

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté de génie de la construction
Département de génie mécanique



*En vue de l'obtention du diplôme de Master II professionnel en Génie Mécanique,
énergétique*

Option : Froid chauffage et climatisation



Thème

*Etude et réalisation d'un distillateur solaire avec
stockage d'énergie*



Proposé et dirigé par :

Directeur : M^r Makhoulf Said

Réalisé par :

M^{lle} Messaoudene Souad

Promotion 2017/2018

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Gisement solaire	
I.1.Introduction.....	3
I.2.Généralités sur le soleil.....	3
I.3.Mouvement de la terre.....	3
I.4.La sphère céleste	4
I.5.Les coordonnées célestes.....	5
I.5.1- Les coordonnées géographiques terrestres.....	5
• La longitude (λ)	
• La latitude (ϕ)	
• L'altitude (Z, H)	
I.5.2-Les coordonnées horaires.....	6
• La déclinaison solaire (δ)	
• L'angle horaire (ω)	
I.5.3-Les coordonnées horizontales.....	7
• L'azimut (a)	
• La hauteur (h)	
I.6.Les temps solaires.....	8
I.6.1. Le temps solaire vrai (T.S.V)	8
I.6.2. Le temps solaire moyen (T.S.M).....	9
I.6.3. Le temps universel (T.U).....	9
I.6.4. Le temps légal (TL).....	9
I.7. Direction des rayons solaires.....	9
I.8. La constante solaire.....	11
I.9. Principe de la réflexion.....	12
I.9.1.Réflexion sur une surface plane.....	12
I.9.2.Réflexion sur une surface courbée	12

I.10. Le spectre solaire incident	13
I.11. Irradiation solaire	13
I.12. Durée d'insolation.....	14
I.13. Différents types de rayonnement	14
• Rayonnement direct	
• Rayonnement diffus	
• Rayonnement réfléchi	
• Rayonnement global	
I.14. Rayonnement solaire en Algérie.....	15
Conclusion.....	16

Chapitre II : Généralités et étude théoriques sur le distillateur solaire

II.1. Introduction.....	18
II.2. Définition	18
II.3. Historique sur la distillation solaire.....	19
II.4. Types de distillation solaire.....	20
II.4.1. Distillation solaire à effet de serre	20
a) Les distillateurs statiques	20
➤ Distillateur plan à pente unique	
➤ Distillateur plan à double pente	
➤ Distillateur solaire sphérique	
➤ Distillateur solaire incliné à cascades	
b) Distillateur à ruissellement.....	23
➤ Distillateur solaire à mèche	
➤ Distillateur solaire à film capillaire	
➤ Distillateur solaire vertical	
II.4.2. Distillateur solaire à multiples effets.....	26
II.4.3. Distillateur à concentration.....	27
- Cylindro-parabolique	

- Sphérique	
- Parabolique	
- Plan	
II.4.4. Distillateurs avec stockage de chaleur.....	29
II.5. Le cas d'un distillateur d'urgence.....	29
II.6. Autres techniques de dessalement.....	30
II.6.1. Technique de l'osmose inverse.....	30
II.6.2. Technique de l'électrodialyse.....	30
II.6.3. Le dessalement par congélation.....	31
II.6.4. Technique de la distillation (flash).....	31
II.7. Les paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur.....	32
II.7.1. Les paramètres internes.....	32
II.7.1.1. Les paramètres de position.....	32
- L'emplacement	
- L'orientation	
- L'inclinaison	
II.7.1.2. Les paramètres de construction.....	33
- La couverture	
- L'absorbeur (récepteur)	
- Le réflecteur	
- L'épaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller	
- L'isolation des faces latérales du distillateur	
II.7.1.3. Les paramètres thermo physiques.....	34
- La couverture et la surface absorbante	
- La saumure	

- Le mélange air-vapeur

II.7.1.4. Les paramètres optiques.....	34
II.7.1.5. Les paramètres de fonctionnement.....	34
II.7.2. Les paramètres externes.....	35
II.7.2.1. Intensité du rayonnement solaire.....	35
II.7.2.2. La vitesse du vent.....	35
II.7.2.3. La température ambiante de l'air.....	35
II.7.2.4. Les paramètres géographiques.....	35
II.8. Conception objective pour un distillateur solaire efficace.....	35
II.9. Principe du fonctionnement du prototype réalisé.....	36
II.10. Echanges de chaleur à l'intérieur du distillateur.....	37
II.10.1. Echange de chaleur entre l'absorbeur et la marmite.....	37
II.10.2. Echange de chaleur entre la marmite et le vase.....	38
II.10.3. Echange de chaleur entre la vitre et l'ambient.....	38
II.11. Bilans thermiques.....	38
II.11.1. Bilan énergétique de la vitre extérieure.....	41
II.11.2. Bilan énergétique de la vitre intérieure.....	42
II.11.3. Bilan énergétique de la marmite.....	42
II.11.4. Bilan énergétique de l'eau.....	43
II.11.5. Bilan énergétique de l'absorbeur.....	43
II.11.6. Bilan énergétique d'un réflecteur.....	43
II.11.7. Le flux perdu à travers les murs.....	43
II.11.8. la surface d'échange d'un condenseur.....	44
II.12. Expressions des coefficients d'échange thermique.....	45
II.12.1. Coefficient d'échange radiatif.....	45
a) Entre la vitre et la voûte céleste	
b) Entre l'absorbeur et la vitre de condensation	

II.12.2. Coefficient d'échange convectif.....	45
a) Entre la vitre et l'atmosphère	
b) Entre la saumure et la vitre	
c) Entre la saumure et l'absorbeur	
d) Entre l'absorbeur et l'air ambiant	
II.12.3. Coefficient d'échange par évaporation-condensation.....	46
II.13. Caractéristiques de fonctionnement du distillateur.....	48
II.13.1. Le rendement.....	48
II.13.2. La performance.....	48
Le facteur de performance brut (F.P.B)	
Le facteur de performance horaire (F.P.H)	
Conclusion.....	49

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

III.1. Introduction.....	50
III.2. Stockage d'énergie thermique.....	50
III.2.1. Stockage par chaleur sensible	50
III.2.2. Le stockage par chaleur latente.....	51
III.2.3. Comparaison entre le stockage par chaleur latente et le stockage par chaleur sensible.....	52
III.2.4. Les avantages de stockage par chaleur latente.....	55
III.3. Critère de choix d'un MCP.....	55
a) Critères thermodynamiques	
Les propriétés thermodynamiques et thermiques	
Les propriétés cinétiques	
Les propriétés chimiques	
Les propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement)	
III.4. Les problèmes liés au changement de phase.....	57
a) La surfusion	

b) La surchauffe	
c) La dilatation	
III.5. Classification des matériaux à changement de phase (MCP).....	58
III.5.1. Les composés organiques.....	59
III.5.1.1. Les composés organiques paraffiniques.....	59
III.5.1.1.1. Les avantages et inconvénients des paraffines.....	60
a) Avantages	
b) Inconvénients	
III.5.1.2. Les composés organiques non paraffiniques.....	61
III.5.2. Les composés inorganiques.....	62
III.5.2.1. Les sels hydratés.....	62
a) Avantages	
b) Inconvénients	
III.5.3. Les eutectiques.....	64
a) Avantages	
b) Inconvénients	
III.6. Méthodes de conditionnement des MCP.....	65
a) La macro-encapsulation	
b) La micro-encapsulation	
III.7. Quelques pistes pour l'amélioration du transfert thermique dans un système de stockage latent.....	66
III.8.1. Amélioration de la conductivité globale du MCP.....	67
III.8.1.1. Les structures métalliques.....	67
a) Matrices métalliques	
b) Mousse métallique	
c) Les nanoparticules	
III.9. Application des Matériaux à changement de phase.....	68
a) L'isolation des bâtiments	
b) La climatisation passive et le chauffage	
c) Le stockage de l'énergie thermique	
d) Le textile	

e) Le Transport agroalimentaire, pharmaceutique et médicale	
Conclusion.....	70

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV.1. Introduction.....	72
IV.2.Elaboration du composite.....	72
IV.2.1.Matériaux utilisés pour la préparation du composite.....	72
a) La paraffine (MCP)	
b) La perlite	
c) Le graphite	
IV.2.2. Le composite MCP/Per/Gr.....	76
IV.2.3.Préparation de la plaque (300mm× 300mm×80mm) pour la mesure de la conductivité thermique.....	78
IV.2.4. Calcul de la conductivité thermique de la plaque.....	79
• Le CT mètre	
• Description de l'appareil	
• Méthode d'essai	
• Méthode de calcul	
IV.2.5. Mesure de la masse volumique par la méthode du pycnomètre.....	82
• Principe de mesure de la masse volumique d'un solide	
IV.3. Fabrication du distillateur.....	83
1) Le boîtier stockeur	
2) La marmite	
3) L'isolation thermique	
4) Le réservoir	
5) Le condenseur	
6) L'absorbeur	
7) La tuyauterie	
8) Réflecteur extérieur	
9) Couverture verrière (verre)	
IV.4. Le montage de boîtier.....	89
IV.5.Le montage du réservoir.....	89

IV.6. La surface d'échange de condenseur avec l'eau de réservoir.....	89
IV.7. Les quantités des matériaux utilisées.....	90
IV.8. IV.8. Le test sur le distillateur avec les lampes	
a) La lampe infrarouge.....	90
b) Une lampe de 200W.....	91
IV.9. Le corps sous forme de pyramide.....	91
IV.10. Mesure de la température des différents éléments de distillateur.....	92
IV.10.1. Les Thermocouples.....	92
IV.11. Pico Technology Enregistreur de données, Température USB TC-08....	92
• Description de l'instrument	
• Caractéristiques et avantages	
IV.12. Logiciel PicoLog.....	94
a) Lancement de PicoLog	
b) Affichage enregistreur	
c) Affichage graphe	
d) Affichage tableau	
e) Affichage lecteur	
IV.13. Etalonnage d'un instrument de mesure.....	101
Conclusion.....	102

Chapitre V : Résultats et discussion

V.1 Résultats de mesure de la conductivité thermique.....	103
Discussion.....	103
V.2. Résultats des tests effectués sur le distillateur solaire.....	104
V.2.1. Discussion des résultats obtenus au test par rayonnement solaire.....	105
V.3. Résultats des essais effectués avec des lampes	106
V.3.1. Avec lampe infrarouge 120w : test le 26 /11/2018 pour (3h).....	106
V.3.1. Discussion des résultats obtenus du test effectué par la lampe infrarouge 120w	108

V.3.2.Avec une lampe de 200w : test le 28 /11/2018 pour (3h).....	110
V.3.2.Discussion des résultats obtenus du test effectué par la lampe 200w...	111
Conclusion.....	111
Conclusion générale	112

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail. Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous les professeurs qui nous ont aidés tout au long de notre cursus universitaire en particulier notre directeur de mémoire Mr: S. Makhlouf pour ses conseils et l'aide qu'il nous a apportés. Nous remercions les responsables des labos MCI (Moteur à Combustion Interne) et RDM (Résistance Des Matériaux) de la faculté de génie de la construction. Nous tenons aussi également à remercier les responsables de l'atelier de Mécanique de Oued-Aissi pour leurs aides dans la réalisation de l'échangeur. Nous tenons aussi à remercier le président et les membres du jury pour avoir accepté de juger ce modeste travail. Nos derniers remerciements, vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

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

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

Tous mes frères et sœurs.

Toute ma famille surtout ma chère tata.

Tous mes enseignants.

Chaque personne qui m'a aidé chacun son nom.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est la source de la vie, elle est omniprésente 72% de la surface de la terre dont 97% d'eau salée et 3% seulement d'eau douce. Elle se présente sous forme liquide, gaz (vapeur d'eau) et solide et se trouve dans de grands réservoirs tels que les océans, les lacs, les nappes souterraines, l'atmosphère et les glaciers.

En effet, la population augmente rapidement et les besoins en eau de l'industrie et de l'agriculture est de plus en plus élevée

Les besoins en eau sont principalement répartis entre 4 types de consommation :

-) 55% de l'eau consommée sert à fournir de l'énergie (barrage hydroélectrique, refroidissement des centrales nucléaires, énergie géothermique, etc.),
-) 8% est consommée par les particuliers ;
-) 15% est utilisée par l'agriculture ;
-) 12% est consacrée à un usage industriel.

Il y a actuellement, pour l'ensemble de la planète suffisamment d'eau pour satisfaire à toutes les utilisations. Toutefois, cette eau n'est pas répartie selon les besoins de chaque région; ainsi, certaines régions sont affectées de pénuries chroniques (désert), alors que d'autre affiche des surplus.

La demande globale en eau ne cesse d'augmenter. Si la tendance actuelle se maintient, la demande en eau pourrait dépasser les quantités disponibles il n'y aura simplement pas assez d'eau de pluie pour combler nos besoins.

L'approvisionnement en eau potable est devenu le problème le plus préoccupant de notre époque, puisque la demande en eau croît tandis que les ressources naturelles diminuent ou tendent à disparaître. Une des solutions qui peut contribuer à l'augmentation des potentialités en eau est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Le procédé le plus adéquat pour effectuer ce dessalement est la distillation solaire, vu sa simplicité, son moindre coût et surtout la disponibilité de la source d'énergie.

Le dessalement de l'eau de mer et saumâtre par l'énergie solaire est le plus rentable et où la demande est la plus urgente que l'eau potable soit distribuée aux compte-gouttes. Pour répondre au déficit d'eau dans le monde, divers procédés techniques ont été développés, ces dernières décennies pour déminéraliser l'eau de mer et saumâtre par l'énergie solaire qui est une énergie renouvelable et gratuite.

Et ce travail porte sur l'étude et la réalisation d'un distillateur solaire avec stockage d'énergie pour la production de l'eau douce en utilisant l'énergie solaire ; dont :

- Le premier chapitre est consacré pour l'énergie solaire et la course du soleil par rapport à la terre.

- Le deuxième chapitre porte des connaissances sur les différents types de distillateur solaire et l'étude théorique.

-Le troisième chapitre est consacré pour les matériaux à changement de phase

-Le quatrième chapitre est consacré pour la méthode et les matériels utilisés pour la réalisation du distillateur solaire avec stockage d'énergie.

INTRODUCTION GENERALE

- Le dernier chapitre comporte les résultats obtenus et discussions.
- Enfin, le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE I : Le gisement solaire

CHAPITRE I : Le gisement solaire

I.1 : introduction

Le soleil est la source de la majorité des énergies qui existent sur terre telles que les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon), l'énergie hydro-électrique, les énergies renouvelables (solaire, éolienne, énergie thermique des mers,...), la biomasse et plantes végétales (photosynthèse). En d'autres termes, sans le soleil il n'y aurait pas de vie sur terre.

Le soleil, une des innombrables étoiles de notre galaxie est né il y a 4,6 milliards d'années dont le cycle de vie est donné par la figure I.1. Dont ce chapitre est consacré pour donner des rappels sur l'énergie solaire et les différents paramètres qui influent sur le rayonnement solaire.



Fig.I.1 : Le cycle de vie du soleil [1]

I.2. Généralités sur le soleil

Le soleil est une source immense d'énergie dont le cœur transforme chaque seconde plus de 4 millions de tonnes de matière en énergie où l'hydrogène fusionne en hélium qui se fait par une réaction thermonucléaire. Le soleil est une étoile de $1,4 \cdot 10^9$ m de diamètre (110 fois celui de la Terre), par une distance moyenne de $1,49 \cdot 10^8$ de la terre, il tourne autour de son axe une fois toutes les quatre semaines, cependant il ne tourne pas comme un corps solide, une rotation est faite en 27 jours à l'équateur et en 30 jours pour les régions polaires [1]. Le soleil est considéré comme un corps noir avec une température de $T = 5778$ K (5505 °C) avec un maximum de rayonnement de 1367,7 W et une puissance de $P_c \text{ é e p l t } 1 \cdot 10^{1}$ W.

I.3. Mouvement de la terre

La terre décrit autour du soleil une trajectoire elliptique dont le soleil occupe un foyer [2].

La terre tourne sur elle-même de l'axe des pôles et le plan équatorial, perpendiculaire à cet axe. ainsi la rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Elle tourne autour du soleil en 265 jours 5h 48mn 40s.

La terre tourne avec une vitesse moyenne de 29,77 km/s (vitesse maximal en hiver 30,27km/set minimal 29,77km/s en été) Ce mouvement s'effectue en sens trigonométrique et provoque le cycle des saisons.

CHAPITRE I : Le gisement solaire

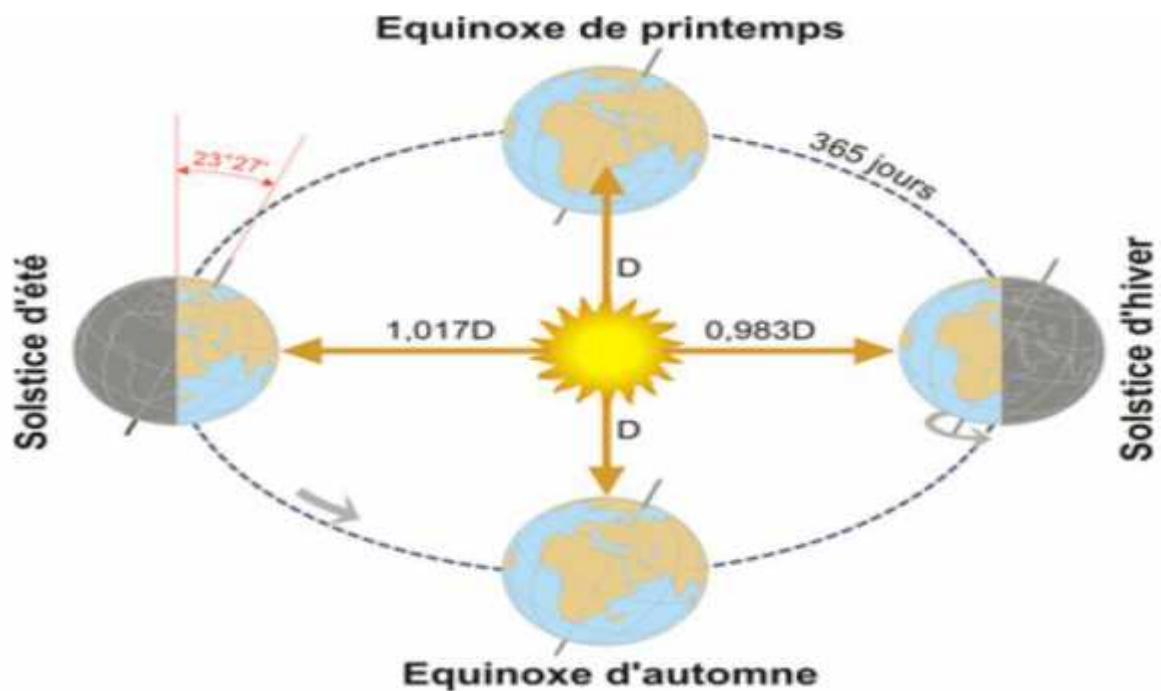


Fig I.2 : le mouvement de la terre autour du soleil [1]

Cette révolution fait varier les durées relatives du jour et de la nuit au rythme des saisons limitées par les deux équinoxes et les deux solstices (voire figure I.2)

- Equinoxe de printemps correspond au 21 Mars,
- Equinoxe d'automne correspond au 23 Septembre,
- Solstice d'été correspond au 22 Juin,
- Solstice d'hiver correspond au 22 Décembre.

I.3. La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, 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 c'est indiqué sur la figure [I.3].

CHAPITRE I : Le gisement solaire

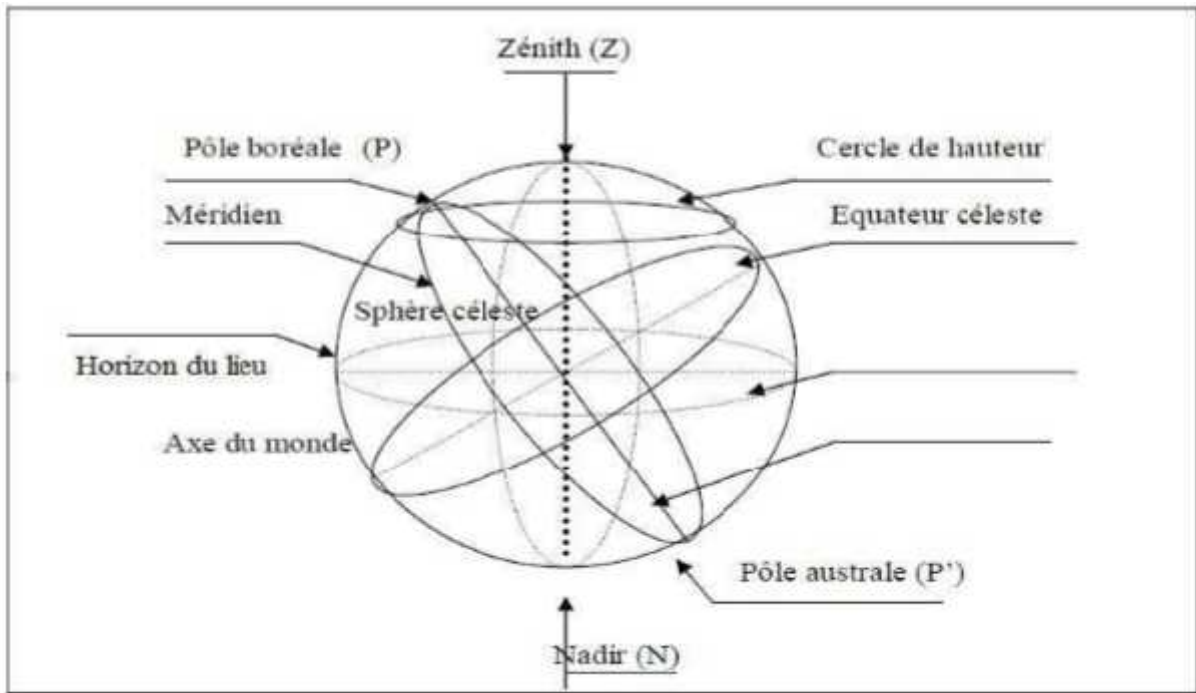


Fig I.3 : La sphère céleste [3]

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

I.4. Les coordonnées célestes

I.4.1. Les coordonnées géographiques

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la Terre.

) **La longitude () :**

C'est l'angle formé par le méridien de **Greenwich** et le méridien du lieu considéré.

Elle est comptée positivement vers l'Est et négativement vers l'Ouest

) **La latitude () :**

C'est l'éloignement d'un point sur la surface de la terre par rapport à l'équateur, mesurée en degré (mesuré à partir du centre de la terre), permettent de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de **0° à 90°** dans l'hémisphère Nord et de **0° à -90°** dans l'hémisphère Sud.

) **L'altitude (Z, H)**

C'est la distance verticale entre le point considéré et une surface de référence théorique (le niveau de mer =0), elle est exprimée en mètre

CHAPITRE I : Le gisement solaire

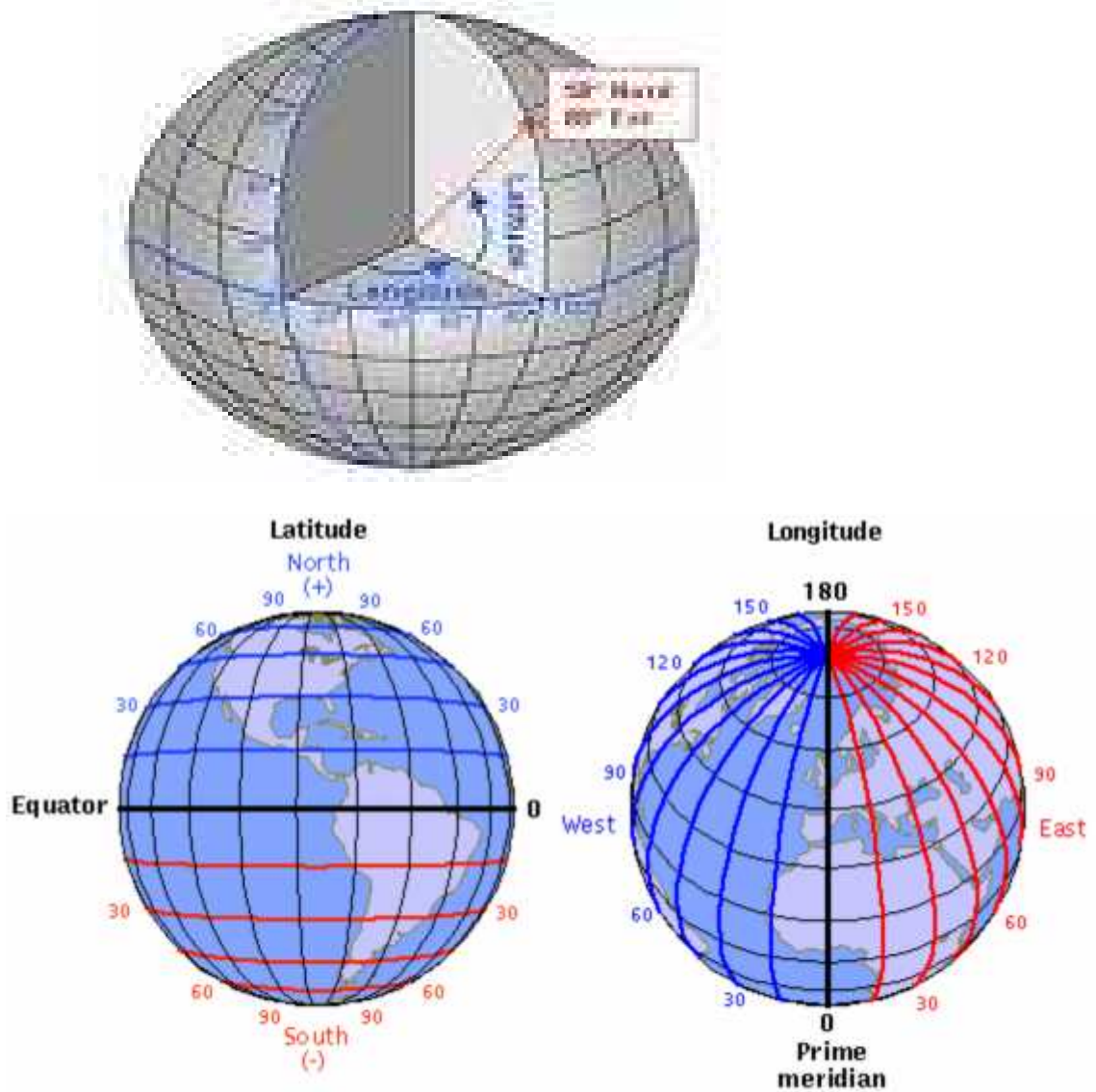


Fig.I.4 : Les coordonnées géographiques terrestres [4].

