné d'un certificat d'étalonnage), et nous mesurons la température du milieu (bain ou four). Le thermomètre étalon (ajusté) indique 25,30 °C, le thermomètre à étalonner indique 24,10 °C. Nous avons alors

$$T^{\circ} \text{ thermomètre} = T^{\circ} \text{ étalon} - 1,20 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

Qui est une relation entre les indications et les valeurs fournies par un étalon. C'est la première étape de la définition.

La seconde étape, consiste à exploiter les résultats de la première.

La **correction** « **manuelle** » consiste à modifier la valeur lue. Dans l'exemple précédent, si le thermomètre mesure 20,6 °C, alors la température à prendre en compte est $20,6 + 1,20 = 21,8$ °C.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a cité les critères du choix des matériaux utilisés, comme on a exposé les différentes pièces, leurs dimensions et les outils que nous avons utilisé dans le montage.

Chapitre V

Résultats et discussion

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des différentes opérations faites dans la partie expérimentale.

V.1. Résultats de mesure de la conductivité thermique :

Les résultats donnés par le CT mètre pour une plaque de (300mm × 300mm × 10mm) sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.1 : Résultats du CT mètres

I_s	13,25mm
e_1	83,1mm
e_2	88,4mm
HFM	43,9mV
T_1	35°C
T_2	20,8°C
ΔT	14,2°C
T	27,9

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.

e_2 : Epaisseur de l'ensemble silicone et la plaque.

I_s : Epaisseur de la plaque.

La valeur de la conductivité thermique mesurée par le CT mètre est : $\lambda = 1,39 \text{ W/m.K}$

Discussion :

Comme on a déjà démontré dans le troisième 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(300mm × 300mm × 10mm),la conductivité thermique est de $\lambda = 1,39 \text{ W/ m K}$.

On constate, après comparaison, que la conductivité thermique est améliorée de près de 6 fois.

Ce qui semble intéressant pour la cinétique de charge et décharge.

V.2. Résultats des tests effectués sur l'échangeur

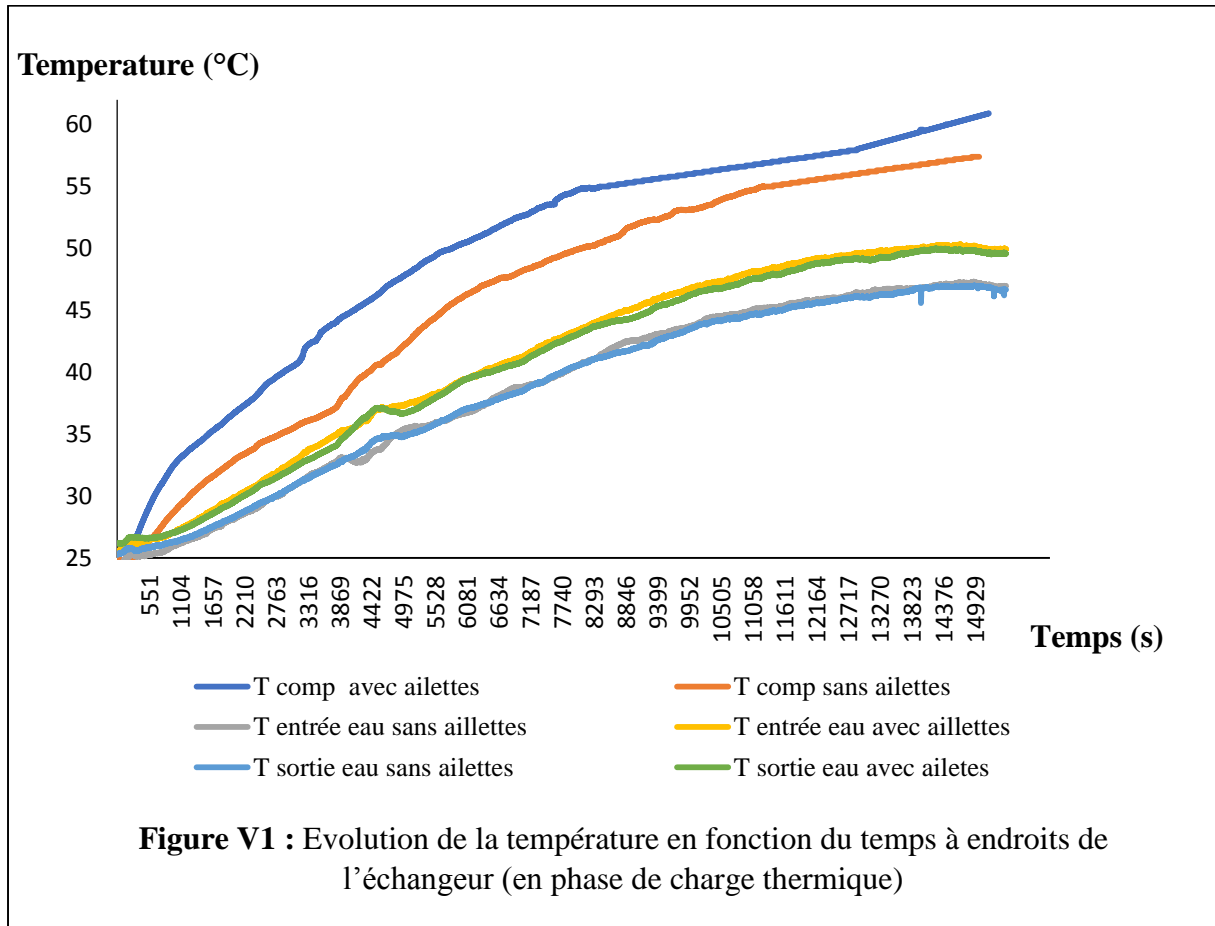
Le tableau ci-dessous représente les résultats des tests effectués sur l'échangeur au mois d'Octobre 2017, pour une période de quatre heures (11h:00-14h:00)

Tableau V.2 : Températures à différents endroits de l'échangeur.

