

Université Mouloud MAMMERI - Tizi-Ouzou
Faculté du génie de la construction
Département de génie mécanique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de master
professionnel en génie mécanique

Option Froid, Chauffage & Climatisation

Thème

Etude et réalisation d'un capteur solaire sans vitrage

Proposé et dirigé par :
Mr : S. MAKHLOUF

Réalisé par:
Mr.: DJEMAI Farinas

Promotion 2017/2018

Remerciements

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

Un grand remerciement pour ma petite famille ; mes parents, Madjid et Farhat qui ont une grande part de la réalisation de mon projet grâce à leur soutien financier.

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 mon frère Farhat qui nous a ouvert les portes de son atelier, et ces ouvriers 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

Nulle œuvre n'est exaltante que celle réalisée avec le soutien moral et financier des personnes qui nous sont proches.

Je tiens à exprimer ma plus profonde reconnaissance à :

-Mes parents qui ont œuvré pour ma réussite, de part leur amour, leur sacrifices consentis, pour toutes leur assistance et leur présence dans ma vie, qu'ils reçoivent à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

-Mes frères et ma sœur: Madjid, Ferhat, Sofiane et Tinhinane qui m'ont toujours entouré et motivé sans cesse de devenir meilleur.

-Mon professeur encadreur Mr S.MAKHLOUF pour son aide et sa précieuse intention.

-Tous mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

-Tous mes amis et amies avec qui j'ai partagé une grande part de ma vie.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I- 1: La sphère céleste	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 2: Coordonnées géographiques terrestre [1]	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 3 : Mouvement du globe terrestre	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 4: Vue du soleil [2].....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 5: Structure du soleil [3].....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 6 : Coordonnées horizontales	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 7: Les coordonnées horizontales [4]	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 8: Coordonnées horizontales [6].	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 9 : Angle incident [6].	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 10 : Rayonnement solaire.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 11 : Le rayonnement extraterrestre en fonction des jours	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 12 : répartition spectrale du rayonnement [17]	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 13 : Répartition spectrale du rayonnement solaire [3]	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 14 : Rayonnement solaire [7].	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 15 : Carte du gisement solaire en Algérie [9].	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre II

Figure II- 1	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 2 : Formule chimique des paraffines (a) n-paraffini (b) iso-paraffiniques.	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 3 : Conditionnement des MCP dans un nodule.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 4 : a) Conditionnement des MCP en sac aluminium, b) en briquette plastique..	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 5 : Microcapsules de paraffine [14].	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 6 : Echangeur tubes et calandre baigné dans un MCP (a) simple(b) avec ailettes [18].	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 7 : Types d'ailettes et schémas associés [22].....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 8 : Anneaux de Lessing [19]	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 9 : Représentation graphique d'un changement de phase avec surfusion.....	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre III

Figure III- 1 : a et b : Echangeurs tubulaires	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 4 : Echangeur à micro-canaux	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 2 : Echangeurs à plaques	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 3 : Echangeur à caloducs pour climatisation	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 5 : Echangeurs en graphite.	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 6 : Classement des échangeurs suivant la compacité	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 7 : Disposition des tubes.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 8 : Ailettes longitudinales minces.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 9 : Ailettes sous forme de barres	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 10 : Ailettes transversales	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 11 Ailettes continues ou indépendantes	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 12 : Système actif mis au point par Zalba et al. : a) dispositif expérimental, b) système de stockage d'énergie thermique.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 13 : Système de rafraichissement actif conçu par Turnpenny et al.	Erreur ! Signet non défini.

Figure III- 14 : Principe de fonctionnement du système de rafraichissement conçu par Turnpenny : a) fonctionnement nocturne, b) fonctionnement diurne**Erreur ! Signet non défini.**

Figure III- 15 : concentrateur cylindo-parabolique de la centrale Nevada solar one (USA).
.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure III- 16 : Les cuiseurs solaires à concentration [25].....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure III- 17 : graphe montre les caractéristiques d'une parabole.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure III- 18: Graphe d'une parabole d'équation $y = x^2$ **Erreur ! Signet non défini.**

Figure III- 19 : Angle d'ouverture de la parabole en fonction de f **Erreur ! Signet non défini.**

Figure III- 20 : Angle d'ouverture d'une parabole en fonction de la distance focale [8] ... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure III- 21: Réflexion des rayons solaires sur une parabole parfaite«Obtenue avec MATLAB »

Figure III- 22 le tube récepteur d'un concentrateur cylindro-parabolique..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure III- 23 : Réflexion des rayonnements solaires sur le tube absorbeur

Erreur ! Signet non défini.

Chapitre IV

Figure IV- 1 : Image des matériaux utilisés pour la préparation du composite**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 2 : poudre de granite.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 3 : Etuve**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 4: poudre de granite.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 6 : Pesée des différents éléments.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 5 : Structure du graphite**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 7 : Emplacement du récipient dans le bain-marie**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 8 : Fabrication des pastilles.**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 9 : la pastille après La compression.**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 10 : le mélange dans le bain marie**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 11 : le moule fabriqué.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 12 : La plaque de dimension $(300*300*9 \text{ mm}^3)$**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 13 : Image globale de l'unité de mesure de la conductivité thermique..**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 14 : support cylindro-parabolique**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 15 cadre de la structure de basse**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 16 : les supports pour fixer les tubes au foyer.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 17: préparation de la tôle**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 18: montage de la tôle**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 19: Canette avec et sans le couvercle (vue de dessus).**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 20 Figure IV.21 : Cannelle avant et après perçage. (Vue de dessous)...**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 21 Figure IV.23: Collage des cannettes**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 22: Le mastic de silicone**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 23: les tubes à canettes**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 24: peindre les canettes en noir matte**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 25: les tubes et les coudes en cuivre de diamètre $d=12\text{mm}$ **Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 26:les ailettes à basse des feuilles de cuivre.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 27: tuyau avec des ailettes en cuivre**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 29: montage fini de capteur**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 28: l'assemblage des deux tubes**Erreur ! Signet non défini.**
 Figure IV- 30 : Thermocouple couple de type K**Erreur ! Signet non défini.**
 Figure IV- 32: schéma d'acquisition de donnée avec thermocouple**Erreur ! Signet non défini.**
 Figure IV- 31: Pico Technology Enregistreur de données, Température **Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre V

Figure V- 1 Evolution de la température en fonction du temps à déferents..... **Erreur ! Signet non défini.**
 Figure V- 2 Evolution de la température en fonction du temps à déferents..... **Erreur ! Signet non défini.**
 Figure V- 3 Evolution de la température en fonction du temps à déferents..... **Erreur ! Signet non défini.**
 Figure IV- 4 courbe du rayonnement global pour un ciel clair**Erreur ! Signet non défini.**

Sommaire

Chapitre I

I.1 : Introduction:	2
I.2 : La sphère céleste :	2
I.3 : Coordonnées géographiques terrestres	3
I.3.1. Altitude h :	3
I.3.2. Longitude α :	3
I.3.3. Latitude φ :	3
I.4. Mouvement du Globe terrestre	3
I.5. Le soleil	4
I.6. Structure solaire :	5
I.7. Position du soleil [4,5]	6
I.8. Coordonnées horaire :	6
I.8.1. La déclinaison du soleil δ	6
I.8.2. Angle horaire du soleil (ω , H)	6
I.9 : Coordonnées horizontale	7
I.9.1. La hauteur du soleil (h) :	8
I.9.2. L'azimut (a) :	8
I.9.3. Angle zénithal θ_z ;	8
I.9.4. Angle incident	9
I.10. Rayonnement solaire [7]	9
I.10.1. Rayonnement extraterrestre (hors atmosphère)	10
I.10.2. Rayonnement solaire en atmosphère terrestre [16].	11
I.11. Irradiation solaire	12
I.12. Durée d'insolation	12
I.13. Rayonnement solaire arrivant au sol	12
I.13.1. Rayonnement direct	12
I.13.2. Rayonnement diffus :	13
I.13.3. Rayonnement réfléchi	13
I.13.4. Rayonnement global	13
I.14. Estimation du rayonnement solaire :	13
I.14.1. Estimation du rayonnement solaire instantané sur une surface inclinée :	13

I.14.2. Rayonnement direct sur une surface inclinée :	13
I.14.3. Rayonnement diffus sur une surface inclinée :	14
I.14.4. Rayonnement provenant de la réflexion :	14
I.14.5. Rayonnement global sur la surface inclinée :	14
I.15. Le rayonnement solaire en Algérie :	15
Conclusion :	17

Chapitre II

II.1 : Introduction :	18
II.2 : Différentes formes de stockage de l'énergie thermique :	18
II.2.1. Transfert thermique par chaleur sensible (CS) :	18
II.2.2 : Transfert thermique par chaleur latente (CL):	19
II.3:Densité :	20
II.4:Compacité :	21
II.5: Matériaux à changement de phase :	22
II.5.1: Les MCP idéal et ces caractéristiques :[10].....	22
a) Critères thermodynamiques :	22
b) Critères cinématiques :	22
c) Critères chimiques:	23
d) Critères économiques :	23
II.5.2 :Classification des matériaux à changement de phase :	23
II.5.2.1 : Les MCP organiques :	23
II.5.2.1.3.1 : Acides gras	27
II.5.2.1.3.2 : Alcools de sucre	28
II.5.2.2 : Les MCP inorganiques.....	28
II.5.2.2.1 : Les sels hydratés :	29
II.5.2.2.2 : Eutectiques	30
Avantages et inconvénients	30
II.5.3 : Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique : ..	31
II.5.3.1 : La macro-encapsulation [14]	31
II.5.3.2: La micro-encapsulation [14]	32
II.6: Augmentation de la surface d'échange	32
II.6.1: Faisceau de tube	32
II.6.2: Les ailettes [11].....	33
II.7: Amélioration de la conductivité globale du MCP :	34

II.7.1: Les structures métalliques :	34
II.7.2: Matrices métalliques :	34
II.7.3: Mousse métallique.....	35
II.7.4: Les nanoparticules [19]	35
II.8: Les phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage	35
II.8.1: La ségrégation de phase.....	35
II.8.2: La surfusion : sous-refroidissement	35
II.8.3: La surchauffe [24].....	36
II.8.4: La dilatation	36
II.9: Conclusion :	37

Chapitre III

III.1) Introduction	38
III-2) Définition [21]	38
III-3) Modes de transfert de chaleur [22]	38
III-3.1) Transfert de chaleur par conduction.....	38
III.3.2) Transfert de chaleur par convection.....	39
III.3.3) Rayonnement.....	39
III.4) Critères de classement des échangeurs de chaleur : [21]	40
III.4.1) Classement technologique	40
III.4.2) Classement suivant le mode de transfert de chaleur	41
III.4.3) Classement suivant le procédé de transfert de chaleur	42
III.4.4) Classement fonctionnel	42
III.4.5) Classement suivant la compacité de l'échangeur [21]	42
III.5) Principales caractéristiques des échangeurs [23]	43
III.6) Echangeur compact	44
III.9.1.2) Les ailettes [23]	46
III.9.1.2.1) Différents types d'ailettes :	46
III.10) Quelque système d'échangeurs Air MCP : [24].....	48
III.10.1) Le système de Zalba el al.	48
II.10.2) Le système de HedBellander :	48
III.10.3) Le système Turnpenny et al.....	49
a) Type parabolique :	51
b) Cylindro-parabolique :	52
b) Type sphérique :	52
d) Type à panneaux:	52

III.11.3.1 Définition :	53
III.11.3.2 Equation de la parabole :	53
III.11.3.3 Equation réduite d'une parabole :	54
III.11.3 Système optique d'une surface parabolique	57
III.11.4 Facteurs Optiques : [27].....	58
III.11.5. Les composants d'un concentrateur solaire parabolique :.....	58
III.11.5.1.La structure métallique	58
III.11.5.2.Le tube collecteur (l'absorbeur)	59
III.11.6 Taux de concentration.....	60

CHAPITRE IV

IV.1 Introduction :.....	61
IV.2 Elaboration du MCP	61
Préparation de la poudre de granite:	62
IV.3 : Réalisation de l'échangeur :	70
IV.3.3.1 Les quantités du matériau utilisées :	73
IV.3.3.2 : La surface d'échange de la canette :	74
IV.3.3.3 : Assemblage des cannetes	75
IV.4. Mesure de la température des éléments de l'échangeur	79

Chapitre V

V.1. Résultats de mesure de la conductivité thermique :	81
V.2. Résultats des tests effectués sur l'échangeur.....	82
V.2.1.Période de stockage de l'énergie thermique.	82
V.2.2.Période de déstockage de l'énergie thermique.....	84
V.2.1.Période de l'absence de rayonnement solaire.....	85
V.3.Calcul de débit	87
V.4.Bilan thermique	87
V.4.1.Calcul de la chaleur spécifique du composite :.....	87
V.4.2.Calcul de rayonnement	89
V.4.2.1.Rayonnement global par mètre carré de capteur :.....	90
V.4.2.2.Rayonnement reçu par la surface étudiée	90
V.4.2.3 Rayonnement envoyé par les réflecteurs sur les cannetes :	91
V.4.2.4. Le rayonnement issu du réflecteur :	91
V.4.2.5.Le rayonnement issu du soleil et reçu par les cannetes :	91
V.4.2.6.Le rayonnement total reçu par la surface étudié :	91

<i>V.4.3.Charge thermique de composite</i>	<i>92</i>
<i>V.4.3.1. La quantité d'énergie reçue par l'eau :.....</i>	<i>92</i>
<i>V.4.4.1. La quantité d'énergie reçue par l'eau :.....</i>	<i>92</i>
<i>V.4.5.Le rendement de l'échangeur</i>	<i>93</i>
<i>Conclusion général</i>	<i>96</i>

Introduction

Les énergies renouvelables sont des productions qui dépendent des conditions climatiques, ces dernières ne sont pas contrôlables puisque elles ne sont pas constantes.

La question qui se pose : comment profiter du temps limité pour récupérer le maximum d'énergie pendant la journée et comment faire lors de l'absence de ces conditions (la nuit).

L'énergie solaire peut être transformée en chaleur, mais à basse température, en utilisant des capteurs plans pour une absorption par une surface sélective et l'effet de serre créée par le vitrage, mais ces capteurs ne permettent pas en général de dépasser une température de 100°C.

Pour travailler avec des températures élevées, il faut récupérer le maximum de flux optique incident qui peut se réaliser à l'aide d'un concentrateur solaire, parmi ces concentrateurs, il y a le concentrateur solaire cylindro-parabolique.

Cette géométrie a l'avantage de réfléchir les rayons solaires sur un point ou une droite où on peut placer un absorbeur ce qui nous donne une forte concentration d'énergie ainsi on aura une augmentation très importante de la chaleur.

Après avoir concentré l'énergie solaire sur la surface désirée, on doit trouver un moyen de la stocker afin de la récupérer et l'utiliser dans le temps voulu.

L'étude de ce phénomène n'est pas une nouveauté de nos jours, le stockage de l'énergie et son déstockage sous forme de chaleur a suscité depuis déjà plusieurs décennies, cette méthode se fait à l'aide des matériaux à changement de phase solide-liquide qui existent encore de nos jours, il a beaucoup d'intérêt dans divers domaines scientifiques, un intérêt particulier a été porté à l'étude et au développement des accumulateurs d'énergie par chaleur latente en vue de gérer la demande au chauffage et climatisation.

Son application industrielle nécessite des compromis sur des critères souvent opposés puisque ils ne sont pas rassemblés dans un seul matériau tel que :

La densité énergétique (soit la capacité de stockage par unité de volume et de masse).

La puissance thermique instantanée stockée et/ou délivrée.

La simplicité du procédé.

L'efficacité énergétique.

Notre travail s'appuie sur cet ensemble de considérations. Il concerne l'élaboration et l'étude d'un système de stockage et de déstockage de chaleur à chaleur latente de fusion qui sera appliquée à un capteur solaire équipé d'un concentrateur cylindro-parabolique.

CHAPITRE I

Gisement solaire

I.1 : Introduction :

Chaque seconde, l'énergie produite au cœur du soleil pourra satisfaire nos besoin énergétique durant un million d'année, même avec notre grand besoin d'énergie, le soleil fournit en permanence 10000fois la consommation de l'humanité entière, avec une espérance de vie de plusieurs milliards d'année, il est la source d'énergie la plus durable.

L'exploitation de cette énergie et l'optimisation de sa collecte par tous types de systèmes des capteurs solaires nécessitent une connaissance exacte de la distribution de l'irradiation solaire, qui est fonction de plusieurs paramètres géographiques, météorologiques et astronomiques, sur le lieu d'implantation de ce système.

Ainsi, ce premier chapitre est consacré pour donner des rappels sur l'énergie solaire, les différents paramètres qui influent sur l'intensité du flux solaire reçu au niveau du sol.

I.2 : La sphère céleste :

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense ($1,496.10^8$ km, distance terre-soleil), avec la terre au centre. On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme cela est représenté sur la (figure I-1).

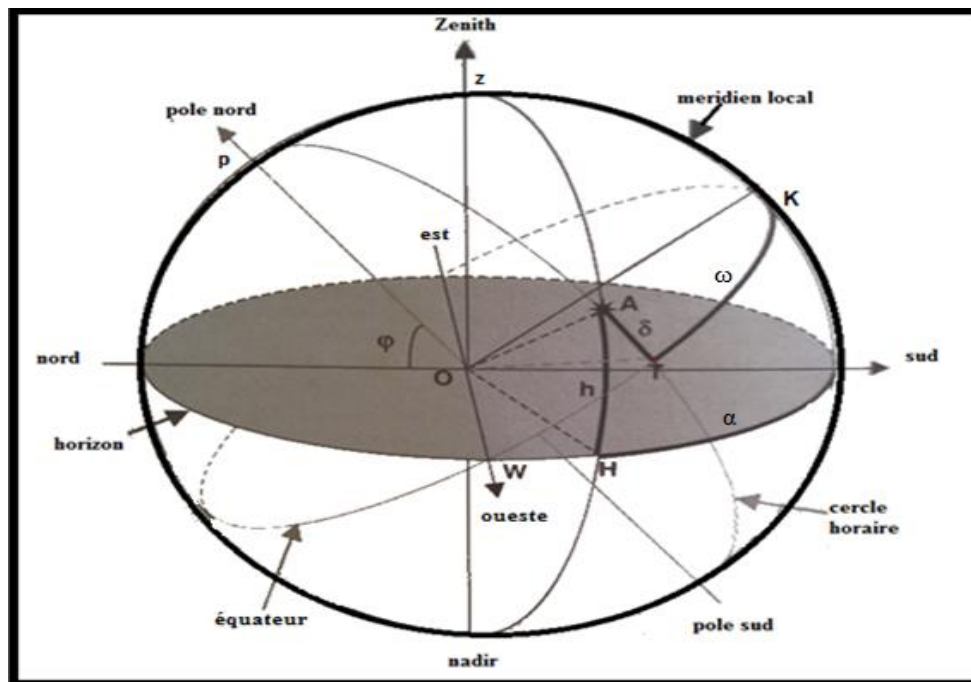


Figure I- 1: La sphère céleste [1]

α : Azimut du soleil.

ω : Angle horaire.

h : Hauteur du soleil.
 φ : La latitude du lieu.

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

I.3 : Coordonnées géographiques terrestres

On repère un point sur la surface de la terre par ces coordonnées :

I.3.1. Altitude h :

L'altitude est l'élévation d'un lieu par rapport au niveau de la mer, mesurée en mètre (m).

I.3.2. Longitude α :

La longitude d'un lieu donné est l'angle formé par le méridien d'origine (méridien de GREENWICH), elle est comptée de 0° à 180° , positivement vers l'Est et négativement vers l'Ouest.

I.3.3. Latitude φ :

Une latitude donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie entre 0° et 90° , positivement vers le pôle Nord et négativement vers le pôle Sud.

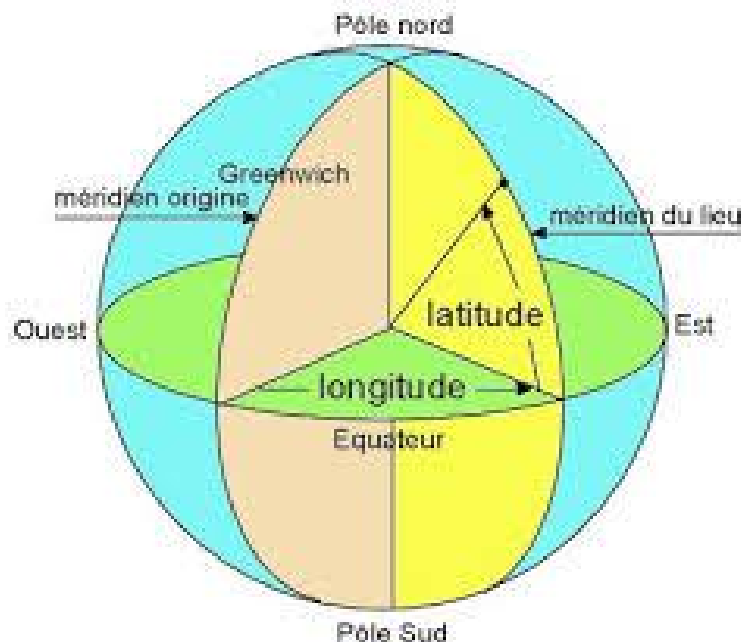


Figure I- 2: Coordonnées géographiques terrestre [1]

I.4. Mouvement du Globe terrestre

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique avec une période de 365.25 Jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21 Décembre) que la

terre est plus proche du soleil, et c'est au solstice d'été (21 Juin) qu'elle en est plus éloignée.

La terre tourne sur elle-même avec une période de 24 h. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace. Il fait un angle $\delta=23.45^\circ$ avec la normale au plan de l'écliptique.

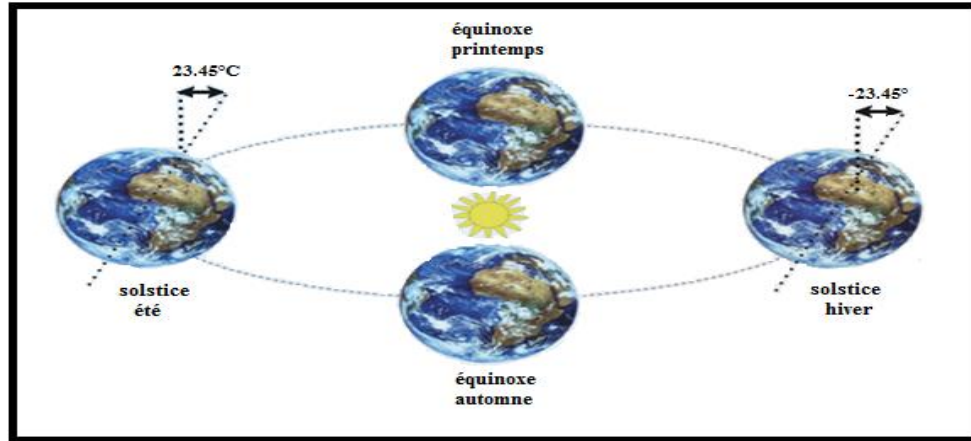


Figure I- 3 : Mouvement du globe terrestre

I.5. 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 2.10^{27} tonnes. Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermonucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium, la différence (4 millions de tonnes) est dissipée sous forme d'énergie ($E = m.C^2$), ce qui représente une énergie totale de 36.10^{22} Kg. La terre étant à une distance de 150.106km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de $1,8.10^{14}$ kW [2].