I.4.2. Les coordonnées horaires

) La déclinaison solaire () :

L'axe de rotation de la terre est incliné par rapport au plan de l'écliptique (plan dans lequel la terre se déplace autour du soleil)

C'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante:

$$= 23,25 \sin \left[\frac{3}{3} (2 + j) \right] \text{ [degré]} \quad (\text{I.1})$$

j : numéro du jour dans l'année compté du 1^e Janvier

CHAPITRE I : Le gisement solaire

) L'angle horaire ()

Il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté positivement dans le sens rétrograde de 0° à 360° (Figure I.5).

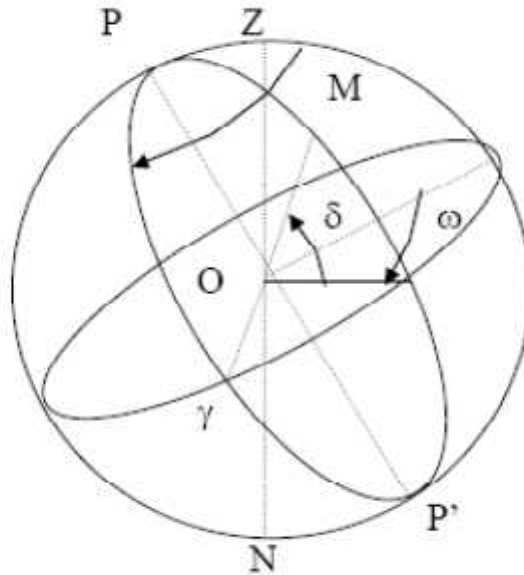


Fig.I.5. Les coordonnés horaires [4]

I.4.3. Les coordonnées horizontales

Les coordonnées horizontales dépendent du lieu de l'observation. Elles ont le plan horizontal comme plan de référence, perpendiculaire à la vertical du lieu. Un objet est repéré dans ce système de coordonnées par ces composantes :

) L'azimut (a)

Ou l'angle que fait la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal avec la direction sud. Il est compté de 0° à 360° d'ouest en est, ou de 0° à 180° à partir du sud vers l'ouest. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\sin (a) = \sin \delta \cos \gamma - \sin \delta \sin \gamma \cos \omega \quad (I.2)$$

) La hauteur (h)

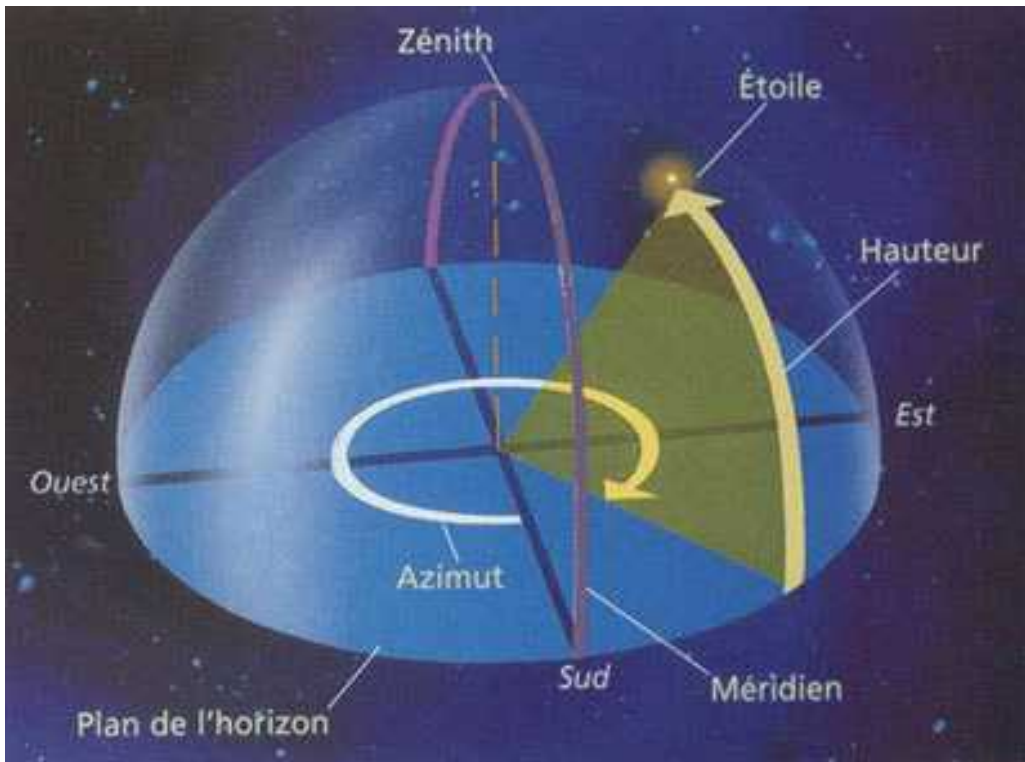
Ou l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de 0° à 90° vers le **zénith** et de 0° à -90° vers le **nadir**.

On appelle quelquefois **distance zénithale** le complément de l'angle **h** : $z + h = 90^\circ$ (figure I.6).

CHAPITRE I : Le gisement solaire

$$\sin (h) = \sin (\) \sin (\) + \cos (\) \cos (\)$$

(I 3)



FigI.6. Les coordonnées horizontales [5]

L'équation de passage des coordonnées horizontales en coordonnées horaires est la suivante :

$$\sin (a) \times \cos (h) = \cos (\) \times \sin (\)$$

$$\cos (a) \times \cos (h) = \cos (\) \times \cos (\) \times \sin (\) - \cos (\) \times \sin (\)$$

$$\sin (h) = \cos (\) \times \cos (\) \times \cos (\) + \sin (\) \times \sin (\)$$

I.5. Les temps solaires

I.5.1. Le temps soleil vrai (TSV)

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil . Il est donné sous la forme suivante :

$$TSV = 12 + \ /15 \tag{I.4}$$

() en degré.

Si = 0, TSV = 12h.00

Si < 0, la matinée.

Si > 0, l'après-midi.

CHAPITRE I : Le gisement solaire

I.5.2. Le temps solaire moyen

Il est donné par la relation

$$ET = TSV - TSM \quad (I.5)$$

Avec:

ET, l'équation du temps, qui corrige le T.S.V par rapport au T.S.M.

$$ET = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \text{ [min]} \quad (I.6)$$

$$N' = (N - 81) \times 360/365$$

Où : N est le numéro du jour dans l'année.

I.5.3. Le temps universel (TU)

C'est le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine)

$$TU = TSM - L/15 \quad (I.7)$$

Où : L : est la longitude.

$L > 0$, pour les villes situées à l'Est de Greenwich

$L < 0$, pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich

$TU = TSM$, pour le méridien de Greenwich

I.5.4. Le temps légal (TL)

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par :

$$TL = TU + H \quad (I.8)$$

Où :

H: le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

H = 1 heure pour l'Algérie.

I.6. Direction des rayons solaires

On considère un plan quelconque caractérisé par deux angles:

: l'angle entre le méridien local et la normale au plan.

= 0, le plan est orienté vers le Sud;

= , le plan est orienté vers le Nord;

CHAPITRE I : Le gisement solaire

$= -\pi/2$, le plan est orienté vers l'Est;

$= \pi/2$, le plan est orienté vers l'Ouest;

γ : l'angle entre le plan horizontal et le plan considéré.

$\gamma = 0$, le plan est horizontal.

$\gamma = \pi/2$, le plan est vertical

Soit :

\vec{N} : le vecteur unitaire porté par la direction des rayons solaires;

\vec{n} : le vecteur unitaire porté par la normale à la surface ;

i : l'angle d'incidence (\vec{n}, \vec{N}) (figure I.7)

$$\vec{N} \begin{cases} \sin(\alpha) \cos(h) \\ \cos(\alpha) \cos(h) \\ \sin(h) \end{cases} \quad \vec{n} \begin{cases} \sin(\alpha) \cos(\gamma) \\ \cos(\alpha) \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{cases}$$

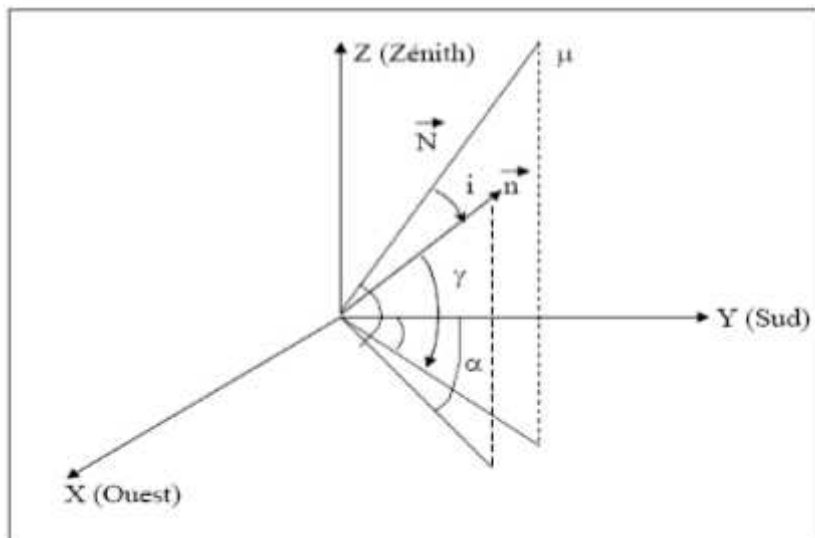


Fig I.7 : Représentation des vecteurs unitaires [6]

$$\vec{N} \cdot \vec{n} = |\vec{N}| \times |\vec{n}| \times \cos(i) = \cos(i)$$

$$\vec{N} \cdot \vec{n} = \sin(\alpha) \times \cos(h) \times \sin(\gamma) \times \cos(\alpha) + \cos(\alpha) \times \cos(h) \times \cos(\gamma) \times \cos(\alpha) + \sin(h) \times \sin(\gamma) = \cos(i) \quad \text{(I.9)}$$

Donc:

$$\cos(i) = \cos(h) \times \cos(\gamma) \times \cos(\alpha) + \sin(h) \times \sin(\gamma) \quad \text{(I.10)}$$

CHAPITRE I : Le gisement solaire

Formule de “cos (i)” en coordonnées horaires

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \times \sin(\alpha) \times \cos(\omega) + (\sin(\delta) \times \cos(\omega) \times \cos(\alpha) - \cos(\delta) \times \sin(\alpha) \times \cos(\omega) \times \cos(\alpha) + (\cos(\delta) \times \cos(\omega) \times \cos(\alpha) + \sin(\delta) \times \sin(\alpha)) \times \sin(\omega)). \quad \text{(I.11)}$$

Cas particuliers :

• Surfaces horizontales : $\omega = 0$

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \cos(\omega) \times \cos(\alpha) + \sin(\delta) \times \sin(\alpha) \quad \text{(I.11.a)}$$

• Surfaces verticales: $\delta = 0$

- Surfaces verticales orientées vers le Sud: $\alpha = 0$

$$\cos(i) = \sin(\omega) \times \cos(\omega) \times \cos(\alpha) - \cos(\omega) \times \sin(\alpha) \quad \text{(I.11.b)}$$

- Surfaces verticales orientées vers le Nord: $\alpha = 180^\circ$

$$\cos(i) = \cos(\omega) \times \sin(\alpha) - \sin(\omega) \times \cos(\omega) \times \cos(\alpha) \quad \text{(I.11.c)}$$

- Surfaces verticales orientées vers l'Est : $\alpha = 90^\circ$

$$\cos(i) = -\cos(\omega) \times \sin(\alpha) \quad \text{(I.11.d)}$$

- Surfaces verticales orientées vers l'Ouest: $\alpha = 270^\circ$

$$\cos(i) = \cos(\omega) \times \sin(\alpha) \quad \text{(I.11.e)}$$

Surface orientée vers le Sud et inclinée d'un angle β par rapport à l'horizontale:

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \cos(\omega) \times \cos(\alpha - \beta) + \sin(\delta) \times \sin(\alpha - \beta) \quad \text{(I.11.f)}$$

I.7. La constante solaire

Le flux solaire moyen sur un plan perpendiculaire à la direction des rayons, placé en dehors de l'atmosphère terrestre, est appelé constante solaire I_0 [5]. La valeur moyenne actuellement retenue est : $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$. Cette valeur est la moyenne sur l'année du flux extra-terrestre. En effet, la trajectoire de la terre autour du soleil étant elliptique, il s'en suit une variation saisonnière de $\pm 1.6\%$ de la distance Terre Soleil et donc une variation de ce flux. La relation suivante donne la valeur corrigée de la constante solaire :

$$I_c = I_0 \times [1 + 0.0034 \times \cos(30 \times (m - 1) + n)] \quad \text{(I.12)}$$

Ou: $I_c = 1367 \text{ w/m}^2$

m : est le numéro du mois dans l'année;

n : est le numéro du jour dans le mois.

CHAPITRE I : Le gisement solaire

I.8. Principe de la réflexion

La réflexion d'un rayon lumineux sur une surface est depuis l'Antiquité un phénomène connu et appliqué.

I.8.1. Réflexion sur une surface plane

On considère le cas de réflexion quand un rayon donne sur une surface plane. Deux lois permettent de décrire géométriquement (donc sans tenir compte de la nature ondulatoire de la lumière) ce que devient un rayon après réflexion sur une surface plane :

Première loi : le rayon incident et la normale à la surface (droite perpendiculaire à la surface passant par le point de contact du rayon incident sur la surface) définissent un plan : le plan incident. Le rayon réfléchi appartient à ce même plan.

Deuxième loi : l'angle (appelé angle incident) entre le rayon incident et la normale est égale à l'angle (appelé angle de réflexion) entre la normale et le rayon réfléchi.

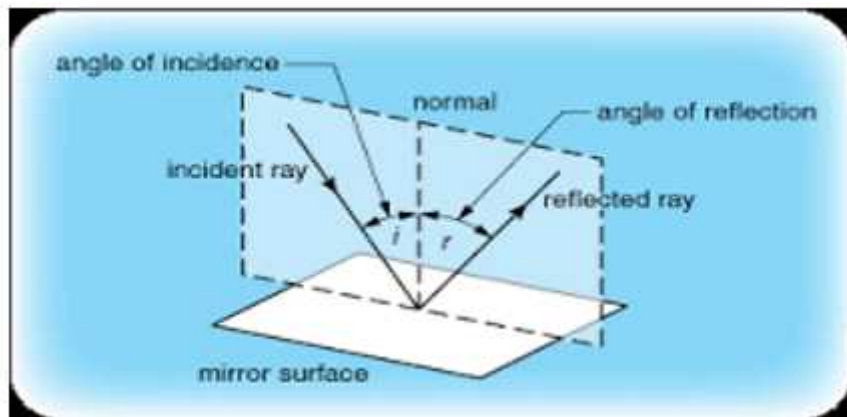


Fig.I.8. réflexion sur une surface plane

I.8.2. Réflexion sur une surface courbe

Si la surface réfléchissante est une courbe, celle-ci peut être décomposée en une multitude de plan infiniment petits. Ainsi, au point d'impact du rayon incident sur la surface réfléchissante, il faut considérer le plan tangent en ce point. On obtient ainsi la normale du plan tangent au point, et les deux lois de la réflexion sont alors d'application pour déterminer le rayon réfléchi.

CHAPITRE I : Le gisement solaire

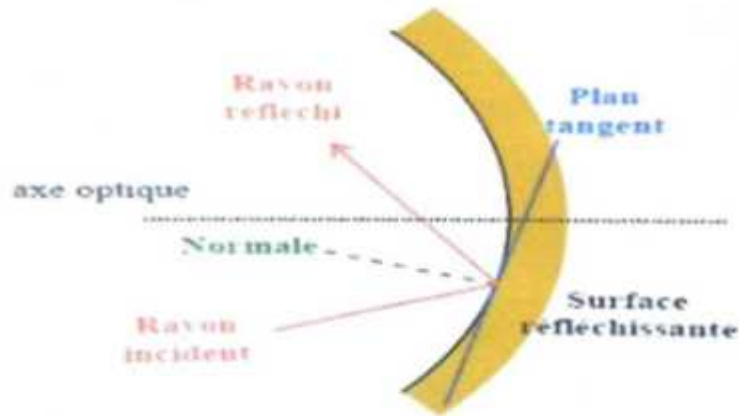


Fig.I.9. Réflexion sur une paroi courbée

I.9. Spectre solaire incident

Le rayonnement solaire est sous la forme d'ondes électromagnétiques constituées de particules qui transportent l'énergie ; ces particules sont les photons. Chaque photon transporte un seul quantum d'énergie qui correspond à une longueur d'onde. Les flux de photons voyagent dans l'espace à la célérité de la lumière, et atteignent la terre à différentes longueurs d'ondes. A partir de ces longueurs d'ondes, on peut distinguer les différents types de rayons qui forment le spectre solaire (fig I.8), depuis les rayons X jusqu'aux ondes radio

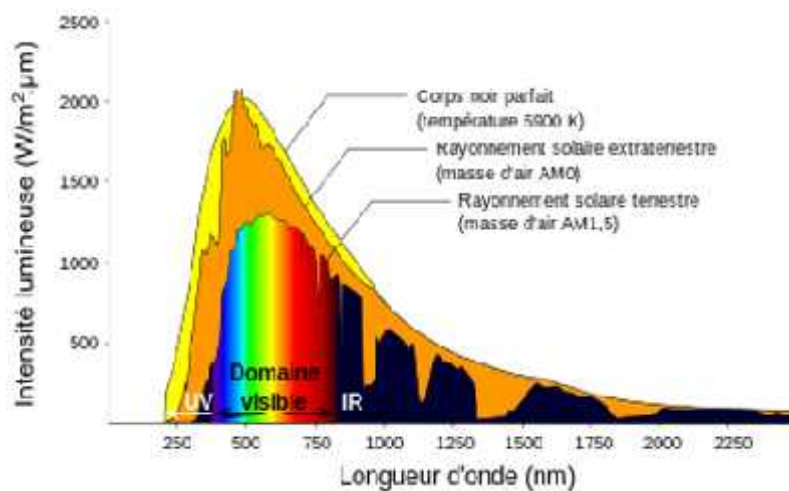


Fig.I.10 : Répartition spectrale du rayonnement solaire [7]

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/m^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.

CHAPITRE I : Le gisement solaire

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/m²

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 120 W.m⁻².

En absence permanente de nuages, la durée d'insolation est pratiquement égale à la durée du jour, qui s'appelle aussi la durée astronomique ou théorique du jour, elle est définie par :

$$S_0 = \frac{2}{1} \omega_0 \quad (\text{I.13})$$

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

S_0 : la durée du jour (h).

I.13. Différents types de rayonnements

En traversant l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est absorbé ou diffusé. On distingue plusieurs composantes :

•Rayonnement direct

C'est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol.

•Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus se manifeste lorsque le rayonnement solaire direct se disperse dans les nuages et les particules atmosphériques. Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les nuages et les molécules diverses en suspension dans l'atmosphère, et de sa réfraction par le sol. Il s'agit donc d'un rayonnement qui ne suit pas une direction définie par le soleil en direction du point d'observation à la surface de la terre.

•Rayonnement réfléchi (Albédo)

Est par définition le pourcentage d'énergie solaire réfléchi vers l'espace par la terre et l'atmosphère par rapport à la quantité d'énergie reçue par celle-ci.

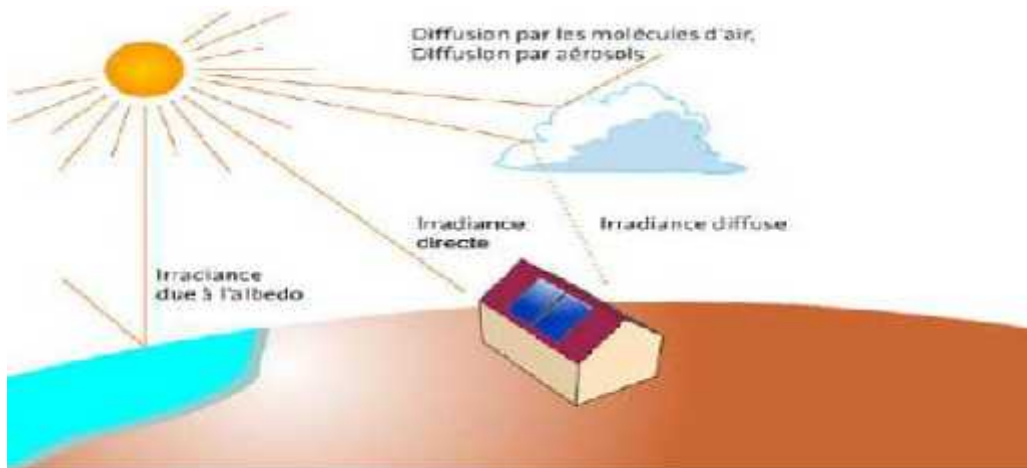
Cependant tous les corps n'ont pas le même pouvoir réflecteur. En effet, les corps noirs sont capables d'absorber toutes les ondes incidentes à leur surface, par contre, la neige, les nuages, les sols dépourvus de végétation sont les meilleurs réflecteurs.

CHAPITRE I : Le gisement solaire

.Rayonnement global

Le rayonnement global est l'énergie totale rayonnante du soleil, qui atteint une surface horizontale à la surface de la terre. Le rayonnement global s'obtient en ajoutant les trois types de rayonnement : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi (albédo).

Rayonnement global = rayonnement direct + rayonnement diffus + albédo



FigI.11: Rayonnement solaire [8]

I.14. Rayonnement solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme surtout dans le Sud du pays, la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures.