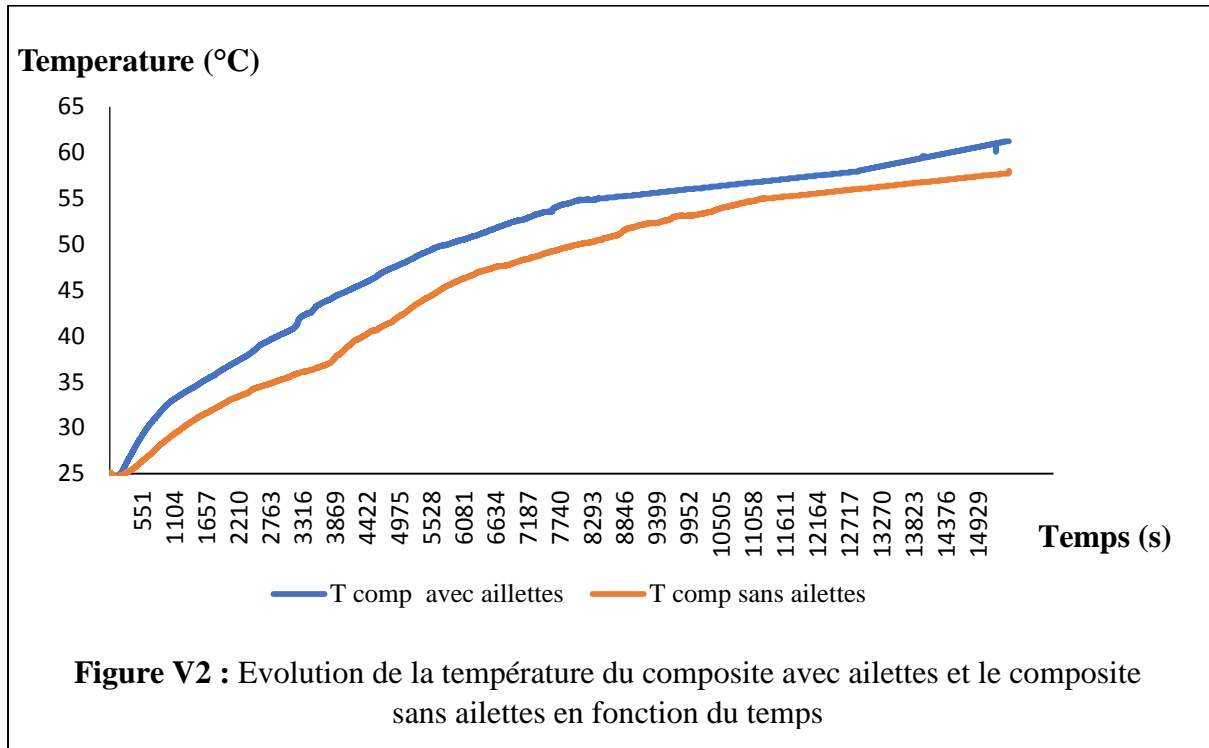
Temps (s)	T Comp avec ailettes (°C)	T Comp sans ailettes (°C)	T entrée eau sans ailettes (°C)	T entrée eau avec ailettes (°C)	T sortie eau sans ailettes (°C)	T sortie eau avec ailettes (°C)
1	25,00	25,15	24,31	25,44	25,26	26,17
606	29,62	26,59	25,28	26,58	25,87	26,61
1208	33,52	29,76	26,44	27,54	26,61	27,44
1804	35,76	32,08	27,58	29,32	27,78	28,96
2813	39,76	34,96	30,09	31,99	30,14	31,60
3417	42,45	36,23	31,82	33,92	31,72	33,12
4044	44,79	38,56	33,00	35,41	33,11	35,18
4622	46,63	40,83	33,99	37,06	34,78	37,08
5220	48,45	43,22	35,57	37,68	35,15	37,06
5838	50,02	45,57	36,40	38,91	36,47	38,81
6409	51,20	47,07	37,46	40,17	37,47	39,96
7032	52,60	48,14	38,8	41,22	38,44	40,82
7604	53,55	49,22	39,63	42,65	39,66	42,26
8827	55,20	51,42	42,41	44,98	41,64	44,25
9424	55,60	52,35	43,07	45,98	42,61	45,31
10050	56,10	53,15	43,82	46,89	43,65	46,34
10626	56,40	54,11	44,57	47,45	44,31	46,91
11234	56,80	54,97	45,16	48,18	44,69	47,61
11833	57,24	55,30	45,62	48,78	45,32	48,28
12489	57,70	55,80	45,98	49,28	45,82	48,97
13068	58,20	56,10	46,40	49,67	46,06	49,11
13640	58,96	56,50	46,72	49,93	46,48	49,55
14236	59,71	56,90	47,04	50,18	46,88	49,95
14811	60,13	57,30	47,16	50,15	46,92	49,78
15388	61,56	57,70	46,92	49,92	46,64	49,61
15470	61,72	58,00	46,97	49,93	46,66	49,56

V.2.1. Discussion des résultats

Le graphe ci-dessous montre l'évolution de la température en fonction du temps à différents endroits de l'échangeur.



Le graphe ci-dessous montre l'évolution de la température en fonction du temps sur l'élément de l'échangeur rempli de composite respectivement avec ailettes et sans ailettes.



Discussion

Le composite avec ailettes

Partie 1

Pour l'intervalle de temps compris entre [0s, 8 000s], une augmentation de température de 25°C à 55°C est obtenue. Cette partie du graphe montre que le composite stocke de l'énergie calorifique appelée chaleur sensible à l'état solide.

Partie 2

Pour l'intervalle de temps compris entre [8 000s, 13 000s] une augmentation légère de la température de 55 °C à 58 °C (on peut la considérer comme stable) est observée. La stabilité de la courbe s'explique par le fait que le composite entame la phase de fusion (changement de phase solide-liquide où la température de début de fusion est de 55 °C et la température de fin de fusion de 58°C). Dans cette partie du graphe, le composite stocke de l'énergie calorifique appelée chaleur latente de changement de phase.