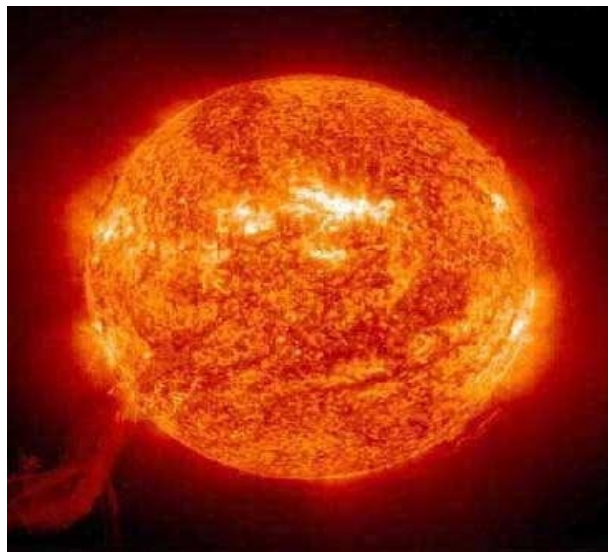


Figure I- 4: Vue du soleil [2]

I.6. 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].

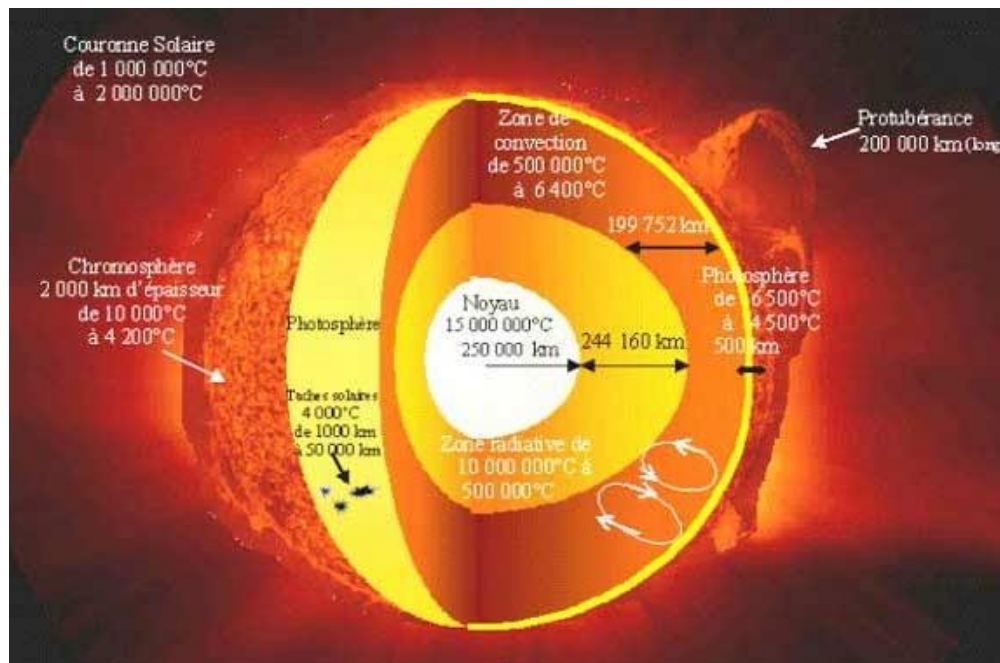


Figure I- 5: Structure du soleil [3]

I.6.1 La photosphère : [3]

La photosphère est une couche opaque, très mince, son épaisseur est d'environ 300 km, elle est responsable de la presque totalité du rayonnement qui nous parvient, c'est la partie visible du soleil. L'ordre de grandeur de la température n'y est plus que de quelques millions de degrés, décroissant très rapidement dans l'épaisseur de la couche jusqu'à une température dite de surface de l'ordre de 4500 km.

I.6.2. La chromosphère et la couronne solaire :

Sont des régions à faible densité ou la matière est très diluées, elles constituent l'atmosphère du soleil. Cette couche est caractérisée par un rayonnement émis très faible, bien

que la température y soit très élevée (un million de degrés).

I.6.3. L'intérieur :

Contient 40 % de la masse du soleil, c'est là où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire. Cette région s'étend sur une épaisseur de 25 104. Cette couche est divisée en trois zones : le noyau, la zone radiative et la zone convective. Le rayonnement émis dans cette partie est totalement absorbé par les couches supérieures. La température atteint plusieurs millions de degrés, et la pression un milliard d'atmosphères.

I.7. Position du soleil [4,5]

La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées :

I.8. Coordonnées horaire :

Les coordonnées horaires sont liées à l'heure de l'observation et n'ont aucune relation avec la position d'un observateur sur la terre. Elles ont comme plan de référence, le plan de l'équateur.

Les coordonnées horaires sont au nombre de deux :

I.8.1. La déclinaison du soleil δ

La déclinaison est l'angle que fait la direction d'observation du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. Elle est exprimée en degrés ($^{\circ}$), minute (m) et seconde (s) d'arc. Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique.

En considérant la déclinaison comme constante sur une journée, l'équation de Kopernic fournit la relation qui relie ces deux grandeurs δ

$$\delta = 23.45 \left[\frac{2\pi(284+d)}{365} \right] \quad (\text{I.1})$$

d : est le numéro du jour de l'année à partir de premier Janvier.

La déclinaison solaire varie de -23.45° au solstice d'hiver à 23.45° au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes, et cette variation entraîne des variations de la hauteur du soleil pour un même site.

I.8.2. Angle horaire du soleil (ω , H)

L'angle horaire étant l'angle ou l'arc sur l'équateur dans le sens rétrograde à partir du plan vertical du lieu passant par le sud jusqu'au plan méridien passant par le centre du soleil. Il mesure la course du soleil dans le ciel. L'angle horaire définit le temps solaire vrai TVS, il est midi TSV si $\omega=0$. il augmente de 15° par heure (un tour de 360° en 24 heures). L'angle horaire $\alpha(^{\circ})$ est donné par la formule suivante :

$$\omega = 15(\text{TVS} - 12) \quad (\text{I.2})$$

TSV : est le temps solaire vrai en heure, se calcule par l'équation suivante :

$$\text{TSV} = \text{TU} + \frac{L}{15} + \text{ET} \quad (\text{I.3})$$

$$\text{ET} = 9.8 \sin(2B) - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (\text{I.4})$$

$$B = \frac{2\pi(n-81)}{365} \quad (\text{I.5})$$

TU : est le temps universel du méridien de GREENWICH (GTM).

ET : équation du temps : exprimé en radians, dépend du numéro du jour de l'année.

L : exprimé en radians, est la longitude

Cette formule n'est pas valable pour les heures de lever et de coucher du soleil, il faut ainsi déterminer l'angle solaire du coucher, et au lever qui dépendent de la déclinaison et de la latitude du lieu :

$$\omega_0 = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (\text{I.6})$$

L'angle solaire au coucher est tout simplement l'opposé de l'angle solaire au lever.

1.9 : Coordonnées horizontales

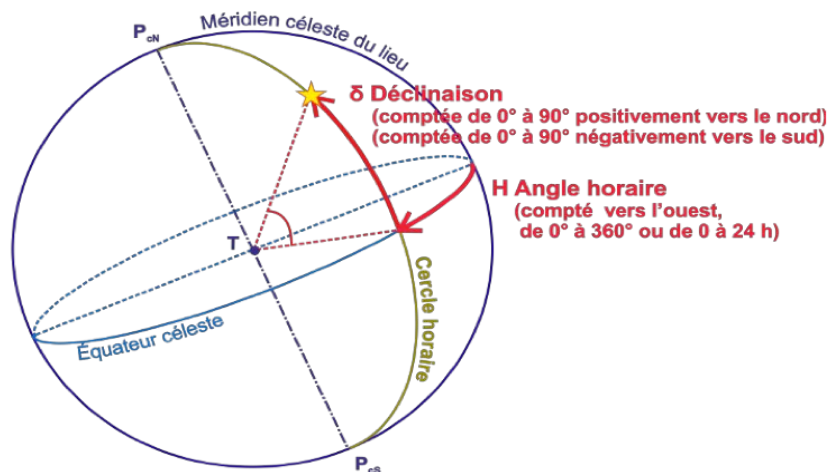


Figure I- 6 : Coordonnées horizontales

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 : [4, 5]

I.9.1. La hauteur du soleil (h) :

La hauteur du soleil est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à 0° au lever et au coucher astronomiques du soleil, sa valeur est maximale à midi, en temps solaire vrai. L'expression de la hauteur du soleil est donnée par :

$$\sin(h) = \sin(\Theta) \sin(\delta) + \cos(\Theta) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (\text{I.7})$$

Θ : Latitude du lieu.

δ : La déclinaison du soleil.

ω : L'angle horaire.

I.9.2. L'azimut (a) :

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le sud. L'azimut est compté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est. Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (\text{I.8})$$

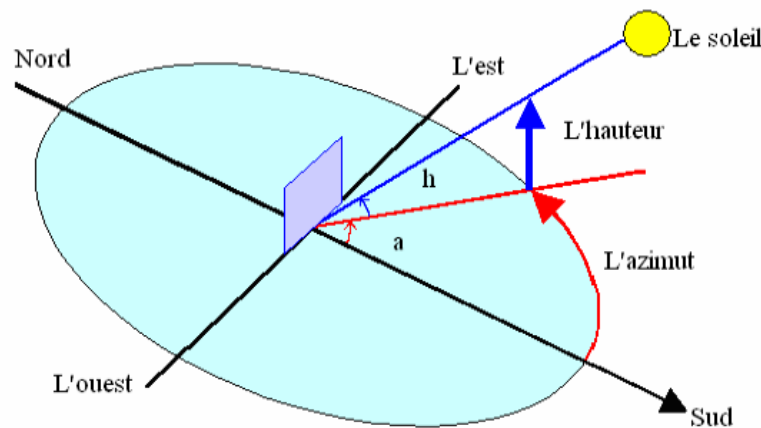


Figure I- 7: Les coordonnées horizontales [4]

I.9.3. Angle zénithal θ_z ;

C'est l'angle entre le zénith local et la ligne joignant l'observateur et le soleil. Il varie de 0 à 19°

$$\cos\theta_z = \cos\delta\cos\omega\cos\varphi + \sin\delta\sin\varphi \quad (\text{I.9})$$

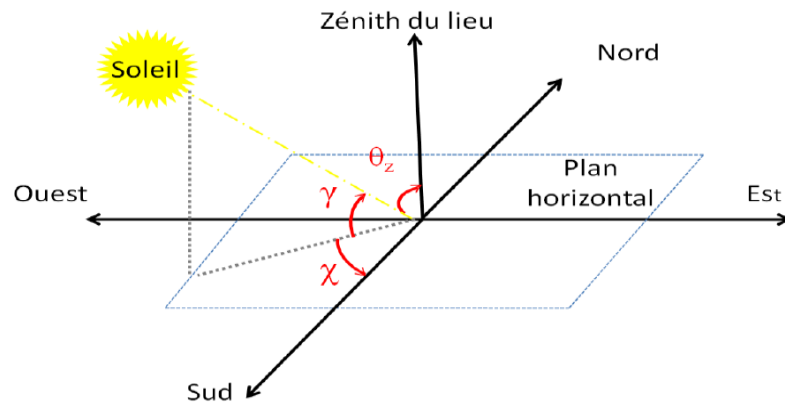


Figure I- 8: Coordonnées horizontales [6].

I.9.4. Angle incident

C'est l'angle formé par la normale du plan et les rayons du soleil.

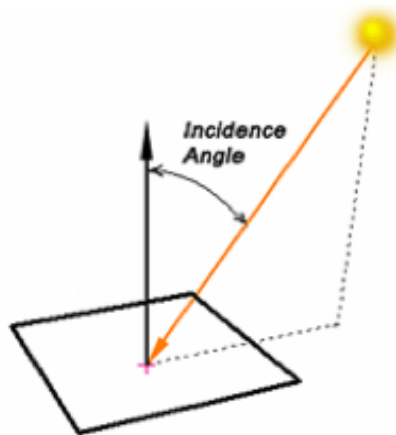


Figure I- 9 : Angle incident [6].

I.10. Rayonnement solaire [7]

Le soleil émet en permanence, dans toutes les directions de l'espace, des rayonnements électromagnétiques composés de « grains » de lumière appelés photons. Ces rayonnements se propagent à la vitesse de la lumière C . Il lui faut donc, en moyenne ; 499 secondes ; soit 8 minutes et 19 secondes, pour que ces rayons atteignent notre atmosphère, l'énergie, E_{ph} , de chaque photon est directement liée à la longueur de l'onde λ .

$$E_{ph} = \frac{h_c}{\lambda} \quad (\text{I.10})$$

Où h est la constante de Planck, $h=6.62.10^{-34}$ J.s.

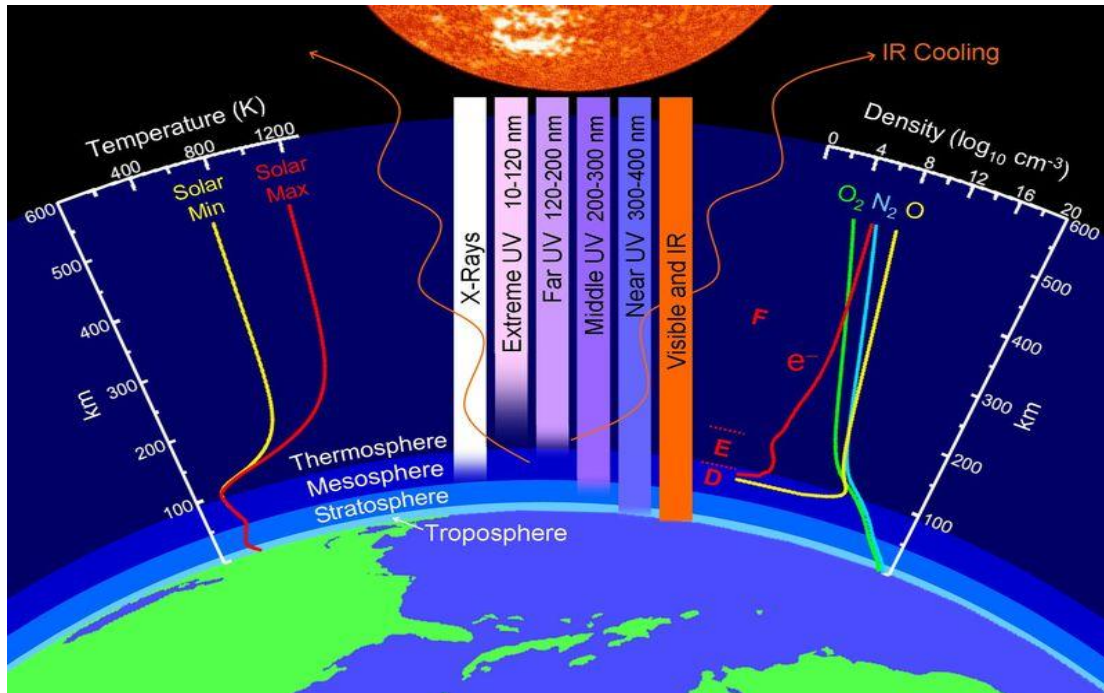


Figure I- 10 : Rayonnement solaire

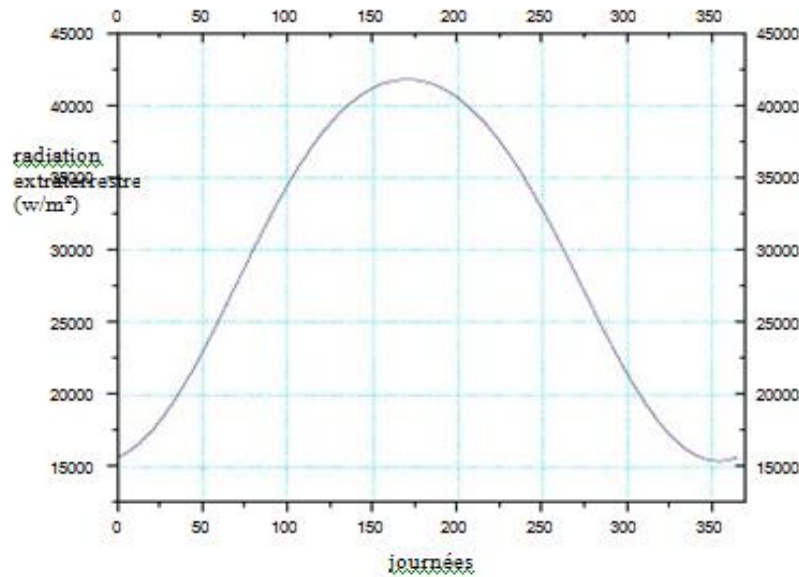
I.10.1. Rayonnement extraterrestre (hors atmosphère)

Le rayonnement solaire extraterrestre couvre un très large domaine de longueurs d'ondes. Il ne dépend d'aucun paramètre météorologique, mais il est fonction de quelques paramètres astronomiques et géographiques tels que : la latitude du lieu (ϕ), la déclinaison solaire (δ), et l'angle horaire au coucher du soleil (ω). Sur une surface horizontale, et pour le jour n , le rayonnement extraterrestre G_0 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jour}^{-1}$) est obtenu à l'aide de l'équation suivante :

$$G_0 = \frac{24 * 60}{\pi} G_{SC} \left[1 + 0.034 \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \omega_0 \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \sin\delta \sin\omega_0 \right] \quad (\text{I. 11})$$

G_{SC} : est la constante solaire égale à $0.0082 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mn}^{-1}$

n : est numéro du jour à partir du premier Janvier.



I.10.2. Rayonnement solaire en atmosphère terrestre [16].

Le rayonnement reçu sur l'atmosphère terrestre n'occupe qu'une faible portion du spectre d'ondes électromagnétiques solaires. Il est caractérisé par des longueurs d'ondes comprises entre 0.2 et 2.5 μm . Il inclut le domaine du visible (ondes lumineuses de 0.4 à 0.8 μm). Les capteurs d'énergie solaire, qui correspondent aux cellules solaires devront donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme d'électrons.

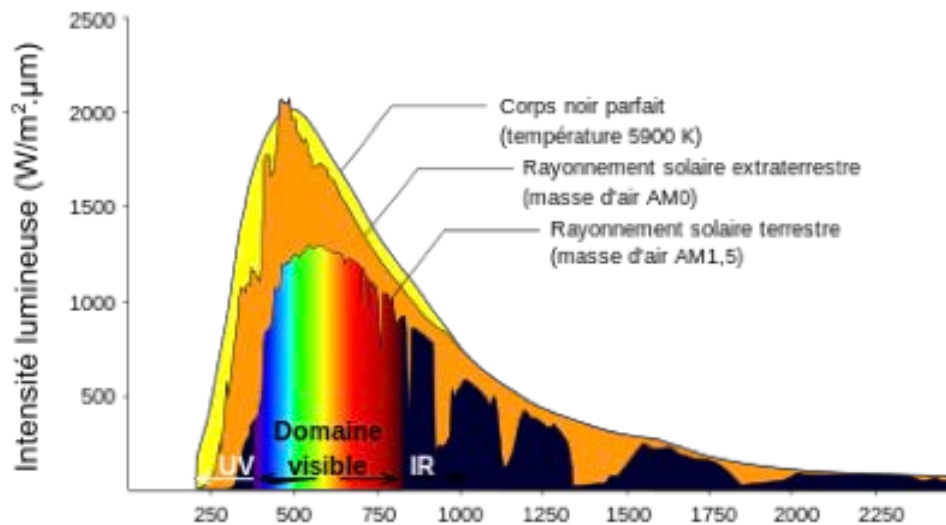


Figure.12 : répartition spectrale du rayonnement [17]

I.11. Irradiation solaire

L'irradiation solaire exprime la quantité d'énergie reçue, au niveau du sol, par unité de surface. Ses unités usuelles sont le J/m^2 , J/cm^2 , Wh/m^2 ou bien kWh/m^2 .

Elle dépend de nombreux facteurs, dont principalement la couverture nuageuse, la durée du jour, l'instant considéré dans la journée, l'orientation et l'inclinaison de la surface, la latitude du lieu, son degré de pollution et la hauteur angulaire du soleil au-dessus de l'horizon.

La combinaison de tous ces paramètres produit la variation dans l'espace et le temps de l'irradiation solaire. Dans les régions du globe comprises entre 40° Nord et Sud, l'énergie globale annuelle reçue par une surface horizontale est comprise entre 1400 et 2500 kWh/m^2 .

I.12. Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond à la durée pendant laquelle le rayonnement solaire direct reçu sur un plan normal dépasse un seuil fixé par la convention à $120W.m^{-2}$. En absence permanente des nuages, la durée de l'insolation est pratiquement égale à la durée du jour, qui s'appelle aussi la durée astronomique ou théorique du jour, elle est définie par :

$$S_0 = \frac{2}{15} \omega_0 \quad (I.13)$$

ω_0 : est égale à l'angle horaire au coucher du soleil(°).

S_0 : la durée du jour(h).

I.13. Rayonnement solaire arrivant au sol

Le calcul et les mesures par satellite montrent que la terre qui est située à environ 150 millions de kilomètres du soleil, reçoit de sa part un rayonnement d'une puissance moyenne de $1361W/m^2$. C'est la puissance reçue par une unité de surface qui serait perpendiculaire aux rayonnements juste au-dessus de l'atmosphère terrestre. En traversant l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est absorbé ou diffusé, on distingue plusieurs composantes :

I.13.1. Rayonnement direct

C'est le rayonnement reçu directement du soleil. C'est ce type de rayonnement qui est utilisé dans le système à concentration (four solaire, centrales solaires thermodynamique et

photovoltaïque).

I.13.2. Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffusé par les différents gaz constituant l'atmosphère, des rayons lumineux issus du Soleil traversent les nuages et se diffusent sur toute la surface de la Terre. Il contribue à l'éclairement mais ne peut pas être concentré (à l'inverse du rayonnement direct).

I.13.3. Rayonnement réfléchi

C'est la partie du rayonnement réfléchi par la Terre appelé aussi albédo.