L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de Juillet) dépasse les

6 kWh /m²/jour et l'énergie annuelle maximale moyenne en Algérie est de l'ordre

2500 kWh/m² /an. La carte ci-dessous représente les différentes zones énergétiques du monde :

CHAPITRE I : Le gisement solaire

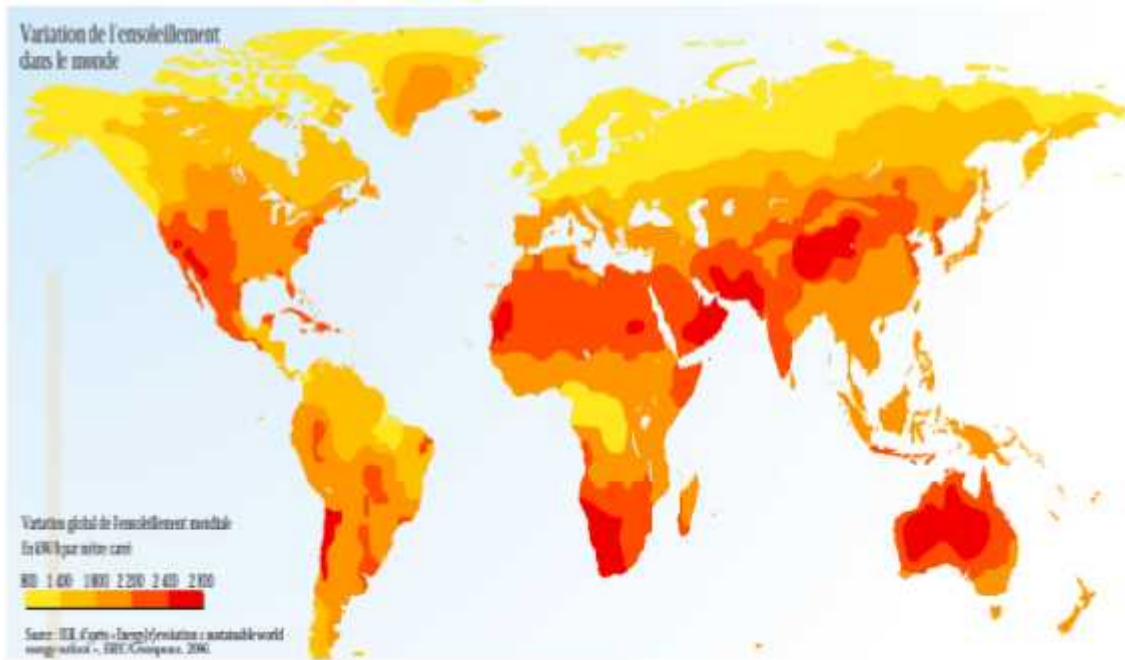
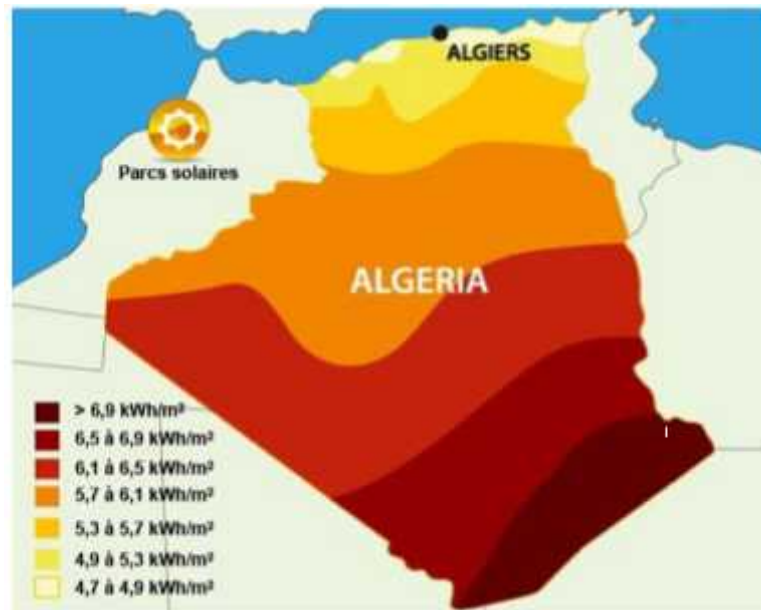


Fig.I.12. Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

Tableau I.1 : Potentiel de l'énergie solaire en Algérie [5].

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficies (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (H/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

CHAPITRE I : Le gisement solaire



FigI.13 : L'irradiation solaire en Algérie

Conclusion

L'énergie solaire est disponible sur l'ensemble du globe terrestre à différentes intensités.

Elle est entièrement renouvelable et inépuisable. Cependant cette énergie reste dépendante des conditions météorologiques qui rendent son exploitation difficile et son apport est variable au gré des jours et des saisons.

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire comme le mouvement de la terre autour du soleil, les coordonnées célestes et horaires. Ensuite, nous avons présenté les différents types de rayonnements (direct, diffus, réfléchi et global).

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

II.1.Introduction

Le manque d'eau potable et la rareté de ses ressources naturelles, causés, par la sécheresse et la surexploitation des nappes phréatiques, deviennent un grand problème qui menace la vie des habitants dans plusieurs régions. Alors la recherche de produire de l'eau potable à partir d'autres ressources naturelles, est d'une extrême importance.

Or, y'a plusieurs régions, manquantes d'eau potable avec existence des sources d'eaux saumâtres contenant un certain pourcentage de sel, si ce n'est l'eau de mer. Le dessalement des eaux saumâtres ou des eaux de mer par distillation solaire est une opération très utilisée dans les régions arides, à l'échelle d'un petit village ou même d'une famille. Plusieurs types de distillateurs solaires ont été réalisés, les plus répandus sont ceux du type à effet de serre ; ils présentent l'avantage d'être simples, faciles à réaliser, de conception rustique, et peu coûteux. Mais ils présentent le gros inconvénient d'une production très faible d'eau potable (de l'ordre de 2,5 à 3 litres par m² par jour),

II.2. Définition

La distillation est une opération qui utilise le rayonnement solaire pour transformer par chauffage ou par réduction de pression de l'eau de mer ou des eaux saumâtres en vapeur, avec l'augmentation de la température l'eau s'évapore et la vapeur d'eau se liquéfie sur la surface froide (vitre dans un bac couvert par une vitre inclinée) .Eventuellement les gouttes d'eau vont se former puis couler sur la surface de vitre , par la condensation, cette vapeur donne une eau de grande pureté. Parmi les différents procédés, la distillation solaire est une solution intéressante, notamment pour les régions isolées. Voir la figure ci-dessus (figure II.1)

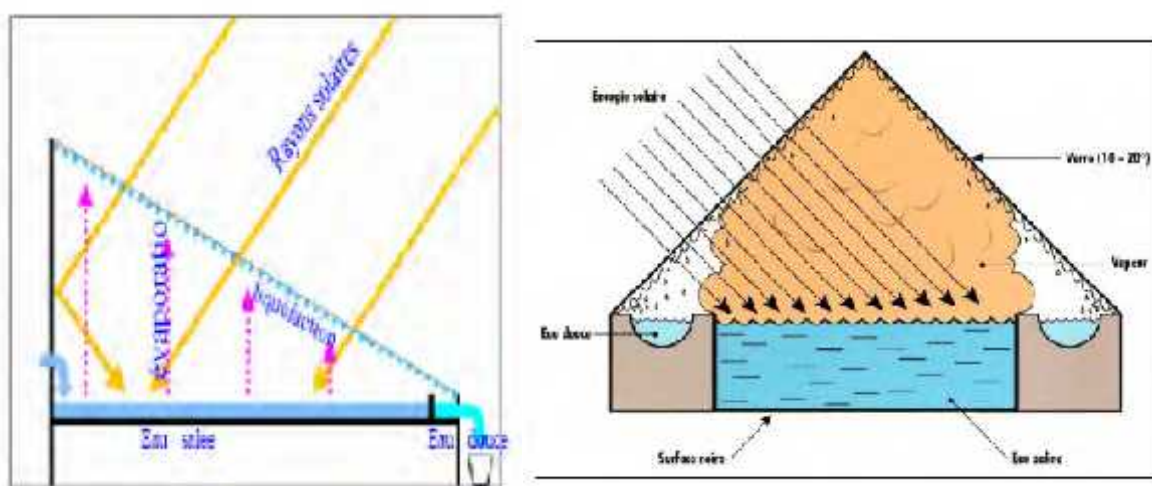


Fig II.1. Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

II.3. Historique sur la distillation solaire

La distillation solaire a été utilisée depuis plusieurs siècles où : En **1551**, les premiers appareils pour distiller l'eau salée ont été conçus par les alchimistes arabes ; c'est une certitude rapportée par Mouchot [9].

En **1862**, le chimiste français Lavoisier a utilisé de larges lentilles en verre pour concentrer les rayons solaires afin de distiller l'eau contenue dans des flacons [10].

En **1872**, fabrication du premier distillateur solaire conventionnel de 5.000 m² de surface à Las-Salinas dans le nord du Chili par l'ingénieur suédois Carlos Wilson. A cause du problème d'accumulation rapide des sels dans le bassin, la nécessité d'un nettoyage régulier du distillateur a donné une fin de fonctionnement de ce dernier en 1910 [11].

En **1920**, Kaush a utilisé des réflecteurs métalliques pour concentrer les rayons solaires [11]. Au début des années 30, Trivino avait proposé un distillateur incliné [12], et en **1938** Abbot a utilisé des réflecteurs cylindriques paraboliques pour concentrer les rayons solaires acheminés dans des tubes contenant de l'eau [12].

En **1945**, invention d'un nouveau distillateur solaire type sphérique, où un grand nombre de ce modèle a été utilisé pendant la 2^{ème} guerre mondiale.

En **1952** l'université de Californie a commencé des investigations dont le but est d'étudier les effets de certains paramètres affectant le rendement tels que la géométrie et les différents matériaux d'isolation [13].

En **1953** Cyril Goméla a développé en Algérie une dizaine de types de distillateurs solaires qui ont été ensuite testés et commercialisés à travers l'Afrique du nord, le Sénégal et l'Australie [14]. Afin d'augmenter le rendement, Savornin et Le Jeune ont aussi étudiés d'autres types de distillateurs solaires inclinés.

En **1960** trois grandes stations de distillateurs solaires ont été construites en Tunisie.

En **1962** le groupe d'énergie solaire de l'Agence Tunisienne de l'Energie Atomique, a étudié activement la distillation solaire. Entre **1963** et **1967** le CSIRO d'Australie (Common Wealth Scientific and Industrial Research Organization) a construit et testé plus de 8 distillateurs dans le but d'améliorer l'efficacité par l'étude de l'effet de certains paramètres [15].

En **1969** Cooper a proposé une simulation pour étudier les performances d'un distillateur solaire à effet de serre [16].

Depuis les années 70, plusieurs autres types de distillateurs ont été élaborés et étudiés, parmi lesquels, nous pouvons, sans être exhaustif citer

-) Le distillateur à effet multiple (Oltra, 1972 ; Bartali, 1976).
-) Le plateau incliné ou le distillateur solaire incliné (Howa, 1961 Akhtamov et al, 1978).

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

- J Le distillateur solaire type mèche inclinée ou type multiple mèches (Frick et Somerfeld 1973 ; Soda et al ; 1980 ; Moustafa 1979).
- J Combinaison du distillateur solaire à effet de serre (Salcuk, 1970, 1971 ; Sodha et al, 1980).
- J Distillateur solaire chauffe indirectement (Soliman 1976 ; Malik et al 1973, 1978, Sodha et al 1981).

II.4. Types de distillation solaire:

Les procédés de dessalement par distillation utilisant l'énergie solaire sous forme

Thermique sont:

- Distillation solaire à effet de serre.
- Distillation solaire à multiples effets.

II.4.1. Distillation solaire à effet de serre

Soit une serre fermée et exposée au soleil à l'intérieur de laquelle se trouve une lame d'eau de mer ou d'eau saumâtre de quelques centimètres d'épaisseur. L'air à l'intérieur de la serre est surchauffé et saturé de vapeur d'eau (douce) qui se condense au contact de la paroi en verre relativement froide. Les gouttes d'eau douce peuvent être recueillies en bas du vitrage dans une gouttière.

Plusieurs types de distillateurs solaires ont été réalisés suivent ce principe, les plus répandus sont ceux du types à effet de serre car ils présentent beaucoup d'avantages d'être simple facile à réaliser, de conception rustique, et peu couteux. Parmi ces derniers on distingue deux types :

a) Les distillateurs statiques :

Ce sont des distillateurs qui ont la nappe d'eau à distiller est immobile.

Les principales géométries rencontrées sont représentées ci-dessous :

➤ Distillateur plan à pente unique

Ce système de distillation est essentiellement constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre, la partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau (eau saumâtre ou eau de mer). Sous l'action de flux solaire, transmis par la couverture transparente l'eau s'échauffe et une partie de celle-ci devienne vapeur qui se condense sur la face intérieure de la vitre et le condensat est récupéré par un récepteur, un appoint d'eau compense le débit distillat.

Les parois latérales et inférieures sont isolées afin de réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur. Le distillateur à pente unique à un capteur unique incliné d'un angle ().



Fig.II.2 : Distillateur solaire à pente unique [17].

➤ **Distillateur plan à double pente**

Ce système a le même principe que le précédent seulement que ce dernier présente deux cotés l'un est exposé au soleil et l'autre côté joue le rôle de condenseur qui donne l'avantage d'accélérer la condensation.



Fig II.3 : Distillateur à double pente [17]

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

➤ Distillateur solaire sphérique

Ce distillateur est constitué d'une sphère en plexiglas ou autres matériaux plastiques transparents, composé de trois parties principales ; une demi sphère supérieur qui transmet le rayonnement solaire d'une part et qui est la surface de condensation d'autre part, une demi sphère inférieure qui récupère le distillat et un bac horizontal en métal noir contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian reposants sur des supports, et d'un système mécanique de récupération de l'eau distillée par l'intermédiaire d'un essuie-glace entraîné par moteur électrique, permet de maintenir la surface de condensation au rayonnement, et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes .

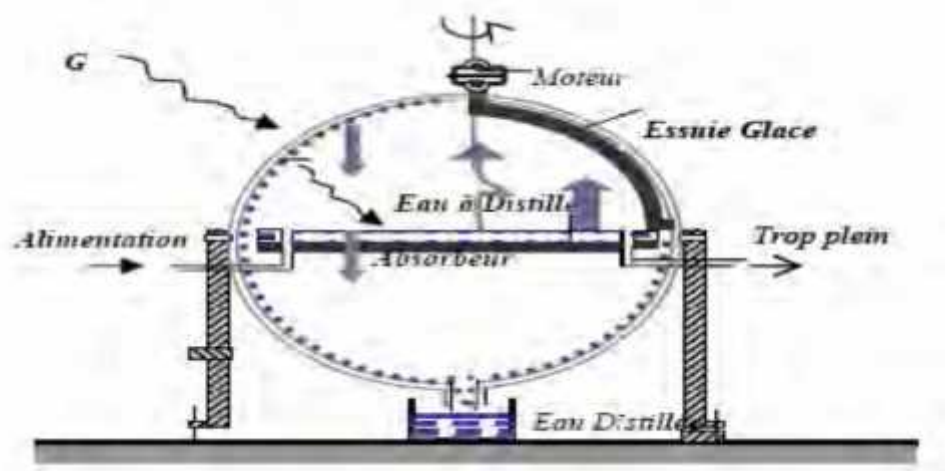


Fig .II.4. Distillateur solaire sphérique [18]

➤ Distillateur solaire incliné à cascades

Cet appareil présente deux avantages: la lame d'eau est très faible et l'orientation par rapport au rayonnement incident se rapproche davantage de l'optimum. Un modèle de ce type n'a été exécuté qu'en petite taille, ces appareils fonctionnent bien mais leurs constructions et leurs entretiens sont coûteux.

C'est un absorbeur sous forme d'escalier ; une géométrie qui permet d'avoir :

- Une surface d'échange de chaleur plus grande.
- Un ralentissement de mouvement de masse sur l'absorbeur ; ce qui donne à la masse d'eau suffisamment de temps pour qu'elle se charge en calories.
- Une réduction de la distance entre la vitre et la saumure ; ce qui améliore les performances du distillateur.

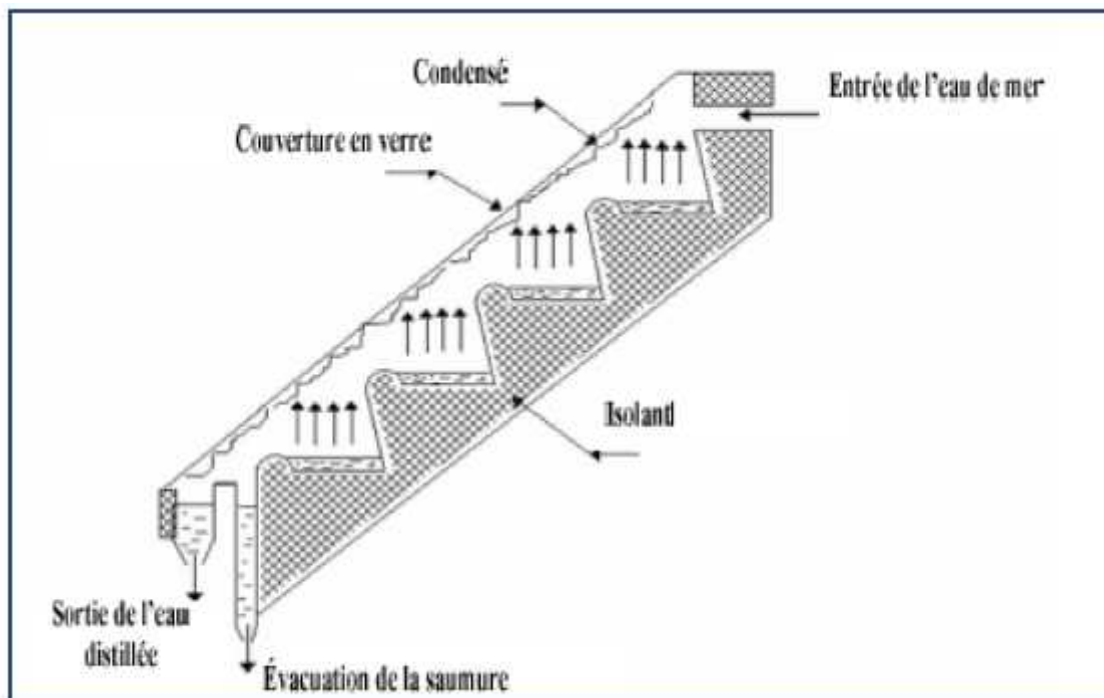


Fig.II.5. Distillateur solaire incliné à cascade [19]

b) Distillateur à ruissellement

Ce sont des distillateurs dont la nappe d'eau à distiller est en mouvement. Les principales géométries rencontrées sont présentées ci-dessous :

➤ Distillateur solaire à mèche

Dans un distillateur à mèche, l'eau d'alimentation coule lentement à travers une garniture poreuse, absorbant les rayonnements (mèche). Deux avantages sont revendiqués sur les distillateurs de bassin. D'abord, la mèche peut être inclinée de sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle avec le soleil (réduisant la réflexion et présentant une grande surface efficace). En second lieu, moins d'eau d'alimentation est dans le distillateur à tout moment, donc l'eau est chauffée plus rapidement et à une température élevée.

Les distillateurs simples à mèche sont plus efficaces que les distillateurs à bassin et quelques conceptions sont prétendues coûter moins qu'un distillateur à bassin de même rendement. L'appareil incliné à mèche permet de maintenir à peu près constante l'épaisseur de la lame d'eau.

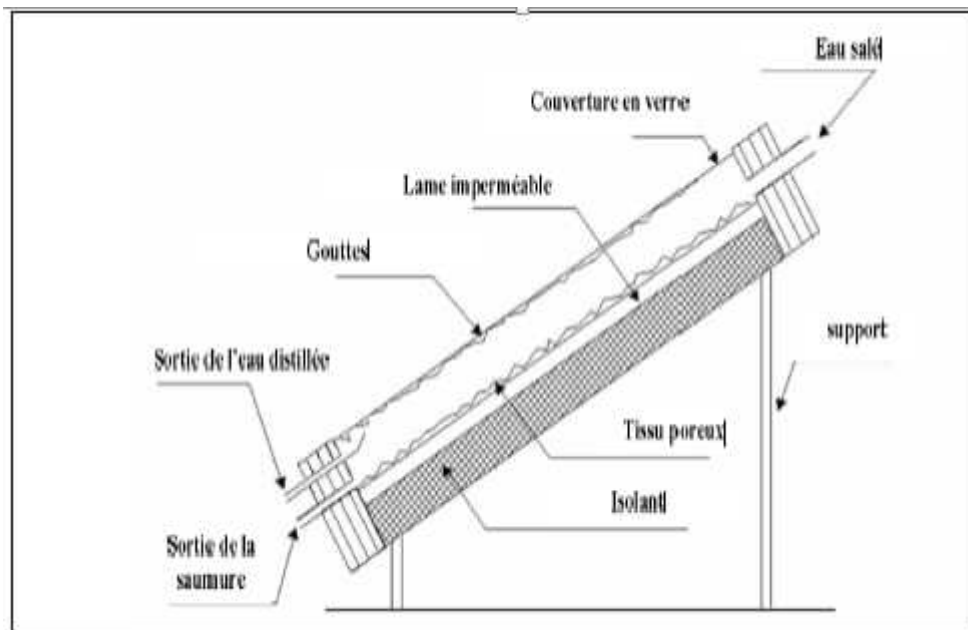


Fig.II.6. Distillateur solaire à mèche [19]

➤ Distillateur solaire à film capillaire

Il se compose d'une très mince couche de textile à mailles fines, imbibée d'eau qui se maintient d'elle-même au contact de la plaque jouant le rôle d'évaporateur. Les forces de tension inter-faciale, nettement supérieures à celles de la pesanteur, jouent un rôle très important dans la formation du film capillaire, de faible inertie thermique, en empêchant toute formation de bulles d'air.

Ce distillateur est composé des éléments suivants : le capteur – évaporateur, le condenseur et l'alimentation. La première cellule capte le rayonnement solaire qui passe à travers la couverture. La vapeur se condense sur la paroi opposée et la chaleur dégagée par cette condensation permet l'évaporation du film qui ruisselle sur l'autre face de cette même paroi

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

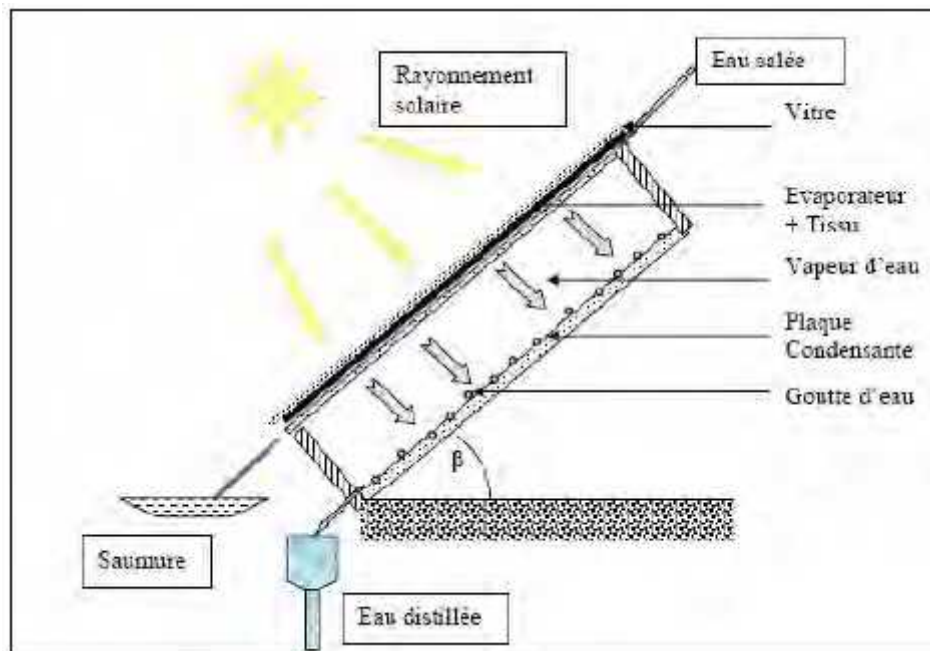


Fig II.7. Distillateur solaire à film capillaire [4]

➤ Distillateur solaire vertical

Le distillateur est composé :

- d'un capteur solaire permettant la captation du rayonnement solaire,
- d'un compartiment d'évaporation,
- d'un compartiment de condensation.

La figure ci-dessous, présente le principe de fonctionnement du distillateur vertical. Le distillateur est alimenté par de l'eau saumâtre à partir d'un réservoir (1), le distillateur est connecté au réservoir à l'aide d'un tube en cuivre (2), le débit d'eau à l'entrée du distillateur est régulé à l'aide d'une vanne (3). La position du réservoir d'alimentation permet l'alimentation du distillateur par un débit constant. Un distributeur d'eau (4), muni de perforations sur la longueur, permet la distribution de l'eau en film sur le tissu spongieux (5), l'eau ruisselle sur le tissu, et la saumure est évacuée en bas (6). L'eau qui s'écoule derrière l'absorbeur (7), s'évapore dans le compartiment d'évaporation, le mélange d'eau et d'air à l'intérieur saturé en vapeur d'eau circule naturellement à travers des deux ouvertures (8) réalisées dans la cloison isolée vers le compartiment de condensation (9), et la vapeur se condense au contact de la plaque de condensation à l'arrière du distillateur. La collecte de l'eau se produit dans une gouttière (10, 11) fabriquée en dessous de la plaque de condensation.

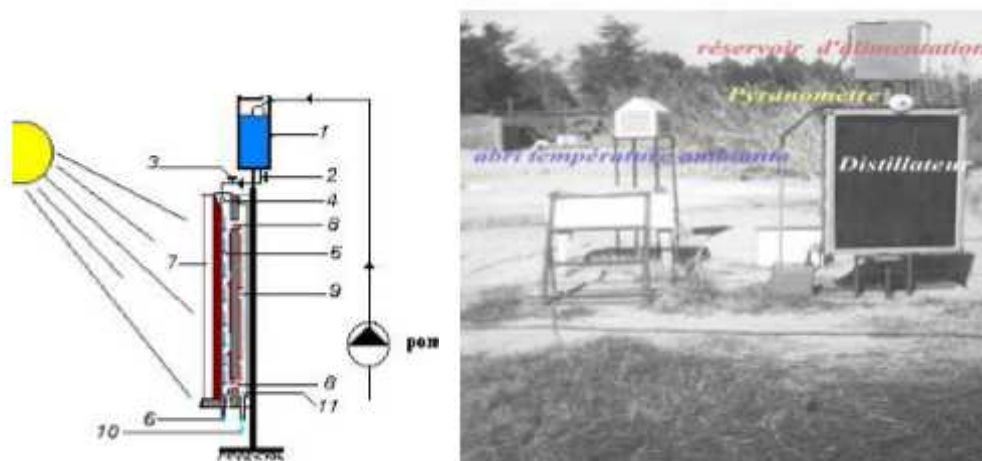


Fig II.8.Distillateur solaire vertical [20]

Les distillateurs à ruissellement présentent des inconvénients tel que :

- La difficulté de régler le débit de l'eau à distiller
- Une perte de chaleur sensible emportée par l'excédent de l'eau non évaporée.