Partie 3

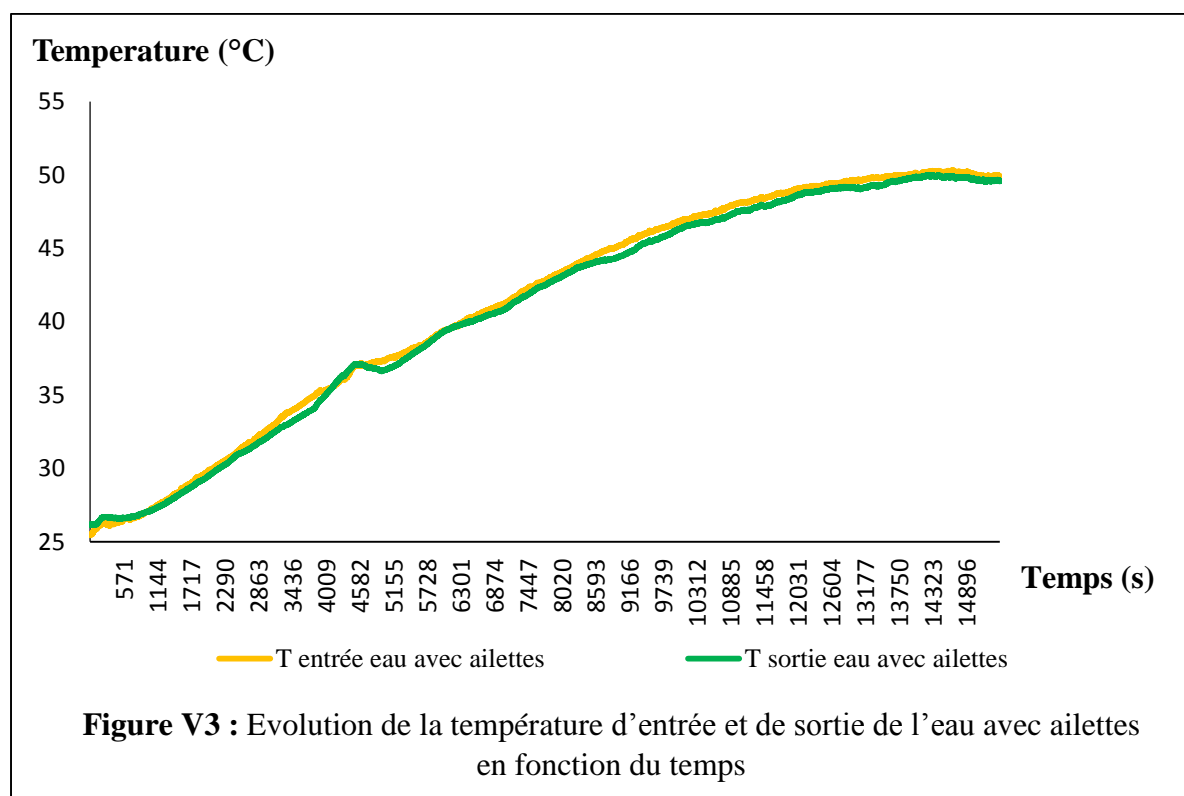
Pour l'intervalle de temps compris entre [13 000s, 15 000s] nous remarquons que la température reprend son allure ascendante. Dans cette partie du graphe, le composite stocke de l'énergie calorifique appelée chaleur sensible à l'état liquide.

Le composite sans ailettes

Nous remarquons un même comportement que celui du composite avec ailettes mais à des intervalles de temps différents.

La différence s'explique par le fait que les ailettes ont joué un rôle très important dans le transfert de chaleur (les ailettes augmentent la surface d'échange et accélèrent le transfert thermique).

Le graphe ci-dessous montre l'évolution de la température d'entrée et de sortie de l'eau pour les éléments avec ailettes.



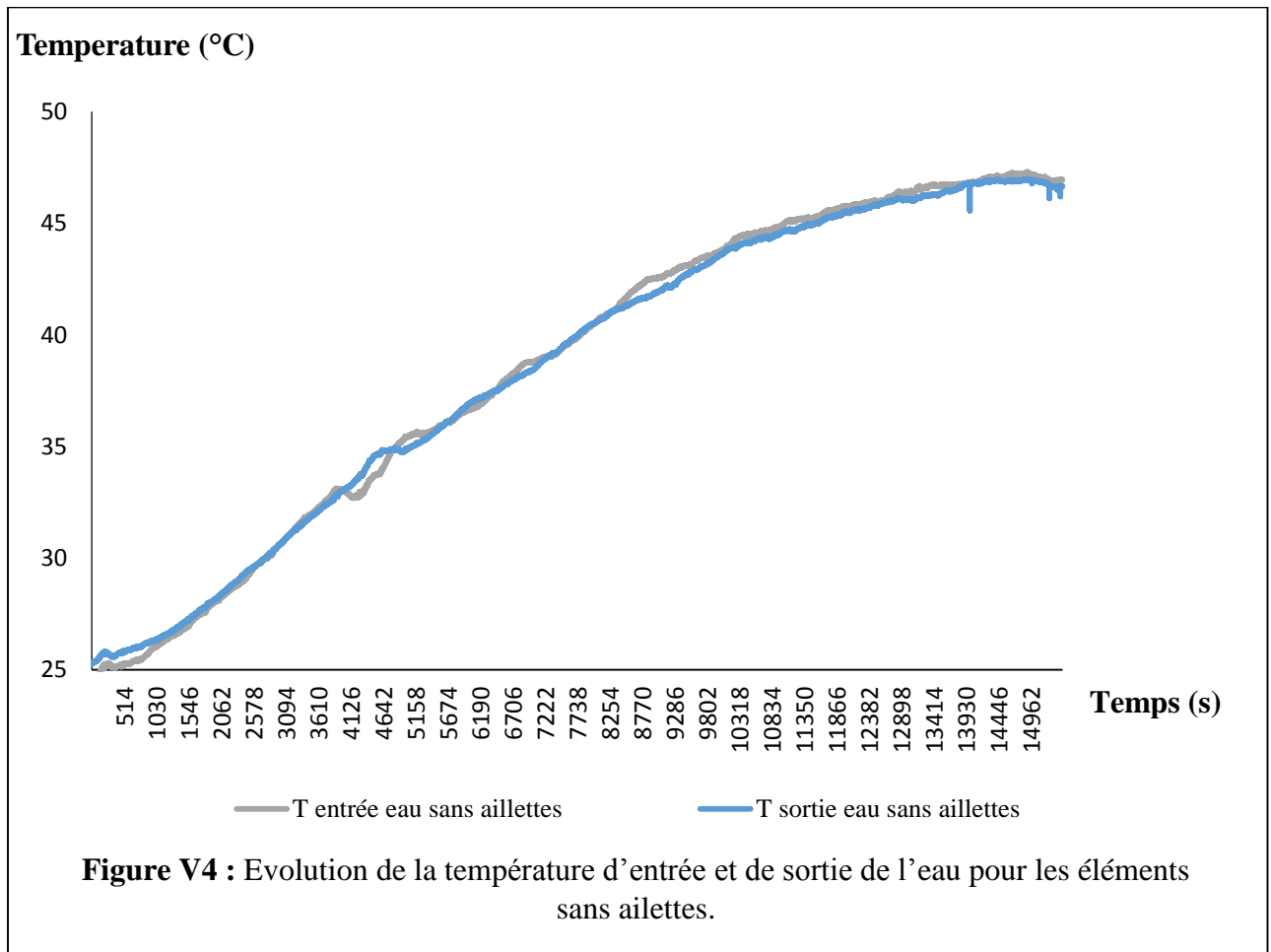
Discussion

On remarque une évolution de la température à partir de l'entrée jusqu'à la sortie au cours du temps. Cela s'explique par le fait que l'eau stocke de l'énergie calorifique appelée chaleur sensible à l'état liquide.