I.13.4. Rayonnement global

C'est la somme du rayonnement direct et diffus, c'est celui-ci qui est utilisé pour faire fonctionner les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques (système sans concentration).

I.14. Estimation du rayonnement solaire :

I.14.1. Estimation du rayonnement solaire instantané sur une surface inclinée :

Dans la majorité des cas d'application, il est nécessaire de calculer le flux solaire sur des plans d'orientation quelconque.

Pour estimer l'énergie reçue par une surface inclinée à partir de données concernant une surface horizontale, il faut séparer la composante directe et la composante diffuse.

I.14.2. Rayonnement direct sur une surface inclinée :

Connaissant le flux direct sur une surface horizontale H_b , le flux direct sur une surface inclinée H_{bi} est donné par la formule suivante :

$$H_{bi} = R_b H_b \quad (\text{I.14})$$

H_{bi} : flux direct sur une surface inclinée.

R_b : rapport du rayonnement direct journalier sur une surface inclinée à celui sur une surface horizontale, il est donné par l'expression suivante :

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (\text{I.15})$$

I.14.3. Rayonnement diffus sur une surface inclinée :

En admettant que le flux diffus est isotrope, c'est-à-dire uniformément réparti sur la voûte céleste, la valeur du rayonnement diffus est donnée par :

$$H_{di} = H_d F_p \quad (\text{I.16})$$

H_{di} : flux diffus sur une surface inclinée.

F_p : facteur d'angle plan incliné-ciel, il est donné par :

$$F_b = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \quad (\text{I.17})$$

Ce qui donne :

$$H_{di} = \frac{H_d}{2} (1 + \cos \beta) \quad (\text{I.18})$$

I.14.4. Rayonnement provenant de la réflexion :

De même, le flux réfléchi par le sol est isotrope, on a :

$$H_r = H \rho_s F_r \quad (\text{I.19})$$

ρ_s : représente le coefficient de réflexion de la lumière diffus du sol (aussi appelé albédo du sol, valeur fixée à 0,2)

$$F_r = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \quad (\text{I.20})$$

F_r : Facteur d'inclinaison du rayonnement réfléchi.

L'équation H_r devient

$$H_r = H \rho_s \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{I.21})$$

H_r : Flux reçu par une surface inclinée provenant de la réflexion sur le sol.

I.14.5. Rayonnement global sur la surface inclinée :

Connaissant les trois composantes des flux et irradiation, on a finalement :

$$H_t = H_{di} + H_{bi} + H_r \quad (\text{I.22})$$

$$H_t = H_b R_b + H_d \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) + H \rho_s \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{I.23})$$

H_t : rayonnement instantané sur une surface inclinée.

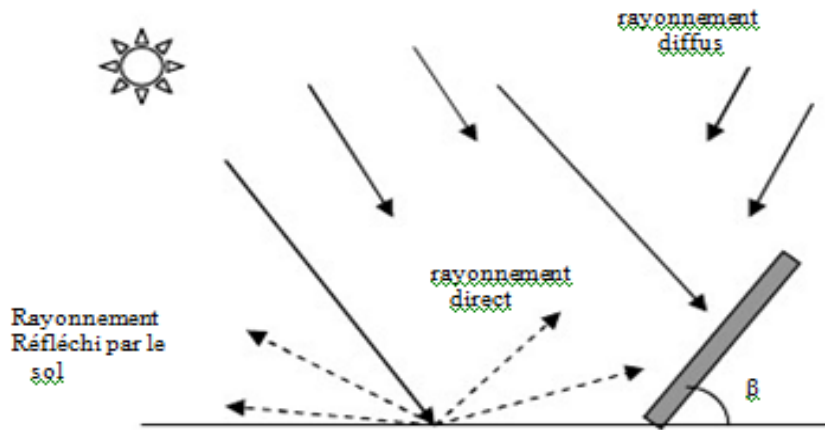


Figure. I.13. Rayonnement solaire [7].

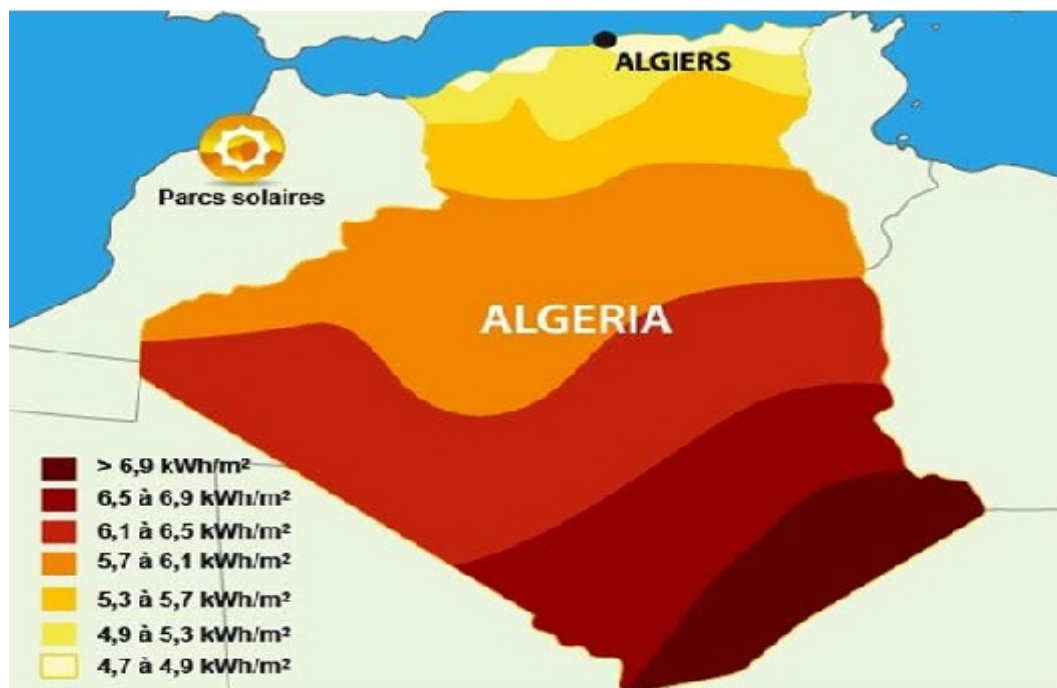
I.15. Le rayonnement solaire en Algérie :

Le Sahara représente environ 87% de la surface globale de l'Algérie, ce qui représente la majeure partie du territoire Algérien, situé entre les latitudes 20° N et 34° N. Ainsi, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires parmi les plus élevés du monde dépassant les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au Sud du pays [5].

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

Tableau I.2. Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [8].

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.



Conclusion :

L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue d'une installation d'un système de captation solaire.

Le rayonnement reçu par un capteur dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil.

Un capteur solaire fixe reçoit le maximum d'énergie lorsqu'il est orienté vers le sud et est incliné selon un angle pratiquement égal à la latitude du lieu. Par exemple les capteurs installés à Constantine sont inclinés de 39° .

Pour que le rayonnement solaire soit perpendiculaire au panneau solaire, et afin d'optimiser tout le système de captation, il est nécessaire de recourir à la technique de poursuite du soleil.

CHAPITRE II

Généralités sur les

matériaux à changement

de phase

II.1 : Introduction :

Tout matériaux capable de changer d'état physique dans une plage de température est appelé Matériaux à changement de phase, ces MCP ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente, cette chaleur est absorbée lors de passage de l'état solide à l'état liquide et peut être perdu lors de passage de l'état liquide à l'état solide, ces deux chemins opposants exploités pour le stockage et le déstockage de l'énergie thermique.

II.2 : Différentes formes de stockage de l'énergie thermique :

Il existe deux formes de stockage de l'énergie thermique suivant les deux types de transfert de chaleur ;

Transfert thermique par chaleur sensible.

Transfert thermique par chaleur latente.

II.2.1. Transfert thermique par chaleur sensible (CS) :

Dans ce cas, la chaleur en question est celle qui échangée sans transition de phase physique, elle est qualifiée de **sensible** parce que ce transfert thermique sans changement de phase change la température du corps, le matériau en question peut stocker ou céder de l'énergie en variant sa propre température.

Mathématiquement la chaleur sensible échangée par un corps qui passe d'une température T1 à une température T2 est donnée par la relation :

$$Q = m C_p (T_1 - T_2) \quad (II.1)$$

Où Q est la chaleur sensible (en J), m est la masse du corps (en Kg), Cp est la chaleur massique du corps (en J / Kg K), T1 et T2 sont les températures initiales et finales du corps (en K).

Exemple : si on prend le Cp de l'eau qui égale à 4186 (J/Kg.K), cette grandeur signifie que pour élever 1Kg d'eau de 1°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 passe de T1 à T2 à pression constante peut être exprimée par la relation :

$$E_{sensible} = \Delta H = H_{final} - H_{initial} = \int_{T_1}^{T_2} m C_p(T) dT \quad (II.2)$$

Si la chaleur spécifique peut être considérée comme constante dans l'intervalle de température entre T1 et T2, (C(T) = Cte=C), la relation devient :

$$\Delta H = m \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2) \quad (II.3)$$

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

On distingue les deux cas suivants :

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

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

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

On peut classer les supports de stockage de chaleur sensible comme suit :

Les supports de stockage liquides (eau, fluide à base d'huile, sel

Les supports de stockage solides (roches, les métaux et autres ...)

Certaines propriétés des substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible sont données dans le tableau 1

Matériaux	Densité Kg/m ³	Chaleur spécifique (J/Kg.K)	Capacité thermique volumique (j/m ³ .K)
Argile	1458	879	1,28
Brique	1800	837	1,51
Grés	2200	712	1,57
Bois	700	2390	1,67
Bêton	2000	880	1,76
Verre	2710	837	2,27
Aluminium	2710	896	2,43
Ferre	7900	452	3,57
Acier	7840	465	3,68
Eau	988	4182	4,17

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

II.2.2 : Transfert thermique par chaleur latente (CL):

La chaleur latente est l'énergie mise en jeu lors des changements d'état de la matière, le stockage par chaleur latente est une solution de stockage thermique qui exploite la chaleur latente d'un matériau à changement de phase (MCP), autrement dit sa capacité à passer de l'état solide à l'état liquide sous l'effet de la chaleur, lorsque le matériau absorbe une quantité de la chaleur suffisante pour réaliser sa transformation, on dit qu'il a atteint sa température de changement de phase, cette chaleur connu sous le nom de chaleur latente de fusion ou de vaporisation selon le

cas, l'énergie de changement de phase absorbée est restituée lors de retour à la phase à la phase initial.

Dans le cas d'un changement de d'état (fusion), la quantité de chaleur mise en jeu se traduit par l'équation :

$$E_{\text{sensible}} = m (h_f - h_i) = m \Delta h_f \quad (\text{J}) \quad (\text{II.4})$$

E_{sensible} : la quantité de chaleur stockée (J/Kg)

m : la masse du matériau (Kg)

Δh_f : enthalpie spécifique (J/Kg)

Dans le cas d'un corps pur chauffé, on a une accumulation d'énergie sensible dans le matériau, cette énergie arrive à un stade qui ne lui permet pas d'augmenter encore plus sa température, donc l'énergie reçue après ce niveau est utilisée pour effectuer un changement de phase, la chaleur est en suite stockée ensuite d'une façon isotherme lors de la fusion du matériau et cela sous forme de chaleur latente, une fois que la matériau se transforme d'une façon complète, la température augmente de nouveau proportionnelle à l'énergie jusqu'à atteindre la température de la source de chaleur, lorsque la température du matériau est égale à la température de la source, il est donc impossible de ne stocker que de la chaleur latente puisque pour arriver il faut changer de phase à nouveau.

La quantité d'énergie stockée dans ce cas peut être exprimée selon l'équation suivante :

$$Q = \int_{T_i}^{T_{fus}} m \cdot C_{p,s} dT + m \cdot \Delta h_{s,L} = \int_{T_i}^{T_{fus}} m C_{p,L} dT \quad (\text{II.5})$$

Q la quantité d'énergie stockée. (j/Kg)

m la masse du matériau. (Kg)

$C_{p,s}$ la chaleur spécifique à l'état solide. (j/Kg.K)

$C_{p,l}$ la chaleur spécifique à l'état liquide. (j/Kg.K)

Δh_{s-L} l'enthalpie spécifique (solide-liquide).

Les matériau qui ont la particularité de transition solide-solide, solide-liquide, liquide-gaz peuvent être employer dans le stockage thermique latent et sont connu sous le nom des matériau à changement de phase, la quantité d'énergie mise en jeu dans ce phénomène est beaucoup plus importante que celle intervenant lors de transfert sensible, il est envisageable grave au transfert latent de stocker beaucoup plus d'énergie dans un volume beaucoup plus réduit (compacité), ou bien augmenter la quantité d'énergie contenue dans un volume de stockage ou ce qu'on appelle la Densité énergétique.

II.3:Densité :

Dans les applications de stockage de l'énergie, la densité énergétique fait référence soit à la densité d'énergie massique soit volumique. Plus la densité d'énergie est élevée, plus il a d'énergie qui peut être stockée ou transportée pour un volume ou une masse donnée.

Exemple :

L'énergie E_{30-70} accumulée par 1 m^3 de ce MCP entre 30°C et 70°C vaut :

$$E_{MCP} = V_S \cdot \rho_{Solide} \cdot C_{P,MCP,solide} \cdot \Delta T + V_S \cdot \rho_{Solide} \cdot L_f + V_l \cdot \rho_{Liquide} C_{p,MCP,liquide} \cdot \Delta T \quad (\text{II. 6})$$

$$E_{MCP} = [1 \cdot 1392 \cdot 3.31 \cdot 10^3 \cdot (55-30)] + [1 \cdot 1392 \cdot 242.85 \cdot 10^3] + [1.07 \cdot 1279 \cdot 3.06 \cdot 10^3 \cdot (70-58)] \\ = 5.00 \cdot 10^8 J = 139 \text{ kWh}$$

E_{MCP} Chaleur stockée par le matériau à changement de phase (kWh)

V Volume du MCP (m^3)

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

ΔT Différence de température (K)

ρ_{Solide} Masse volumique du MCP à l'état solide (kg/m^3)

$\rho_{liquide}$ Masse volumique du MCP à l'état liquide (kg/m^3)

L_f Chaleur latente de fusion du MCP (J/Kg)

$C_{p,MCP,liquide}$ 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 $E_{eau30-70}$:

$$E_{eau30-70} = V \cdot \rho_{eau} \cdot C_{P,eau,liquide} \cdot \Delta T \quad (\text{II. 7})$$

$$= 1 \cdot 1000 \cdot 4186 \cdot (70-30) \\ = 1.67 \cdot 10^8 J = 46.4 \text{ kWh}$$

ρ_{eau} Masse volumique de l'eau (kg/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.

II.4: 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 :

$$V_{eau} = \frac{100000 \times 3600}{c_{peau} \times (58 - 55) \times \rho_{eau}} \\ V_{eau} = \frac{100000 \times 3600}{4186 \times (58 - 55) \times 1000} = 28,7 m^3 \\ V_{MCP} = \frac{100000 \times 3600}{L_{f,MCP} \times \rho_{MCP}}$$

$$V_{eau} = \frac{100000 \times 3600}{242,85 \times 10^3 \times 1293} = 1,1m^3$$

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.

II.5: Matériaux à changement de phase :

II.5.1: Les MCP idéal et leurs caractéristiques :[10]

Il existe un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0-120°C). Cependant ils ne peuvent être utilisés pour le stockage de l'énergie que lorsqu'ils possèdent certaines propriétés thermodynamiques, cinématique et chimique qui sont définies à partir d'un nombre de critères.

a) Critères thermodynamiques :

- Une température de fusion dans la gamme de température désirée.
- Une chaleur latente par unité de masse ou de volume élevée.
- Une densité importante pour éviter les grands volumes.
- Une bonne conductivité thermique.
- Une chaleur spécifique élevée pour que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible typique.
- Une faible augmentation de volume lors de la phase de transition.

b) Critères cinématiques :

Le matériau à changement de phase ne doit montrer ou presque pas de phénomène 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.

Cet état est considéré comme métastable qui est rompu soit par une perturbation extérieure (choc, impureté), soit par abaissement de la température jusqu'au point de nucléation ou le premier germe de solide apparaît. A chaque fois la surfusion est très importante, la chaleur est restituée à une faible température par rapport à la température de stockage.

Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiquée par les tables thermodynamiques.

La vitesse de cristallisation insuffisante sur la puissance de stockage, si on a un matériau qui prend du temps à se cristalliser, il rendra sa chaleur très lentement et limitera la puissance échangée.

c) Critères chimiques:

Le matériau à changement de phase ne doit pas se décomposer dans la gamme de température de stockage. Une fusion congruente, pour que la composition chimique de MCP ne change pas au cours du temps.

Pas de pollution de l'environnement ou risque d'inflammabilité ni d'explosion en contact avec l'atmosphère.

Pas de corrosion avec le matériau de construction.

d) Critères économiques :

Les matériaux à changement de phase doivent être disponibles en grande quantité et surtout pas coûteux même si peu d'entre eux sont commercialisés.

Il est de préférence que les MCP soient recyclable afin de les récupérer pour une autre utilisation.

Avoir le principe de recyclage pour l'utilisation des matériaux à changement de phase de divers domaines.

II.5.2 : Classification des matériaux à changement de phase :

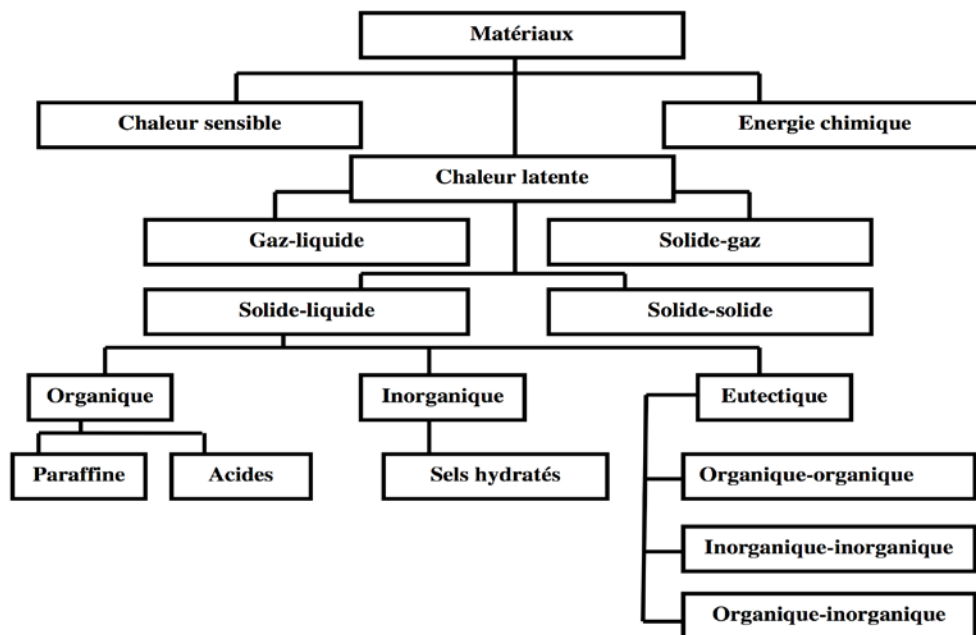


Figure II.1 : Classification des matériaux à changement de phase[11]

II.5.2.1 : Les MCP organiques :

Les matériaux ou les substances organiques ont une température de fusion comprise entre 0°C et 150°C. Les plus utilisés sont essentiellement à base de **paraffine**, des **acides gras** et des

alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques :

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

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

II.5.2.1.1: Les composés organiques paraffiniques :

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

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

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

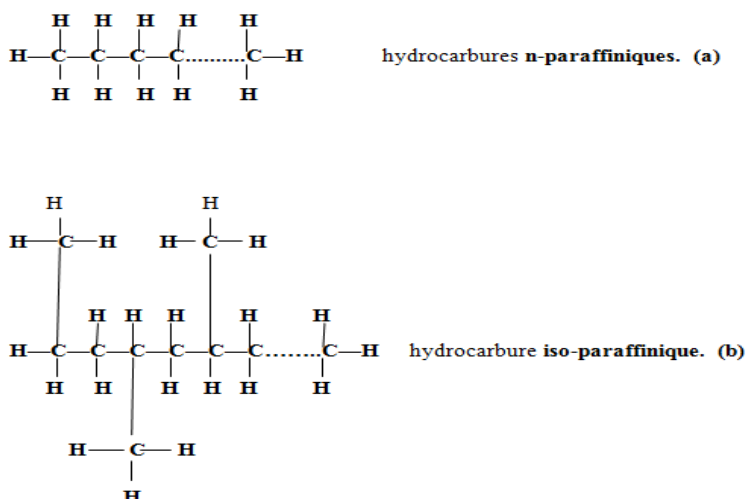


Figure II.2: Formule chimique des paraffines (a) n-paraffini (b) iso-paraffiniques.

Le point de fusion des alcanes augmente avec le nombre croissant d'atomes de carbone.

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

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

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

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

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

Tableau II.2 : propriétés thermo physiques des paraffines (Sharma et al 2009) [12]

II.5.2.1.2 : Les différentes cires paraffiniques : [12]

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

	Paraffines			
	Tétradécane	Héxadécane	Octadécane	Eicosane
Formule	C ₁₄ H ₃₀	C ₁₆ H ₃₄	C ₁₈ H ₃₈	C ₂₀ H ₄₂
T de fusion (°C)	5.5	16.7	28	36.7
Enthalpie de fusion (kJ/kg)	226	237	244	247
Conductivité thermique	0.15	0.15	0.15	0.15
Capacité thermique massique	2.07	2.11	2.16	2.21
Masse volumique solide	825	835	814	856
Masse volumique liquide	771	776	774	778
Retard à la solidification (°C)	Aucun	Négligeable	Négligeable	Aucun
Pression de vapeur (Pa)	133 à 75°C	133 à 105°C	133 à 75°C	133 à
Tension superficielle (N/m)	27.4*10 ⁻³	3.4	27.4*10 ⁻³	-
Viscosité (cP)	2.1	-	3.4	-

Tableau II.3 : Exemples de propriétés physiques de paraffines. [12]

Avantages et inconvénients

- La surfusion est négligable. la pression de vapeur de fusion est faible même à des températures relativement hautes.
- Elles sont stables chimiquement mais il faut les protéger de l'air pour éviter l'oxydation.
- Il n'y a pas de ségrégation de phase.
 - La masse volumique de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850 kg/m³ et celle de la phase solide est de 800 à 900 kg/m³. La dilatation volumique est donc environ 15% pendant le processus de changement de phase. On peut éviter ou au moins réduire ce problème par un conditionnement adapté.
 - Les paraffines sont souvent des mélanges d'hydrocarbures et ont un prix raisonnables.
 - Les cires paraffiniques pures sont très coûteuses. Les deux principaux inconvénients sont les suivants :
 - Les cires paraffiniques présentent une très faible conductivité thermique (0,18-0,25 W/m.K). cette propriété diminue le taux de stockage/déstockage de la chaleur pendant les cycles fusion/solidification. Cette faible conductivité thermique qui est habituellement un

handicap, bien que dans le transport de nourriture elle soit un avantage, peut être compensée par une grande surface d'échange ou par un conditionnement adapté.