II.4.2. Distillateur solaire à multiples effets

Il est donc apparu absolument nécessaire d'améliorer la consommation spécifique de l'évaporateur à simple effet. Ceci a été obtenu grâce à la distillation à multiples effets. On sait en effet, que la température d'ébullition de l'eau varie avec la pression.

On peut donc utiliser la chaleur de condensation de la vapeur produite dans une première chambre d'évaporation pour faire fonctionner le faisceau de chauffe d'une seconde chambre à pression et température plus faibles, et ainsi de suite.

Le nom de multiples effets a été donné à ce type d'appareils parce que la vapeur initiale (Vapeur de chaudière) accomplit plusieurs fois son effet.

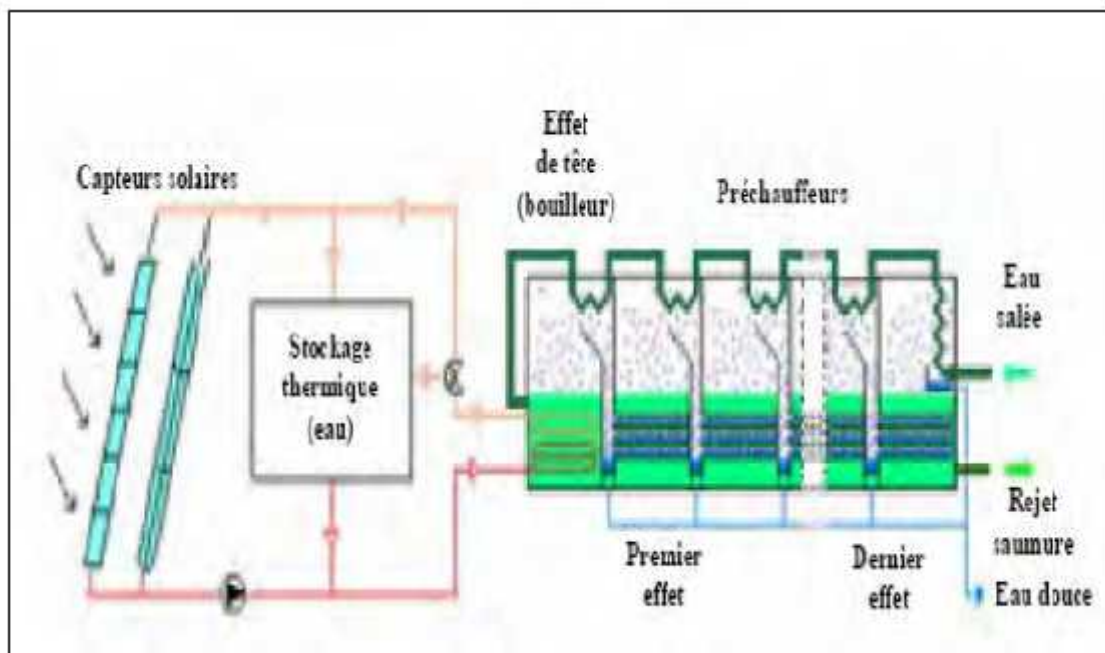


Fig II.9. Le principe de la technique à multi effets [19]

II.4.3. Distillateur à concentration

Les distillateurs solaires à concentration fonctionnent selon le principe de la concentration et 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. De nombreux modèles de réflecteurs existent :

- **Cylindro-parabolique** : Cette géométrie permet une focalisation linéaire, elle est utilisée dans le cas de collecteur à tubes sous vides ou les centrales solaires thermiques de type Luz.



Fig.II.10. Distillateur à concentration cylindro-parabolique

- **Sphérique** : le réflecteur sphérique concentre le rayonnement solaire sur un foyer linéaire mobile porté par un rayon de la sphère orienté en direction du soleil.



Fig.II.11.Distillateur à concentration sphérique

- **Parabolique :** C'est le type de géométrie le plus utilisé .Il permet de concentrer les rayons lumineux en un point pour obtenir de très hautes températures .Il est souvent utilisé dans le cas des cuiseurs solaires ou couplé à un moteur Stirling.



Fig.II.12.Distillateur à concentration parabolique

- **Plan :** le réflecteur est en général mobile afin de suivre le soleil, on parle alors d'héliostat plan .Ce système est utilisé dans le cas des centrales solaires thermiques à tour ou couplé à un miroir parabolique comme dans le cas des fours solaires.



FigII.13. Le four solaire

II.4.4. Distillateurs avec stockage de chaleur

La variabilité de l'énergie solaire incidente nécessite son stockage donc qu'il faut adapter la production à la consommation. Par définition «stocker de l'énergie consiste à l'emmagasiner pendant une période où elle est abondante pour la récupérer quand c'est nécessaire.

Dans le but d'améliorer le temps de fonctionnement du distillateur qui est conditionnée par la présence du rayonnement solaire, le stockage de chaleur devient une nécessité.

II.5. Le cas d'un distillateur d'urgence

Pour fournir l'eau potable de secours sur la terre, un distillateur très simple peut être fait .Il se sert de l'humidité de l'air .Tout ce qui est exigé est une couverture en plastique, une cuvette ou un seau, et un caillou (figure II.14).

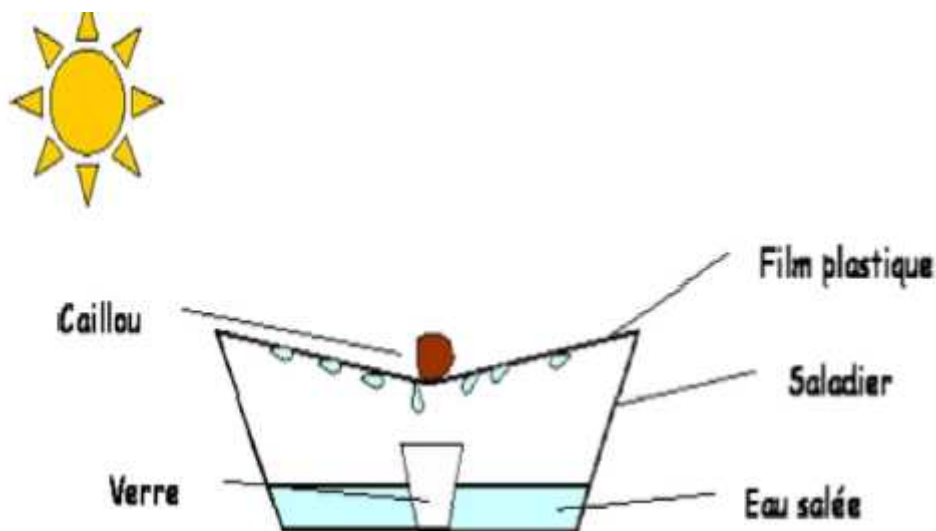


Fig.II.14. Le cas d'un distillateur d'urgence

II.6. Autres techniques de dessalement

II.6.1. Technique de l'osmose inverse

L'osmose inverse consiste à filtrer l'eau par son passage à travers une membrane semi-perméable d'une extrême finesse dont sont séparées deux solutions de concentrations différentes. Elle consiste à placer de l'eau salée et de l'eau douce, séparée par une membrane semi-perméable dans un récipient comme (normalement c'est l'eau pure qui migre vers la solution concentrée appelé saumure), mais si on exerce une pression sur l'eau salée, le processus est inverse. Alors, elle est appelée osmose inverse, parmi les avantages de l'osmose inverse

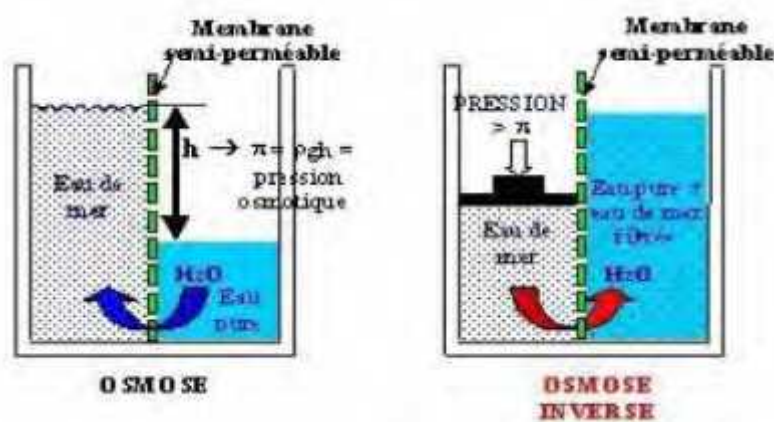


Fig.II.15. La technique de l'osmose inverse

II.6.2. Technique de l'électrodialyse

Le principe de l'électrodialyse est bien connu. Les ions d'un sel dissous dans l'eau, comme le Chlorure de sodium par exemple, déplacent sous l'action d'un champ électrique créé par deux électrodes trempant dans le liquide. Les ions positifs ou cations (par Na^+ sont attirés par l'électrode négative (ou cathode) tandis que les ions négatifs (Cl^-) sont par l'électrode positive. Dans l'électrodialyse, on intercale alternativement des membranes filtrantes soit imperméables aux anions et perméables aux cations, soit imperméables aux cations et perméables aux anions. On obtient ainsi une série de compartiments à forte concentration de sels et d'autres à faible concentration.

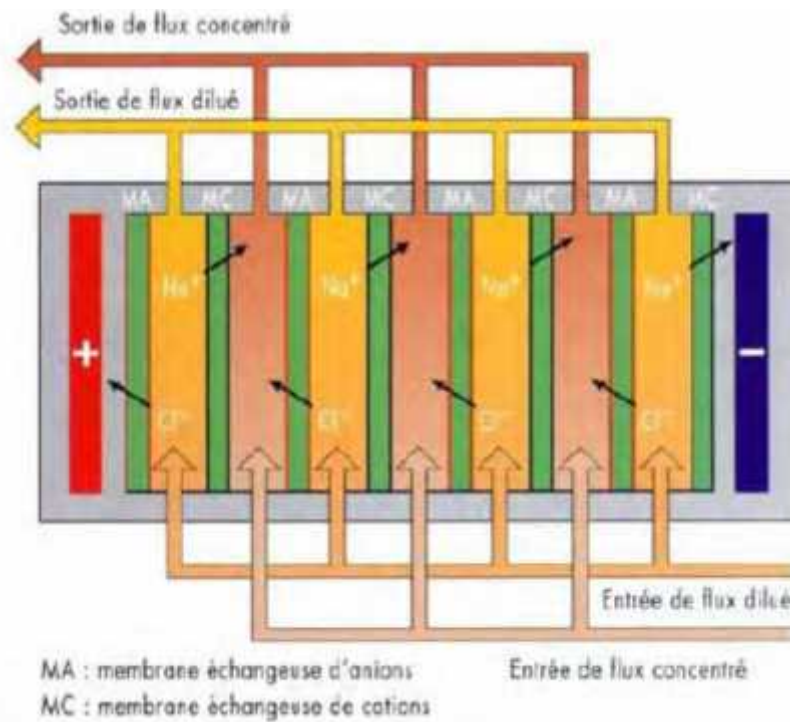


Fig II.16.La technique de l'électrodialyse

II.6.3.Le dessalement par congélation

Lorsqu'on fait geler de l'eau salée. Les cristaux qui se forment consistent en de la glace pratiquement pure, le sel étant chassé de l'eau lors de cristallisation forme une saumure à la surface du cristal. Ce processus a été mis au point aux Etats-Unis.

II.6.4. Technique de la distillation (flash)

Cette technique est illustrée par la **figure (II.17)**, où l'eau salée subit un préchauffage progressif lors de son passage à travers les différents condenseurs, puis un chauffage de 90°C par vapeur et entre dans une série de chambres de distillation où règne une faible pression (par rapport à la pression atmosphérique).

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

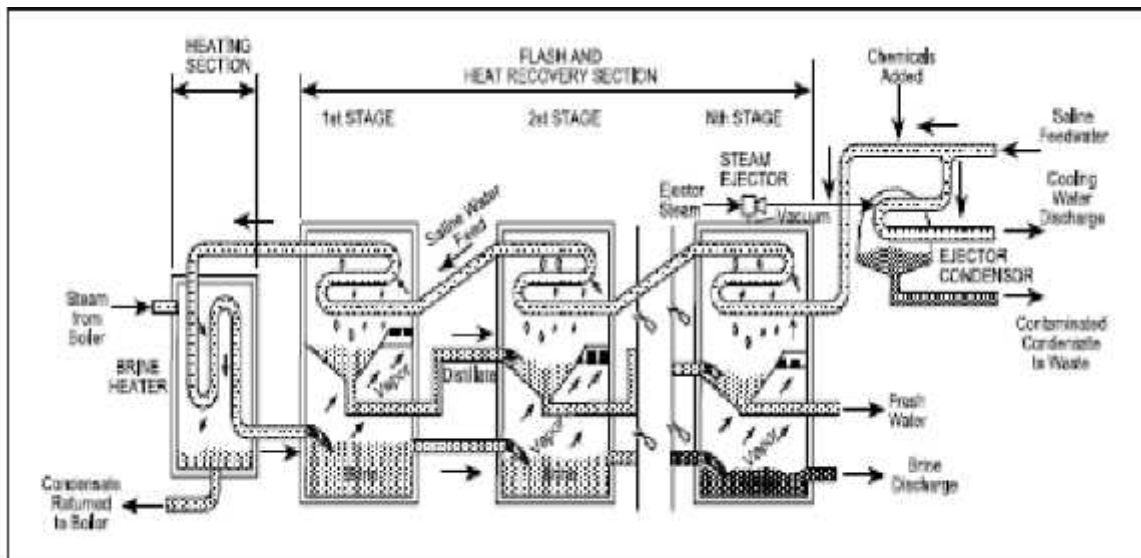


Fig II.17. Technique de la distillation (flash)

II.7. Les paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur

On peut classer les paramètres qui influent sur le fonctionnement du distillateur comme suit :

- Les paramètres externes
- Les paramètres internes

II.7.1. Les paramètres internes

On peut distinguer :

II.7.1.1. Les paramètres de position

- L'emplacement du distillateur est choisi de façon à éviter les obstacles « L'effet de masque », qui empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface de captation.
 - L'orientation dont dépend essentiellement le fonctionnement du distillateur pendant la journée. Généralement on opte pour :
 - Une orientation Est pendant la matinée.
 - Une orientation Ouest pendant l'après - midi.
 - Une orientation Sud si le distillateur doit fonctionner toute la Journée.
 - L'inclinaison: généralement elle est liée à la période de fonctionnement durant l'année.
 - Pour un fonctionnement estival, le distillateur doit être incliné d'un angle : $\theta = -10^\circ$
- Ou θ est l'altitude du lieu.

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

- Pour un fonctionnement hivernal, l'inclinaison est $= +20^\circ$
- Pour un fonctionnement annuel, on choisit $= +10^\circ$

II.7.1.2. Les paramètres de construction

- La couverture

La couverture verrière intervient essentiellement par sa nature, telle que transmettre le maximum de rayonnement solaire et être opaque à l'infra-rouge. [21] Un tel dispositif représente donc un véritable piège au rayonnement solaire. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture (l'effet de serre). Il faut qu'elle soit non hydrophobe; elle doit aussi résister aux attaques du vent et des particules solides.

- L'absorbeur (récepteur)

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, gaz).

La surface de récepteur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- une bonne conductivité et diffusion thermique.
- une bonne inertie thermique.
- un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.
- une bonne résistance chimique vis-à-vis du fluide utilisé. 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).

- Le réflecteur

Le réflecteur est un miroir de surface plane, possédant une propriété réfléchissante grâce à un dépôt métallique.

Retenons une propriété importante de ces miroirs : quand un faisceau lumineux arrive sur la surface réfléchissante, tous les rayons réfléchis convergent vers le récepteur.

On a choisi l'aluminium comme réflecteur car il a un coefficient de réflexion important. Ce métal n'est pas trop cher, contrairement à l'or ou à l'argent.

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

-L'épaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller

L'épaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller joue un grand rôle dans la production, cette dernière est d'autant plus importante que l'épaisseur est faible, cependant plus l'épaisseur est grande plus la distillation est dure.

-L'isolation des faces latérales du distillateur

L'isolation des faces latérales a pour but d'éliminer les pertes (transfert de chaleur avec le milieu extérieur).

II.7.1.3.Les paramètres thermo physiques

Les paramètres thermo physiques sont représentés par :

-La couverture et la surface absorbante

La conductivité thermique, la chaleur spécifique, la diffusivité thermique, le coefficient de dilatation thermique.

- La saumure

La conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique, la chaleur latente de vaporisation, le coefficient de dilatation thermique et la diffusivité thermique.

-Le mélange air-vapeur

La conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique, le coefficient de dilatation thermique.

II.7.1.4.Les paramètres optiques

Les paramètres optiques sont (l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et la transmittivité) de la surface de la couverture et de la surface absorbante.

II.7.1.5.Les paramètres de fonctionnement

Ces paramètres sont les différentes températures du système et du fluide, en particulier la température de l'eau à distiller.

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

II.7.2. Les paramètres externes

C'est des paramètres qui influent sur le bon fonctionnement et le rendement du distillateur, ces paramètres sont liés au site [22] :

II.7.2.1. Intensité du rayonnement solaire

C'est le facteur essentiel dans cette étude. C'est une énergie rayonnante de courte longueur d'onde (0.17 à 4 μm) [4]. Le maximum d'intensité est obtenu pour la longueur d'onde 0.47 μm dans le spectre visible. L'intensité globale du rayonnement solaire arrivant aux confins de l'atmosphère sur une surface perpendiculaire est constante, est égale à 1.35KW/m². Cependant, l'énergie arrivant au voisinage de la surface terrestre est affaiblie par l'absorption d'une partie du rayonnement par l'atmosphère [4]. Le coefficient de transmission est assez constant en cours d'année et se situe entre 0.7 et 0.9. Plusieurs études montrent que l'irradiation globale reste le paramètre le plus influent sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire [19].

II.7.2.2. La vitesse du vent

L'effet convectif sur la face de la vitre joue un rôle important sur le fonctionnement du système. La vitesse du vent est liée au coefficient de transfert convectif entre la couverture et l'extérieur.

II.7.2.3. La température ambiante de l'air

La valeur de cette température intervient pour déterminer des échanges thermiques entre la partie interne et le milieu extérieur.

II.7.2.4. Les paramètres géographiques

Les paramètres géographiques tels que la longitude, la latitude et la hauteur du soleil, sont à prendre en considération dans cette étude.

II.8. Conception objective pour un distillateur solaire efficace

Pour avoir un rendement élevé, le distillateur solaire devrait maintenir

- Une température d'eau d'alimentation élevée.
- Une importante différence de température entre l'eau d'alimentation et la surface de condensation.
- Une faible fuite de vapeur.

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

Une grande différence de température peut être obtenue lorsque :

- la surface de condensation absorbe peu du rayonnement entrant.
- l'eau de condensation absorbe la chaleur qui doit être enlevée rapidement de la surface de condensation.

En plus on doit surveiller les éléments suivants

- Emplacement

Les distillateurs solaires fonctionnent à l'aide de l'énergie solaire; son emplacement est choisi d'une façon à éviter les obstacles.

- Le goût

L'eau distillée est insipide à cause de l'absence des minéraux selon les préférences personnelles, le refroidissement de l'eau pourrait en améliorer le goût.

- La facilité de nettoyage

On choisit un modèle doté d'un absorbeur facile à nettoyer

- La composition des distillateurs

On recommande que les distillateurs soient en fer galvanisé, en aluminium ou en bois.

II.9. .Principe du fonctionnement du prototype réalisé

Le distillateur est alimenté avec de l'eau saumâtre à l'aide d'une conduite extérieure (1), qui est équipé d'un flotteur pour maintenir le niveau d'eau dans la marmite. Une fois que l'eau est arrivée à la marmite (2), et sous l'effet du rayonnement solaire, cette dernière s'échauffe pour atteindre sa température d'évaporation(3). La vapeur produite et sous l'effet de pression suit la tuyauterie (4) pour qu'elle se condense au niveau du serpentin(5). Finalement on récupère l'eau distillée au bout du serpentin(6).

Note: Le réflecteur sert comme concentrateur du rayonnement solaire.

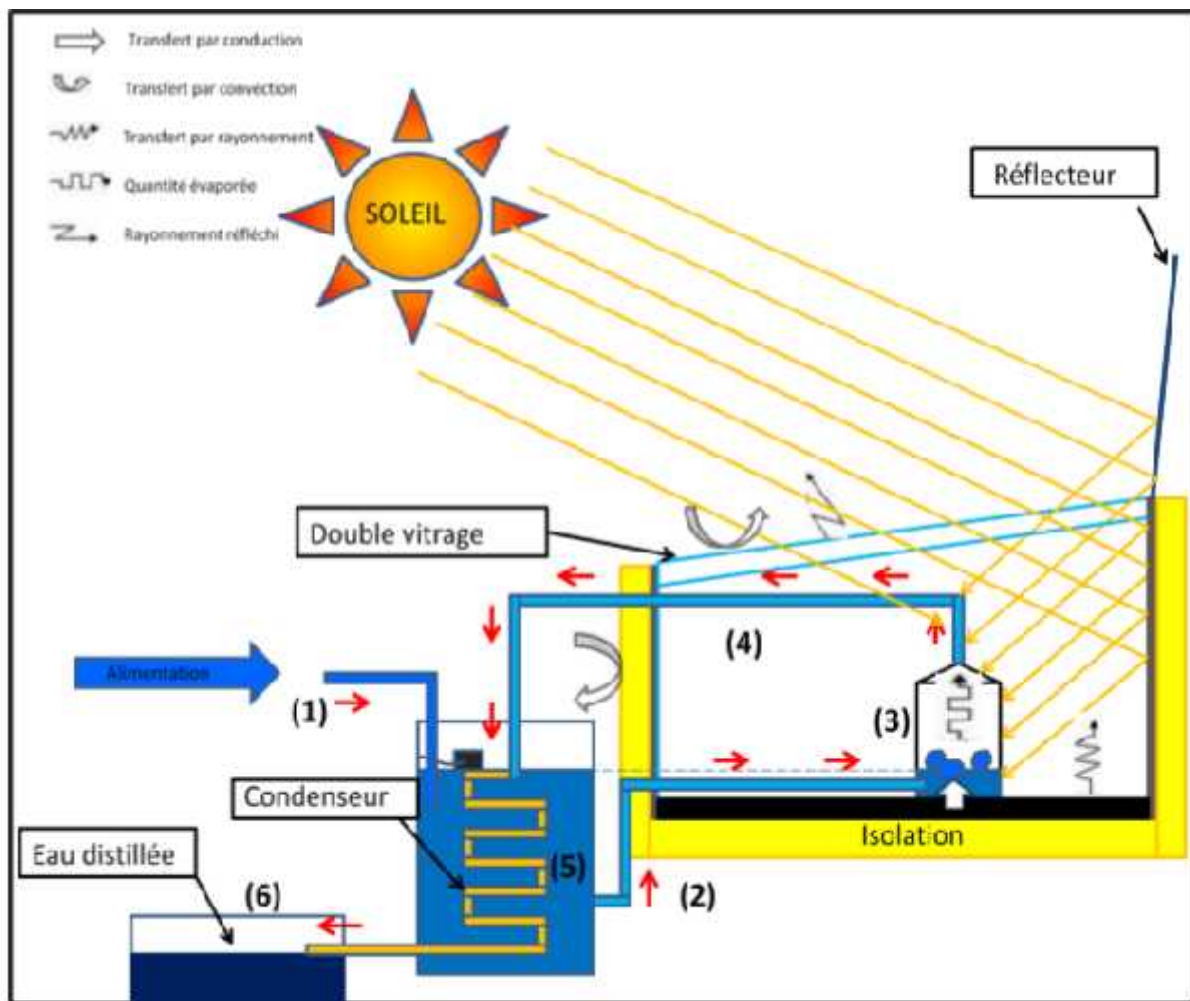


Fig.II.18. Schéma du principe de fonctionnement

II.10. Echanges de chaleur à l'intérieur du distillateur

II.10.1. Echange de chaleur entre l'absorbeur et la marmite

L'eau reçoit de la marmite un flux solaire ou de chaleur par convection naturelle et conduction. La marmite elle-même reçoit de l'absorbeur un flux de chaleur.

II.10. 2. Echange de chaleur entre la marmite et le vase

L'eau à l'intérieur de la marmite cède un flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle aux surfaces de condensation. Avec l'évaporation, l'eau perd un flux de chaleur. La vapeur récupérée au niveau de la marmite est envoyée vers le condenseur par une conduite.

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

II.10.3. Echange de chaleur entre la vitre et l'ambiant

Le milieu extérieur cède un flux de chaleur par rayonnement solaire à la vitre, dont une partie est réfléchi. La vitre cède au milieu extérieur un flux de chaleur par rayonnement et par convection naturel.