L'augmentation parallèle de la température de sortie et d'entrée d'eau s'explique par le fait que l'échangeur travaille en circuit fermé.

La variation de température pour les éléments avec ailettes est estimée à 25 °C.

Le graphe ci-dessous montre l'évolution de la température d'entrée et de sortie d'eau pour les éléments sans ailettes.



Nous remarquons le même comportement de l'eau que celui des éléments avec ailettes, mais il ya une différence au niveau des températures où la variation de ces dernières est estimé a 21°C.

Cette différence réside toujours dans l'ajout des ailettes.

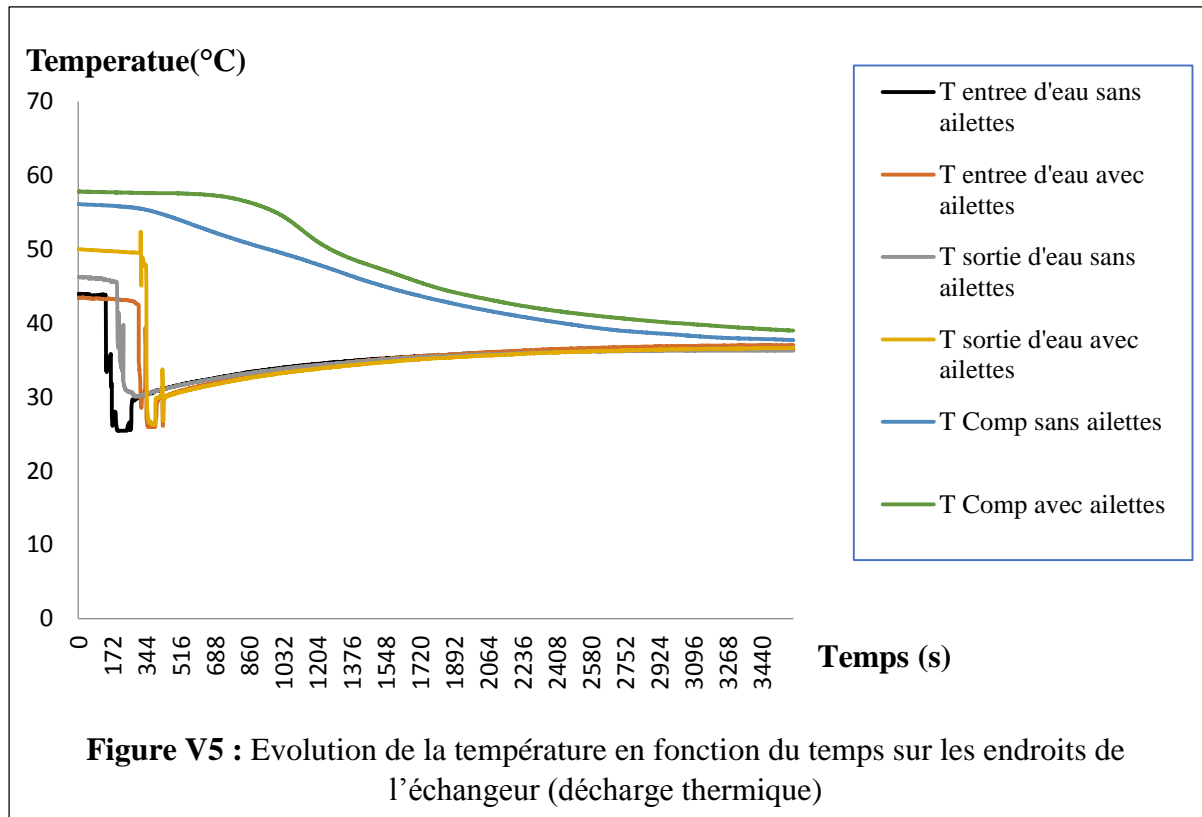
Le tableau ci-dessous représente les résultats des tests effectués sur l'échangeur au mois d'Octobre 2017, pour une période d'une heure 15h:00-16h:00.(Décharge thermique)

Tableau V.3 : Températures à différents endroits de l'échangeur (décharge thermique)