- Les cires paraffiniques sont facilement inflammables.

II.5.1.3 : Les composés organiques non-paraffiniques :

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

Les composés organiques non-paraffiniques sont les MCP les plus nombreux, avec des propriétés très variables

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

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

II.5.2.1.3.1 : Acides gras

Les acides gras sont caractérisés par la formule chimique $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ 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 ($T_{\text{fusion}} = 61\text{-}63 \text{ °C}$) et l'acide myristique ($T_{\text{fusion}} = 51.5\text{-}53.6 \text{ °C}$) [19].

Un exemple des acides gras avec leurs propriétés thermo-physiques est donné dans le tableau suivant :

Matériaux	Formule	Points de fusion (°C)	Chaleur latente kJ/kg
Acide acétique	$\text{CH}_3 \text{COOH}$	16.7	184
Acide caprique	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_8$	36	152
Acide laurique	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{10}$	49	178
Acide myristique	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{12}$	58	199
Acide palmitique	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{14}$	55	163
Acide stéarique	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{16}$	69.4	199

Tableau II.4 : Propriétés thermo-physiques des acides gras (Sharma et al, 2009) [12]

Avantages et inconvénients:

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 élevée, plus la température de fusion est élevée, 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-source.

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.

II.5.2.1.3.2 : 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 malitol et l'érythritol. Ces produits sont extraits des plantes et peuvent être qualifiés de bio-sources. Par exemple, le mannitol provient des algues alors que le sorbitol est extrait du sirop de maïs [20].

Avantages et inconvénients

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.

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.5.2.2 : Les MCP inorganiques

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de température de fusion comprise entre -100°C et $+1000^\circ\text{C}$. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0°C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0°C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieure à 150°C). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une conductivité thermique élevée. Ils ont une fusion nette (c'est-à-dire une plage de fusion étroite). Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles. Les problèmes majeurs

rencontrés lors de leur utilisation sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agents de nucléation afin d'être fiables (Farid et al, 2004 et Vineet, 2005).

III.5.2.2.1 : Les sels hydratés :

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

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

Tableau récapitulatif des principaux hydrates salins avec leurs caractéristiques

Hydrates salins	T de fusion $^\circ C$	Chaleur latente de fusion KJ /Kg
Sel de Glauber($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$)	32.4	252
Chlorure de calcium, hexa	27 – 30	190
Acétate de sodium tri hydrate($Na CH_3$	58	170 – 264
$NH_4 \cdot Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	95	238.5
Phosphate de sodium	77	213
Pyrophosphate de sodium déca hydrate sous forme de capsules (calotherm70)	70	184
Hydroxyde de	78	301
Carbonate de sodium déca	32 – 35	247
Nitrate de calcium tétra	40 – 43	140

Tableau II.5 : Principaux hydrates salins avec leurs caractéristiques (Jotshi et al) [13]

Avantages et inconvénients

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

D'autre part, les hydrates salins ont certains inconvénients tels que la fusion accompagnée de la séparation de phase (ségrégation de phase), le sous-refroidissement (surfusion) et le caractère corrosif. Quelques méthodes sont élaborées pour empêcher la ségrégation de phase pour l'utilisation des hydrates salins comme MCP, sont l'addition d'un agent épaississant ou d'un agent de gélification de l'hydrate salin. La première méthode, l'agent épaississant est ajouté pour augmenter la viscosité de l'hydrate salin. La seconde méthode, l'hydrate salin est stabilisé dans les pores d'un polymère gel. En outre, un agent de nucléation (poudres métalliques qui favorisent le démarrage de la cristallisation) est ajouté pour éviter le phénomène de surfusion.

III.5.2.2.2 : 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 $\text{Mg}(\text{NO}_3)3.6\text{H}_2\text{O-MgCl}_2.6\text{H}_2\text{O}$ ($T_{\text{fusion}} = 59.1\text{ }^\circ\text{C}$) 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].

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

Eutectiques inorganique	Point de fusion ($^\circ\text{C}$)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
49.3% $\text{MgCl}_2.6\text{H}_2\text{O}$ +50.7% $\text{Mg}(\text{NO}_3).6\text{H}_2\text{O}$	58	132.3
61.5% $\text{Mg}(\text{NO}_3)6\text{H}_2\text{O}$ +38.5% NH_4NO_3	51	131.1
58.3% $\text{Mg}(\text{NO}_3)6\text{H}_2\text{O}$ +41.7% $\text{MgCl}_2.6\text{H}_2\text{O}$	58	106
$\text{CaCl}_2.6\text{H}_2\text{O}+\text{CaBr}_2.\text{H}_2\text{O}$	14	140
Acide caprique-laurique	18	120
Acides palmitique-laurique	33	145
Acides stéariques, laurique	34	150

Tableau II.6 : Liste de quelques eutectiques [13]

Avantages et inconvénients

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.

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.5.3 : Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique :

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

- Le matériau du conteneur de conditionnement doit être compatible avec le MCP et ne doit subir ni oxydation, ni ramollissement ou toutes autres dégradations.

- Le conteneur de conditionnement doit assurer une parfaite étanchéité quand le MCP change de l'état solide à l'état liquide.

- Le conteneur doit pouvoir résister à la dilatation et au changement de volume de MCP en phase liquide : ce changement peut casser le conteneur si celui-ci ne peut pas absorber le changement de volume.

Il existe deux techniques pour conditionner les MCP :

III.5.3.1 : La macro-encapsulation [14]

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

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

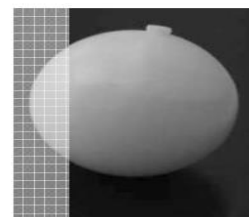
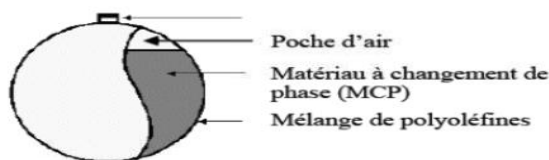


Figure II.3 : Conditionnement des MCP dans un nodule



Figure II.4 : a) Conditionnement des MCP en sac aluminium, b) en briquette plastique.

III.5.3.2: La micro-encapsulation [14]

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.

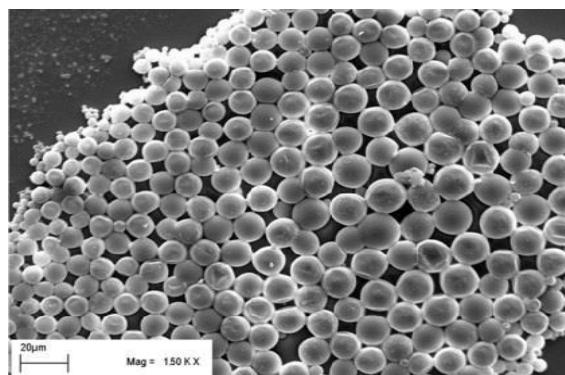


Figure II.5 : Microcapsules de paraffine [14].

II.6: Augmentation de la surface d'échange

II.6.1: Faisceau de tube

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

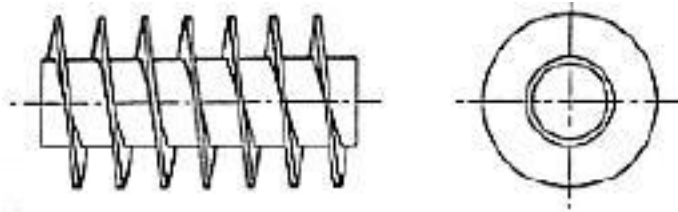
avec le même volume et le tube lisse simple.



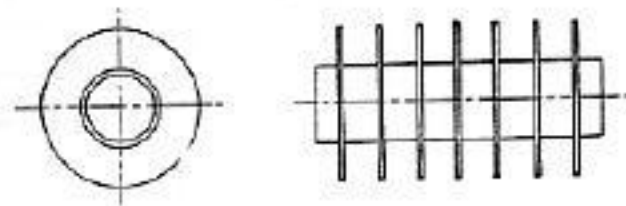
Figure II.6: Echangeur tubes et calandre baigné dans un MCP (a) simple (b) avec ailettes [18].

II.6.2: Les ailettes [11]

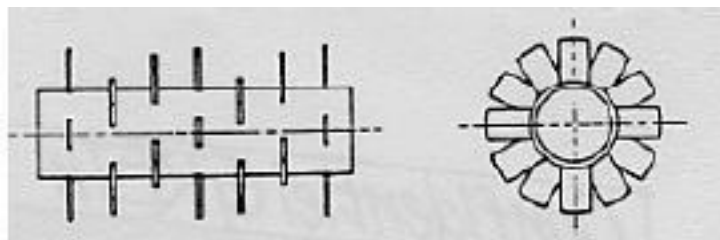
L'amélioration des transferts thermiques par l'ajout d'ailettes se décompose en deux facteurs. Le premier est l'augmentation de la surface d'échange et le second est la diminution de la distance caractéristique de solidification. Les différents types d'ailettes sont représentés ci-dessus:



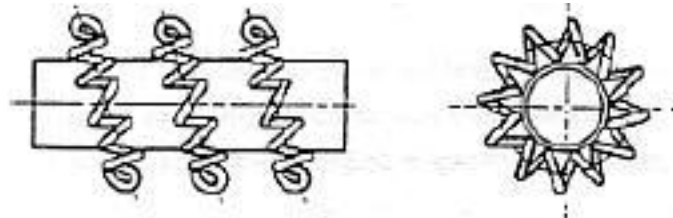
Ailettes hélicoïdales. les plus courantes. annelées ailettes transverses



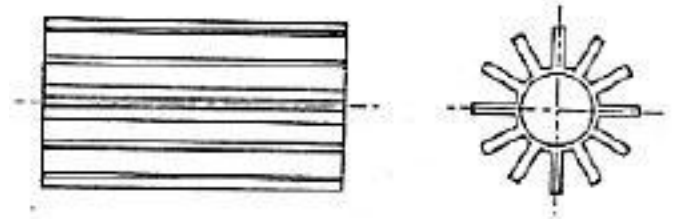
Ailettes annulaires



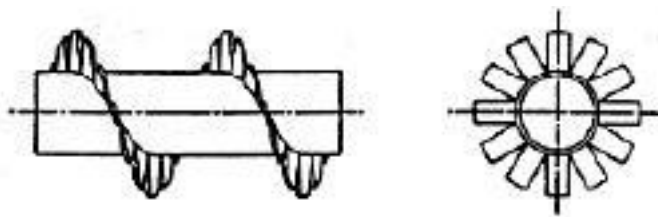
Ailettes à piquant



Ailettes en L préformée



Ailettes longitudinales



Ailettes hélicoïdales segmentées

Figure II.7 : Types d'ailettes et schémas associés [22].**II.7: Amélioration de la conductivité globale du MCP :****II.7.1: Les structures métalliques :****II.7.2: 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 :

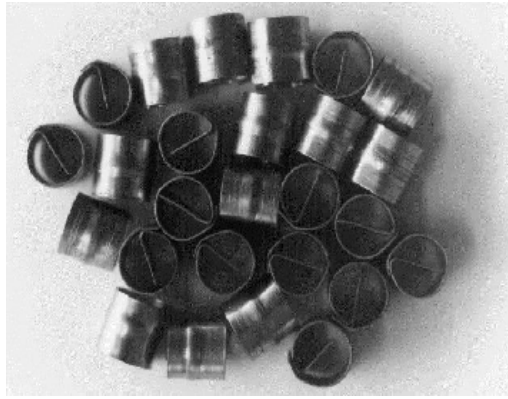


Figure II.8: Anneaux de Lessing [19]

II.7.3: 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.

II.7.4: Les nanoparticules [19]

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.

II.8: Les phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage

II.8.1: La ségrégation de phase

Lorsque la fusion n'est pas congruente, on observe une ségrégation de phase

Exemple : $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$.

Pour prévenir ce problème plusieurs techniques ont été testées comme l'utilisation d'agents épaississants. Comme agents épaississants on utilise par exemple de la cellulose, du gel de silice de la silice...etc.

II.8.2: La surfusion : sous-refroidissement

La surfusion correspond à l'état liquide d'un corps tandis que sa température est inférieure à la température de cristallisation. Celle-ci n'apparaît que pour certains types de **MCP** comme les matériaux inorganiques. Généralement on traite ce problème en ajoutant un agent de nucléation

(poudre métallique) qui favorise le démarrage de la cristallisation.

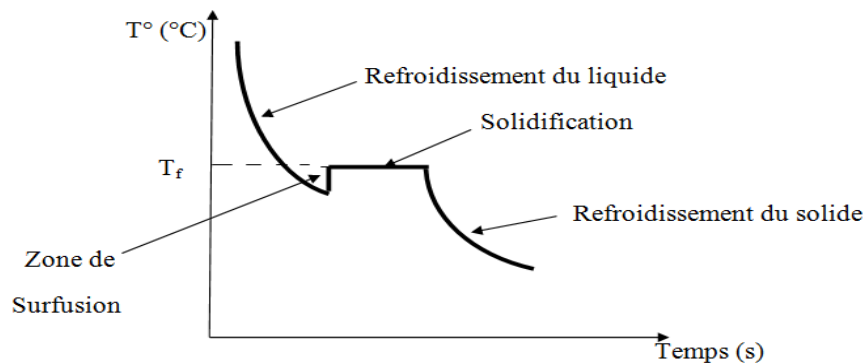


Figure.II.9: Représentation graphique d'un changement de phase avec surfusion.

II.8.3: La surchauffe [24]

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.

II.8.4: 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.

II.9: 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 system de stockage latent.

CHAPITRE III

Echangeurs de chaleur

III.1) Introduction

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

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

III-2) Définition [21]

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

III-3) Modes de transfert de chaleur [22]

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

III-3.1) Transfert de chaleur par conduction

Dans la transmission par conduction la chaleur se diffuse de proche en proche d'une

particule à autre grâce aux vibrations des atomes ou des molécules et du mouvement des électrons; ce mode de transfert nécessite donc une présence de matière, mais sans déplacement macroscopique de celle-ci. Le transfert de chaleur par conduction est régi par la loi de Fourier, établie expérimentalement pour le cas d'un transfert unidirectionnel d'un corps solide indéformable.

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

Où λ est la conductivité thermique du matériau.

Le flux de chaleur s'écrit alors:

$$d\phi = \frac{dq}{dt} = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (\text{III-2})$$

La densité de flux de chaleur s'exprime par :

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

III.3.2) Transfert de chaleur par convection

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

$$\phi = h S (T_p - T_\infty) \quad (\text{III-4})$$

h : coefficient d'échange convectif.

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

T_p : température de la paroi.

T_∞ : température loin de la paroi.

III.3.3) Rayonnement

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

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

Où ε est l'émissivité de la surface.

σ est la constante de Stephan Boltzmann et vaut $5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

Après avoir défini les modes de transfert de chaleur, nous allons passer à un cas pratique (les échangeurs de chaleur), où ces différents modes de transfert de chaleur peuvent coexister à la fois. Cependant les échangeurs radiatifs n'interviennent que très rarement dans les échangeurs de chaleur.

III.4) Critères de classement des échangeurs de chaleur : [21]

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

III.4.1) Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

À tubes : monotube, à tube séparés, à tube à ailettes, coaxiaux ou multitubulaires (Figure III.1)

À plaques : à surface primaire ou à surface secondaire (Figure III.2)

À autres types : à caloducs (Figure III.3), micro échangeurs (Figure III.4), échangeurs non métalliques (céramique, polymère, graphite, verre, Figure III.5).

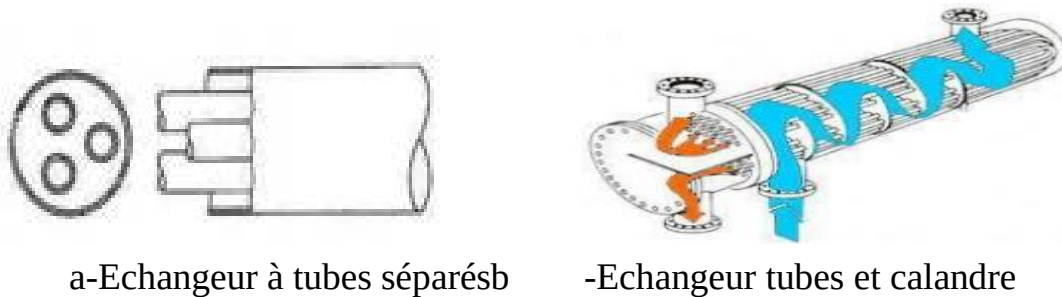


Figure III.1 : a et b : Echangeurs tubulaires

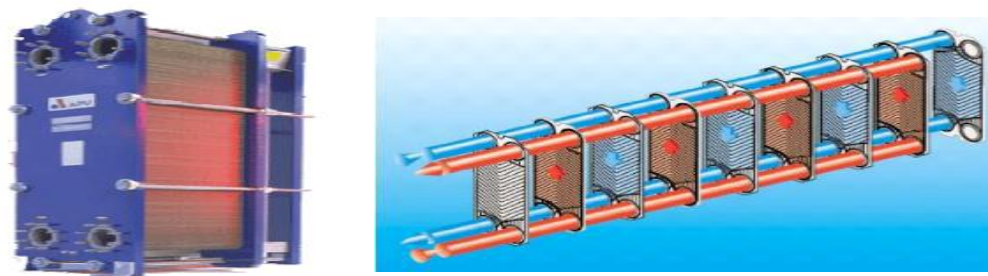


Figure III.2 : Echangeurs à plaques



Figure III.3 : Echangeur à caloducs pour climatisation

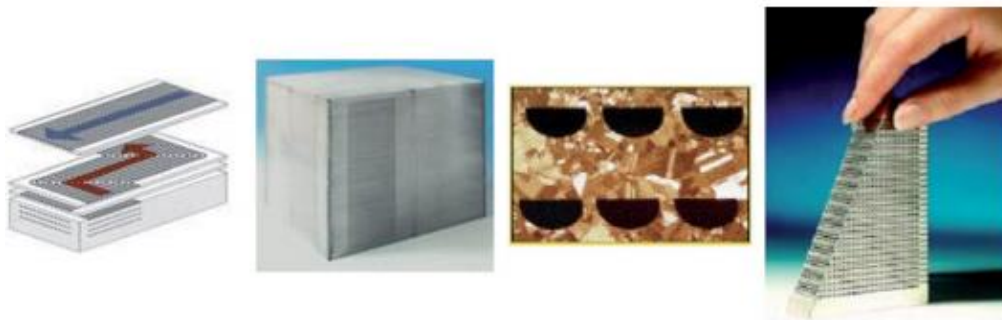


Figure III.4 : Echangeur à micro-canaux

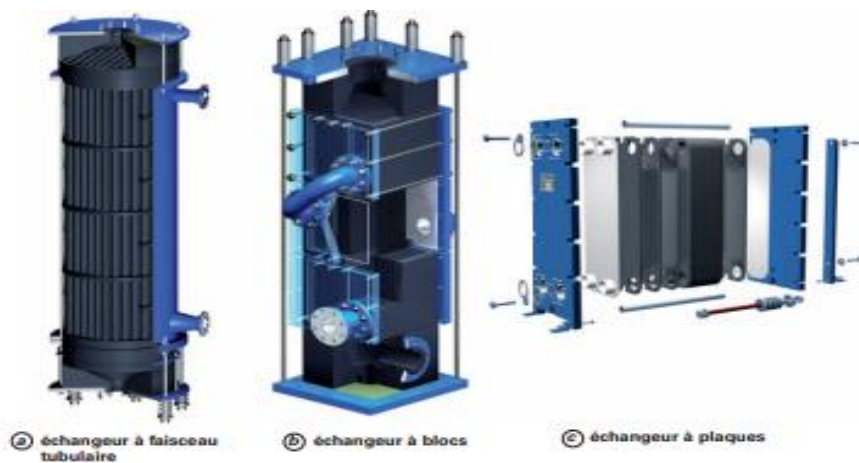


Figure III.5 : Echangeurs en graphite.

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

Les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) sont couplés dans

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

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

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

Transfert sans stockage, donc en récupérateur, avec 2 ou n passages et un écoulement en général continu.

Transfert avec stockage, donc en régénérateur, avec un seul passage et un écoulement intermittent, la matrice de stockage étant statique ou dynamique.

III.4.4) Classement fonctionnel

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

Le cas de deux fluides en écoulement monophasique.

Le cas d'un seul fluide en écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs.

Le cas de deux fluides en écoulement avec changement de phase, cas des évapo-condenseur

III.4.5) Classement suivant la compacité de l'échangeur [21]

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

Une classification suivant la compacité peut être schématisée comme suit :

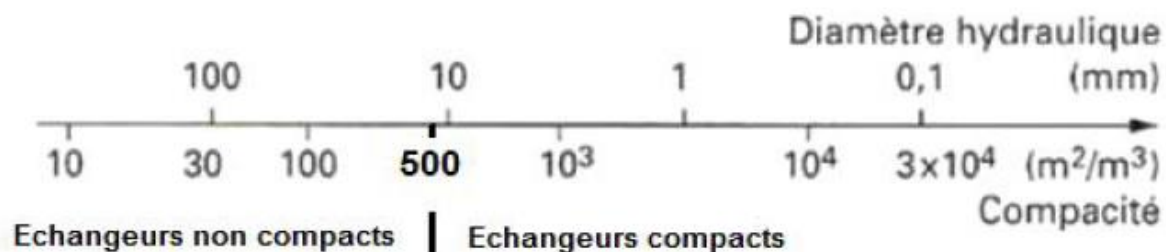


Figure III.6 : Classement des échangeurs suivant la compacité

Les échangeurs de chaleur peuvent être classés compacts ou non compacts suivant leurs

diamètres hydrauliques. Plus le diamètre hydraulique est grand moins l'échangeur est compact, et plus le diamètre hydraulique est petit l'échangeur est compact.

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

On retiendra deux types de parois :

Les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : super alliage, métaux ou alliages réfractaires.

Les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc.

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

Les échangeurs à courants parallèles (Co-courants) ou échangeurs anti-méthodique : l'écoulement des deux fluides parallèles s'effectue dans le même sens.

Les échangeurs à contre-courants ou échangeurs méthodiques : l'écoulement des deux fluides est parallèle mais en sens contraire.