II.11. Bilans thermiques

Pour effectuer le bilan thermique de notre système on définit le flux global incident sur le vitrage extérieur, en tenant compte du flux réfléchi par les réflecteurs en direction de la vitre comme on peut le considérer un système thermodynamique ouvert délimité par ses surfaces extérieures :

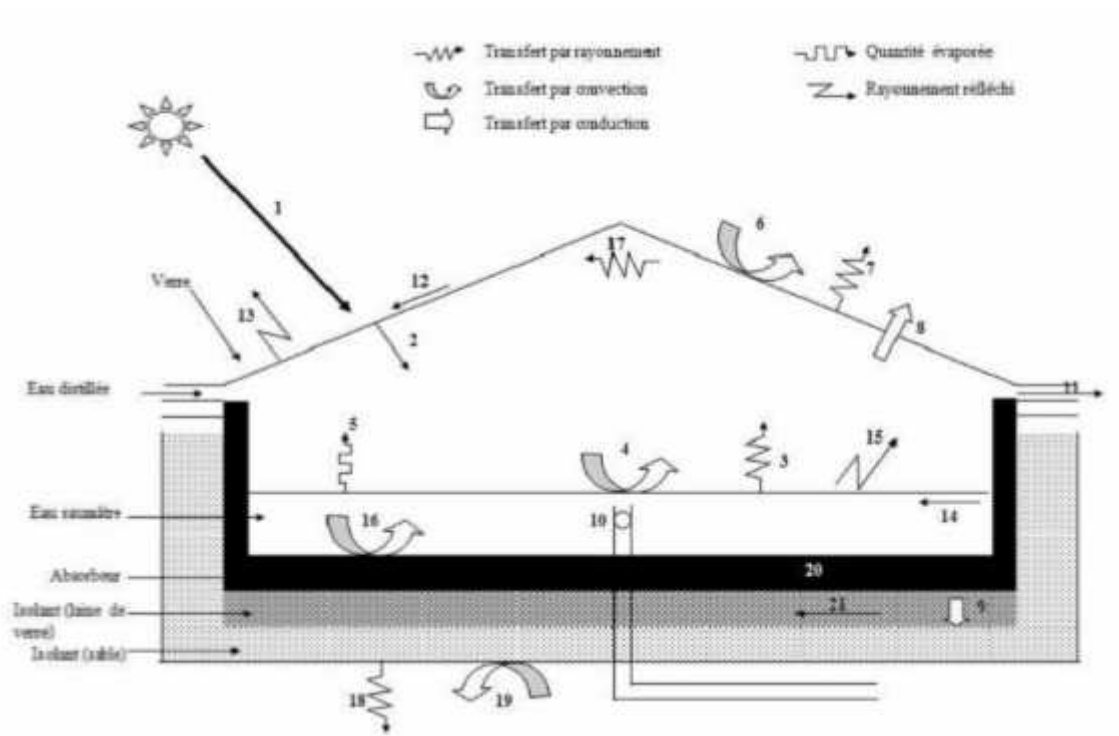


Fig .II.19. Figure des différents flux d'énergies. [23]

Ou :

- 1 : est la puissance totale reçue par le couvercle sous l'incidence normal (E)
- 2 : est la puissance (absorbée + réfléchi) par la saumure et celle réfléchi par le plan noir.
- 3 : est la puissance échangée par rayonnement entre le plan noir et la vitre.
- 4 : est la puissance échangée par convection entre la saumure et la vitre.
- 5 : est la quantité d'eau évaporée.

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

6 : est la puissance échangée par convection entre le couvercle et le milieu extérieur.

7 : est la puissance rayonnée par le couvercle vers la voute céleste.

8 : est la puissance échangée par conduction de la vitre vers le milieu extérieur.

9 ,18 ,19 : sont des puissances perdues par conduction, rayonnement et convection à travers la base.

10 : tube d'eau saumâtre.

11 : sortie de l'eau distillée.

12 : est une puissance absorbée par la vitre.

13 : est un rayonnement réfléchi par la vitre.

14 : est une puissance absorbée au niveau de l'eau saumâtre.

15 : est un rayonnement réfléchi au niveau de l'eau saumâtre.

16 : est une puissance absorbée par la saumure.

17 : est une puissance échangée par rayonnement.

20 : l'absorbeur.

21 : l'isolant.

$$\Phi_R = \Phi_G + \Phi_{\text{réf été}}$$

$$\Phi_G = \Phi_D + \Phi_D + \Phi_{\text{Réf s}}$$

$$\Phi_d = S_d \cdot A_v$$

$$\text{Ou : } S_d = I \cos \theta$$

Où θ représente l'angle d'incidence des rayons solaires sur la surface des vitrages.

$$\Phi_{\text{réf été}} = S_d \cdot A_r \cdot r_r$$

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

) Le bilan thermique au niveau de l'unité de distillation

$$E = E_r + Q_{rvc} + Q_{cva} + Q_m + Q_b + Q_p \quad (1)$$

Avec :

E : puissance solaire totale reçue par le couvercle sous l'incidence normale.

E_r : puissance solaire réfléchiée par le couvercle .

Q_{rvc} : puissance rayonnée par le couvercle.

Q_{cva} : puissance échangée par convection entre le couvercle et l'air extérieur.

Q_m : chaleur emporté par le distillat par unité de temps.

Q_b : puissance perdue par conduction – convection à travers la base.

Q_p : puissance perdue à travers les faces latérales.

Toutes les puissances précédentes sont en [watts] .

$$E : Q_1 = E = r_v \cdot E$$

$$Q_2 = Q_{rvc} = h_r \cdot S_v (T_v - T_c)$$

$$Q_3 = Q_{cva} = h_c \cdot S_v (T_v - T_a)$$

$$Q_4 = Q_m = \dot{m}_d \cdot C_p (T_d - T_a)$$

$$Q_5 = Q_b = h_g \cdot S_l (T_l - T_a)$$

Après avoir remplacé les termes de l'équation (1), on aura :

$$E = r_v \cdot E + h_r \cdot S_v (T_v - T_c) + h_c \cdot S_v (T_v - T_a) + \dot{m}_d \cdot C_p (T_d - T_a) + h_g \cdot S_l (T_l - T_a) + Q_p$$

Q_p ; Représente les différentes pertes suivantes :

- Pertes par convection et rayonnement des parois latérales.
- Pertes par fuites de vapeur vers l'atmosphère, celles –ci sont minimisées par l'adjonction d'un joint d'étanchéité au niveau du couvercle.
- Pertes par fuite du distillat, elles sont minimisées par l'étanchéité des gouttières.

Note : Avec ces pertes étant faibles, on n'en tiendra pas compte dans le bilan thermique.

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

II.11.1. Bilan énergétique de la vitre extérieure

La variation d'énergie interne est égale à la somme des quantités de chaleur échangées :

$$\Delta U_v = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5 \quad (\text{II.1})$$

$$\Delta U_{v1} = m_v \cdot C_v \frac{\partial T_v}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

Φ_1 : Puissance solaire absorbée par la vitre extérieure.

$$\Phi_1 = \alpha_{v1} \cdot \Phi_R \quad (\text{II.3})$$

Φ_2 : Puissance thermique échangée par convection entre la vitre extérieure et le milieu ambiant .

$$\Phi_2 = h_{c1} \cdot e \cdot A_{v1} (T_e - T_{v1}) \quad (\text{II.4})$$

Φ_3 : Puissance thermique échangée par convection entre les deux vitres.

$$\Phi_3 = h_{c1-v2} \cdot A_{v1} (T_{v1} - T_{v2}) \quad (\text{II.5})$$

Φ_4 : Puissance échangée par rayonnement entre les deux vitres.

$$\Phi_4 = h_r \cdot \varepsilon_{v2-v1} \cdot A_{v1} (T_{v2} - T_{v1}) \quad (\text{II.6})$$

Φ_5 : Puissance échangée par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste.

$$\Phi_5 = h_r \cdot \varepsilon_{V-v1} \cdot A_{v1} (T_V - T_{v1}) \quad (\text{II.7})$$

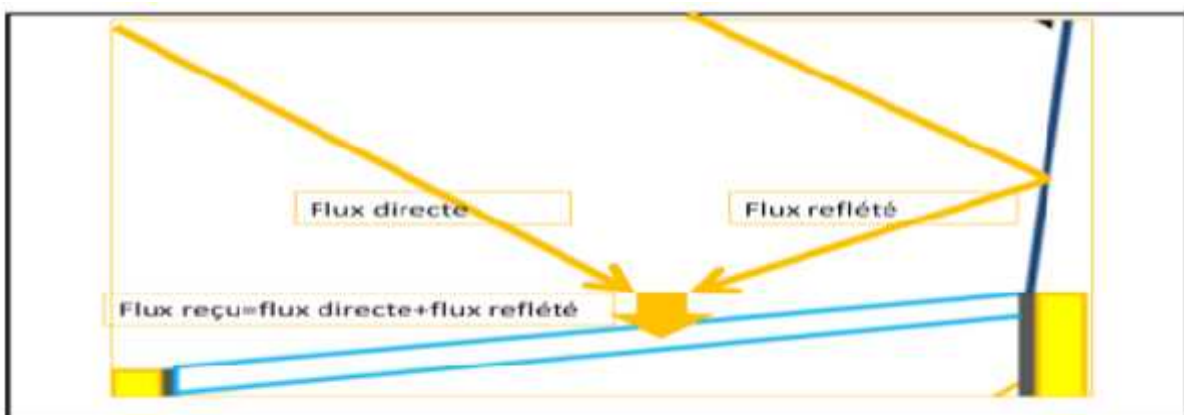


Fig II.20. Schéma explicatif du rayonnement incident sur la surface verrière

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

II.11.2. Bilan énergétique de la vitre intérieure

L'équation résultante du bilan énergétique de la vitre intérieure est :

$$\Delta U_v = \Phi_6 + \Phi_7 + \Phi_8 + \Phi_9 + \Phi_1 \quad (\text{II.8})$$

U_{v2} : Puissance thermique moyenne contribuant à l'échauffement de la vitre intérieure.

$$U_{v2} = m_v \cdot C_v \cdot \frac{\partial T_{v2}}{\partial t} \quad (\text{II.9})$$

Φ_6 : Puissance absorbée par la vitre intérieure.

$$\Phi_6 = \tau_{v1} \cdot \alpha_{v2} \cdot \Phi_R \quad (\text{II.10})$$

Φ_7 : Flux de rayonnement entre la vitre intérieure et l'absorbeur.

$$\Phi_7 = h_r \cdot \epsilon_{v2-a} \cdot A_{v2} (T_a - T_{v2}) \quad (\text{II.11})$$

Φ_8 : Flux de rayonnement entre la vitre intérieure et la vitre extérieure.

$$\Phi_8 = h_r \cdot \epsilon_{v1-v2} \cdot A_{v2} (T_{v1} - T_{v2}) \quad (\text{II.12})$$

Φ_9 : Puissance due à l'échange convectif entre la vitre intérieure et la lame d'air statique au-dessus de l'absorbeur.

$$\Phi_9 = h_{c2} \cdot A_{v2} (T_a - T_{v2}) \quad (\text{II.13})$$

Φ_1 : Puissance due à l'échange par convection entre la vitre intérieure et la vitre extérieure

$$\Phi_1 = h_{c1} \cdot A (T_{v1} - T_{v2}) \quad (\text{II.14})$$

II.11.3. Bilan énergétique de la marmite

$$U_m = \Phi_1 + \Phi_1 \quad (\text{II.15})$$

U_m : Puissance thermique moyenne contribuant à échauffer la marmite

$$U_m = m_m \cdot C_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial t} \quad (\text{II.16})$$

Φ_1 : Puissance absorbée par la marmite

$$\Phi_1 = \alpha_m \cdot A_m \cdot \Phi_R \cdot \tau_{v1} \cdot \tau_{v2} \quad (\text{II.17})$$

Φ_1 : Flux échangé avec le liquide à évaporer

$$\Phi_1 = -m_e \cdot C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} - \dot{m}_e \cdot L_v \quad (\text{II.18})$$

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

II.11.4. Bilan énergétique de l'eau

$$U_e = m_e \cdot C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = - \dot{e}_v \cdot L_v + h_m \cdot A_m \cdot (T_m - T_e) \quad (\text{II.19})$$

II.11.5. Bilan énergétique de l'absorbeur

$$U_a = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 \quad (\text{II.20})$$

U_a : Puissance thermique moyenne contribuant pour échauffer l'absorbeur

$$U_a = m_a \cdot C_a \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (\text{II.21})$$

Φ_1 : Puissance absorbée par l'absorbeur

$$\Phi_1 = \alpha_D \cdot A_{aD} \cdot \Phi_R \cdot \tau_{v2-v1} \quad (\text{II.22})$$

Φ_1 : Flux échangé par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre intérieure

$$\Phi_1 = -\Phi_7 = -h_r \cdot \epsilon_{v2-a} \cdot A_{v2} \cdot (T_a - T_{v2}) \quad (\text{II.23})$$

Φ_1 : Flux dû à l'échange convectif entre l'absorbeur et la lame d'air statique

$$\Phi_1 = h_{c2} \cdot A_a \cdot (T_{v2} - T_a) \quad (\text{II.24})$$

Φ_1 : Flux échangé par conduction entre l'absorbeur et la marmite

$$\Phi_1 = \frac{\lambda_a}{e_a} \cdot A_a \cdot m \cdot (T_a - T_m) \quad (\text{II.25})$$

II.11.6. Bilan énergétique d'un réflecteur

$$\Phi_r = G_r \cdot A_r \cdot \tau_r \quad (\text{II.26})$$

Avec :

Φ_r : Puissance réfléchie sur le récepteur.

A_r : Surface d'un réflecteur

G_r : Éclairement global arrivant sur le réflecteur

τ_r : Coefficient de réflexion de l'aluminium.

II.11.7. Le flux perdu à travers les murs

Est :

$$= (h_i \cdot S + S_a \frac{\lambda_a}{e_a} + S_L \frac{\lambda_L}{e_L} + S_b \frac{\lambda_b}{e_b} + h_e \cdot S) (T_i - T_e) \quad (\text{II.27})$$

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

II.11.8. la surface d'échange d'un condenseur

Le calcul de la surface d'échange du condenseur (surface de condensation) est basé sur les hypothèses suivantes :

- Les fuites de vapeur sont négligeables,
- L'échange de chaleur à travers la tuyauterie en dehors du vase de condensation est négligeable,
- le transfert de chaleur est unidirectionnel.

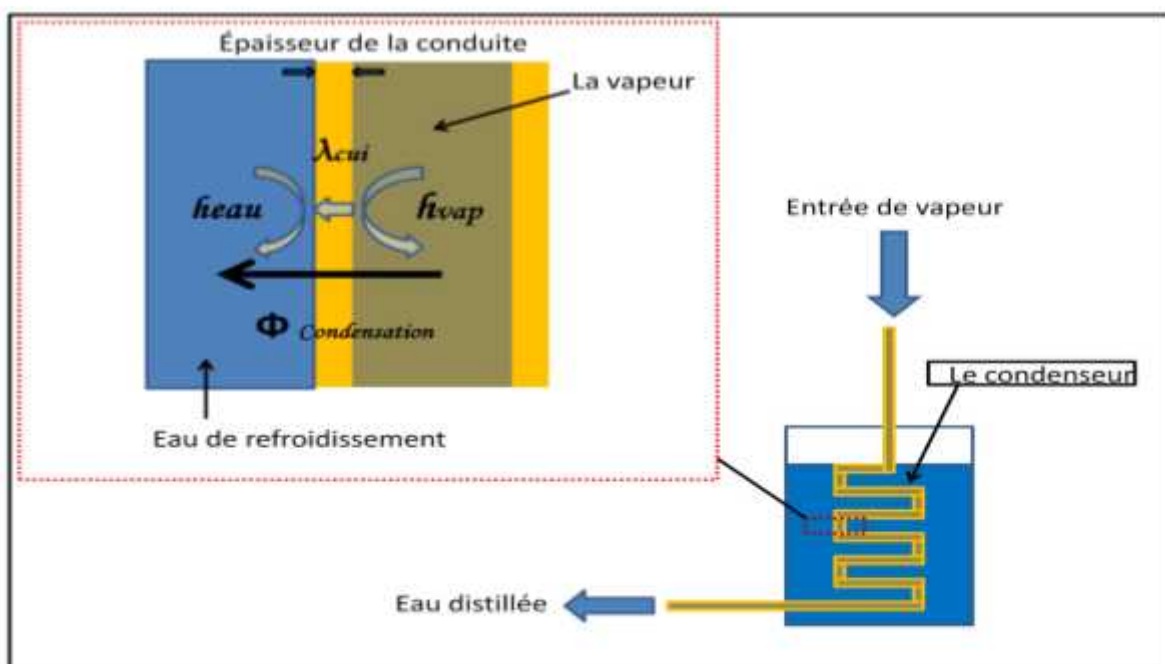


Fig II.21. Les modes de transfert de chaleur lors de la condensation.

Le flux échangé entre l'eau et la vapeur par convection et conduction à travers les parois du condenseur par unité de longueur de serpentin est :

$$\Phi_{e-v} = (T_v - T_e) / R \quad (\text{II.28})$$

$$R = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{h_v \cdot r_i} + \frac{l \cdot r_e}{\lambda_c} + \frac{1}{h_e \cdot r_e} \right)$$

On aura :

$$\Phi_c = c \cdot L_v = (T_v - T_e) / \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{h_v \cdot r_i} + \frac{l \cdot r_e}{\lambda_c} + \frac{1}{h_e \cdot r_e} \right) \quad (\text{II.29})$$

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

Alors le débit de condensation par unité de longueur de serpentín est:

$$c = (T_v - T_c) \left(\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{h_v} + \frac{1}{\lambda_c} + \frac{1}{h_c} \right) \right) L_v \quad (\text{II.30})$$

II.12 .Expressions des coefficients d'échange thermique

II.12.1.Coefficient d'échange radiatif

a) Entre la vitre et la voute céleste

$$h_r = \alpha_v \cdot \epsilon_v (T_v^2 + T_c^2) (T_v + T_c)$$

b) Entre l'absorbeur et la vitre de condensation

En négligeant l'atténuation du rayonnement due à l'existence d'une couche mince d'eau séparant le plan noir et la vitre, nous aurons :

$$h_r = F_{t1} \cdot \sigma (T_v^2 + T_t^2) (T_v + T_t)$$

$$\text{Avec : } F_{t1} = 1 / (1 - \epsilon_t) / \epsilon_t + 1 / F_{t1} + (1 - \epsilon_v) / \epsilon_v \cdot S / S_0$$

$$\text{Et } F_{t1} = 1$$

II.12.2. Coefficient d'échange convectif

a) Entre la vitre et l'atmosphère

Il est en fonction de la vitesse du vent

$$\begin{cases} h_v = 7.5 + 4 V_v & \text{si : } V_v < 4 \text{ m/s} \\ h_v = 7.3 V_v^{0.8} & \text{si : } V_v \geq 4 \text{ m/s} \end{cases}$$

Mais généralement la corrélation utilisée est :

$$h_v = 5.67 + 3.86 V_v$$

b) Entre la saumure et la vitre

Le coefficient d'échange convectif entre la saumure et la vitre est donné par l'expression suivante :

$$h_s = (0.123 T_s - 3.818) ((T_s - T_v)^{1/3})$$

Ce coefficient peut être obtenu en fonction du nombre de Grashof et de l'inclinaison de la vitre

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

Pour $0 < \beta < 20^\circ$

) Si	$Gr < 2 \cdot 10^3$	$Nu = 1$
) Si	$2 \cdot 10^3 < Gr < 3 \cdot 10^4$	$Nu = 0.0507 G^{0.4}$
) Si	$3 \cdot 10^4 < Gr < 2 \cdot 10^5$	$Nu = 3.6$
) Si	$Gr > 2 \cdot 10^5$	$Nu = 0.0402 \cdot G^{0.3}$

Alors :
$$h_s = \frac{N \cdot \lambda_m}{d_{ht}}$$

La première corrélation n'est pas valable pour des températures de la saumure inférieure à 31 °C.

C) Entre la saumure et l'absorbeur

$$h_s = \frac{N \cdot \lambda_s}{L}$$

Le nombre de Nu est donné en fonction des valeurs de Gr telles que :

) Si	$Gr < 10^5$	$Nu = 1$
) Si	$10^5 < Gr < 2 \cdot 10^7$	$Nu = 0.54 (G \cdot Pr)^{0.2}$
) Si	$Gr > 2 \cdot 10^7$	$Nu = 0.14 (G \cdot Pr)^{0.3}$

L'expression de Grashof est donnée comme suit :

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot L^3 (T_1 - T_2)}{\nu_s^2}$$

d) Entre l'absorbeur et l'air ambiant

$$h_g = 1 / \left(\frac{e_d}{\lambda_e} + \frac{e_i}{\lambda_e} + \frac{e_c}{\lambda_c} + \frac{1}{h_c} \right)$$

Avec :
$$h_c = 5.7 + 3.86 \cdot V_v$$

h_c : est le coefficient d'échange convectif entre le contre plaque et l'air ambiant.

II.12.3. Coefficient d'échange par évaporation-condensation

Baum a montré que l'évaporation et la condensation sont très liées, quand l'une augmente l'autre aussi et quand réciproquement pour la diminution. La connaissance des coefficients d'échanges à l'évaporation et à la condensation permet de calculer le taux d'eau distillée produite (\dot{S}_t)

En effet :
$$\dot{S}_t = h_d \cdot (T_s - T_v) / L_v (T_m)$$

Avec :
$$1/h_d = 1/h_e + 1/h_c$$

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

h_d : est le coefficient d'échange thermique évaporation – condensation rapporté à la surface qui conditionne les transferts de chaleur et de masse (S_s – S_t).

Les résultats suivants sont établis par Baum et Bairamov en 1963.

) A l'évaporation :

$$N_e = 39,8 \cdot P_e \cdot (G_e \cdot P_e)^{0,1}$$

$$\text{Pour : } 2,17 \cdot 10^6 < (G_e \cdot P_e) < 1,78 \cdot 10^7$$

) A la condensation :

$$N_c = 1,413 \cdot 10^4 \cdot P_c \cdot (G_c \cdot P_c)$$

$$\text{Pour : } 2,35 \cdot 10^6 < (G_c \cdot P_c) < 2,51 \cdot 10^7$$

En 1968, Bairmov et Rybakova ont complété les résultats précédents pour des valeurs du produit (Gr.Pr) plus élevées, correspondant à des écarts de températures entre la saumure et vitre plus élevés, ils obtiennent :

) A l'évaporation :

$$N_e = 2,767 \cdot P_{ev} \cdot (G_e - P_e)^{0,3}$$

$$\text{Pour : } 1,58 \cdot 10^8 < G_e \cdot P_e < 4,7 \cdot 10^8$$

) A la condensation :

$$N_c = 5,164 \cdot 10^{-2} \cdot P_c \cdot (G_c \cdot P_c)^{0,6}$$

$$\text{Pour : } 1,66 \cdot 10^8 < G_c \cdot P_c < 7,39 \cdot 10^8$$

Avec :

P_e, P_c : Pressions de vapeur à l'évaporation et à la condensation (en bars).

$$) P_e = \frac{\mu_e \cdot C_m}{\lambda_m} \quad \text{et } \mu_e \text{ calculée à } T_s$$

$$) P_c = \frac{\mu_c \cdot C_m}{\lambda_m} \quad \text{et } \mu_c \text{ calculée à } T_v$$

$$) G_e = \frac{y \cdot \beta}{\theta \cdot \frac{z}{d}} \cdot (T_s - T_m) \cdot (dh/2)^3$$

$$) G_c = \frac{y \cdot \beta}{\theta \cdot \frac{z}{d}} \cdot (T_m - T_v) \cdot (dh/2)^3$$

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

Nous aurons :

$$h_e = \frac{N_e \cdot \lambda_m}{dn/2}$$

$$h_c = \frac{N_c \cdot \lambda_m}{dn/2}$$

II.13. Caractéristiques de fonctionnement du distillateur

Afin de caractériser la production d'eau de tels distillateurs, plusieurs grandeurs sont définies. On distingue constamment :

II.13.1. Le rendement

C'est la quantité d'eau produite par unité de surface de plan noir et par jour [21]. L'inconvénient majeur de ce critère est qu'il ne fait pas mention de l'énergie solaire qui arrive sur le distillateur. Le rendement d'un distillateur simple est

$$\eta = \frac{d \cdot L_v}{G}$$

Avec : $d = \frac{q_e}{L_v}$

d : Débit de masse distillat.

L_v : Chaleur latente d'évaporation.

G : densité de flux solaire global incident.

II.13.2. La performance

Pour caractériser un distillateur de manière absolue amène à définir le facteur de performance brut (F.P.B) et le facteur de performance horaire (F.P.H) [21], [19].

Le facteur de performance brut (F.P.B) :

C'est le rapport de la quantité d'eau produite au bout de 24 h sur la quantité d'énergie entrée durant cette période.

Chapitre II : Généralités et étude théorique sur le distillateur solaire.