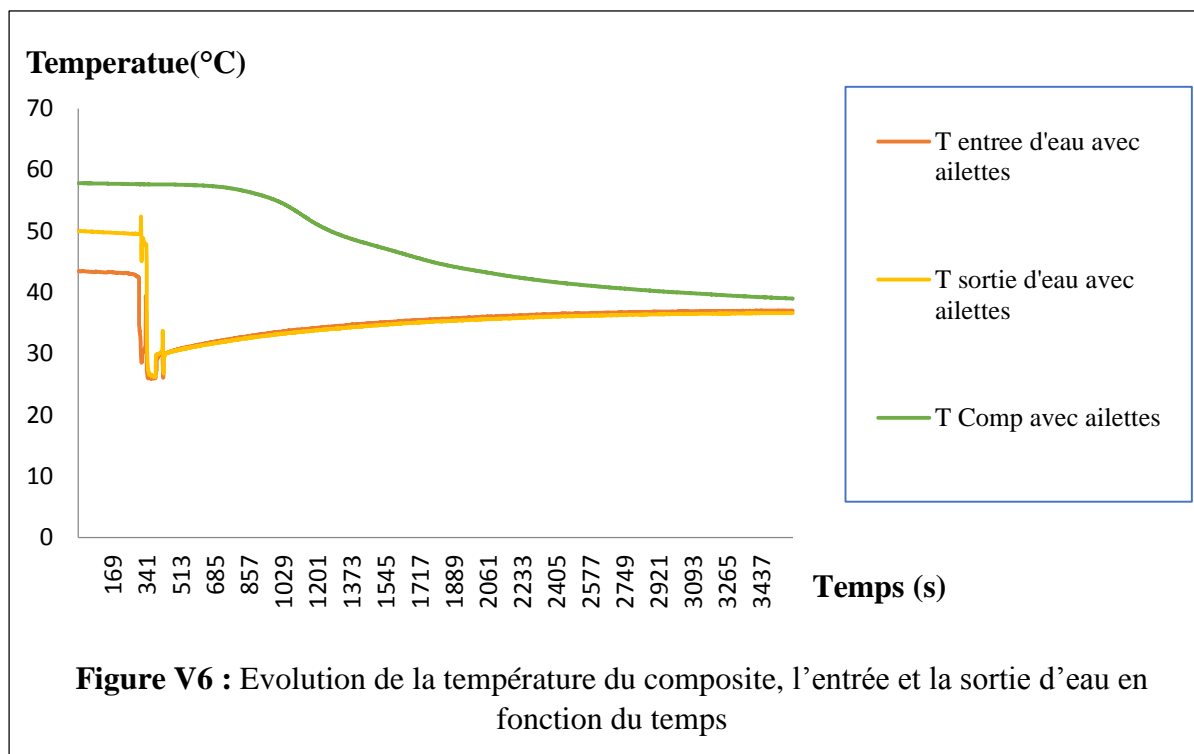
Temps (s)	T entrées eau sans ailettes (°C)	T entrées eau avec ailettes (°C)	T sorties eau sans ailettes (C°)	T sorties eau avec ailettes (C°)	T Comp sans ailettes (C°)	T Comp avec ailettes (°C)
0	43,94	43,44	46,25	50,02	56,11	57,82
247	25,75	43,11	30,81	49,61	55,75	57,69
349	30,46	26,05	30,47	27,34	55,31	57,62
527	31,76	30,95	31,67	30,76	53,82	57,56
707	32,64	32,05	32,56	31,83	52,08	57,22
887	33,45	33,01	33,33	32,7	50,55	56,15
1067	34,09	33,78	33,96	33,39	49,15	53,84
1247	34,59	34,36	34,44	33,95	47,59	50,35
1427	35,02	34,87	34,85	34,45	45,92	48,22
1607	35,33	35,28	35,18	34,89	44,47	46,58
1787	35,61	35,63	35,47	35,23	43,26	44,94
1967	35,86	35,9	35,67	35,48	42,19	43,74
2147	36,04	36,16	35,85	35,71	41,26	42,77
2327	36,22	36,4	36,01	35,95	40,45	41,95
2507	36,31	36,58	36,11	36,13	39,73	41,31
2687	36,37	36,71	36,18	36,29	39,11	40,77
2867	36,48	36,83	36,22	36,37	38,71	40,32
3047	36,45	36,9	36,26	36,46	38,37	39,95
3227	36,45	36,98	36,28	36,53	38,05	39,6
3407	36,39	37	36,26	36,59	37,87	39,27
3587	36,37	37,03	36,27	36,62	37,71	39,02

3599	36,39	37,02	36,27	36,63	37,71	38,99
------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Le graphe ci-dessous montre l'évolution de la température en fonction du temps aux endroits de l'échangeur lors de la décharge thermique (sans source de chaleur).



Le graphe ci-dessous montre l'évolution des températures de l'eau à l'entrée, à la sortie de l'échangeur et la température du composite avec ailettes.



Décharge thermique

Le composite avec ailettes

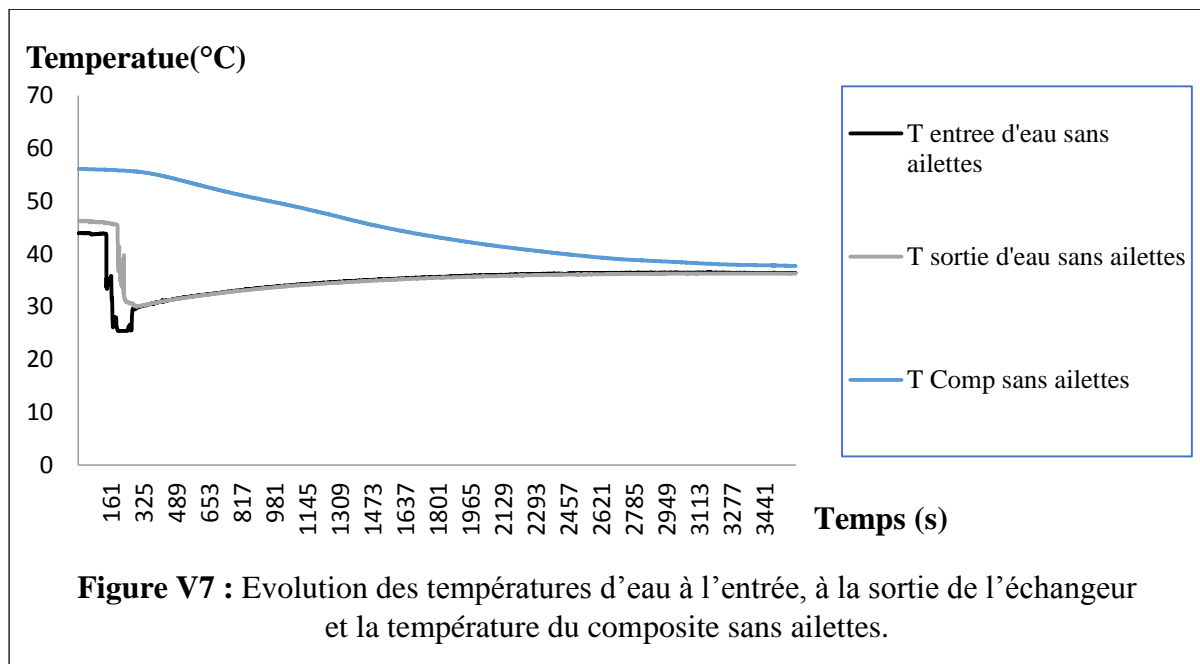
Pour l'intervalle de temps compris entre [0s, 900s], on remarque une stabilité de la température. Elle s'explique par le fait que le composite est dans la phase liquide-solide (changement de phase).

Pour l'intervalle de temps compris entre [900s, 3600s], une diminution de la température du composite est constatée. Elle s'explique par le fait que le composite perd de la chaleur et rentre dans la phase de solidification.

L'eau

Pour l'eau, on constate une augmentation de la température entre [370s, 3600s]. Cela est dû à l'absorption de la chaleur perdue par le composite, par l'eau.