Les échangeurs a courants croisés avec ou sans brassage : les lignes de courants des deux fluides sont perpendiculaires l'une par rapport à l'autre.

III.5) Principales caractéristiques des échangeurs [23]

Les échangeurs de chaleur sont caractérisés essentiellement par :

La nature de la source chaude ou froide qui peut être sous forme gazeuse (air), liquide (eau) ou solide (sol).

La fonction de l'échangeur : un échangeur de chaleur peut aussi bien jouer le rôle d'un évaporateur ; refroidisseur de gaz ou de liquide, que celui d'un condenseur ; refroidi par un gaz ou un liquide.

Les conditions de fonctionnement : les conditions de température supportable par les parois de l'échangeur, il faut aussi éviter l'accumulation thermique qui peut engendrer du gèle sur les parois. La pression du fluide qui ne doit pas dépasser les limites du matériau constituant l'échangeur. Le pincement, c'est-à-dire le minimal de température entre les deux fluides.

Leurs géométries : les dimensions extérieures, d'un échangeur sont très importantes car elles ont un lien direct avec l'encombrement de ce dernier. On a aussi la disposition des tubes, qui peut être alignée ou en quinconce avec un entraxe bien défini, leurs diamètres intérieurs et extérieurs, qui définissent l'épaisseur des tubes.

La nature du matériau qui les compose : les matériaux dont les échangeurs sont composés, dépendent de la nature des sources de chaleurs ; on utilise de l'acier ordinaire pour l'ammoniac, des métaux cuivrés pour les fluides halogénés, aluminium et ses alliages ainsi que des aciers spéciaux inoxydables. Les contraintes mécaniques, thermiques et financières, sont aussi des paramètres influant sur la nature des matériaux des échangeurs. Pour les ailettes, on choisit généralement l'aluminium, qui est un matériau léger et bon conducteur.

❖ Les caractéristiques de fonctionnement :

Le coefficient global d'échange thermique.

Perte de pression pour le circuit du fluide (chaud ou froid) et pour celui du frigorigène.

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).

III.6) Echangeur compact

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

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

$$R = \frac{S_e}{V} \quad (\text{III-6})$$

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

III.7) Echangeur conventionnel [23]

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

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

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

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

III.8) Echangeurs tubulaires [21]

III.8.1) Différentes catégories existantes

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

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

III.9) Echangeurs à tubes ailettes :

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

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

III.9.1) Constituants d'une batterie :

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

III.9.1.1) Les tubes

Ce sont des tubes dont le diamètre est normalisé et correspond au diamètre extérieur, ils sont généralement en acier inoxydable, en cuivre, en laiton, en verre, en aluminium ou en matière

plastique. Le choix du matériau dépend des fluides utilisés. Deux dispositions de tubes sont possibles :

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

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

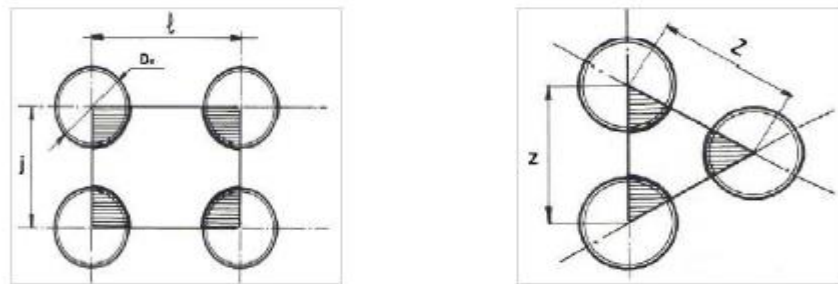


Figure III 7 : Disposition des tubes.

III.9.1.2) Les ailettes [23]

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

III.9.1.2.1) Différents types d'ailettes :

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

Ailettes longitudinales minces :

- a) A section constante.
- b) A section variable.
- c) A section ramifiée.

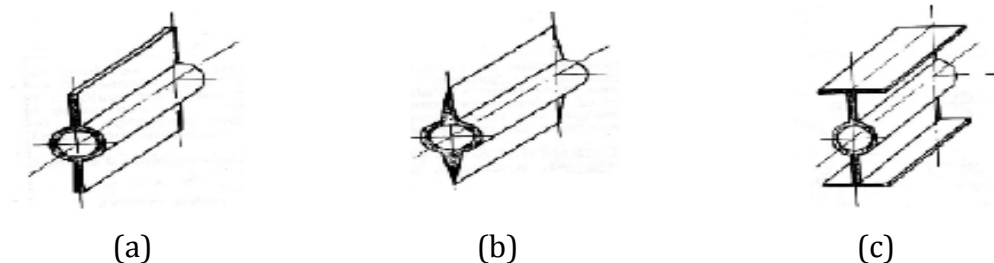


Figure III 8 : Ailettes longitudinales minces

Ailettes linéaires sous forme de barres de sections diverses

- a) A section constante (circulaire, carré).
- b) A section variable (conique, aiguille).



Figure III 9 : Ailettes sous forme de barres

Ailettes transversales :

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

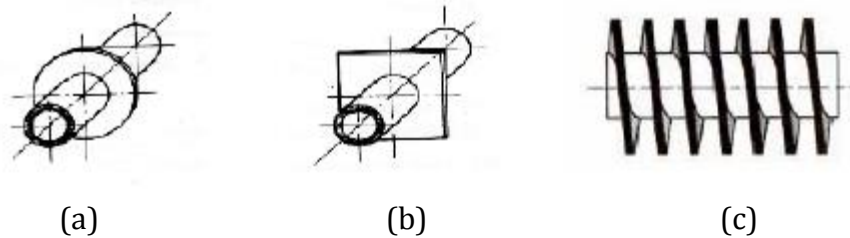


Figure III 10 : Ailettes transversales

Ailettes continues ou indépendantes :

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

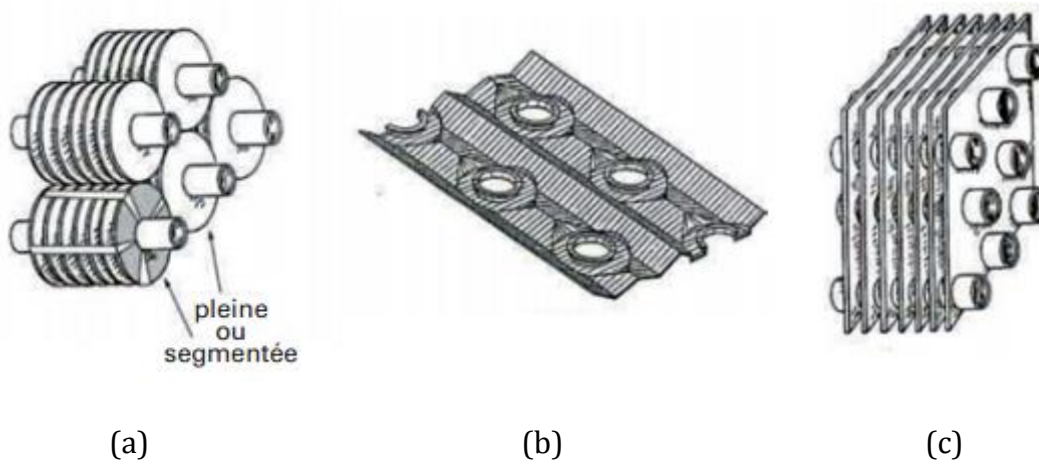


Figure III.11 : Ailettes continues ou indépendantes

III.10) Quelque système d'échangeurs Air MCP : [24]

III.10.1) Le système de Zalba et al.

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

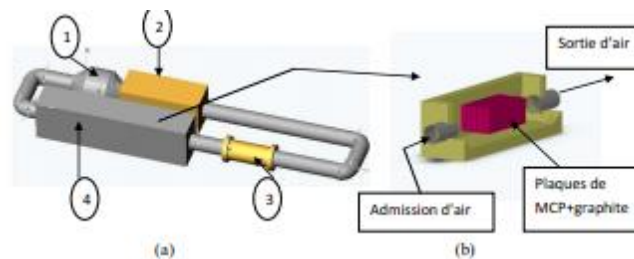
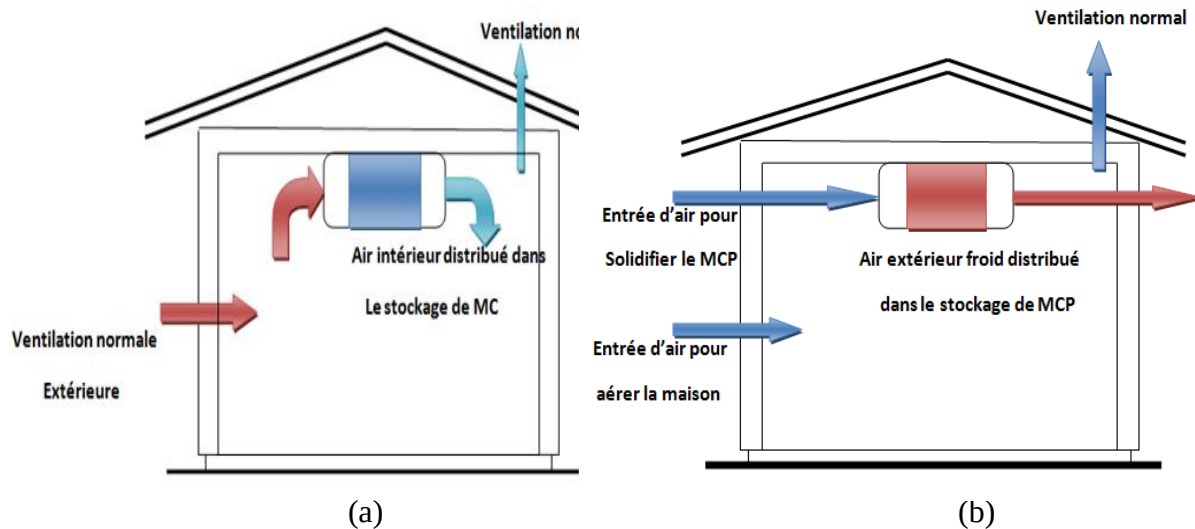


Figure II.12 : Système actif mis au point par Zalba et al. : a) dispositif expérimental, b) système de stockage d'énergie thermique

II.10.2) Le système de HedBellander :

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



III.10.3) Le système Turnpenny et al.

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



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

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

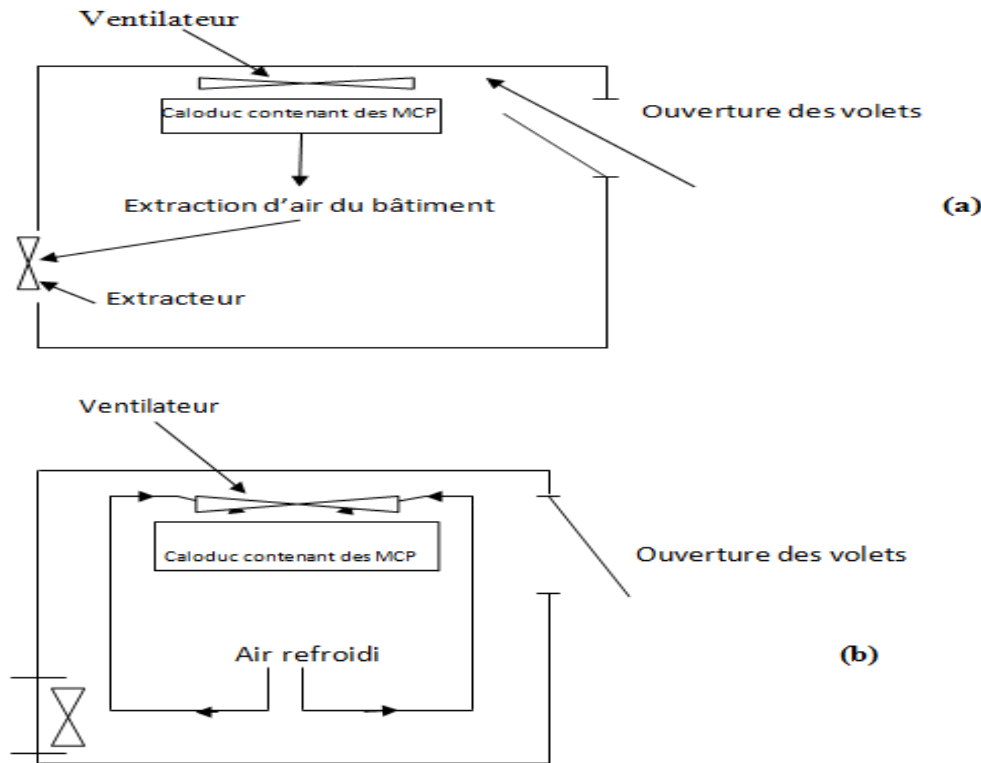


Figure III.15 : Principe de fonctionnement du système de rafraîchissement conçu par Turnpenny : a) fonctionnement nocturne, b) fonctionnement diurne.

III.11 : le concentrateur cylindro-parabolique :

III.11.1 Introduction :

Technologie cylindro-parabolique s'est avérée être la plus mature et le plus bas coût de la technologie thermique solaire disponible aujourd'hui. En conséquence, la plupart des projets des centrales solaires thermiques commerciales implantées sont basés sur ce type de capteur, les plus part de ces projets sont construits aux Etats-Unis, Espagne, Afrique du Nord et Moyen-Orient.

Le principe de la concentration d'énergie est important sur notre vie quotidienne. On dispose en effet avec le soleil d'une énorme quantité d'énergie potentiellement utilisable, et une fois concentrée, une masse d'énergie est bien plus simple à stocker, transformer et déplacer. Même s'il y a des exceptions, un accès à de très fortes concentrations d'énergie permet dans la plupart des cas de faire à peu près ce qu'on veut avec un minimum de puissance.

De ce fait des capteurs solaires à concentration sont appliqués, l'énergie solaire arrive sur une grande surface réfléchissante et réfléchi sur une plus petite surface avant qu'elle ne soit

transformée en chaleur ce qui inciterait des températures plus augmentée. La majorité des collecteurs à concentration peuvent concentrer que le rayonnement solaire parallèle venant directement à partir du disque du soleil (Rayonnement direct).

Description du concentrateur : [26]



Figure III-16 concentrateur cylindo-parabolique de la centrale Nevada solar one (USA).

Construites dans les déserts et autres zones arides du globe, les centrales solaires à capteurs cylindro-paraboliques sont une filière solaire thermodynamique.

La technologie de réflecteurs cylindro-paraboliques est la plus fréquente et est actuellement utilisée par les plus puissantes centrales solaires au monde dans le Sud-ouest des Etats-Unis et dans le Sud de l’Espagne.

III.11.2 : Type de concentrateur :

Les concentrations fonctionnent selon le principe de la concentration et de la réflexion des rayons solaires. Ils utilisent une surface réfléchissante dont la forme permet de concentrer en un même point la réverbération de l’énergie lumineuse. De nombreux modèles existent :

a) Type parabolique :

Ce sont des disques concaves qui focalisent par leurs miroirs ou leurs lames en aluminium très réfléchissantes, les rayons solaires de manière très précise sur le fait-tout. Ce dernier repose sur un dispositif prévu pour recevoir le ou les plats à cuire (selon le modèle et la grandeur des récipients). Les paraboles doivent être régulièrement réorientées pour obtenir un rendement optimum.

b) Cylindro-parabolique :

En règle générale, le creux est aligné avec son axe focal horizontal Est-Ouest. L'aliment à cuire est disposé le long de cette ligne. L'auge est faite de sorte que son axe de symétrie pointe au soleil à midi ; cela impose au bac d'être incliné de haut en bas.

b) Type sphérique :

Cette conception est la plus simple des concentrateurs car ils sont très faciles à réaliser et à employer ; la forme du réflecteur est sphérique et dirige la lumière le long d'une ligne perpendiculaire à la surface de la sphère. Une telle conception a été proposée pour la première fois par « Stam » en 1961. Le navire de cuisson peut être accroché au trépied pour atteindre le foyer. Voici les différents modèles de type à concentration.

d) Type à panneaux:

Les cuiseurs à panneaux sont construits à partir de matériaux variés, suffisamment résistants et dont l'intérieur est recouvert d'une surface réfléchissante (miroir, aluminium...).

Sa configuration spatiale répond à des exigences géométriques et optiques précises de façon à permettre aux réflecteurs de bien jouer leur rôle. En effet, les réflecteurs sont orientés selon un certain angle de manière à focaliser les radiations solaires en un point où sera placé, sur une grille un récipient de couleur noire enfermé à l'intérieur d'un sac en plastique ou en verre, résistant à la chaleur qui permet de créer l'effet de serre.

Ce type de cuiseur permet de cuire une variété d'aliments et il peut atteindre 150 degré durant une journée bien ensoleillée.



1-parabolique, 2-parabolique orienté vers le haut, 3-forme carrée concave, 4- sphérique, 5-cylindro-parabolique, 6-à parois réfléchissantes en forme d'aile.
Figure III-17 : Les cuiseurs solaires à concentration [25]

III.11.3 : La géométrie du concentrateur cylindro-parabolique :

III.11.3.1 Définition :

Une parabole est par définition l'ensemble des points situés à égale distance d'une droite fixe appelée directrice, et un point fixe F appelé foyer. L'intersection de la parabole et de son axe est le sommet qui est exactement intermédiaire entre le foyer et la directrice.

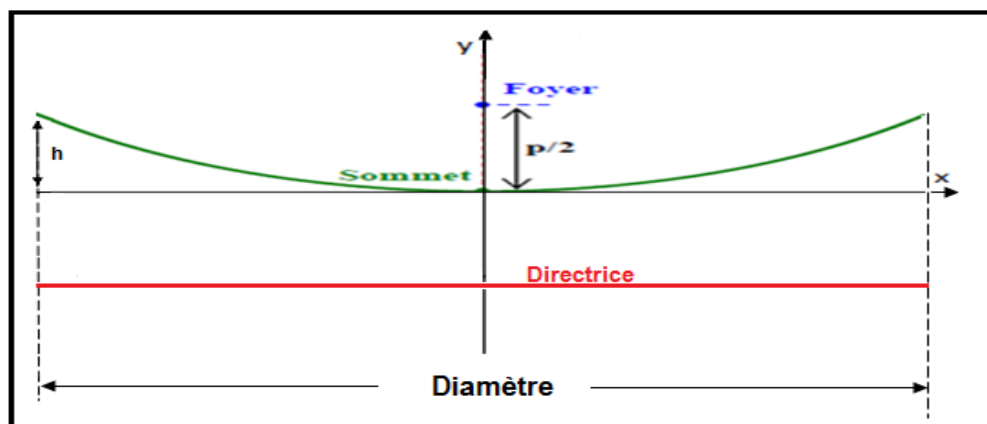


Figure III-18 : graphe montre les caractéristiques d'une parabole

III.11.3.2 Equation de la parabole :

Si la directrice d'une parabole a pour équation $y = p/2$ et son foyer pour coordonnées $(0, p/2)$, alors la parabole aura pour équation :

$$y = \frac{x^2}{2p} \quad (\text{III-7})$$

III.11.3.3 Equation réduite d'une parabole :

On choisit un repère orthonormé, d'origine S le sommet de la parabole, d'axe des ordonnées (Δ) l'axe focal, tel que le point F a pour coordonnées $(0, p/2)$. Dans ce repère, l'ordonnée de F est strictement positive et le point K a pour coordonnées $(0, -p/2)$. Soient M(x,y) un point du plan et H $(-x, -p/2)$ son projeté orthogonal sur (D).

Soit : $M \in (P)$

$$MF^2 = MH^2 \Leftrightarrow x^2 + (y - \frac{p}{2})^2 = (y + \frac{p}{2})^2 \quad (\text{III-8})$$

Après simplification la parabole a pour équation :

$$y = \frac{x^2}{2p} \quad (\text{III-9})$$

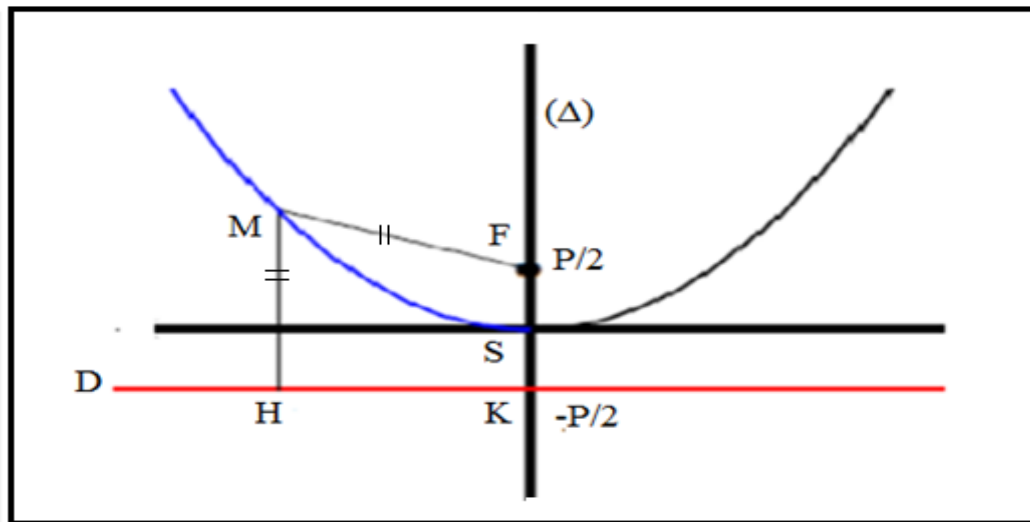


Figure III-19 : Graphe d'une parabole d'équation $y = \frac{x^2}{2p}$

III.11.4 Caractéristiques d'une parabole

Deux paramètres permettent de décrire complètement une parabole :

- Le coefficient p qui intervient dans l'équation de la parabole génératrice du paraboloïde. Lorsque p augmente, la parabole devient plus « plate », et inversement, lorsque p diminue, la parabole devient plus profonde. Ce paramètre règle donc la profondeur de la parabole.