Le facteur de performance horaire (F.P.H)

C'est le rapport de la quantité horaire d'eau produite sur la quantité d'énergie entrée en une heure. A un instant donné de la journée, le facteur de performance F.P est donné par la relation :

$$FP = \frac{d}{\alpha_a \cdot G \cdot A_a}$$

FP : facteur de performance.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les différents types de distillateurs solaires avec leurs principes de fonctionnement, et les équations qui régissent sur le fonctionnement du distillateur et qui conduisent à l'évaluation numérique du rendement et des différents flux qui interviennent dans le distillateur, ainsi que les différentes pertes d'énergie engendrées dans ce prototype.

Et Pour améliorer le rendement du distillateur, il est nécessaire d'augmenter le plus possible la surface d'échange entre l'absorbeur sur lequel repose le fond de la marmite ainsi que la surface de cette dernière afin d'améliorer l'énergie absorbée et transmise à l'eau.

III.1. Introduction

Les matériaux à changement de phase (MCP) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. La chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide (et vice versa).

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

Cette propriété du matériau est liée à son importante énergie de fusion par unité de volume, plus celle-ci sera grande et plus les propriétés de stockage et de restitution de la chaleur seront intéressantes.

III.2. Stockage d'énergie thermique

L'énergie thermique peut être stockée comme un changement de l'énergie interne d'un matériau en tant que chaleur sensible, chaleur latente. On distingue deux formes de stockage.

III.2.1. Stockage par chaleur sensible

Ce qui veut dire qu'il faut **4186 joules** pour élever **1 kg** d'eau de **1°C**. Ainsi, à pression constante, si l'on réchauffe un corps (généralement liquide ou solide) de masse m et de capacité thermique $C_p(T)$ de la température T_1 à la température T_2 on peut stocker une énergie donnée par sa variation d'enthalpie [30].

$$E_{S, ns} = H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} m c_p(T) dT \quad (III.1)$$

En supposant $C_p(T)$ constante, on obtient la relation suivante :

$$E_{S, ns} = H_2 - H_1 = m c_p (T_2 - T_1) \quad (III.2)$$

La quantité d'énergie stockée est proportionnelle à l'écart de température, alors :

- Si $T_1 > T_2$ on dira que c'est un stockage du chaud.

- Si $T_2 > T_1$ on dira que c'est un stockage du froid.

III.2.2. Le stockage par chaleur latente

Ce type de stockage consiste à exploiter la quantité d'énergie engagée lors du changement d'état d'un corps, celui-ci se produit à température constante. La chaleur latente est notée par L_v (v pour la vaporisation) et L_f (f pour la fusion).

Exemple : $L_f = 330\,103\text{ J/kg}$ c'est-à-dire la fonte de **1 kg** de glace à la température constante de **0 °C** nécessitera une énergie de **330 kJ**.

$$E_{lt} = H_2 - H_1 = mL_f \quad (III.3)$$

Supposant qu'un solide pur à la température T_1 , de masse m ayant une température de fusion T_f telle que $T_1 < T_f < T_2$, l'énergie stockée serait donnée à pression constante, pour la variation d'enthalpie suivante [30]

$$E_{lt} = H_2 - H_1 = mC_{ps} \int_{T_1}^{T_f} (T) dT + mL_f + mC_{pl} \int_{T_f}^{T_2} (T) dT \quad (III.4)$$

$C_{ps}(T)$: Chaleur spécifique du corps à l'état solide.

$C_{pl}(T)$: Chaleur spécifique du corps à l'état liquide.

L_f : Chaleur latente de changement de phase.

En supposant $C_{ps}(T)$ et $C_{pl}(T)$ constantes, nous obtenons :

$$E_{lt} = H_2 - H_1 = mC_{ps}(T_f - T_1) + mL_f + mC_{pl}(T_2 - T_f) \quad (III.5)$$

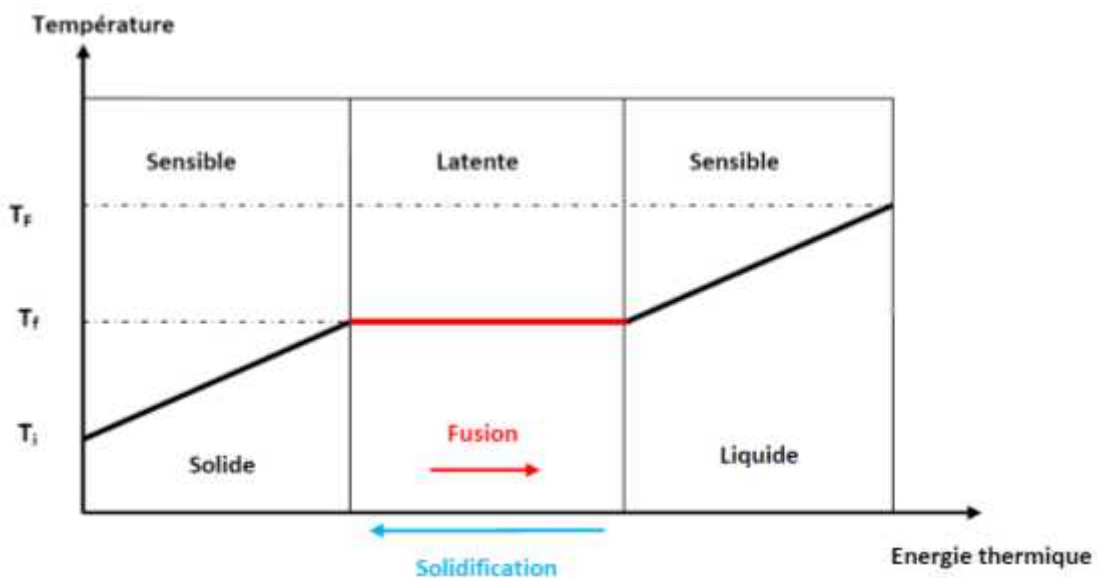


Fig III.1. Evolution de la température d'un corps pur avec changement d'état.

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

Si l'on représente l'enthalpie spécifique en fonction de la température, on obtient donc la courbe (a) de la figure (III.2). On remarque la discontinuité due au changement d'état (pas de variation de température). Dans le cas d'un mélange (alliage), la variation d'enthalpie ne représente plus de continuité (Courbe b, figure III.2), sauf dans le cas où l'on a formation d'un composé défini avec fusion (ou solidification) congruente.

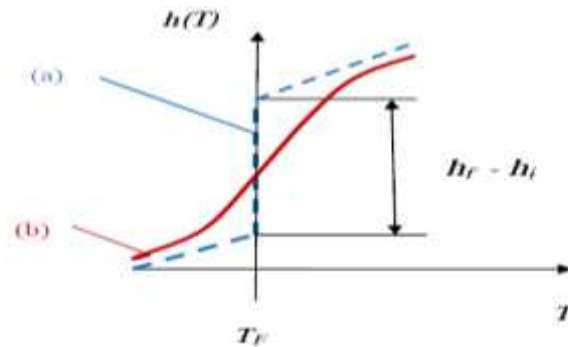


Fig III.2. L'enthalpie spécifique en fonction de la température,

Courbe (a) pour un corps pur.

Courbe (b) pour un mélange.

III.2.3. Comparaison entre le stockage par chaleur latente et le stockage par chaleur sensible

Il est important de noter que les quantités d'énergie mises en jeu dans le processus de changement de phase sont bien plus importantes que celles qui interviennent lors de transfert sensible. C'est grâce au stockage par chaleur latente qu'il est aujourd'hui possible de réduire considérablement le volume d'un élément de stockage d'énergie (compacité), ou encore d'augmenter très fortement la quantité d'énergie contenue dans un même volume de stockage (densité énergétique). On notera, d'autre part, qu'un MCP peut cumuler les 2 types de transfert thermique décrits précédemment.

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

Exemple :

Tableau III.1 : Les caractéristiques du MCP.

Nom	Acétate trihydrate de sodium (MCP)
T_f (°C)	55-58 °C
L_f ($\frac{J}{kg}$)	$242,85 \cdot 10^3$
C_{ps} ($\frac{J}{kg.K}$)	$3,31 \cdot 10^3$ à 30°C
C_{pl} ($\frac{J}{kg.K}$)	$3,06 \cdot 10^3$ à 70°C
ρ_l ($\frac{kg}{m^3}$)	1279 à 70°C
ρ_s ($\frac{kg}{m^3}$)	1392 à 30 °C

a) **Densité énergétique :**

L'énergie $E_{M\ 3-7\ ^\circ C}$ accumulée par $1\ m^3$ de ce MCP entre **30 °C** et **70 °C** vaut :

$$\begin{aligned}
 E_{M\ 3-7} &= V \cdot \rho_s \cdot C_{ps} \cdot \Delta T_s + V \cdot \rho_s \cdot L_f + V \cdot \rho_l \cdot C_{pl} \cdot \Delta T_l \\
 &= [1 \cdot 1392 \cdot 3,31 \cdot 10^3 \cdot (55-30)] + [1 \cdot 1392 \cdot 242,85 \cdot 10^3] + [1 \cdot 1279 \cdot 3,06 \cdot 10^3 \cdot (70-58)] \\
 &= 5,0010^8 \text{ Joules} \\
 &= 139 \text{ kWh}
 \end{aligned}$$

E_M Chaleur stockée par le matériau à changement de phase (kWh)

V Volume du MCP (m^3)

C_{ps} Chaleur spécifique massique du MCP à l'état solide (J/(kg.K))

ΔT Différence de température (K)

ρ_s Masse volumique du MCP à l'état solide (kg/m³)

ρ_l Masse volumique du MCP à l'état liquide (kg/m³)

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

C_{pl} Chaleur spécifique massique du MCP à l'état liquide (J/(kg.K))

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

Pour le même intervalle de température, et même volume d'eau (1m^3) accumulerait une quantité :

$$\begin{aligned} E_{e \text{ 3 } -7^\circ\text{C}} &= C_{e \text{ liq}} \cdot V \cdot \rho_e \cdot \Delta T_e \\ &= 1 \cdot 1000 \cdot 4186 \cdot (70-30) \\ &= 167,44 \times 10^6 \text{ Joules} \\ &= 46,4 \text{ kWh} \end{aligned}$$

ρ_e Masse volumique de l'eau (kg/m^3)

$C_{e \text{ liq}}$ Chaleur spécifique massique de l'eau ($/\text{k} \cdot \text{K}$)

Résultat :

$$\frac{E_M \text{ 3 } -7^\circ\text{C}}{E_e \text{ 3 } -7^\circ\text{C}} = 3$$

Donc le MCP considéré a permis de stocker 3 fois plus d'énergie pour un même volume que l'eau. Il possède donc une plus grande densité énergétique.

b) Compacité

De la même manière, pour stocker **100 kWh** de **55°C** à **58°C**, nous avons besoin des volumes

V_e et V_M , suivants :

$$\begin{aligned} \text{Pour l'eau on a : } V_e &= \frac{P_{St}}{C_{e \text{ liq}} \cdot \rho_e \cdot \Delta T} \\ &= \frac{1 \cdot 10^3 \cdot 3}{4 \cdot 1 \cdot (58 - 55)} \\ &= 28,7 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Pour le MCP on a :

$$\begin{aligned} V_M &= \frac{P_{St}}{L_{fM} \cdot \rho_M} \\ &= \frac{1 \cdot 10^3 \cdot 3}{2,8 \cdot 1 \cdot 10^3} \\ V_M &= 1,1 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Résultats :

$$\frac{V_e}{V_M} \approx 26$$

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

Le volume du MCP utilisé pour stocker **100 kWh** entre **55 °C** et **58 °C** est donc plus de **26 fois** plus petit que celui de l'eau. Il possède donc une plus grande compacité.

III.2.4. Les avantages de stockage par chaleur latente

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

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

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

Par ailleurs, tout MCP peut servir de déphaseur thermique : tout apport ou perte énergétique (variation de température, rayonnement solaire...) en provenance du milieu ambiant peut provoquer la fusion ou la cristallisation du matériau à température quasi constante. Dès lors, le milieu situé de l'autre côté du MCP ne ressent pas aussitôt l'effet de cet apport ou de cette perte, mais ne commencera à le ressentir qu'après la fusion ou la cristallisation totale du matériau [24].

III.3. Critère de choix d'un MCP

Il est bien évident que le premier critère de choix d'un MCP concerne la température de transformation 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 représentera la plus grande chaleur latente. Des critères sont donc définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée.

a) Critères thermodynamiques

Le matériau à changement de phase doit avoir :

Les propriétés thermodynamiques et thermiques

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

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

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

Les propriétés cinétiques

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

Les propriétés chimiques

Le matériau à changement de phase doit montrer :

- Une stabilité chimique (absence de réaction chimique entre le MCP et le conteneur).
- Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur latente soit fiable.
- Aucune action corrosive sur les matériaux de construction ou sur leur conteneur.
- Le matériau doit être non inflammable et non explosif et ne doit pas être nocif.

Les propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement)

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

III.4. Les problèmes liés au changement de phase

a) La surfusion

Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de fusion. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés au-dessous de la température de changement d'état. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

et les échanges de chaleur avec l'extérieur faibles le déclenchement de la solidification provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement d'état. Ce phénomène réduit l'efficacité thermique des unités de stockage par chaleur latente par rapport à ceux par chaleur sensible. En effet, la décharge de la chaleur (pendant la solidification) a lieu à des températures inférieures de celles où le stockage de cette chaleur a eu lieu. On a donc une différence entre la chaleur absorbée pendant le chauffage et celle restituée pendant le refroidissement [25].

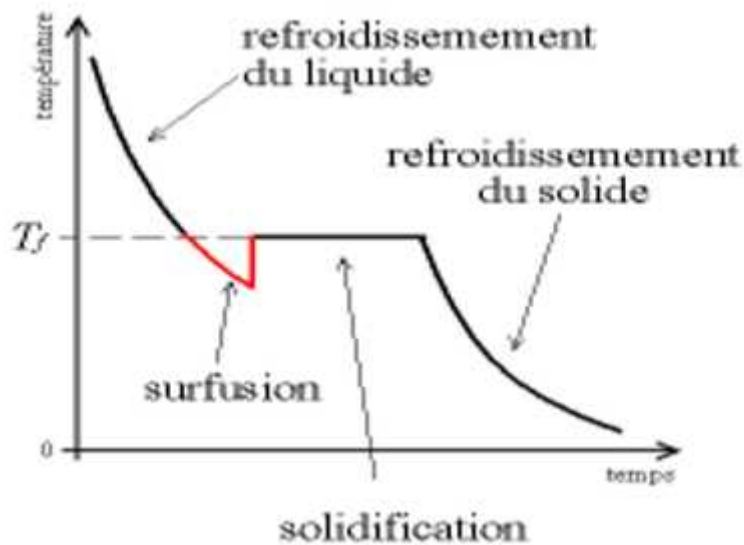


Fig.III.3 : Le phénomène de la surfusion [8].

b) La surchauffe

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

Si elle s'effectue pendant une longue durée, le stockage par chaleur latente perd l'essentiel de ses avantages par rapport au stockage par chaleur sensible [25].

C) La dilatation

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

III.5. Classification des matériaux à changement de phase (MCP)

En 1983, Abhat [26] a donné une classification générale des matériaux, utilisée depuis par la communauté scientifique du stockage latent. Cette classification est illustrée sur la figure suivante :

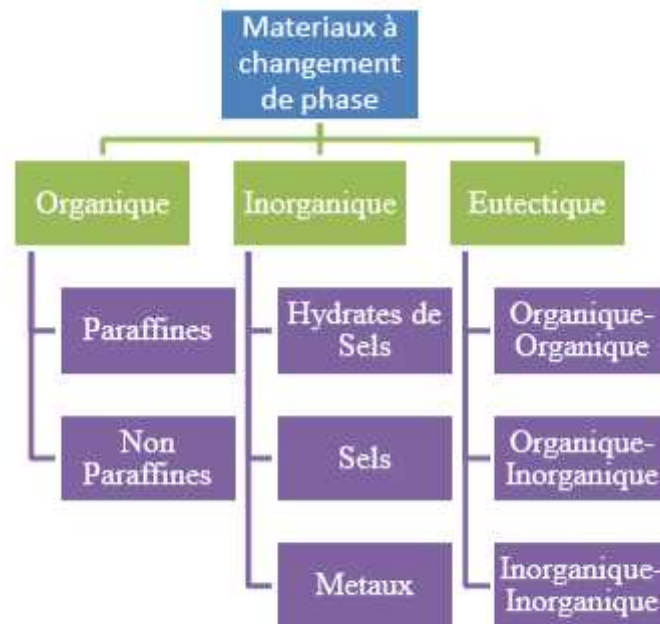


Fig.III.4. Classification des MCP [15].

Les matériaux à changement de phase sont classés en trois grandes familles :

-) **Les composés organiques** : paraffines, corps non-paraffiniques.
-) **Les composés inorganiques** : hydrates salins, sels, métaux, alliages.
-) **Les eutectiques** : ils peuvent être organiques ou inorganiques.

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

III.5.1. Les composés organiques

Un composé organique est un composé dont l'un des éléments chimiques constitutifs est le carbone. Ce composé peut être d'origine naturelle ou produit par synthèse. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools.

III.5.1.1. Les composés organiques paraffiniques

Ils sont essentiellement constitués d'hydrocarbures saturés, à chaîne linéaire ou parfois ramifiée avec un groupement méthyle substitué en bout de chaîne, pour des applications de

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

stockage thermique. Ils sont de la famille des alcanes de formule chimique C_nH_{2n+2} . Les paraffines sont les plus utilisées à cause de leur capacité de stockage plus importante. Les paraffines intéressantes pour le stockage thermique celles qui sont sous forme solide aux températures usuelles et sont qualifiées de « cire paraffinique ». Leur point de fusion augmente avec le nombre croissant d'atome de carbone.

Tableau III.2 : Propriétés thermo-physiques des paraffines [28].

Nombre d'atome 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

III.5.1.1.1. Les avantages et inconvénients des paraffines

a) Avantages

-) Plus la longueur moyenne de la chaîne hydrocarbonée est élevée, plus la température de fusion et la chaleur latente sont élevées.
-) Les paraffines ne montrent pas de tendance à la ségrégation des phases lors de leur transition et sont chimiquement stables.
-) Elles ont une faible pression de vapeur saturante qui limite les risques de vaporisation.

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

-) Certaines sont considérées comme non toxiques, inoffensives écologiquement et compatibles avec les réservoirs métalliques car elles ne provoquent pas ou peu de corrosion.
-) Facilement disponibles et peu coûteuses.

b) Inconvénients

-) Leur conductivité thermique reste très faible (0,25 W/m.K).
-) Elles présentent une expansion volumique assez élevée (15 %).
-) Une densité peu importante. (800 kg/m³).

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

Tableau III.3 : Exemples de propriétés physiques de paraffines. [28]

	Paraffines			
	Tétradécane	Hexadécane	Octadécane	Eicosane
Formule	$C_{14}H_{30}$	$C_{16}H_{34}$	$C_{18}H_{38}$	$C_{20}H_{42}$
Température de fusion (°C)	5.5	16.7	28	36.7
Conductivité thermique (W/m.°C)	0.15	0.15	0.15	0.15
Enthalpie de fusion (kJ/kg)	226	237	244	247
Capacité thermique massique (kJ/kg . °C)	2.07	2.11	2.16	2.21
Masse volumique solide (kg/m ³)	825	835	814	856
Masse volumique liquide (kg/m ³)	771	776	774	778
Retard de la solidification (°C)	Aucune	Négligeable	Négligeable	Aucune
Pression de vapeur (Pa)	133 à 75 °C	133 à 105 °C	133 à 75 °C	133 à 100 °C
Tension superficielle (N/m)	$27.4 \cdot 10^{-3}$	3.4	$27.4 \cdot 10^{-3}$	-
Viscosité dynamique (kg/m.s)	2.1	-	3.4	-

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

III.5.1.2. Les composés organiques non paraffiniques

Les composés organiques non paraffiniques sont divisés en deux groupes : les acides gras et les autres matières organiques. La formule générale des acides gras est $C_3(C_2)_n$, certaines caractéristiques de ces matériaux ont :

-) Relativement une enthalpie de changement de phase élevée.
-) Absence du phénomène de sous-refroidissement.
-) Une haute stabilité thermique.
-) Inflammabilité.
-) Une faible conductivité thermique.
-) Instabilité à haute température.

Tableau III.4 : Propriétés thermo-physiques des acides gras [28].

Matériaux	Formule	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
Acide acétique	CH_3COOH	16.7	174
Polyéthylène glycol 600	$H((OC_2H_2)_n-OH)$	20-25	146
Acide caprique	$CH_3(CH_2)_8-COOH$	36	152
Acide élaïdique	$C_8H_7C_9H_{16}-COOH$	47	218
Acide laurique	$CH_3(CH_2)_{10}-COOH$	49	178
Tri-stéarine	$(C_{17}H_{35}COOH)_3$	56	191
Acide muristique	$CH_3(CH_2)_{12}-COOH$	58	199
Acide palmitique	$CH_3(CH_2)_{14}-COOH$	55	163
Acide stéarique	$CH_3(CH_2)_{16}-COOH$	69.4	193
acétamide	CH_3CONH_2	8.1	241
Fumarate de méthyle	$(CHCO_2CNH_3)$	102	242
Acide pentadécanoïque	$CH_3(CH_2)_{13}-COOH$	52.5	178

III.5.2. Les composés inorganiques

Les composés inorganiques ont une température de fusion comprise entre -100 et +100°C. Les plus utilisés sont : les solutions aqueuses de sel, des sels hydratés, les mélanges de sels, des mélanges de métaux. Ils sont caractérisés par leur importante chaleur latente et une haute conductivité thermique. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leur utilisation sont en

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

rapport avec la ségrégation de phase, la corrosion, et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'éviter celle-ci [29].

III.5.2.1. 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 $AB \cdot n H_2O$.

Le sel hydraté le plus utilisé par son faible coût est le $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ ($T_{\text{fusion}} = 28-30^\circ\text{C}$). On peut citer aussi le $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ pour les applications de climatisation.

a) avantages

-) Les hydrates de sels sont appropriés pour leur utilisation dans le stockage thermique parce qu'ils présentent une grande chaleur latente (100-300 kJ/kg).
-) Une température de fusion adaptée aux applications à basse température ($\approx 10^\circ\text{C}$) et sont largement compétitifs en termes de coût et de rentabilité.
-) Ils présentent une conductivité thermique plus élevée que les paraffines (environ 0,5 W/m.K).

b) Inconvénients

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

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

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

Tableau III.5 : Différents hydrates salins [28].

Hydrates Salins	Température de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
Sels de Glauber ($Na_2SO_4 \cdot H_2O$)	32.4	252
Chlorure de calcium, Hexa hydrate $CaCl_2 \cdot 6H_2O$	27-30	190
Acétate de sodium tri hydrate $NaCH_3COOH \cdot 3H_2O$	58	170 à 264
hydroxyde de barium octahydrate $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	78	301
Phosphate de sodium dodécahydrate $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	77	213
Carbonate de sodium déca hydrate $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	32-35	247
Nitrate de calcium hydrate $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	40-43	140

III.5.3. Les eutectiques

Les eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs corps, ont une fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Ils sont utilisés pour le refroidissement et dans les systèmes passifs de stockage de l'énergie solaire. Les eutectiques peuvent être obtenus en mélangeant des corps :

-) Organique -organique
-) Inorganique –inorganique
-) Organique- inorganique

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

Tableau III.6 : Liste des quelques eutectiques [28].

Eutectique inorganique	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (KJ/Kg)
49.3%MgCL.6H ₂ O+50.7%Mg(NO ₃).6H ₂ O	58	132.3
61.3%Mg(NO ₃)6H ₂ O+38.5%NH ₄ NO ₃	51	131.1
CaCL ₂ .6H ₂ O+CaBr ₂ .H ₂ O	14	140
58.3%(MgNO ₃)6H ₂ O+41.7%MgCL ₂ .6H ₂ O	58	106
Eutectique Organique		
Acide caprique-laurique	18	120
Acide palmitique -laurique	33	145
Acide stéarique-laurique	34	150

a) Avantages

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

b) Inconvénients

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

III.6. Méthodes de conditionnement des MCP

Le conditionnement des MCP doit obéir à certaines exigences :

-) Le matériau du conteneur de conditionnement doit être compatible avec le MCP et ne doit subir ni ramollissement ou toute autre dégradation.
-) Le conteneur de conditionnement doit assurer une parfaite étanchéité quand le MCP change d'état.
-) Le conteneur doit pouvoir résister à la dilation et au changement de volume du MCP durant son changement de phase.

Il existe deux techniques de conditionnement des MCP :

a) La macro-encapsulation

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

Les conteneurs peuvent être constitués de sacs, bouteilles en plastique de différentes formes géométriques. Ils existent des procédés industriels qui utilisent le conditionnement dans des sphères de matière plastique ou nodule [28].

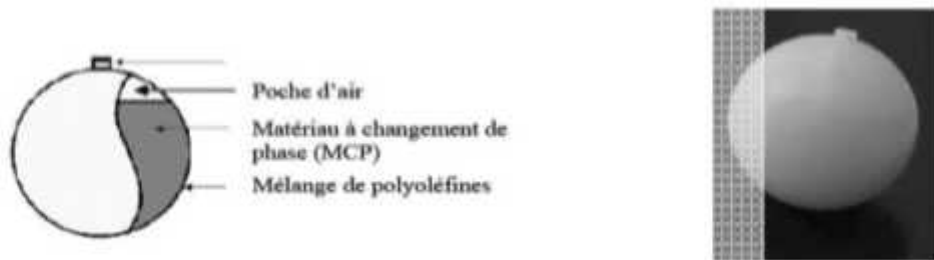


Fig.III.5. Conditionnement des MCP dans un nodule [28].