Le graphe ci-dessous montre l'évolution des températures d'eau à l'entrée, à la sortie de l'échangeur et la température du composite sans ailettes.



Composite sans ailettes

Nous remarquons le même comportement que celui du composite avec ailettes, mais à des intervalles de temps différents. Cela s'explique par le fait que les ailettes ont accéléré le chauffage de l'eau.

Conclusion : L'ajout des ailettes a joué un très grand rôle dans le transfert de chaleur par l'augmentation de la surface d'échange.

Calcul du débit d'eau (\dot{m} : kg/s) :

En remplissant un bidon de 5L avec de l'eau en 22,12 secondes, on obtient :

$$\dot{m} = \frac{5}{22,12} = 0,226 \text{ L/s}$$

$$\dot{m} = 0,226 \times 10^{-3} \times \frac{1000 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 0,226 \text{ kg/s}$$

V.3. Bilan thermique

Calcul de la chaleur spécifique du composite

$$C_{P_{\text{paraffine-solide}}} = 2240 \text{ J/kg. K}$$

$$C_{P_{paraffine-Liquide}} = 1900 \text{ J/kg. K}$$

$$C_{P_{silice}} = 350 \text{ J/kg. K}$$

$$C_{P_{silice}} = 720 \text{ J/kg. K}$$

$$C_{P_{comp}} = \frac{m_{pa} \times C_{P_{pa}} + m_{Si} \times C_{P_{Si}} + m_{Gr} \times C_{P_{Gr}}}{m_{pa} + m_{Si} + m_{Gr}} \quad (\text{V. 1})$$

La paraffine à l'état solide

$$C_{P_{comp}} = \frac{m_{pa} \times C_{P_{pas}} + m_{Si} \times C_{P_{Si}} + m_{Gr} \times C_{P_{Gr}}}{m_{pa} + m_{Si} + m_{Gr}} \quad (\text{V. 2})$$

$$C_{P_{comp}} = \frac{4,86 \times 2240 + 4,32 \times 350 + 1,62 \times 720}{4,86 + 4,32 + 1,62}$$

$$C_{P_{comp}} = 1256 \text{ J/kg. K}$$

La paraffine à l'état liquide

$$C_{P_{comp}} = \frac{m_{pa} \times C_{P_{pal}} + m_{Si} \times C_{P_{Si}} + m_{Gr} \times C_{P_{Gr}}}{m_{pa} + m_{Si} + m_{Gr}} \quad (\text{V. 3})$$

$$C_{P_{comp}} = \frac{4,86 \times 1900 + 4,32 \times 350 + 1,62 \times 720}{4,86 + 4,32 + 1,62}$$

$$C_{P_{comp}} = 1103 \text{ J/ kg. K}$$

Calcul du rayonnement

Rayonnement solaire journalier moyen est donné par un site (PVGIS)

Estimation des profils moyens journaliers.

Résultats donnés pour le mois d'Octobre.

Base de données de radiation solaire employée: PVGIS-CMSAF

Inclinaison du panneau: 0 degré.

Orientation (azimut) du panneau: 0 degré.

Heure	Rayonnement global G_c ($\frac{W}{m^2}$)
06:52	55
07:07	92
07:22	134
07:37	180
07:52	228
08:07	276
08:22	324
08:37	370
08:52	415

09:07	458
09:22	499
09:37	537
09:52	571
10:07	603
10:22	631
10:37	655
10:52	675
11:07	692
11:22	704
11:37	712
11:52	716
12:07	716
12:22	712
12:37	704
12:52	692
13:07	675
13:22	655
13:37	631
13:52	603
14:07	571
14:22	537
14:37	499
14:52	458
15:07	415
15:22	370
15:37	324
15:52	276
16:07	228
16:22	180
16:37	134
16:52	47
17:07	35

Gc Rayonnement global ciel clair sur un plan fixe W/m^2

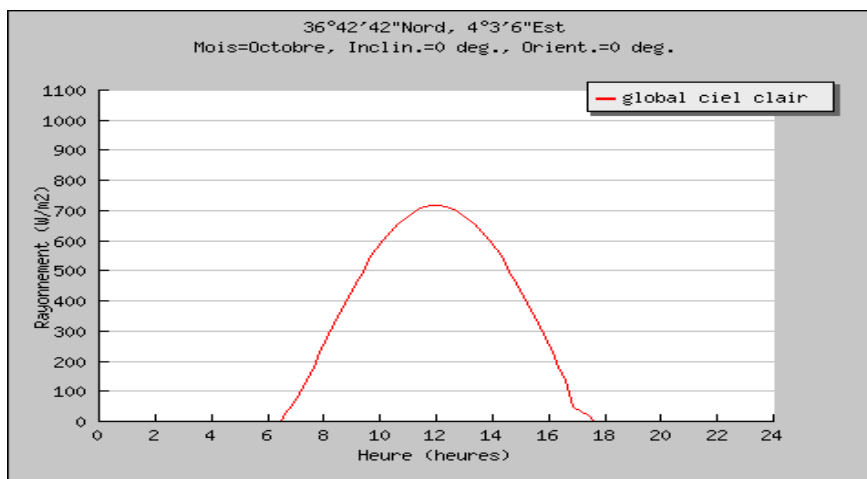


Figure V8 : Courbe du rayonnement global pour un ciel clair

Rayonnement global par mètre carré de capteur

Sachant que l'expérience s'est déroulée entre 11h et 14h, nous ne prendrons que les valeurs qui sont dans cet intervalle de temps.

$$11\text{h: } 00 \quad \frac{(692+704+712+716)}{4} \times 3600 = 2541600 \text{ J/m}^2$$

$$12\text{h: } 00 \quad \frac{(716+716+704+692)}{4} \times 3600 = 2545200 \text{ J/m}^2$$

$$13\text{h: } 00 \quad \frac{(675+655+631+603)}{4} \times 3600 = 2307600 \text{ J/m}^2$$

$$14\text{h: } 00 \quad \frac{(571+537+499+458)}{4} \times 3600 = 1858500 \text{ J/m}^2$$

$$E_{Ray} = \sum (\text{intensités moyennes} \times 3600) \quad (\text{V. 4})$$

$$E_{Ray} = 2541600 + 2545200 + 2307600 + 1858500$$

$$E_{Ray \text{ soleil}} = 9252900 \text{ J/m}^2$$

Le rayonnement reçu par la surface étudiée :