- Le diamètre D permet, une fois p déterminé, de fixer les dimensions de la parabole. Vu de haut, la parabole présente une ouverture circulaire dont le diamètre est D .

a) Profondeur d'une parabole

La taille de la courbe parabolique (ou la profondeur) P_f peut être définie comme la distance maximale du sommet à une ligne tracée à travers l'ouverture de la parabole, elle est définie à partir de l'équation III-1

$$P_f = \frac{D^2}{16f} \quad (\text{III-10})$$

Avec :

D : diamètre de la parabole.

f : est la distance focale $= \frac{p}{2}$.

b) Surface d'une parabole

C'est l'espace inclus entre une parabole et une ligne à travers son ouverture, elle est indiquée par :

$$S_x = \frac{2}{3} \pi \sqrt{2f \left[(2pf + 2f)^{\frac{3}{2}} - 2f^{\frac{3}{2}} \right]} \quad (\text{III-11})$$

c) Longueur d'une parabole :

La longueur d'arc d'une parabole peut être trouvée en intégrant une surface différentielle de cette courbe, en appliquant les limites $X = P_f$ et $Y = D/2$, on trouve :

$$L_p = \left[\frac{D}{2} \sqrt{\left[\frac{4p_f}{D} \right] + 1} + 2 \ln \left[\frac{4p_f}{D} + \sqrt{\left[\frac{4p_f}{D} \right]^2 + 1} \right] \right] \quad (\text{III-12})$$

d) Surface d'un cylindo-parabole:

La surface de cylindro-parabole peut être trouvée en utilisant l'équation (III-12) mais cette fois en appliquant les limites $X=P_f$ et $Y=D$, et on multipliant par la longueur de la structure, on trouve :

$$S_x = 2 \cdot L_p \cdot L_{C-p} \quad (\text{III-13})$$

Avec :

L_{C-p} : Longueur de cylindro-parabole.

e) Surface d'ouverture de la parabole :

La surface d'ouverture d'une parabole est la surface du disque supérieur de la parabole elle se calcule par la formule suivante :

$$A_{par} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{III-14})$$

f) Angle d'ouverture d'une parabole Ψ :

On peut voir qu'une parabole avec un petit angle d'ouverture est relativement plate.

L'augmentation de l'angle d'ouverture de la parabole fait diminuer la distance focale.

$$2r \sin \beta = 4f \tan \frac{\beta}{2} \quad (\text{III-15})$$

β : Angle d'ouverture.

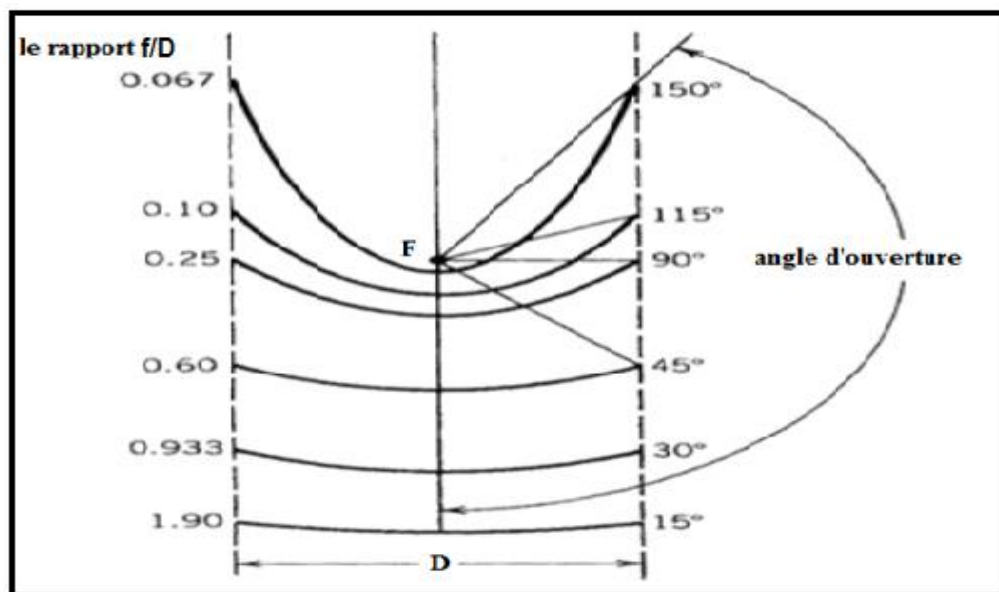


Figure III-20 : Angle d'ouverture de la parabole en fonction de f

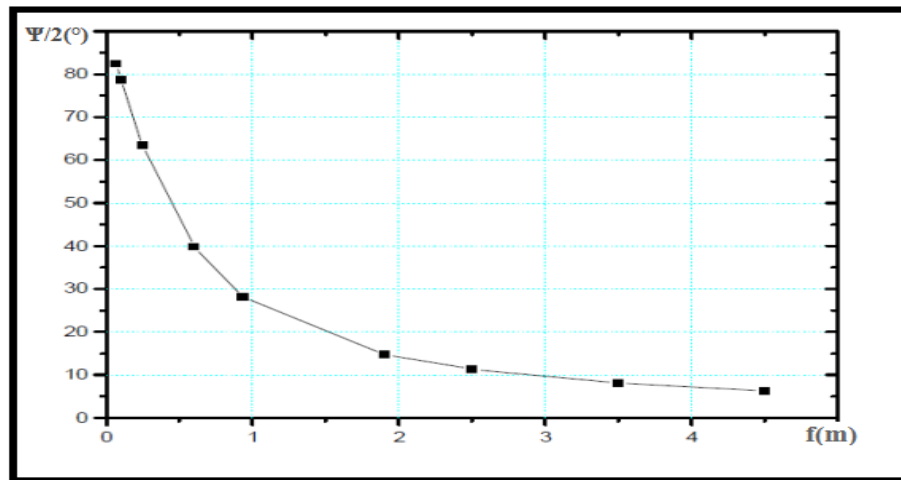


Figure III-21:Angle d'ouverture d'une parabole en fonction de la distance focale [8]

III.11.3 Système optique d'une surface parabolique

L'idée d'utiliser une surface parabolique vient du fait qu'elle est stigmatique pour les points à l'infini situé sur son axe.

D'après les lois de réflexion, tout rayon lumineux parallèle à l'axe de la parabole est réfléchi par la parabole suivant une droite passant par le foyer

Voyons maintenant les propriétés de réflexion d'une parabole. Si on place une lampe au foyer d'une parabole, on peut remarquer que les rayons réfléchis sont parallèles à l'axe optique. Inversement, des rayons incidents parallèles à l'axe optique sont réfléchis en un point qui correspond au foyer géométrique de la parabole.

Si la courbe de la parabole a pour équation $y = \frac{x^2}{2p}$ les rayons réfléchis coupent l'axe optique au point $(0, p/2)$. Ce point est le foyer du miroir.

Par contre, des rayons parallèles entre eux, mais non parallèles à l'axe optique, ne convergent pas en un point.

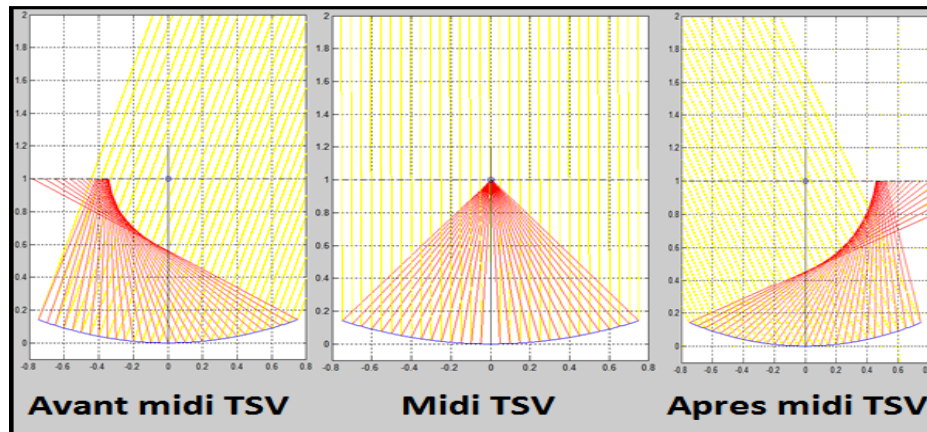


Figure III-22 : Réflexion des rayons solaires sur une parabole parfaite « Obtenue avec MATLAB »

III.11.4 Facteurs Optiques : [27]

Facteur d'interception est le facteur optique le plus compliqué dans le calcul de la performance optique d'un concentrateur CCP. Il représente le rapport entre l'énergie interceptée par l'absorbeur et celle réfléchiée par les surfaces réfléchissantes.

Il traduit le fait que certains rayons solaires peuvent être renvoyés vers l'extérieur du concentrateur ou bien passer à côté de l'absorbeur lorsque les surfaces optiques présentent des défauts ou des irrégularités et lorsque l'absorbeur est mal positionné dans le plan focal. Donc il dépend des propriétés optiques des matériaux utilisés. Il existe aussi que certains erreurs peuvent apparaître dans la construction du concentrateur ou le système de poursuite. Si on utilise les paramètres d'erreurs universelles appliquées pour toutes les géométries du collecteur, le facteur d'interception optique est donné par :

$$C_{opt,\lambda} = \frac{I_0(\lambda)}{I_a(\lambda)} \quad (\text{III-16})$$

Ou λ : la longueur d'onde des rayons solaire.

Sur toutes les longueurs d'onde de spectre on obtient :

$$C_{opt} = \frac{I_0}{I_a} \quad (\text{III-17})$$

III.11.5. Les composants d'un concentrateur solaire parabolique :

III.11.5.1. La structure métallique

Doit être suffisamment solide pour résister aux importantes contraintes mécaniques liées au vent. Elle doit de plus être munie d'extrémités assurant la compatibilité entre les dilatations thermiques inégales de l'acier et du verre.

III.11.5.2. Le tube collecteur (l'absorbeur)

Le récepteur doit absorber autant de flux solaire concentré possible, et le convertir en énergie thermique, cette chaleur est transférée dans un fluide d'un certain type (liquide ou gaz).

Le récepteur ne doit pas être trop grand pour ne pas faire de l'ombre au réflecteur et ne doit pas être trop petit pour pouvoir capter la totalité des rayons concentrés au foyer.

La surface du récepteur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une bonne conductivité et diffusion thermique.
- Un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.
- Une bonne résistance chimique vis à vis du fluide utilisé.
- Un facteur d'émission dans l'infrarouge aussi faible que possible.
- Une bonne inertie thermique.

Il est important que le récepteur soit métallique car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur (cuivre : 360 W/m.K, aluminium : 200 W/m.K, acier 60 W/m.K). Plus le coefficient de conduction est faible et plus l'absorbeur doit être épais, ce qui augmente le prix et l'inertie de l'absorbeur.

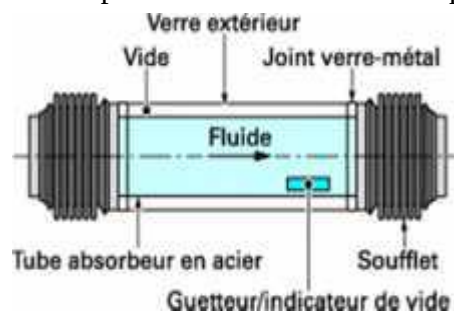


Figure. III-23 le tube récepteur d'un concentrateur cylindro-parabolique

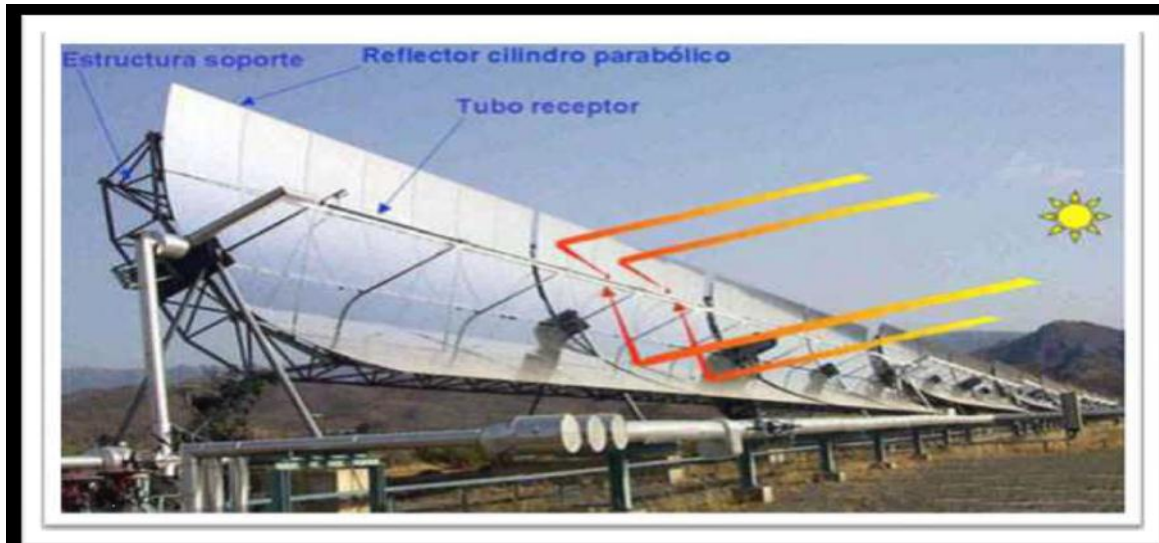


Figure.II.24 Réflexion des rayonnements solaires sur le tube absorbeur

III.11.6 Taux de concentration

La définition la plus commune du taux de concentration est basée sur la notion de surface. Elle est donnée comme étant le rapport de la surface de l'ouverture à la surface du récepteur, [3, 4].

$$C = \frac{A_0}{A_r} \quad (\text{III-18})$$

A_0 est la surface d'ouverture, et A_r la surface de l'absorbeur

CHAPITRE IV

Partie expérimentale

IV.1 Introduction :

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

Notre objectif est de réaliser un composite à base de paraffine /graphite / poudre de granite 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), la poudre de granite (PG, Figure IV.1b), ainsi que le graphite en poudre pour améliorer la conductivité thermique (Gr, Figure IV.1c).

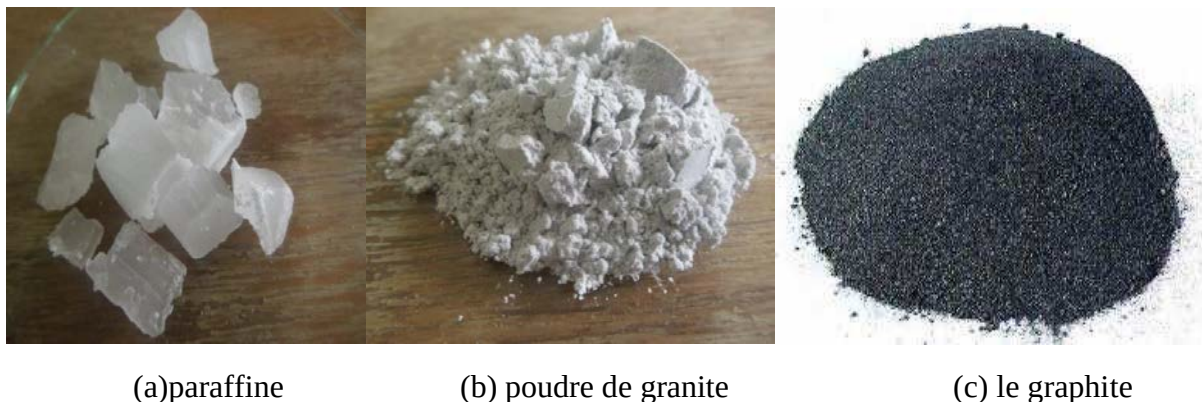


Figure IV.1 : Image des matériaux utilisés pour la préparation du composite

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 et celle qu'on a utilisée est destinée à la fabrication de bougies, comportant des additifs chimiques convenables (présence entre autres de +20% de de stéarine).

b) Poudre de granite :

La poudre de granite est récupérée d'un atelier de construction, elle est disponible au marché national pour ses différentes utilisations comme le domaine de peinture et design, le granite est le résultat du refroidissement lent, en profondeur, de grandes masses de magma intrusif qui formeront le plus souvent des plutons, ces derniers affleurant finalement par le jeu de l'érosion qui décape les roches sus-jacente.

Le granite est une roche acide (riche en silice) et dense (densité moyenne : 2,7), sa composition chimique moyenne est : 75,5 de SiO_2 , 14% de Al_2O_3 , 9,5% de $(\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})$, 2% d'oxydes (Fe, Mn, Mg, Ca).



Figure IV.2 : poudre de granite

Préparation de la poudre de granite:

La poudre est d'abord tamisée plusieurs fois avec un tamis de diamètre de 0,315mm jusqu'à avoir une poudre fine puis cette poudre obtenue est ensuite séchée dans une étuve à 100°C pendant 24 h (**Figure IV.3 et Figure IV.4**).



Figure IV.3: poudre de granite



Figure. IV.4 : Etuve

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 élevée (3 500 °C).

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

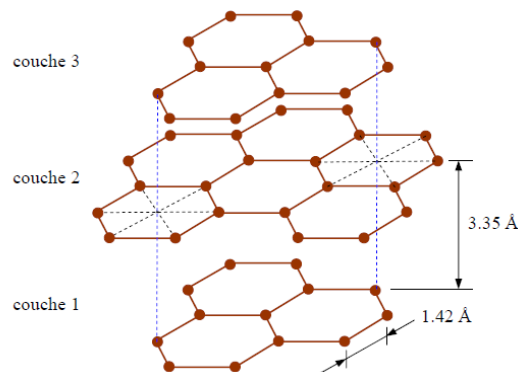


Figure IV.5 : Structure du graphite

IV.2.2 Préparation du composite MCP/P.G/Gr et MCP/PG :

Pour la préparation du composite on commence par :

- la pesée des différents éléments attribués dans le MCP (paraffine, poudre de granite, graphite) avec la balance électronique de précision (**Figure IV.6**). La proportion en masse de paraffine a été modifiée, de 95% à 50 % pendant la préparation des composites, de façon à ne pas avoir de fuite du MCP lors du processus de chauffage (**Tableau IV.1**).



Figure IV.6 : Pesée des différents éléments

Numéro de l'échantillon	MCP paraffine (Pa) en %	Poudre de granite (PG) en%	Graphite (Gr) en %	Notation
1	80%	20%	/	80%Pa20%PG
2	80%	15%	5%	80%Pa15%Pr5%P
3	75%	25%	/	75%Pa25%Pr
4	75%	20%	5%	75%Pa20%PG5%G
5	70%	30%	/	70%Pa30%PG
6	70%	25%	5%	70%Pa25%PG5%G
7	65%	35%	/	65%Pa35%PG
8	65%	30%	5%	65%Pa30PG5%Gr
9	60%	40%	/	60%Pa40%PG

Tableau IV.1 Les proportions en masse des différents constituants

- On place ces éléments dans un récipient en évitant toute infiltration de l'eau dans le mélange.

- Le récipient est placé dans un bain-marie réglé à 75°C pour faire fondre la paraffine. Après fusion, les différents constituants sont bien mélangés pour assurer un mélange homogène (**Figure IV.7**).



Figure IV.7 : Emplacement du récipient dans le bain-marie

- On verse le mélange homogène dans un moule pour la fabrication des pastilles de $(40 \times 40 \times 4 \text{ mm}^3)$ (**Figure IV.8**).



Figure IV.8 : Fabrication des pastilles.

- Après avoir versé le mélange dans le moule ou la pastilleuse on le comprime manuellement pour extraire les pastilles.
- Les pastilles obtenues sont soumises à une compression unidirectionnelle à 120 kN pendant une minute 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.9**), ce qui nous donne des pastilles comprimées qui figure sur la (**figure IV.10**).

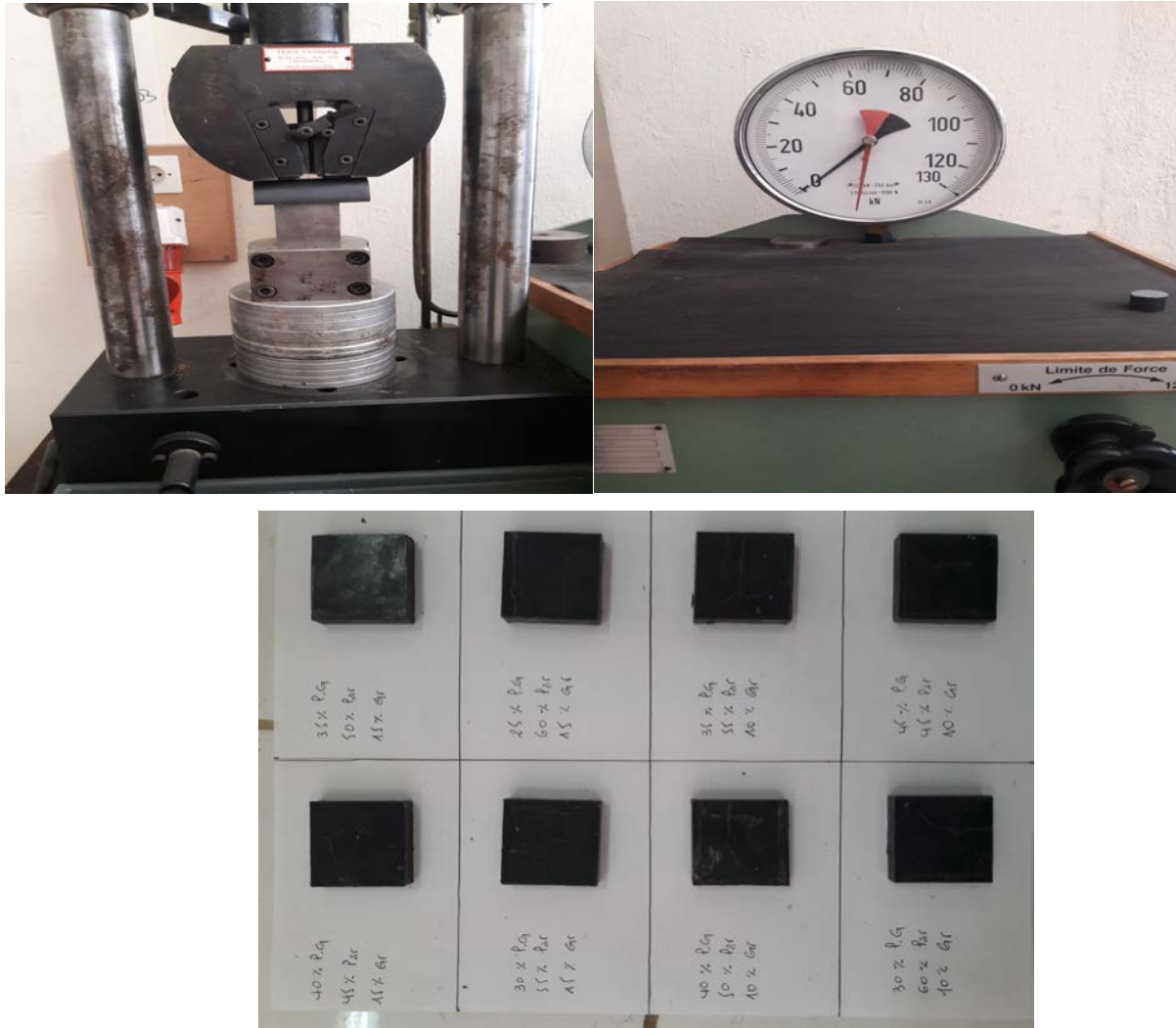


Figure IV.10 : la pastille après La compression.