Fig. III.6. Exemples de conditionnement du MCP [28].

b) La micro-encapsulation

La micro-encapsulation est un procédé physique ou chimique qui permet d'emprisonner des petites gouttes de MCP dans une coquille solide de 1 à 1000 μm de diamètre [28].

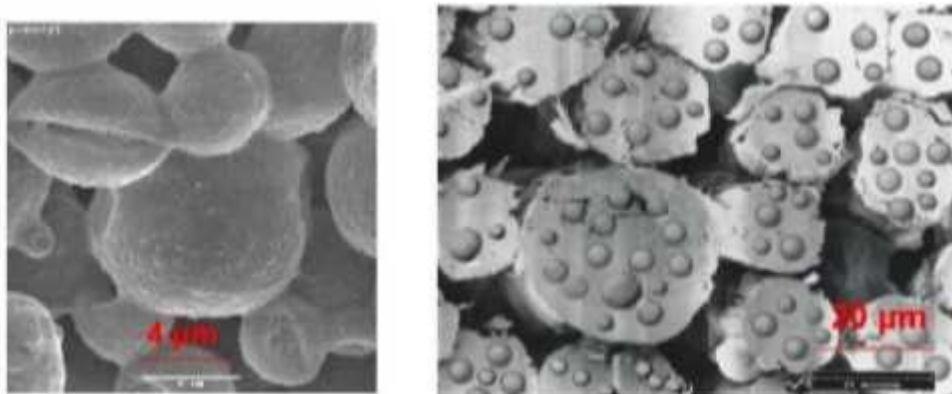


Fig. III.7. Vue microscopique de la micro-encapsulation [28].

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

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

L'utilisation des MCP en tant que matériaux de stockage et plus particulièrement de la transition solide-liquide présente l'inconvénient d'une faible conductivité thermique. Lors du processus de décharge, l'énergie libérée par la solidification du MCP doit être transportée de l'interface solide-liquide à travers la couche de solide naissante autour de la surface de transfert vers le fluide caloporteur. De cette façon, le coefficient de transfert global est limité par la conductivité thermique du MCP solide à la décharge qui est souvent le processus dimensionnant dans de nombreuses applications. Ils ainsi possible [31] :

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

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

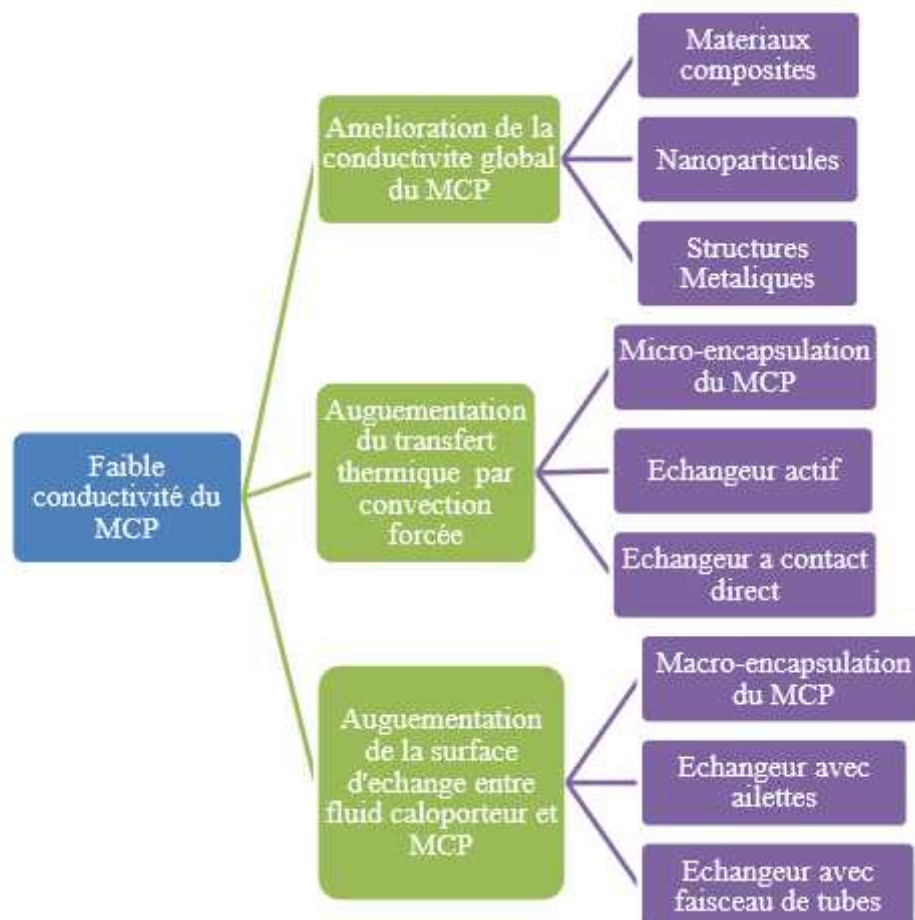


Fig. III.8 : Pistes d'amélioration du transfert thermique dans les systèmes de stockage par chaleur latente [31].

III.8.1. Amélioration de la conductivité globale du MCP

III.8.1.1. Les structures métalliques

a) Matrices métalliques

Parmi toutes les matrices métalliques testées expérimentalement dans des unités de stockage latent, les anneaux de Lessing en métal sont les plus efficaces puisque la conductivité thermique de l'ensemble anneaux-paraffine (2 W/m.K) est dix fois plus supérieure à la conductivité thermique de la paraffine seule (0,2 W/m.K).

Cette structure est visible sur la Figure (III.9) :



Fig III.9. Anneaux de Lessing [31]

b) Mousse métallique

Une autre des techniques développées consiste à réunir une mousse ou une structure de métal ayant une porosité de l'ordre de 90 % avec un MCP par compression ou imprégnation. Plusieurs auteurs ont déjà appliqué cette technique principalement avec du cuivre. Un exemple de mousse de cuivre est présenté sur la Figure III.7 :



Fig.III.10. Mousse de cuivre à imprégner de MCP [31].

c) Les nanoparticules

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 [31].

III.9. Application des Matériaux à changement de phase

Les MCP sont utilisés pour le stockage de l'énergie thermique, aussi dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles, par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent principalement sous la forme de petits «sacs en plastique» contenant le matériau choisi, disposé au plus près du produit à conserver.

Comme on peut les trouver principalement dans l'industrie des matériaux à changement de phase sont les suivantes [26] :

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

a) L'isolation des bâtiments

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

b) La climatisation passive et le chauffage

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



Fig. III.11: Climatisation passive et chauffage (gauche), Isolation du bâtiment (droite) [26].

c) Le stockage de l'énergie thermique

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

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

d) Le textile

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

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

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

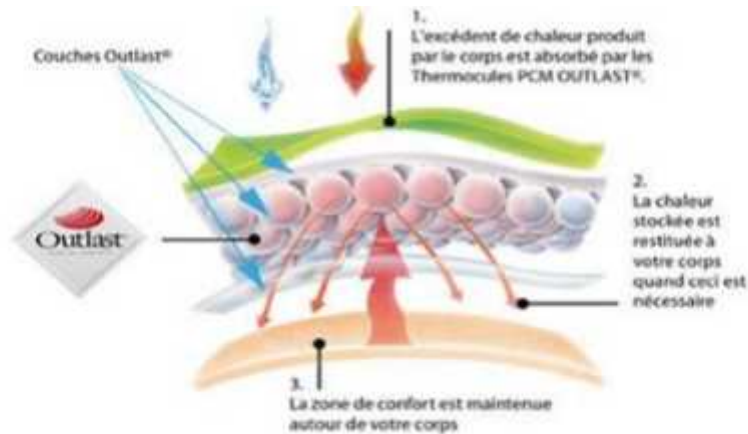


Fig. III.12. MCP dans le textile [26].

e) Le Transport agroalimentaire, pharmaceutique et médicale

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

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



Fig.III.13. Emballage isotherme passif transport de médicament [26].

Chapitre III : Les matériaux à changement de phase

Conclusion :

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

On a aussi cité quelques phénomènes ayant un impact sur le changement de phase et quelques pistes envisagées pour améliorer le transfert thermique dans un système de stockage latent.

IV.1. Introduction

Notre projet consiste à réaliser un distillateur solaire avec stockage d'énergie un matériau composite à base de perlite, paraffine et du graphite afin de l'utiliser dans le prototype expérimental réalisé à cet effet et qui reste l'objectif fixé au départ, qui est l'absorption de la chaleur cédée par la marmite.

IV.2. Elaboration du composite

IV.2.1. Matériaux utilisés pour la préparation du composite

Le premier critère de choix à retenir pour un MCP est la température de changement de phase 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.

Le matériau à changement de phase utilisé dans cette étude est la paraffine (Pa), la perlite (Per) servant de support et le graphite (Gr) en poudre pour améliorer la conductivité thermique du composite .



(a) La paraffine (Pa)



(b) la perlite (Pr)



(c) Le graphite (Gr)

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

a) La paraffine (MCP)

La paraffine disponible sur le marché national est celle qu'on a utilisée est celle qui est destinée pour la fabrication de bougies, comportant des additifs chimiques inconvenables (présence entre autres de +20 % de stéarine).

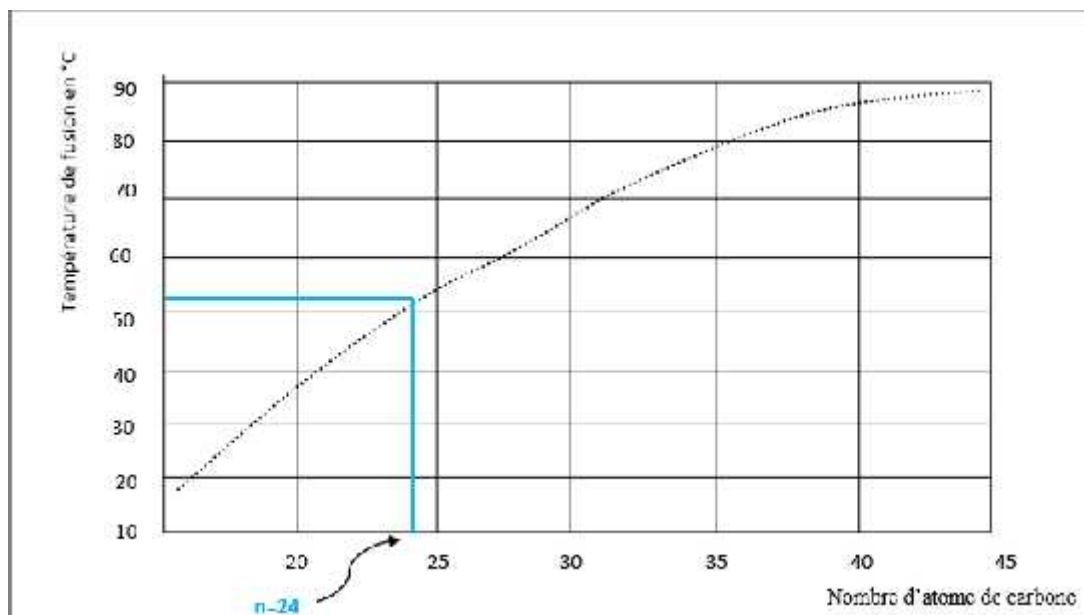


Fig.IV.2. Température de fusion en fonction du nombre d'atome de carbone.

Exemple, l'augmentation du nombre des atomes de carbone de C1 à C100 augmente la température de fusion de 90.68 à 388.40K et la chaleur de fusion de 58 à 285 KJ/Kg respectivement.

Chapitre IV : Matériels et méthodes

Dans notre cas, on a utilisé de la paraffine dont le point de fusion est situé entre 52 et 54°C, on peut déduire d'après la courbe donnant la température de fusion en fonction du nombre d'atome de carbone de l'alcane utilisé (**figure IV.2**)

Il s'agit du Tétracosane :

Tableau .IV. 1 : Le tétracosane est un hydrocarbure linéaire de la famille des alcanes

Propriétés chimiques	Propriétés physiques
Formule brute : $C_{24}H_{50}$	T° de fusion : 54 °C
Formule chimique : $C_{24}(C_{24})_2C_{24}$	Point d'ébullition : 391 °C
Masse molaire : 338,65g/m	

b) La perlite

La perlite est un isolant minéral, 100 % naturel. Elle est issue de roches volcaniques siliceuses que l'on a broyées puis chauffées à plus de 1000°C pour obtenir des grains possédant un fort pouvoir isolant. Les performances thermiques de la perlite sont dans la moyenne.

La perlite étant hydrophile, elle doit impérativement être associée à un hydrofuge.

Elle peut être utilisée en tant qu'isolant thermique et phonique mais dans notre cas on l'a utilisée comme matrice pour tenir le MCP.

Propriétés physiques

- Couleur : Blanche
- Densité apparente : 35-45 kg/m³ (selon PI 200-77)
- Densité compacté : 45-70 kg/m³ ((selon PI 200-77)
- pH (en eau) : 7-10 (selon PI 202-77)
- Conductivité thermique : 0,05 et 0,06 W/m.K à 20 °C (selon ASTM 177)
- Température d'adoucissement : 1150-1250 °C
- Température de fusion : 1260-1350 °C
- Granulométrie

Propriétés chimiques

S_iO_2	70-80 %
Al_2O_3	12-16 %
N_2O	2-5 %
K_2O	2-5 %
CaO	0-2 %
MgO	0-1 %
F_2O_3	0-1 %
H_2O (de l'eau combinée)	<1 %

) **Le broyage de la perlite**



Moulin à café



perlite en poudre

Fig.IV.3. Le broyage de la perlite avec un moulin à café.

c) Le graphite

Le graphite 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 qui est caractérisé par :

-) Une faible densité qui varie de 2.1 à 2.3.
-) Un point de fusion très élevé (3500 °C)

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

Tableau IV.2 : Propriétés physiques et chimiques du graphite.

Propriétés chimiques	Propriétés physiques
Formule brute : C	T° fusion : 3652 ° C
Masse molaire : 338.65g/m	Conductivité thermique jusqu'à : 500W/m K
Masse volumique : 2250k /m³	Capacité thermique massique : 720J/k K

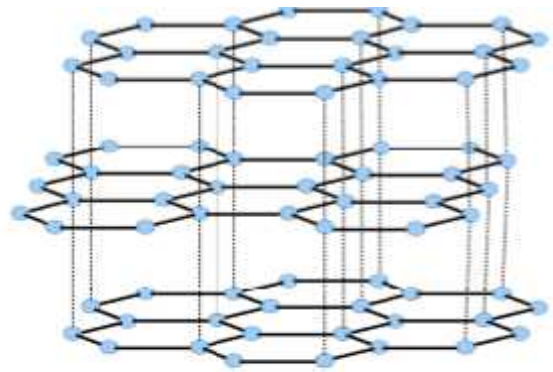
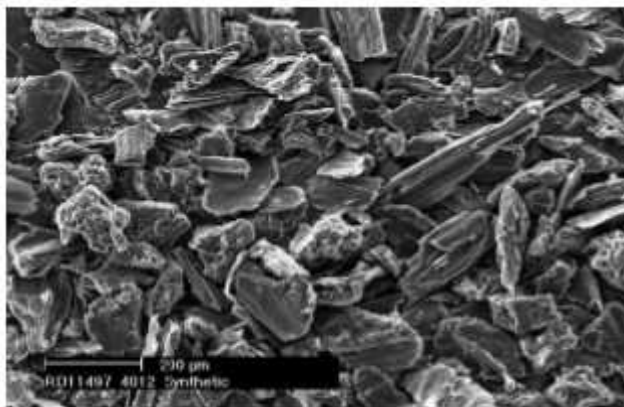


Fig. IV.4 : Structure cristalline du graphite

IV.2.2. Le composite MCP/Per/Gr

Pour la préparation du composite nous commençons par la pesée des différents matériaux utilisés dans le composite-MCP (paraffine, perlite, graphite) avec la balance électronique de précision (Figure IV.4) avec 1/1000 de précision .



Fig. IV.5 : Pesée des différents éléments du composite

Chapitre IV : Matériels et méthodes

➤ La pesée des différents éléments constituant le composite :

-) **MCP** : 60% ($1,5k_g$ de paraffine)
-) **Graphite**: 15% ($0,78k_g$ de graphite)
-) **Perlite** : 25% ($0,625k_g$ de perlite)

➤ Fabrication de composite



La paraffine avant la fusion



la paraffine après la fusion



La perlite ($0,625 k_g$; 25%)



, le graphite tamisé ($0,78 k_g$; 15%)



Graphite +Perlite

- Le récipient contenant le MCP est ensuite placé dans un bain-marie pour le faire fondre entièrement, les différents éléments sont ajoutés au MCP fondu en mélangeant progressivement pour avoir un mélange homogène.



MCP (paraffine) +Perlite +Graphite

Fig. IV.6 : Les différents composants du composite MCP/ Graphite/Perlite

IV.2.3.Préparation de la plaque (300 mm× 300 mm×8 mm) pour la mesure de la conductivité thermique

Un mélange de trois constituants du composite est préparé suivant les pourcentages : 60% paraffine, 25% de perlite, 15% de graphite.

Pour obtenir une plaque de dimension (300 × 300 × 8) mm, nous avons suivi les étapes suivantes:

-) Préparation du moule en verre (partie inférieur, partie supérieure), à la base du moule, nous avons mis une feuille de papier cuisson, pour éviter que le composite soit collée à la plaque de verre après le démoulage.
-) Le mélange est ensuite mis dans un récipient après la pesée.
-) Le mélange est placé dans un bain-marie réglé à 70 °C pour subir une fusion

-) Le contenu du récipient est mélangé jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène (fusion totale de la paraffine).
-) Après la fusion totale du mélange, son contenu est rapidement versé dans le moule en verre qui a été fabriqué à cet effet (**Figure IV.7**) pour éviter la solidification du composite à l'intérieur du récipient.
-) Enfin, la partie supérieure du moule est placée sur la partie supérieure de la presse et une force manuelle est appliquée dessus pour éviter la formation des bulles d'air entre le matériau et les parois du moule, et pour avoir une surface lisse de la plaque.
-) Le tout est laissé à l'air libre pour être refroidi et permettre la cristallisation du composite.
-) Au démoulage, une plaque homogène et lisse en surface de dimensions $(300 \times 300 \times 8)$ m³ est obtenue (**Figure IV.8**).

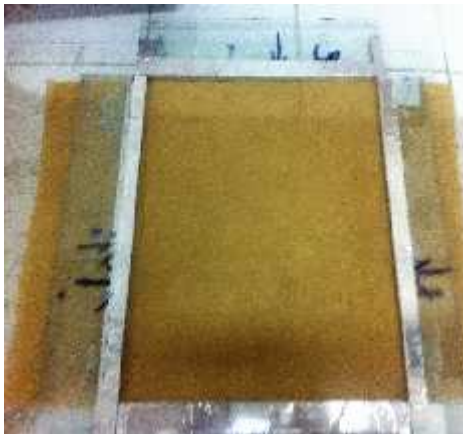


Fig.IV.7.Moule en verre



Fig.IV.8. La plaque (300*300*8)

IV.2.4. Calcul de la conductivité thermique de la plaque

Pour la mesure de la conductivité thermique du matériau composite, on a utilisé un CT mètre.

) Le CT mètre

Le CT mètre est un appareil de contrôle thermique non destructif. Il a été élaboré dans le but d'évaluer avec précision, les paramètres thermiques d'un certain nombre de matériaux, et de contrôler la production des matériaux isotropes et homogènes par prélèvements (**Figure IV.9**).

) Description de l'appareil

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

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

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



Figure IV.9 : CT mètre

) Méthode d'essai

La taille des échantillons qui peuvent être utilisés avec la méthode de mesure de la conductivité pour un débitmètre thermique est de 300×300×8 mm

La résistance thermique se situe entre 0,1 et 1,4 $m^2.K/W$. En général, plus le matériau utilisé est isolant, plus le spécimen devrait être mince, sinon la durée du test sera longue. Des feuilles de caoutchouc en silicone sont utilisées pour des résistances inconnues ou d'une faible résistance thermique pour éliminer l'espace d'air entre le spécimen, la plaque chaude et la plaque froide.

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

)] Méthode de calcul

On dit que les conditions de régime permanent sont obtenues lorsque 5 lectures consécutives à cet intervalle donnent des valeurs de résistance thermique d'une stabilité de 1% lorsqu'elle ne change pas.

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

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

$$\lambda = \frac{I_s [(K_1 + (K_2 * T)) + ((K_3 + (K_4 * T) * H)) + ((K_5 + (K_6 * T)) * H)]}{\Delta} \quad (IV.1)$$

Avec :

λ : conductivité thermique [$W/m.k$]

I_s : Épaisseur du spécimen en [m]

T : différence de température en [$^{\circ}C$] ($T_1 - T_2$)

T : température moyenne en [$^{\circ}C$] ($(T_1 + T_2) / 2$)

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

T_1 : Température de la plaque chaude.

T_2 : Température de la plaque froide.

Les constantes d'étalonnage avec ou sans silicone :

$K_1 = 88.1389$

$K_4 = 0.8037$

$K_2 = -2.7829$

$K_5 = 0.7954$

$K_3 = -21.3064$

$K_6 = -0.0189$

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

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

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

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

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

La mesure de masse volumique se fait par une série de trois pesées successives (Cf Figure IV.10).

- On remplit la fiole de liquide jusqu'au repère. On mesure une masse M_e .
- On ajoute à côté de la fiole une petite quantité du solide pour lequel on veut déterminer la masse volumique. On mesure une masse M_1 .
- On met le solide dans le pycnomètre et on a juste le volume de liquide jusqu'au niveau du repère sur la fiole. On mesure une masse M_2 .

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

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

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

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



Fig.IV.10: Pesée de la masse de la fiole avec et sans le matériau

IV.3. Fabrication du distillateur

Le matériel nécessaire utilisé pour la réalisation du distillateur est le suivant :

- 1) Un boîtier stockeur (en bois)
- 2) Une marmite (enceinte d'évaporation)
- 3) Une isolation thermique (polystyrène expansé +feuille d'aluminium)
- 4) Un réservoir (bac de condensation)
- 5) Un condenseur (serpentin en inox)
- 6) Un absorbeur
- 7) Une tuyauterie
- 8) Des réflecteurs extérieurs.
- 9) Une couverture verrière.

Le distillateur élaboré est constitué des éléments suivants :

- Le boîtier stockeur qui contient la marmite(ou se passe la condensation) et le matériau à changement de phase avec l'isolation.
- Des réflecteurs qui sont placés sur le boîtier
- Et le réservoir d'eau qui contient le serpentin (ou se passe la condensation) et la récupération de l'eau douce à la sortie du serpentin.

1) Le boîtier stockeur

On a utilisé la ruche d'abeille comme boîtier qui est ensuite isolé avec du polystyrène expansé et enrobé avec du l'aluminium pour réfléchir le maximum de rayonnement solaire vers la marmite.

Les dimensions de boîtier sont :



Fig.IV.11 : Le boîtier avant isolation

Longueur : côté extérieur 0.5 m

côté intérieur 0.46 m

Largeur : côté extérieur 0.41 m

côté intérieur 0.37 m

Hauteur : 0.23 m

Epaisseur : 0.05



Fig.IV.12 : Le boîtier au cours d'isolation

2) La marmite

Elle absorbe le maximum de rayonnement solaire soit directement ou bien indirectement avec un fond noir et un couvercle en verre qui assure l'effet de serre qu'on veut réaliser.

Ces dimensions sont :

$$\begin{array}{l}) \quad D_m \quad = 0.26 \text{ m} \\) \quad h_m \quad = 0.06 \text{ m} \end{array}$$



Fig.IV.13 : La marmite entourée de l'MCP et isolation

3) L'isolation thermique

L'isolation thermique du distillateur est en polystyrène expansé. L'épaisseur varie de 3 à 6cm. Il faut que les produits utilisés résistent aux températures de fonctionnement.

Le polystyrène expansé utilisé a les dimensions suivantes :

-) Longueur : 2 m
-) Largeur : 1 m
-) Epaisseur : 0.04 m
-) Conductivité thermique : 0,04w/m .k

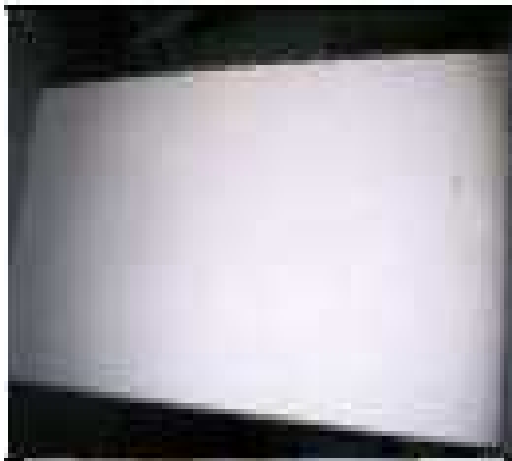


Fig.IV.14 : Le polystyrène expansé

4) Le réservoir

C'est un bac de condensation qui a le rôle de refroidir la vapeur qui passe de la marmite en traversant le condenseur pour récupérer l'eau douce.