Surface des réflecteurs

$$S_1 = (0,73 \times 0,70) = 0,511 \text{ m}^2$$

$$S_2 = (0,73 \times 0,70) = 0,511 \text{ m}^2$$

$$S_3 = (0,7 \times 0,7) = 0,49 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{réflecteurs}} = \sin 20 (S_1 + S_2 + S_3) \quad (\text{V. 5})$$

$$S_{\text{réflecteurs}} = [(0,73 \times 0,70) + (0,73 \times 0,70) + (0,7 \times 0,7)] \sin 20$$

$$S_{\text{réflecteurs}} = 0,51 \text{ m}^2$$

Avec

$$S_{\text{réflecteurs}} \quad \text{Surface des réflecteurs} \quad (\text{m}^2)$$

Surface des cannettes

$$S_{\text{cannettes}} = \frac{\pi d_{\text{cannette}} L_{\text{cannette}}}{2} \times n_{\text{cannettes}} \quad (\text{V. 6})$$

$$S_{\text{cannettes}} = \frac{0,052 \times 3,14 \times 0,132}{2} \times 18$$

$$S_{\text{cannettes}} = 0,19 \text{ m}^2$$

Avec

$$S_{\text{cannettes}} \quad \text{Surface totale d'un seul élément} \quad (\text{m}^2)$$

$n_{cannettes}$ Nombre de cannettes
 $d_{cannette}$ Diamètre d'une seule cannette (m)

Rayonnement renvoyé par les réflecteurs sur les cannettes

$$Ray_{refle-soleil} = \frac{ERay_{soleil} \times S_{reflecteurs}}{1m^2} \times coef_{reflexion} \quad (V.7)$$

$$Ray_{refle-soleil} = \frac{9252900 \times 0,51}{1} \times 0,9$$

$$Ray_{refle-soleil} = 4718979 J/m^2$$

Le rayonnement issu des réflecteurs

$$RAY_{can-reflecteur} = S_{cannettes} \times Ray_{reflecteurs} \quad (V.8)$$

$$RAY_{can-reflecteur} = 0,19 \times 4718979$$

$$RAY_{can-reflecteur} = 896606.01 J$$

Le rayonnement issu du soleil et reçu par les cannettes

$$RAY_{can-soleil} = RAY_{soleil} \times S_{cannettes} \quad (V.9)$$

$$RAY_{can-soleil} = 9252900 \times 0,19$$

$$RAY_{can-soleil} = 1758051 J$$

Le rayonnement total reçu par la surface étudiée

$$RAY_{TOTAL} = RAY_{can-soleil} + RAY_{can-reflecteur} \quad (V.10)$$

$$RAY_{TOTAL} = 896606.01 + 1758051$$

$$RAY_{TOTAL} = 2654657,01 J$$

Charge thermique du composite

Compartment avec ailettes

Pour calculer l'énergie stockée par le composite (paraffine, silice, graphite), nous avons utilisé l'équation de l'enthalpie totale suivante :

$$E_{comp} = [m C_{ps} \Delta T + m L_f + m C_{pl} \Delta T] \quad (V.11)$$

$$E_{comp} = [5,4 \times 1256 (55 - 25,5)] + [5,4 \times 158,92 \cdot 10^3] [5,4 \times 1103 \times (61,72 - 58)]$$

$$E_{comp} = 1080405,864 J$$

La quantité d'énergie reçue par l'eau :

$$E_{eau} = m C_{p_{eau}} \Delta T \quad (V.12)$$

$$E_{eau} = 10 \times 4180 (50 - 25,5)$$

$$E_{eau} = 1024100 J$$

On a :

$$E_{Ray} = E_{eau} + E_{comp} + E_{pertes} \quad (\text{V. 13})$$

$$E_{pertes} = E_{RAYTOTALE} - (E_{comp} + E_{eau})$$

$$E_{pertes} = 2654657,01 - (1080405,864 + 1024100)$$

$$E_{pertes} = 550151,146 J$$

$$\frac{E_{pertes}}{E_{Ray}} \times 100 = \frac{550151,146}{2654657,01} \times 100 = 20 \%$$

$$E_{pertes} = 20 \%$$

Compartiment sans ailettes

$$E_{comp} = [m C_{ps} \Delta T + m L_f + m C_{pl} \Delta T] \quad (\text{V. 14})$$

$$E_{comp} = [5,4 \times 1256 (55 - 25)] + [5,4 \times 158,92 \times 10^3] +$$

$$E_{comp} = 1061640 J$$

Quantité d'énergie reçue par l'eau

$$E_{eau} = m C_{p_{eau}} \Delta T \quad (\text{V. 15})$$

$$E_{eau} = 10 \times 4180 (46,97-25)$$

$$E_{eau} = 918346 J$$

$$E_{Ray} = E_{eau} + E_{comp} + E_{pertes} \quad (\text{V. 16})$$

$$E_{pertes} = E_{RAYTOTALE} - (E_{comp} + E_{eau})$$

$$E_{pertes} = 2654657,01 - (1061640 + 918346)$$

$$E_{pertes} = 674671,01 J$$

$$\frac{E_{pertes}}{E_{RAYTOTAL}} \times 100 = \frac{674671,01}{2654657,01} \times 100 = 25\%$$

$$E_{pertes} = 25\%$$

Décharge thermique du composite

Compartiment avec ailettes

$$E_{comp} = [m C_{ps} \Delta T + m L_f] \quad (\text{V. 17})$$

$$E_{comp} = [5,4 \times 1256 \times (55 - 39) + 5,4 \times 158,92 \times 10^3]$$

$$E_{comp} = 966686,4 J$$

L'énergie reçue par l'eau

$$E_{eau} = m C_{p_{eau}} \Delta T \quad (\text{V. 18})$$

$$E_{eau} = 15 \times 4180(37 - 26)$$

$$E_{eau} = 689700 \text{ J}$$

$$E_{pertes} = E_{comp} - E_{eau} \quad (\text{V. 19})$$

$$E_{pertes} = 966686,4 - 689700$$

$$E_{pertes} = 276986,4 \text{ J}$$

$$\frac{E_{pertes}}{E_{comp}} \times 100 = \frac{276986,4}{966686,4} \times 100 = 28\%$$

$$E_{pertes} = 28\%$$

Le rendement de l'échangeur**Compartiment avec ailettes**

$$\eta = \frac{E_{comp} + E_{eau}}{E_{Ray}} \times 100 \quad (\text{V. 20})$$

$$\eta = \frac{1080405,864 + 1024100}{2654657,01} \times 100$$

$$\eta = 79\%$$

Compartiment sans ailettes

$$\eta = \frac{E_{comp} + E_{eau}}{E_{Ray}} \times 100 \quad (\text{V. 21})$$

$$\eta = \frac{1061640 + 918346}{2654657,01} \times 100$$

$$\eta = 75\%$$

V.4. Conclusion

D'après les calculs de l'énergie générée par le montage expérimental, nous constatons une variation de température estimée à 25 °C pour le compartiment avec ailettes et de 21°C pour celui du compartiment sans ailettes. L'énergie stockée dans le compartiment avec ailettes est estimée à 1080405 *J* et celle du compartiment sans ailettes 1061 640 *J* . Cette différence est due au rôle important joué par les ailettes pour améliorer le transfert de chaleur par l'augmentation de la surface d'échange.