- après avoir compresser les pastilles, on les a mit dans l'étuve pour les soumettre à une température de 65°C pendant trois heures pour voir le pourcentage le plus fiable qui retient bien la paraffine dans la structure afin de ne pas s'écouler.

IV.2.3 : Préparation des plaques de 30x30x9 cm³ pour mesurer la conductivité thermique :

Un mélange de trois constituants du composite est préparé suivant les pourcentages : 55% paraffine, 30% poudre de granite, 15% de graphite.

Pour obtenir une plaque de dimension (300x300x9mm³), on suit les étapes suivantes :

- Les différents éléments utilisés sont placés dans un récipient après la pesée.
- Le mélange est par la suite placé dans un bain-marie réglé à 70°C.
- Le contenu du récipient est remué pour avoir un mélange homogène jusqu'à fusion totale de la

paraffine (**Figure IV.11**).



Figure IV.11 : le mélange dans le bain marie

- A la sortie du récipient du bain-marie, son contenu est rapidement versé dans le moule fabriqué à cet effet (**Figure IV.12**) pour éviter la solidification du composite à l'intérieur du récipient.



Figure IV.12 : le moule fabriqué

- Enfin, la partie supérieure du moule est placée sur la partie femelle du moule et une force manuelle est appliquée dessus pour éviter la formation des bulles d'air entre le matériau et les parois du moule, et pour améliorer l'état de surface de la plaque.
- Le tout est laissé à l'air libre pour être refroidi et permettre la cristallisation du composite. Au démoulage, une plaque de dimensions (300x300x9 mm³) qui vont nous servir à mesurer la conductivité thermique est obtenue (**Figure IV.13**).



Figure IV.13 : La plaque de dimension $(300*300*9 \text{ mm}^3)$

IV.2.4 : Le CT mètre :

Le CT mètre est un appareil de contrôle thermique non destructif. Il a été élaboré dans le but d'évaluer avec précision, les paramètres thermiques d'un certain nombre de matériaux, et de contrôler la production des matériaux isotropes et homogènes par prélèvements (**Figure III.14**)

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 iso-thermique.

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

Un indicateur à cadran dans la roue permet de déterminer le spécimen testé. Le mouvement de la plaque chaude permet d'utiliser des spécimens de l'épaisseur jusqu'à 75 mm. La plaque chaude est protégée par un interrupteur de haute température (70°C). Une isolation en mousse entoure l'ensemble de débitmètre thermique. Une isolation similaire se trouve sur le couvercle, ainsi qu'un espace d'air stagnant autour de l'ensemble de la plaque chaude, pour empêcher la perte de chaleur (**Figure IV.14**).



Figure IV.14 : Image globale de l'unité de mesure de la conductivité thermique

b) Méthode d'essais :

La taille des échantillons qui peuvent être utilisés avec la méthode de mesure de la conductivité pour un débitmètre thermique est de $300 \times 300 \text{ mm}$. Le spécimen testé doit avoir des dimensions minimum de 75 mm d'épaisseur.

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

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

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

c) Méthode de calcul :

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

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

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

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

Avec :

λ : conductivité thermique

I_s : épaisseur du spécimen en m

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

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

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

T_1 : température de la plaque chaude.

T_2 : température de la plaque froide.

Les constantes d'étalonnage avec ou sans silicone :

$K_1 = 88.1389$

$K_2 = -2.7829$

$K_3 = -21.3064$

$K_4 = 0.8037$

$K_5 = 0.7954$

$K_6 = -0.0189$

IV.3 : Réalisation de l'échangeur :

IV.3.1 : Réalisation du boîtier :

Pour réaliser le boîtier, on a utilisé du bois, deux plaques de 1,4m*15cm*2,5cm, deux autres plaques de 1,25m*15cm*2,5cm qui forment la cadre extérieur.

On aussi couper quatre formes cylindro-parabolique sur trois plaques de bois de 1,2m*15cm*2,5cm qui forment des supports qui vont tenir les formes cylindro-paraboliques, enfin deux derniers support pour fixé les tube sur le foyer de la cylindro-parabole. **(Figure IV.15.16)**



Figure IV.15: support cylindrparabolique



figure IV.16: cadre de la structure de basse



Figure.IV.17 : les supports pour fixer les tubes au foyer

IV.3.2 : Fabrication des structures cylindro-parabolique

Dans cette étape, on a utilisé une tôle de fer d'une épaisseur de 3/10mm pour faciliter la flexion de la paroi. Cette tôle est coupée en quatre rectangles pour la placer sur les structures cylindro-parabolique (**Figure IV.18 et Figure IV.19**).



Figure IV.18 : préparation de la tôle



Figure IV.19 : montage de la tôle

IV.3.3 : Préparation des canettes

Les canettes doivent d'abord subir une modification de leur forme initiale où un des couvercles est totalement ouvert par un côté, et l'autre percé au milieu avec un diamètre de ($d = 12 \text{ mm}$) de l'autre côté pour éviter au maximum la fuite du MCP à l'état liquide tout autant laisser passer les tuyaux avec les ailettes soudées dessus (**Figure IV.20** et **Figure IV.21**).



Figure IV.20: Canette avec et sans le couvercle (vue de dessus).



Figure IV.21 : Cannette avant et après perçage. (Vue de dessous)

Dans cette étapes on a besoin de deux tubes quatre tubes formé par le collage des cannettes, à chaque extrémité de tube on a besoin d'une cannette percé et les autres cannettes son sans le couvercle, pour cela on doit calculer le nombre de cannettes à préparer;

IV.3.3.1 Les quantités du matériau utilisées :

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

$$V = \pi \times r^2 \times L \quad (VI.3)$$

V : volume de la cannette.

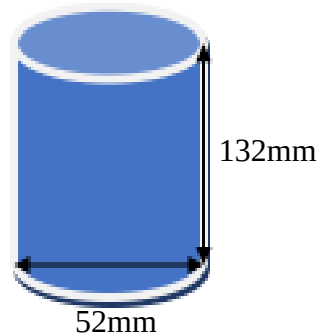
L : longueur de la cannette.

r : rayon de la cannette

.

Après calcul, on trouve

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



Le nombre de cannettes à utiliser :

$N_c =$ la longueur des tubes $\div$ par la longueur d'une seule cannette

$$N_c = (1200 \times 4) \div 132 = 36,36 \text{ cannettes}$$

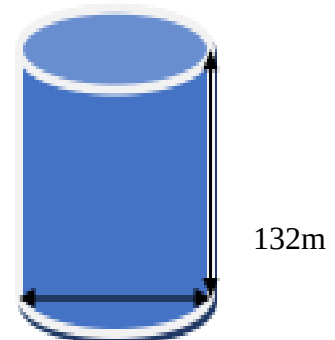
$$N_c \approx 37 \text{ cannettes}$$

Donc

$$V_{T-c} = 1,02 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

Pour le volume des tubes cylindrique de cuivre on utilise toujours la même équation (IV.) mais pour un diamètre défèrent.

$$V_{\text{tube}} = 1,49 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$



Volume à remplir de composite :

$$V = V_{T-c} - V_{\text{tube}}$$

$$V = 0,01 \text{ m}^3$$

V_{T-c} = volume total des cannettes.

V_{tube} = volume total des tubes de cuivre.

Les matériaux qu'on a utilisés sont :

Paraffine $\rho_P = 900 \text{ kg/m}^3$

Graphite $\rho_G = 2160 \text{ kg/m}^3$

Poudre de granite $\rho_S = 2700 \text{ kg/m}^3$

Sachant que les pourcentages des matériaux sont comme suit :

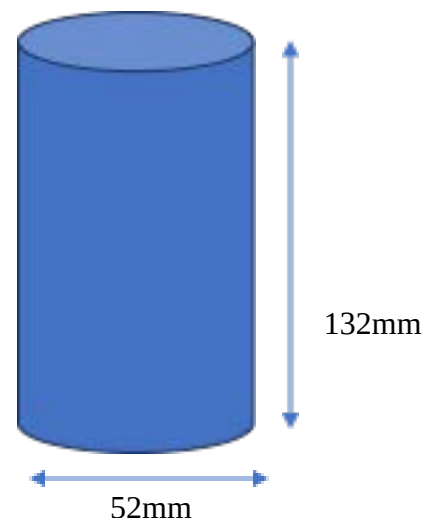
55% Pr, 15% Gr, 30% PG.

La quantité théorique des matériaux utilisée est estimée à 16,29kg : $Pr = 0,55 \times 16,29 = 8,96 \text{ kg}$.

$Gr = 0,15 \times 16,29 = 2,44 \text{ kg}$.

P-Granite = $0,30 \times 16,29 = 4,89 \text{ kg}$.

IV.3.3.2 : La surface d'échange de la canette :



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

$$S = 2\pi rL$$

Alors :

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

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

Donc la surface d'échange total des cannettes s'écrit

$$S = 2\pi rL \times \text{Nombres de cannettes}$$

$$S_{T-C} = 2,155 \times 10^{-2} \times 36,36$$

$$S_{T-C} = 0,784 \text{ m}^2$$

Puisque on a une forme cylindro-parabolique au dessus de tube donc on prend toute la surface comme une surface d'échange.

IV.3.3.3 : Assemblage des cannetes

Une fois les cannetes sont prêtes, on les a fait assemblée d'une manière à avoir des quatre tubes symétriques, pour cela on a utilisé le mastic de silicone pour coller les cannetes l'une à l'autre pour éviter les fuites de l'MCP (**Figure IV.22** et **Figure IV.23**)



Figure IV.22: Le mastic de silicone



Figure IV.23: Collage des cannetes



Figure IV.24: les tubes à canettes

Une fois les tubes sont prêts, on les a couverts avec peinture noire pour améliorer l'absorption de rayonnement reçu (**Figure IV.25**)



Figure IV.25: peindre les canettes en noir matte

IV.3.4 : Préparation des tubes centraux:

On procure 4 tubes en cuivre de longueur $L=1,3\text{m}$ et de diamètre de $D = \text{mm}$, trois petits tubes de même diamètre et de longueur $L = 30 \text{ cm}$ qui alimentent entre les grand tubes à l'aide une coudes en cuivre, pour former un serpentín qui passe par les quatre trous qui se trouve sur les supports réaliser avant (Figure IV.26).



Figure IV.26 : les tubes et les coudes en cuivre de diamètre $d=12\text{mm}$

IV.3.5 : Préparation des ailettes de cuivre

Pour avoir une meilleure diffusivité thermique et une plus grande surface d'échange, on soude des ailettes fabriquées à base de feuilles de cuivre (figure IV.27), qui est un bon conducteur thermique, sur les tuyaux dans lesquels le fluide caloporteur circulera (Figure IV.28),



Figure IV.27: les ailettes à base de feuilles de cuivre



Figure IV.28 : tuyau avec des ailettes en cuivre.

IV.3.6 : Assemblage des tubes à ailettes avec les canettes :

Une fois les tubes en cuivre avec les ailettes sont prêts on les a fait entrer dans les tubes fabriqués à base des canettes afin d'assembler les quatre tubes avec des coudes pour former un serpentin (figure IV.29).



Figure IV.29 : l'assemblage des deux tubes

IV.3.7 : Remplissage des canettes

Une fois qu'on a fini l'assemblage des deux tubes, on prépare l'MCP avec le même pourcentage effectué lors de la préparation de la plaque (300*300*9mm), après la fusion de composite on l'a versé dans le tube fabriqué à base des canettes après une bonne vérification de l'étanchéité des tubes pour ne pas avoir des fuites.

IV.3.8 : Assemblage général de capteur

Après avoir fini avec la réalisation des différents éléments, nous sommes passés à l'assemblage (**Figure IV.30**).



Figure IV.30 : montage fini de capteur.

IV.4. 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.4.1. 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 refroidie, une tension variable est produite, qui peut être ensuite transcrite en température. Les alliages thermocouple sont généralement disponibles en fils.



Figure VI.31 : 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 »

V.4.2 : 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.32: 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.

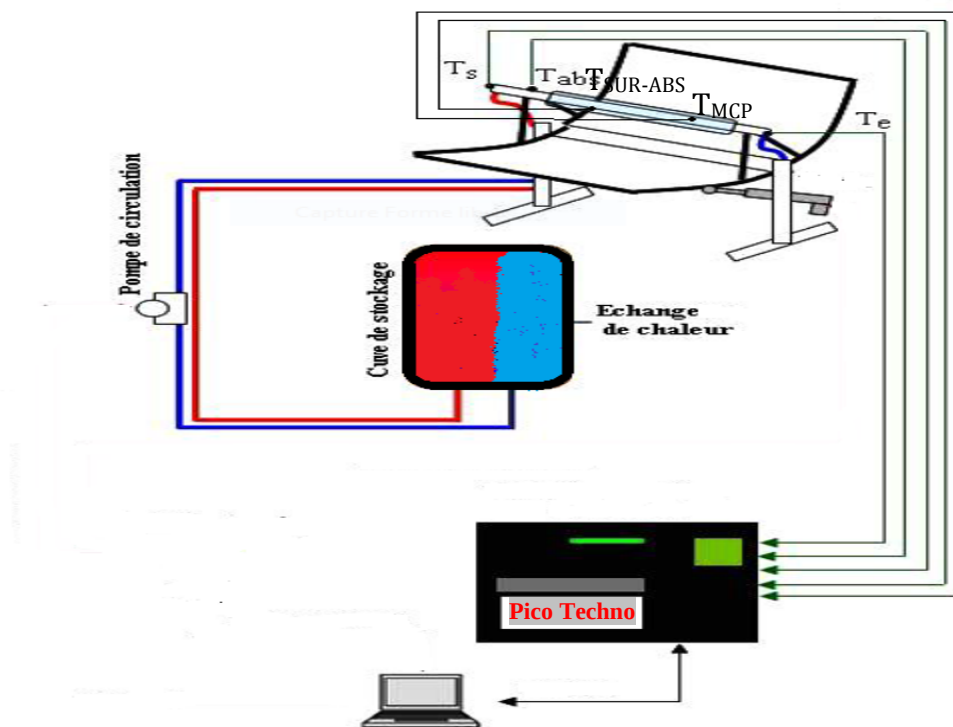


Figure IV.33 : schéma d'acquisition de donnée avec thermocouple

CHAPITRE V

Résultats et discussion

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des différentes opérations faites dans la partie expérimentale, ces résultats vont inclure le comportement de notre matériau à changement de phase et l'efficacité de notre capteur suivant tout les points qui font la différence pour son rendement.

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

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

I_s	9,5mm
e_1	83,11mm
e_2	86,91mm
HFM	43,5mV
T_1	35°C
T_2	21,7°C
ΔT	13,3°C
T	28,35

Tableau V.1 : Résultats du CT mètres

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 : $\lambda = 1,05 \text{ W/ m.K}$.

Discussion :

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

On constate, après comparaison, que la conductivité thermique s'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

On a collecté les résultats obtenus des capteurs de température en trois périodes qu'on a appelés comme suit :

Période de stockage de l'énergie thermique.
Période de déstockage de l'énergie thermique.
Période de l'absence de rayonnement solaire.

Ces trois périodes sont résumées sur les tableaux suivants :

V.2.1. Période de stockage de l'énergie thermique.

Le tableau ci-dessous représente les résultats des tests effectués sur l'échangeur au mois de novembre 2018, pour une période de 45 minutes (11h: 30-12h:15)

Dans cette étape, il n'y a pas une circulation d'eau dans l'échangeur donc il n'y a pas d'échange entre le fluide caloporteur et l'MCP.

Temps (s)	MCP	Sur l'absorbeur	Sous l'absorbeur
1	32,72	38,48	39,06
92	33,14	38,49	39,72
184	33,54	38,51	39,76
276	33,94	38,88	39,92
368	34,38	40,34	41,76
460	34,86	41,75	43,71
552	35,39	43,91	45,87
644	35,95	44,45	46,90
736	36,46	44,80	46
828	36,97	42,61	45,14
920	37,4	41,28	44,02
1012	37,75	41,42	46,67
1104	38,09	44,62	47,99
1196	38,48	45,38	50,01
1288	38,95	46,21	51,51
1380	39,48	46,60	50,62
1472	39,99	46,79	51,50
1564	40,55	47,58	52,47
1656	41,03	47,99	52,84
1748	41,48	48,43	53,38
1840	41,95	48,60	53,44

1932	42,39	48,88	53,97
2024	42,92	49,18	54,23
2116	43,51	50,59	56,42
2208	44,3	50,87	56,97
2300	45,14	49,14	56,73
2392	46,95	51,97	57,98
2484	46,97	52,45	58,59
2576	47,02	52,09	58,76
2668	47,09	52,03	59,55

Tableau V.2 : températures à différents endroits de capteurs sans circulation de fluide

Discussion des résultats

Le graphe ci-dessous montre l'évolution de la température en fonction du temps a différents endroit du capteur sans prendre en compte l'entrée et la sortie de fluide puisque il n'y a pas de circulation d'eau.

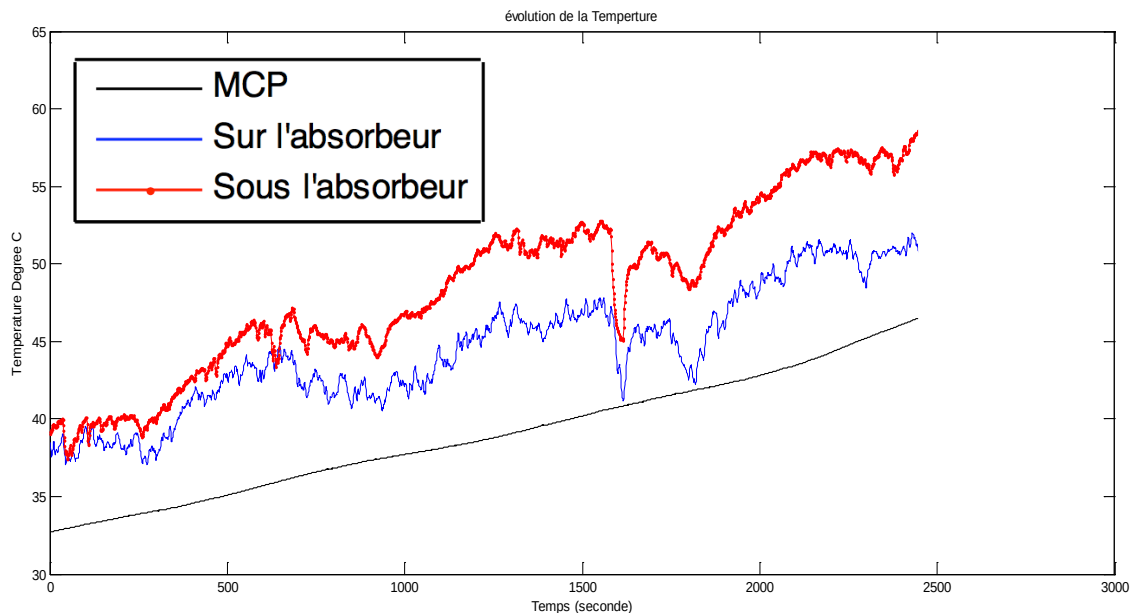


Figure V1 : Evolution de la température en fonction du temps à différents endroits du capteur (phase de stockage)

Discussion :

On remarque une importante évolution de température sous l'absorbeur comparé avec celle sur l'absorbeur, cela confirme l'efficacité de la surface cyindro-parabolique et sa capacité de réfléchir plus de rayonnement vers la partie inférieure de l'absorbeur que celle reçu sur l'absorbeur directement du soleil.

On remarque aussi une bonne évolution de température dans le composite jusqu'à atteindre la température de fusion à la fin de l'allure pendant une durée de 45 minute.

V.2.2.Période de déstockage de l'énergie thermique.

Le tableau ci-dessous représente les résultats des tests effectués sur l'échangeur au mois de novembre 2018, pour une période de trois heures (12h:15-15h30), dans cette période le fluide caloporteur circule dans le serpentin donc on a un échange entre le fluide et l'MCP.

Temps (s)	Entrée du capteur	MCP	Sur l'absorbeur	Sous l'absorbeur	Sortie de l'élément 1	Sortie du capteur
2764	16,02	45,31	52,31	57,53	20,82	27,55
3194	16,51	42,98	52,52	58,05	20,99	28,34
3624	21,91	35,87	45,95	48,12	24,38	25,77
4054	22,71	29,43	46,43	47,46	24,86	26,83
4484	24,12	29,44	39,44	39,74	26,89	27,57
4914	24,9	29,75	39,02	38,49	27,87	28,25
5344	25,66	29,23	34,16	34,66	28,09	28,39
5774	25,82	29,26	33,35	33,41	28,70	28,77
6204	26,04	29,84	37,97	39,56	29,03	29,14
6634	27,20	30,25	38,06	38,77	29,32	29,38
7064	27,65	30,96	42,81	43,87	29,66	30
7494	28,10	31,27	34,13	35,51	30,11	30,40
7924	28,75	31,69	41,74	42,76	30,44	30,78
8354	28,76	31,67	34,21	34,58	30,67	31,01
8784	28,93	31,67	34,13	34,30	30,97	31,07
9214	28,01	32,11	40,99	41,30	31,38	31,90
9644	28,23	32,40	39,40	40,53	32,29	32,90
10074	27,22	32,76	41,41	37,64	32,40	32,99
10504	27,17	33,26	41,99	42,87	32,83	31,04
10934	28,28	33,47	38,89	39,76	33,06	32,98
11364	28,45	33,5	41,38	39,51	33,27	32,75
11794	28,69	33,45	36,36	37,67	33,99	32,48
12224	29,54	33,33	40,46	41,79	34,21	33,19
12654	29,48	34,10	44,71	45,64	34,02	33,98
13084	29,08	35,09	47,39	47,66	35,14	34,02
13514	29,26	38,51	49,92	50,57	38,08	37,99
13944	31,15	39,49	52,62	53,36	37,52	37,01
14374	31,39	40,10	51,48	52,15	37,72	36,88
14804	32,53	40,79	51,43	53,86	39,49	37,77

Tableau V.2 : températures à différents endroits de capteurs avec circulation de fluide.

Discussion des résultats :

Le graphe ci-dessus montre l'évolution de la température en fonction de temps à différents endroits de capteurs en marche ou le fluide caloporteur circule dans le serpentin.

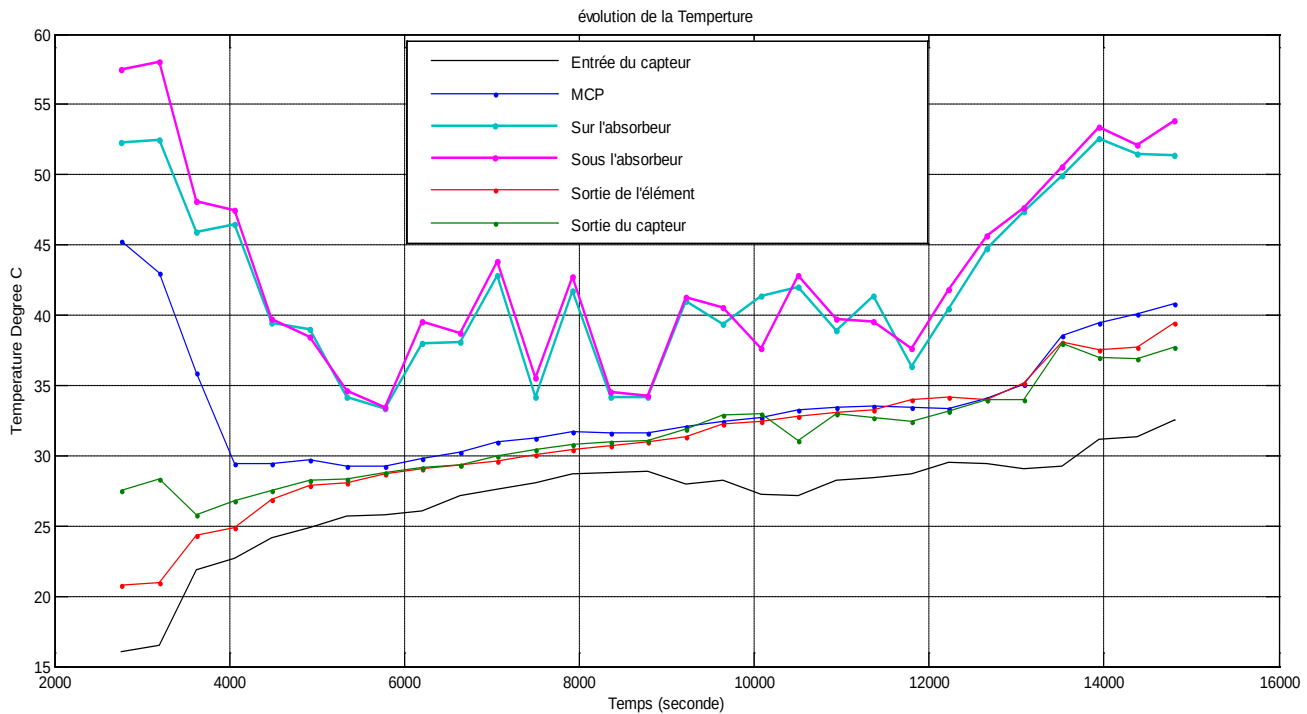


Figure V2 : Evolution de la température en fonction du temps à différents endroits du capteur (phase de déstockage)

Dans cette phase on remarque une chute de température de l'MCP juste après qu'on mit la pompe en marche, elle s'explique par le fait que le composite cède de la chaleur pour l'eau et ce procédé se fait à une vitesse importante ce qui confirme l'efficacité des ailettes et le graffite qu'on a utilisé pour améliorer la conductivité

Dans le reste de la courbe on remarque une évolution de température sur tous les points mesurés du capteur mais dans cette phase le transfert de chaleur se fait par chaleur sensible puisque l'MCP est un peu de la température de fusion.

V.2.1.Période de l'absence de rayonnement solaire

Le tableau ci-dessous représente les résultats des tests effectués sur l'échangeur au mois de novembre 2018, pour une période de 30 min (15h:30-16h00), dans cette période le fluide caloporteur circule dans le serpentin donc on a un échange entre le fluide et l'MCP mais à l'absence de rayonnement.

Temps (s)	Entrée de capteur	MCP	Sur l'absorbeur	Sous l'absorbeur	Sortie de l'élément1	Sortie du capteur
15090	33,32	41,17	51,62	60,43	37,32	35,73
15161	33,35	41,20	51,21	60,64	36,92	35,32
15234	33,97	41,35	49,80	60,44	36,93	36,10
15303	34,12	41,33	50,60	60,70	36,47	36,24
15374	32,28	41,67	49,60	59,37	40,28	32,58
15445	32,48	41,49	49,92	59,73	40,33	32,62
15516	33,15	41,57	49,25	56,87	37,17	35,34
15587	34,46	41,65	48,67	58,88	36,97	35,92
15658	34,89	39,26	44,46	51,25	39,14	37,72
15729	35,09	39,26	43,22	50,30	39,17	37,91
15800	34,96	39,18	43,13	49,91	39,13	37,92
15871	35,17	31,18	42,56	49,62	39,15	37,96
15942	35,51	39,12	39,44	48,29	39,16	37,98
16013	35,13	39,03	36,74	45,41	39,04	38
16084	35,51	38,82	35,94	43,19	38,83	38,06
16155	35,23	38,58	35,53	41,76	38,58	38,4
16226	34,91	38,32	34,53	40,99	38,34	36,77
16,297	34,68	38,08	34,26	40,16	38,16	36,50
16368	34,84	37,83	33,85	39,43	37,95	36,25

Tableau V.3 : Evolution de la température en fonction du temps à différents endroits du capteur (phase d'absence de rayonnement)

Discussion des résultats :

Le graphe ci-dessus montre l'évolution de la température en fonction de temps à différents endroits de capteurs en marche à l'absence de rayonnement solaire.

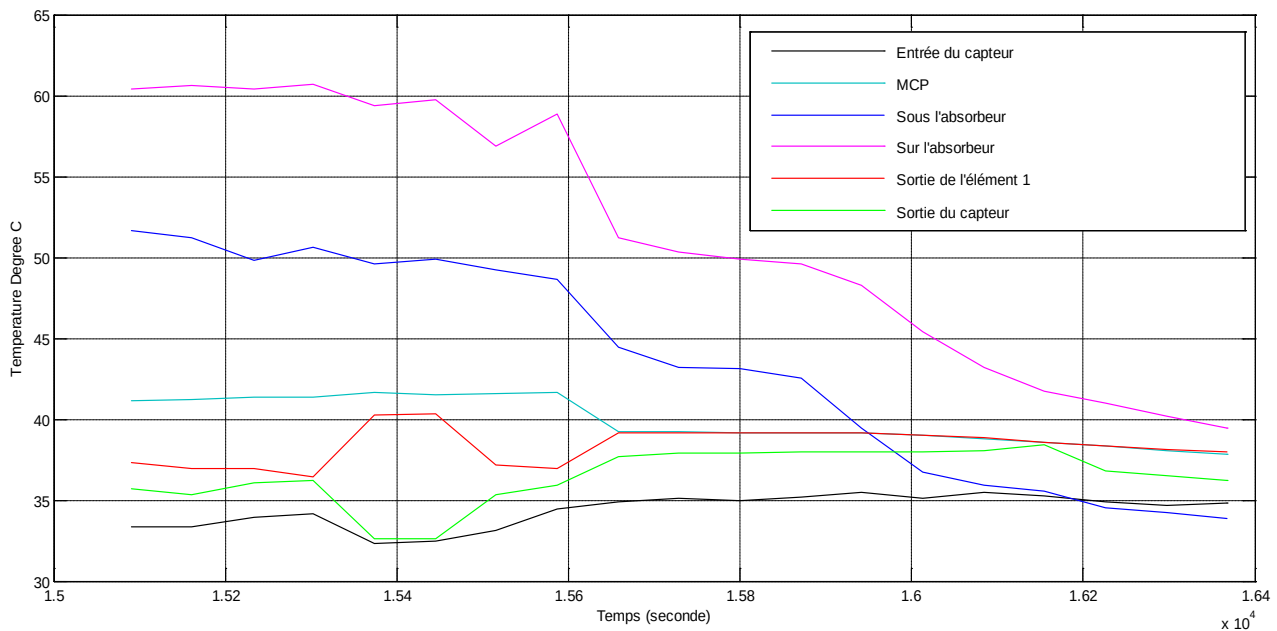


Figure V3 : Evolution de la température en fonction du temps à différents endroits du capteur (phase d'absence de rayonnement)

On remarque dans ce graphe qu'à l'absence du rayonnement l'échange thermique entre l'MCP et l'eau continue jusqu'à atteindre la température d'équilibre, ce phénomène est très claire à la fin de la courbe entre la température de l'MCP et l'élément 1.

V.3.Calcul de débit

En remplissant un bidon de 5L avec de l'eau à la sortie du capteur en 28,98s on obtient

$$\dot{m} = \frac{5}{28,98} = 0,172 \text{ L/s} \quad \text{V.1}$$

$$\dot{m} = 0,172 \text{ Kg/s}$$

V.4.Bilan thermique

V.4.1.Calcul de la chaleur spécifique du composite :

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

$$C_{p_{\text{paraffine-liquide}}} = 1900 \text{ J/kg.K.}$$

$$C_{p_{\text{granite}}} = 740 \text{ J/kg.K.}$$

$$C_{p_{\text{graphite}}} = 720 \text{ J/kg.K.}$$

$$Cp_{composite} = \frac{Cp_{par} \times m_{par} + Cp_{Grnt} \times m_{Grnt} + Cp_{Gr} \times m_{Gr}}{m_{par} + m_{Grnt} + m_{gr}} \quad \mathbf{V.2}$$

La paraffine à l'état solide

$$Cp_{composite} = \frac{Cp_{par,s} \times m_{par} + Cp_{Grnt} \times m_{Grnt} + Cp_{Gr} \times m_{Gr}}{m_{par} + m_{Grnt} + m_{gr}} \quad \mathbf{V.3}$$

$$Cp_{composite} = \frac{2240 \times 0,55 + 740 \times 0,3 + 720 \times 0,15}{0,55 + 0,3 + 0,15}$$

$$Cp_{composite} = 1562 \frac{J}{kg \cdot K}$$

La paraffine à l'état liquide

$$Cp_{composite} = \frac{Cp_{par,l} \times m_{par} + Cp_{Grnt} \times m_{Grnt} + Cp_{Gr} \times m_{Gr}}{m_{par} + m_{Grnt} + m_{gr}} \quad \mathbf{V.4}$$

$$Cp_{composite} = \frac{1900 \times 0,55 + 740 \times 0,3 + 720 \times 0,15}{0,55 + 0,3 + 0,15}$$

$$Cp_{composite} = 1375 \frac{J}{kg \cdot K}$$

V.4.2.Calcul de rayonnement

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

Estimation des profils moyens journaliers.

Résultats données pour le mois de novembre.

Inclinaison du panneau : 0 degrés

Orientation (azimut) du panneau : 0 degrés

L'heure	Rayonnement global Gc (W/m ²)
4h :00	0
5h :00	0
6h :00	0
7h :00	7
8h :00	157
9h :00	332
10h :00	475
11h :00	568
12h :00	599
13h :00	568
14h :00	475
15h :00	332
16h :00	156
17h :00	7
18h :00	0
19h :00	0
20h :00	0

Tableau V.4 : rayonnement global sur un plan fixe W/m²

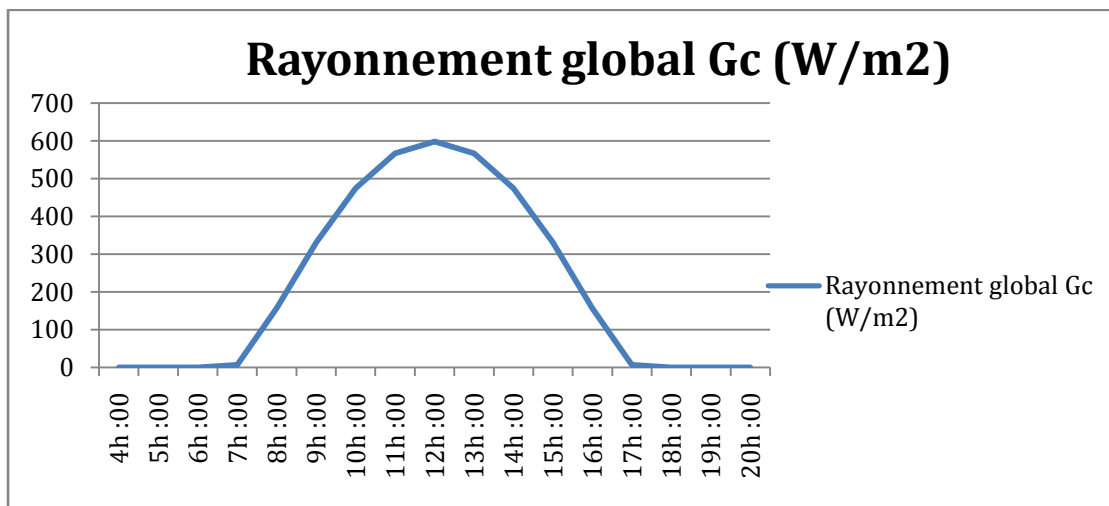


Figure V.4 : courbe du rayonnement global pour un ciel clair

V.4.2.1. Rayonnement global par mètre carré de capteur :

Sachant que l'expérience s'est déroulée entre 11h30 et 16h donc nous ne prendrons que les valeurs qui sont dans l'intervalle de ce temps :

$$E_{ray} = \sum(\text{intensités moyennes} \times 3600) \quad \text{V.5}$$

$$E_{ray} = (568 + 599 + 568 + 475 + 332) \times 3600$$

$$E_{ray} = 9151200 \text{ J/m}^2$$

V.4.2.2. Rayonnement reçu par la surface étudiée

Surface des relecteurs :

$$S_{cyl-par} = 2 \times \text{longueur de l'arc} \times \text{la longueur de cylindro - parabole}$$

$$S_{cyl-par} = 2 \times \left[\frac{D}{2} \sqrt{\left[\frac{4P_f}{D} \right] + 1} + 2 \ln \left[\frac{4P_f}{D} + \sqrt{\left[\frac{4P_f}{D} \right]^2 + 1} \right] \right] \times 1200 \quad \text{V.6}$$

$$S_{cyl-par} = 2 \times 0,1707478011 \times 1200$$

$$S_{cyl-par} = 409,79 \text{ mm}^2$$

Puisque on a quatre éléments ou bien quatre forme cylindro-parabolique donc on multiplie cette surface obtenue par 4 :

$$S_{T-cyl-par} = S_{cyl-par} \times 4 \quad \text{V.7}$$

$$S_{T-cyl-par} = 409,79 \times 4$$

$$S_{T-cyl-par} = 1,63918 \text{ m}^2$$

Surface des cannettes

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

$$S = 2\pi rL \quad \text{V.8}$$

Alors :

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

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

Donc la surface d'échange total des cannettes s'écrit

$$S = 2\pi rL \times \text{Nombres de cannettes} \quad \text{V. 9}$$

$$S_T = 2,155 \times 10^{-2} \times 36,36$$

$$S_T = 0,784 m^2$$

V.4.2.3 Rayonnement envoyé par les réflecteurs sur les cannettes :

$$Ray_{ref-soleil} = \frac{E_{Ray-soleil} \times S_{ref}}{1m^2} \times Cof_{reflexion} \quad \text{V.10}$$

$$Ray_{ref-soleil} = \frac{9151200 \times 1,63918}{1m^2} \times 0,9$$

$$Ray_{ref-soleil} = 13500417,61 J$$

V.4.2.4. Le rayonnement issu du réflecteur :

$$Ray_{can-ref} = \frac{S_{cannettes}}{2} \times Ray_{réflecteurs} \quad \text{V.11}$$

$$Ray_{can-ref} = 0,392 \times 13500417,61$$

$$Ray_{can-ref} = 5292163,70 J$$

V.4.2.5. Le rayonnement issu du soleil et reçu par les cannettes :

$$Ray_{can-soleil} = \frac{S_{cannettes}}{2} \times Ray_{soleil} \quad \text{V.12}$$

$$Ray_{can-soleil} = 0,392 \times 9151200$$

$$Ray_{can-soleil} = 3587270,4 J$$

V.4.2.6. Le rayonnement total reçu par la surface étudiée :

$$Ray_{Total} = Ray_{can-soleil} + Ray_{can-réflecteurs} \quad \text{V.13}$$

$$Ray_{Total} = 3587270,4 + 5292163,70$$

$$Ray_{Total} = 8879434,10 J$$

V.4.3. Charge thermique de composite

Pour calculer l'énergie stockée par le composite, nous avons utilisés l'équation de l'enthalpie totale suivante :

$$E_{composite} = [mCp_s \Delta T + mL_f + mCp_l \Delta T] \quad \text{V.14}$$

$$E_{composite} = \left[16,29 \times 1562 \times (44,3 - 32,72) + 16,25 \times 158,92 \times 10^3 \right. \\ \left. + 16,29 \times 1375 \times (47,09 - 45,14) \right]$$

$$E_{composite} = 2920780,43 \text{ J}$$

V.4.3.1. La quantité d'énergie reçue par l'eau :

$$E_{eau} = mCp_{eau} \Delta T \quad \text{V.15}$$

$$E_{eau} = 60 \times 4180 \times (38,83 - 16,02)$$

$$E_{eau} = 5244019 \text{ J}$$

On a :

$$E_{Ray} = E_{eau} + E_{comp} + E_{perte} \quad \text{V.16}$$

$$E_{Perte} = 8879434,10 - (2920780,43 + 5244019 \text{ J}) \\ E_{Perte} = 714634,67 \text{ J}$$

$$\frac{E_{pertes}}{E_{comp}} \times 100 = \frac{714634,67}{2920780,43} \times 100 \quad \text{V.17}$$

$$E_{Perte} = 24,46 \%$$

V.4.4. Décharge thermique de composite

$$E_{composite} = [mCp_s \Delta T + mL_f] \quad \text{V.18}$$

$$E_{composite} = 16,29 \times 1562 \times (41,17 - 37,83) + 16,25 \times 158,92 \times 10^3$$

$$E_{composite} = 2667436,23 \text{ J}$$

V.4.4.1. La quantité d'énergie reçue par l'eau :

$$E_{eau} = mCp_{eau} \Delta T \quad \text{V.20}$$

$$E_{eau} = 60 \times 4180 \times (36,25 - 33,32)$$

$$E_{ea} = 734844 \text{ J}$$

$$E_{comp} = E_{eau} + E_{perte} \quad \text{V.21}$$

$$E_{Perte} = (2667436,23 - 734844) \\ E_{Perte} = 932592,23 \text{ J}$$

$$\frac{E_{Pertes}}{E_{comp}} \times 100 = \frac{932592,23}{2667436,23} \quad \text{V.22}$$

$$E_{Perte} = 34,96 \%$$

V.4.5.L'efficacité de l'échangeur

$$\eta = \frac{E_{comp} + E_{eau}}{E_{Ray}} \times 100 \quad \text{V.23}$$

$$\eta = \frac{5244019}{8879434,10} \times 100$$

$$\eta = 0,59$$

Conclusion général

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 par 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 travail sont comme suit :

Les résultats du CT mètre ont montré que l'ajout du graphite améliore sensiblement la conductivité thermique du composite.

Les ailettes contribuent à augmenter la surface d'échange.

La paraffine a été bien retenue dans la matrice utilisée comme support de stockage pour avoir une viscosité plus grande.

La structure cylindro-parabolique nous permet d'atteindre des températures importantes grâce à son système de concentration sur l'absorbeur.

En conclusion, on a réussi à fabriquer un capteur où on a ajouté un concentrateur pour augmenter le flux de chaleur capté, ainsi on a rajouté du graphite pour notre MCP afin d'augmenter la conductivité thermique, on a aussi augmenté la surface d'échange en utilisant des ailettes, notre élément de stockage par MCP à l'aide d'un concentrateur 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.

Références Bibliographiques

- [1] J. Bernard, Energie solaire Calculs et optimisation, Edition ellipses, 2004.
- [2] **J. M Chasseriau**, « conversion thermique du rayonnement solaire » Dunod 1984.
- [3] **Ahmed Habib Khedim** « L'énergie solaire et son utilisation sous sa forme thermique et photovoltaïque » ANEP ?2005. PP 104-125.
- [4] **S. Saadi**, Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Mémoire de Magister en physique ; UMC, 2010.
- [5] **M. Capderou**, Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.
- [6] **Pierre Henri** Communay: Héliothermiques; Le gisement solaire Méthodes et calculs. Grope de Recherche et d'Edition-2002.
- [7] M, Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (1985).
- [8] **A. Mefti; M.Y Bouroubi; H. Mimouni**, Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N° 2, P12, décembre 2002.
- [9] **A. Mefti; M, Y, Bouaroubi; H Mimouni**. « Evaluation du potentiel énergétique solaire », bulletin des énergies renouvelables, N⁰², P12, décembre 2002.
- [10] **SHARMA S.D SAGARAK**. "Latent heatstoragematerial and system a review". International journal of green energy 2: 1-56. (2005).
- [11] **Amina Akrouche** ; " Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase » ; mémoire de Magister ; Université M'Hamed BOUGARA, Boumerdes ; ALGERIE
- [12] Rijal alaina ROKOTOSAONA. Thèse De Doctorat. Etude et modélisation des équilibre liquide/solide et solide/solide des mélange binaire de n-alcanes linéaires et des mélange multiconstituants. 21 décembre 2005 à l'institut polytechnique de LORRAINE
- [13] C.K Jotshi, D.Y. Goswami and J.J. Tomlinson, Solar thermal energystorage in phase Change materials, in proc. 1992 ASES AnnualConnf USA, 1992.
- [17] LANE G.A phase change materials for energystoragenucleation to preventsupercooling. Solarenergymaterials and solarcells 27:135-160 (1992).

[18] Matthieu Martinelli. Stockage d' énergie thermique par changement de phase – Application aux réseaux de chaleur. Thermique [physics.class-ph]. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. <tel-01412771v2>

[19] R. Velraj, R. V Seeniraj, B. Hafner, C. Faber et K. Schwarzer «Heattransferenhancement in latent heatstoragesysteme». Sol. Energy. Vol. 65. No 3, pp 171-180 Feb 1999.

[20] AdeleSoupart-Caron. Stockage de chaleur dans les matériaux a changement de phase. Genie des procedes. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. <NNT : 2015GREAI078>. <tel-01266813>

[22] Echangeur de chaleur – description des échangeurs – catégorie : Génie énergétique, be 9516, Technique de l'Ingénieur.

[23] J.F. Sacadura, Initiation aux transferts thermiques, coordonnateur. Edition TEC et DOC.

[24] G.Ricot, Transmission et échangeurs de chaleur, les éditions Parisiennes.

[25] Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Paris, France. Spécialité Energétique. Serge Blaise EkomyAngo. Le 24 novembre 2011.

[26] A.steinfeld et R.Palumbo, solar thermo chemicalprocesstechnology .edition: Encyclopedia of physical science et technology ,2001

[27] s.kalogéro.sliod and j.ward., a simplified méthode for estimatingintercept factor of parabolique Throughcollectors,proceedings of the forthwordrenewableenergycongress , Denver . Colorado .USA

http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89changeur_de_chaleur

<http://www.cder.dz>

[www.NASA.Org](http://www.nasa.org)