La quantité d'énergie perdue est très faible par rapport au celle reçu par l'eau et le composite.

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 (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 résultats du CT mètre ont montré que l'ajout du graphite améliore la conductivité thermique du composite.
- Les ailettes contribue a augmenté la surface d'échange ce qui est prouvé dans les bilans thermiques.
- La paraffine a été bien retenu dans le gel de silice utilisé comme support de stockage pour avoir une viscosité plus grande (composite sous forme d'une patte)
- La composition (MCP, Silice, Graphite) d'ont la température de début de fusion est de 55°C avec une chaleur latente de 158,92kJ /kg est approprié pour le choix des applications de stockage d'énergie.

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 nous avons utilisé des ailettes sous la forme hélicoïdales. En utilisant d'autre forme d'ailette comme par exemple sous la forme horizontale permettra l'augmentation de la surface d'échange et la diminution de la distance caractéristique de solidification.

En ajoutant d'autre compartiments (tubes) à notre échangeur permettra d'augmenter la surface d'échange. Cette technique permet de multiplier les passages du fluide caloporteur dans le MCP et ainsi maximiser l'échange.

Notre MCP pourraient être une bonne solution pour augmenter l'inertie des bâtiments notamment pour les maisons en bois dont la faible inertie pose des problèmes.

Références bibliographiques

- [1] J. M Chasseriau, « conversion thermique du rayonnement solaire » Dunod 1984.
- [2] S. Saadi, « effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan ». Mémoire de magister en physique ; université Constantine 2012.
- [3] Ahmed Habib Khedim « L'énergie solaire et son utilisation sous sa forme thermique et photovoltaïque » ANEP ?2005. PP 104-125.
- [4] A. A. SFEIR G GUARRACINO « Ingénierie des systèmes solaires » Ed techniques et documentation paris 1981.
- [5] M. Capdrou, Atlas solaire de l'Algérie, tom 1, vol.1 et 2 OPU, 1987.
- [6] J. A Duffie and W. A BECKMAN. Solar energy thermal process; 2nd edition, Wiley Interscience, 1974.
- [7] A. Mefti; M, Y, Bouaroubi; H Mimouni. « Evaluation du potentiel énergétique solaire », bulletin des énergies renouvelables, N⁰², P12, décembre 2002.
- [8] ANDRE Bontemp, Alain GARRIQUE, Charles GOUBIER, Jaques HUETZ, Christophe MARVILLET, Pierre MERCIER, Roland VIDIE, « description des échangeurs » technique de l'ingénieur [B 2 3 4 1].
- [9] S.V PATANKAR .E M SPARROW « Fully developed flow and heat transfer in ducts having stream-wise-periodic variation of cross sectional area» journal of heat transfer VOL.99.P (6-180), 1977.
- [10] C. BOUGRIOU «calcul et technologie des échangeurs» office des publications universitaires ; Alger ; 2012.
- [11] Yves Jannot, TRANSFERTS THERMIQUES. Cours de 2ème année. Ecole des Mines Nancy. 2011
- [12] Jack P Holman-heat transfer Tenth edition (Mc graw-hill series in mechanical engineering) The Mc graw hill companies. Inc (2010).
- [13] Yves Jannot, Christian Moyne «Transferts thermiques » 27 avril 2016
- [14] H. Mehling et L.F Cabeza, Heat and cold storage with PCM, springer-Verlag Berlin Heidelberg ed 2008.
- [15] ABHAT A, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage material. Solar energy, VOL, 30, NO313-332.5(1983).
- [16] SHARMA S.D SAGARAK. "Latent heat storage material and system a review". International journal of green energy 2: 1-56. (2005).

Références bibliographiques

- [17] LANE G.A phase change materials for energy storage nucleation to prevent supercooling. Solar energy materials and solar cells 27:135-160 (1992).
- [18] K. Pielichowska et K Pielichowski «phase change materials for thermal energy storage», progresse in material science, VOL.65, no.0, pp 67-123. Aug 2014.
- [19] M. K Rathod et J. Banerjee; «Thermal stability of phase change material, used in latent heat energy storge systeme»: review, Renwable and sustainable energy Review, Vol 18. Pp 246-258, Feb 2013.
- [20] SAMSA Newsletter «sugar Alcohol based Materials for seasonal storage application» 2015.
- [21] M. M. Farid. A M. Khadhair, S.A Rzack et S. Al Hallaj «A Review on phase change materials and application» Energy conversion and management , Vol 45, no 9-10, pp. 1597-1615 June 2004.
- [22] Amina Akrouche. Mémoire de magister, Etude du stockage et déstockage d'énergie dans les matériaux a changement de phase, Ecole des mines de Nantes 29/10/2011.
- [23] R. Velraj, R. V Seeniraj, B. Hafner, C. Faber et K. Schwarzer «Heat transfer enhancement in latent heat storage systeme». Sol. Energy. Vol. 65. No 3, pp 171-180 Feb 1999.
- [24] Adele Soupart-Caron. Stockage de chaleur dans les materiaux a changement de phase. Genie des procedes. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. <NNT : 2015GREAI078>. <tel-01266813>
- [25] Matthieu Martinelli. Stockage d'energie thermique par changement de phase – Application aux réseaux de chaleur. Thermique [physics.class-ph]. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. <tel-01412771v2>
- [26] Sadok BEN JABRALAH ; Matériaux a changement de phase [physique-énergétique .class-ph].Université tunis,Tunisie.[sadok.jabralah@fsb.rnu.tn].
- [27] www.CDER.com (Centre de développement des énergies renouvelables)
- [28] www.Nasa.com