Pour avoir de l'eau à l'intérieur de ce bac à travers une conduite extérieure et pour cela on a mis un système de flotteur pour ne pas avoir des pertes d'eau dans le cas où le bac est plein et qu'il soit isolé en polystyrène.

C'est une marmite en inox et ces dimensions sont :

$$\begin{array}{l}) \quad D_{rés} = 0.25 \text{ m} \\) \quad H_{rés} = 0.21 \text{ m} \end{array}$$



FigIV.15 : Le réservoir isolé avec le condenseur

5) Le condenseur

C'est un tube en forme de serpent en inox, il est plongé dans le réservoir pour refroidir la vapeur qui traverse ce serpent avec l'eau du réservoir qui a les caractéristiques suivantes :

$$\begin{array}{l}) \quad \varnothing_{i} = 5 \text{ mm} \\) \quad \varnothing_{e} = 6 \text{ mm} \\) \quad e_{Ti} = 1 \text{ mm} \\) \quad \text{Langueur de tube } L = 4.5 \text{ m} \\) \quad \text{Conductivité thermique } 16.3 \text{ (W/m) à } 296 \text{ K} \\) \quad \text{Conductivité électrique à } 293 \text{ K } 1.429 \cdot 10^8 \text{ (}\Omega^{-1}\text{m}^{-1}\text{)} \end{array}$$



Fig .IV.16 : Le condenseur

6) L'absorbeur

Le rôle de l'absorbeur est d'absorber le maximum de rayonnement solaire global et transmettre la chaleur produite par cette absorption vers le matériau à changement de phase qui se trouve autour de la marmite et sous la surface de l'absorbeur, c'est pour cette raison qu'il est peint en noir. Il est essentiellement en aluminium. Il est placé sur des plaques de MCP pour emmagasiner la chaleur reçue par l'absorbeur.

Les dimensions de la surface de l'absorbeur sont :

-) Longueur : 0.46 m
-) Largeur : 0.37 m
-) Epaisseur : 1 mm
-) Superficie de la base : $0.170m^2$.



Fig.IV.17 : L'absorbeur teinté en noir et son emplacement

7) La tuyauterie

La tuyauterie utilisée entre la marmite et le réservoir est un tuyau en plastique et le serpentin de condensation en inox.



Fig.IV.18 : les tuyauteries utilisées

8) Réflecteur extérieur

Les réflecteurs ont le rôle de refléter le rayonnement solaire vers la marmite d'évaporation.

Les dimensions de la surface des réflecteurs sont :

-) Longueur : 0.5 m
-) Largeur : 0.41 m

9) Couverture verrière (verre)

Le double vitrage est en verre ordinaires qui a un bon coefficient de transmission lumineux. Elle est assemblée sur un cadre en bois, afin de minimiser les pertes de chaleur à travers la couverture.

Les dimensions de la couverture sont :

-) Longueur : 0.49 m
-) Largeur : 0.375 m
-) L'épaisseur : 0.004 m
-) Superficie : 0.184 m^2

IV.4. Le montage de boîtier

Le vase est équipé du système des vases communicants pour assurer le remplissage de la marmite dès que le niveau de l'eau baisse, le remplissage se fait par le couvercle à l'aide d'une conduite. et la vidange se fait au centre de la marmite qui sera isoler pour que la vapeur ne se condense pas dans la conduite. L'évacuation du distillat vers l'extérieur est réalisée par une tuyauterie.

Après avoir assemblé toutes les éléments on aura la figure suivante :



Fig.IV.19 : Le montage du boîtier

IV.5. Le montage du réservoir

Le réservoir est relié avec la marmite par des tuyaux en plastique, et la conduite de la vapeur est reliée à un tube en inox qui a le rôle de la condensation de la vapeur produite dans la marmite.

IV.6. La surface d'échange de condenseur avec l'eau de réservoir

Le tuyau traversé par la vapeur soit calorifugé pour que la vapeur se condense dans le tube de condensation et avoir échange de chaleur avec l'eau de réservoir afin qu'il soit préchauffé quand il arrive dans la marmite (donc on a économie d'énergie pour chauffer l'eau).

La surface d'un tube (cylindre creux) s'écrit :

$$S = 2\pi$$

Alors :

$$S = 2 \times 3,14 \times 3 \times 10^{-3} \times 4,5 \\ = 84,78 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

IV.7. Les quantités des matériaux utilisées

La quantité totale utilisée de matériaux pour l'élaboration des composites du MCP est estimée à **2,905 Kg.**

$$Par = 0,6 \times 2,5 \text{ kg} = 1,5 \text{ k}$$

$$Per = 0,25 \times 3,12 \text{ kg} = 0,78 \text{ k}$$

$$G = 0,15 \times 4,16 \text{ kg} = 0,625 \text{ kg}$$

IV.8. Le test sur le distillateur avec les lampes

Pour une comparaison entre l'intensité du rayonnement solaire et la puissance des lampes infrarouge et celle de 200w qui ont les caractéristiques suivantes :

a) Lampe infrarouge

La lampe infrarouge produit une lumière imperceptible par l'œil humain, car sa fréquence est inférieure et sa longueur d'onde supérieure à celle des autres couleurs qui elles sont visibles. Le principe de fonctionnement repose sur l'augmentation temporaire de la température de la zone vers laquelle est orientée la lampe. Ces caractéristiques sont les suivantes :

-) La puissance : 120 w
-) $\phi_{la} - r = 0,08 \text{ m}$



Fig.IV.20. lampe infrarouge et son emplacement dans le support

b) Lampe de 200W

La lampe 200w rayonne comme les lampes simples (blanche), ça longueur d'onde émise est proportionnelle à sa température, d'où ; Une température de 3200 à 4000K correspond à des lumières neutres, c'est à dire des longueurs d'onde jaune-vert-blanchâtre, dans notre cas on a utilisé une lampe qui rayonne en blanc.



Fig.IV.21. La lampe de 200w et son emplacement

IV.9.Le corps sous forme de pyramide

Il est utilisé comme un support pour la lampe et soit isolé et enrobé par l'aluminium pour concentrer le rayonnement et avoir le maximum de réflexion vers la marmite, ces caractéristiques sont les suivants :

-) $L_b - e = 0.31 \text{ m}$
-) $L_b - b = 0.25 \text{ m}$
-) $H_e = 0.3 \text{ m}$
-) $H_b = 0.25 \text{ m}$



Fig.IV.22.Le support des lampes infrarouge et 200w



Fig.IV.23.Une vue finale du test avec les lampes

IV.10. Mesure de la température des différents éléments de distillateur

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

IV.10.1. Les Thermocouples

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



Fig. IV.24 : Thermocouple de type K

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

IV.11. 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.



Fig.IV.25: Pico Technology Enregistreur de données, Température

) Caractéristiques et avantages

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

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

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

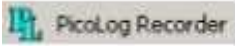
Dimensions		85 x 145 x 25 mm		
Caractéristiques techniques principales				
Type de thermocouple	Plage globale en $^{\circ}\text{C}$		0,1 $^{\circ}\text{C}$ Résolution	Résolution de 0,025 $^{\circ}\text{C}$
B	-20 → 820	1	-20 → +1 820	600 → 1 820
E	-270 → +910		-270 → +910	-260 → +910
J	-210 → 200	1	-210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

VI.12. Logiciel PicoLog

On citera quelques étapes

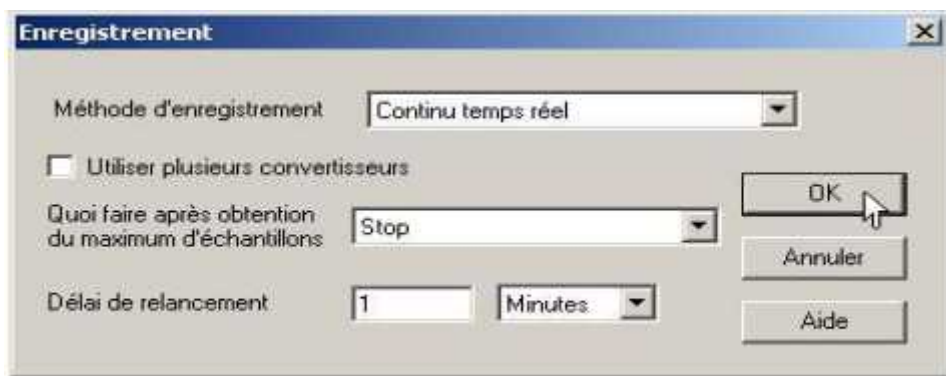
a) Lancement de PicoLog

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

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



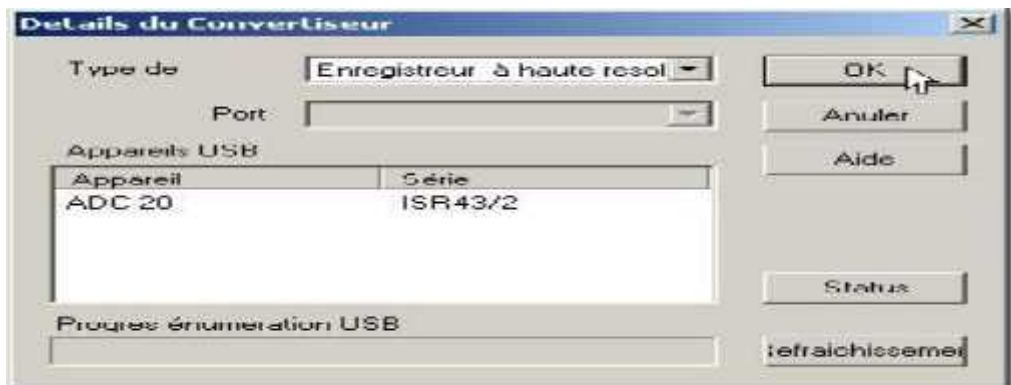
-) Dans la boîte de dialogue **Enregistrement**, cliquer sur **OK** :



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



-) Dans la boîte de dialogue **Détails du Convertisseur**, choisir **Enregistreur à Haute Résolution** dans **Type de Convertisseur**. Le type de matériel et son numéro de série apparaissent dans la liste des **Matériels USB**. L'indicateur de **Progression d'énumération USB** se déplace vers les 100%. Si l'indicateur de progression ne bouge pas, débrancher puis rebrancher l'unité et cliquer sur **Actualiser**.



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



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

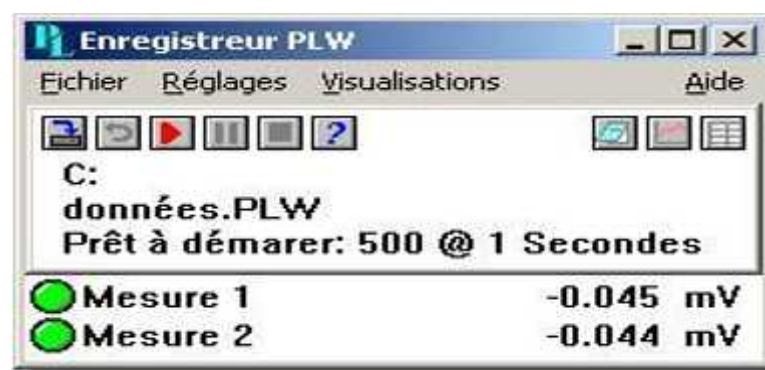
-) L'écran **Enregistreur PLW** affiche maintenant la tension sur la voie 1 (proche de 0 mV si aucun appareil n'est connecté) :



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




b) Affichage enregistreur


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




Cet affichage dispose d'un menu donnant accès aux fonctions de gestion de fichiers, aux réglages d'enregistrement et à d'autres affichages. Au-dessous figure une fenêtre contenant des informations sur l'état courant d'enregistrement, ainsi que des boutons permettant de contrôler l'enregistrement.


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


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


 Arrêt momentané.

 Arrêter l'enregistrement

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

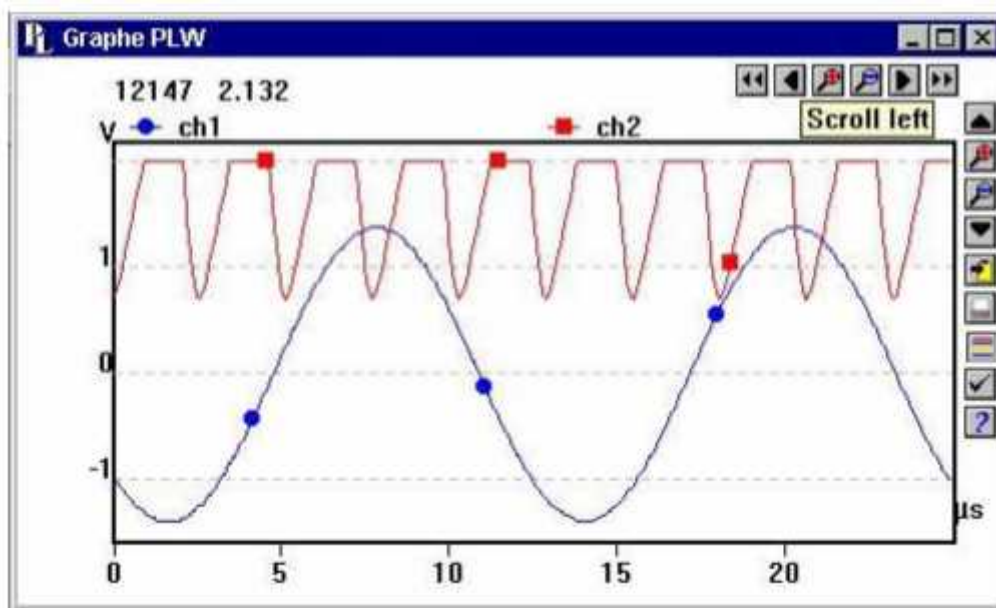
 Activer un affichage de notes.

 Activer un affichage graphe.


 Activer un affichage tableau.


c) Affichage graphe





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



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





 Déplace l'affichage d'un intervalle entier (plus tôt).

 Déplace l'affichage d'un quart d'intervalle (plus tôt).






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

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

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

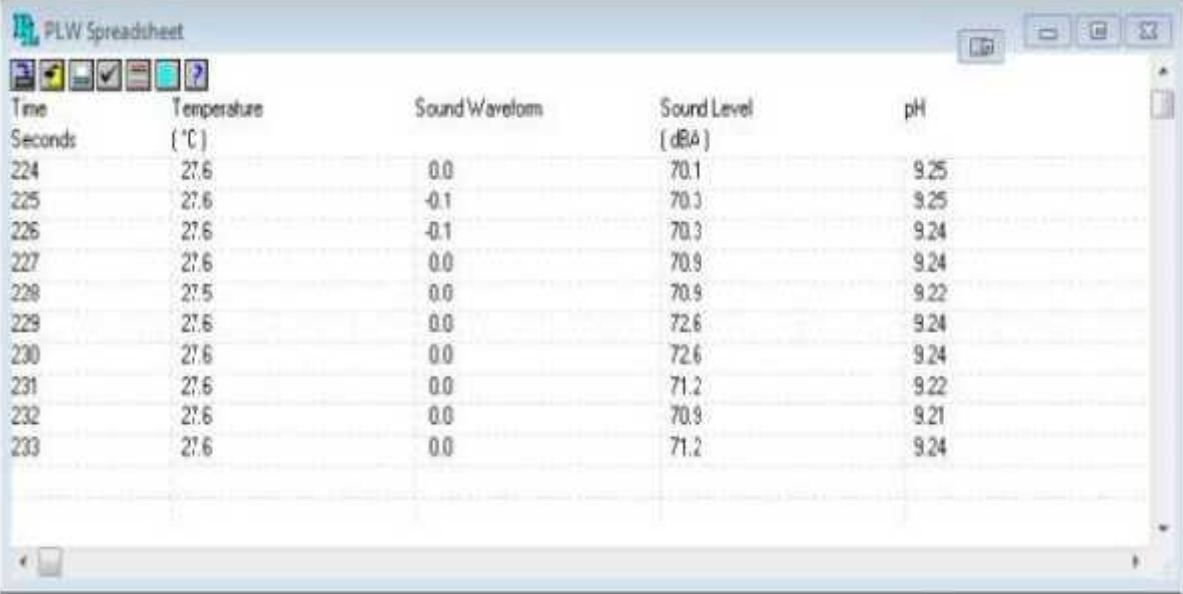
-  Déplacer d'un intervalle entier vers le haut.
-  Multiplie le centre de l'intervalle par deux (agrandissement)
-  Divise l'affichage courant par deux (réduction).
-  Déplacer d'un intervalle entier vers le bas.

Les autres touches verticales sont:

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

d) Affichage tableau


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



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


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


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

 Ouvrir un dialogue pour sélectionner les paramètres à afficher.

Préciser l'affichage, soit des lectures individuelles, soit un résumé des lectures dans la gamme (la première lecture, la moyenne, le minimum et le maximum).

La barre de défilement sur la droite permet de sélectionner la gamme de temps. Après avoir sélectionné une gamme de lectures, on peut utiliser les touches suivantes:

 Sauvegarder les lectures en format texte dans un fichier

 Copier les lectures sur le presse-papier

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

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

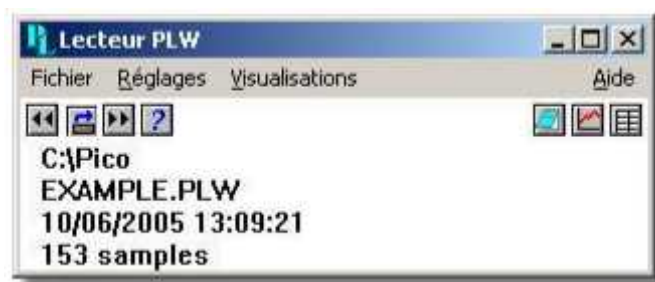
Si l'on souhaite sélectionner un grand nombre de lectures :

- Positionner le pointeur sur la première lecture.

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


e) Affichage lecteur


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




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


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


 Chargement d'un nouveau fichier dans le lecteur.


 Retour au fichier précédent.

 Avance au fichier suivant.

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

 Activer un affichage de notes.

 Activer un affichage graphe.

 Activer un affichage tableur.

VI.13. Etalonnage d'un instrument de mesure

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

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

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

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

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

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

Conclusion

Dans ce chapitre on a cité les critères du choix pour les matériaux utilisés, même on a exposé les différents éléments et leurs dimensions avec les outils qu'on a utilisés dans le montage réalisé.

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

V.1. Résultats de mesure de la conductivité thermique

Les résultats donnés par le CT mètre pour une plaque de (300m × 300m × 8m) sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.1 : Résultats du CT mètres

l_s	0.009225
e_1	83.11
e_2	86.76
HFM	44.8
T_1	33.5
T_2	20.9
d	12.6
T_m	27.2

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.

l_s : Epaisseur de la plaque.

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$dT = T_1 - T_2$$

La valeur de la conductivité thermique mesurée par le CT mètre est : **$\lambda = 0.44 \text{ W/m.K}$**

Discussion :

Comme la conductivité thermique de la paraffine est située entre (0.18 W/ m K et 0.25 W/ m K) et d'après les résultats obtenus de la plaque (300m × 300m × 8m), la conductivité thermique est de $\lambda = 0.44 \text{ W/ m K}$.

Après comparaison, on constate que la conductivité thermique est améliorée.

Chapitre V : Résultats et discussions

D'après le calcul de la conductivité thermique on constate que le graphite améliore la conductivité thermique des matériaux même avec une matrice qui a une très faible conductivité thermique ($0.05w/m.k$).

V.2. Résultats des tests effectués sur le distillateur solaire

Et le but de l'évaluation des performances du distillateur, une série de tests expérimentaux ont été effectués sous l'ensoleillement naturel .

Et durant les différents essais, on mesure les paramètres suivants:

- La température de l'eau à l'intérieur de la marmite T1.
- La température de la vapeur dans la marmite T2.
- La température au niveau de l'absorbeur T3.
- La température sous la vitre T4.
- La température au niveau du réservoir T5.
- La température ambiante T6.

Note :

Les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples de type K.

Le thermocouple mesure les températures des différents endroits avec un pas d'une seconde pendant une période de 10800 secondes (3h).

Le premier test est effectué le 08 novembre 2018 à 13h et le tableau ci-dessous représente les résultats du test effectués sur le distillateur en plein soleil, pour une période de trois heures (13h à 16h).

Tableau V.2 : Températures à différents endroits du distillateur

Temps Secondes	T1 (eau de la marmite)	T2 (vapeur de la marmite)	T3 (absorbeur)	T4 (sous la vitre)	T5 (le réservoir)	T6 (ambiante)
0	35,98	54,20	73,44	29,52	18,78	20,13
161	37,34	54,94	75,30	29,76	18,92	19,56
250	36,99	54,66	74,93	27,17	18,80	20,76
492	37,00	53,97	73,97	24,92	18,13	20,28
500	38,50	54,07	74,29	25,15	18,23	20,48
1470	39,27	55,07	72,56	24,38	17,45	19,51
1965	51,66	54,66	62,13	24,45	18,43	21,70
2219	52,00	53,70	59,13	23,66	18,55	21,93
2564	53,87	61,92	61,79	27,40	21,42	27,82
3362	54,00	57,59	65,77	22,82	18,76	22,90
3948	55,00	58,97	68,61	23,29	18,74	22,81
4390	56,00	59,45	68,11	23,38	18,82	23,81
4923	57,00	59,65	67,72	23,14	18,95	23,66
6410	58,00	60,59	62,08	23,56	19,07	24,27
7535	59,00	61,12	60,54	23,50	19,17	24,42

8842	60,00	62,44	61,47	23,46	19,24	24,35
9393	60,17	62,98	60,65	23,23	19,33	24,56
9957	60,00	62,85	59,47	23,06	19,38	22,64
10799	59,67	62,22	57,84	23,65	19,58	24,80

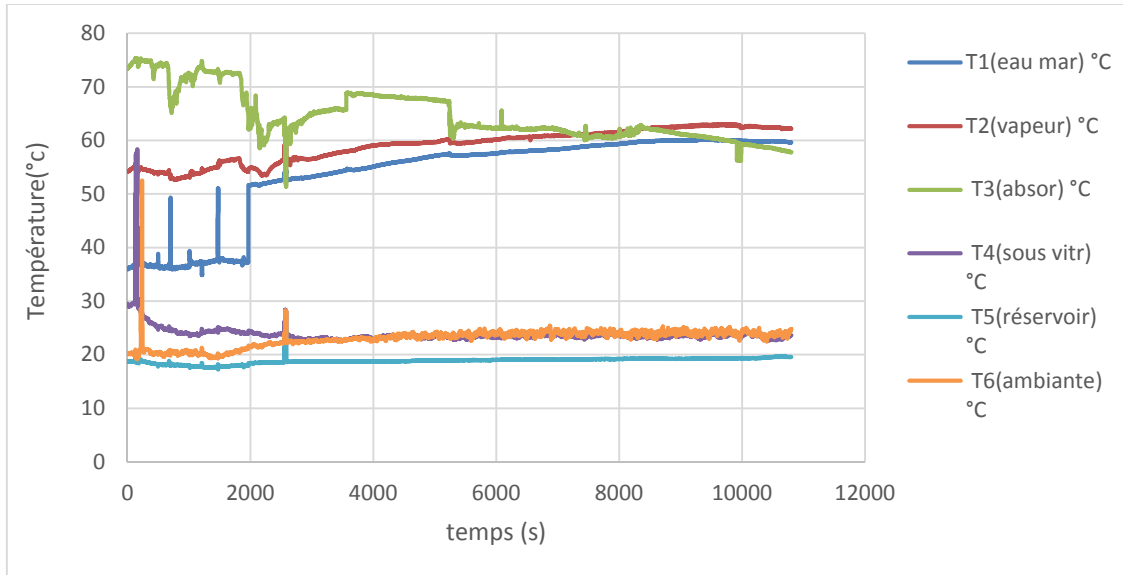


Fig.V.1. Evolution des températures en fonction du temps à différents endroits du distillateur

V.2.1. Discussion des résultats obtenus au test par rayonnement solaire

Dans cet essai on a mesuré des températures qui augmentent proportionnelles avec le temps, après un moment on a une diminution des températures mesurées sur l'absorbeur, ce qui s'explique par l'ombre des parois du boîtier et l'éloignement du rayonnement solaire incident sur la surface d'absorption et l'intensité du rayonnement est faible et la course du soleil est courte comme c'est l'automne.



Fig.V.2. Formation des bulles (l'eau se chauffe)

Comme on voit sur cette photo y'a formation des bulles ce qui signifie que l'eau se chauffe donc la température de l'eau augmente.

Et comme on n'a pas eu les résultats désirés on a effectué d'autres tests avec des lampes pour améliorer l'intensité du rayonnement qui est faible dans cette période des tests (une lampe infrarouge 120w, et une lampe de 200w).

V.3.Résultats des essais effectués avec des lampes

La figure suivante représente le test avec les lampes



Fig.V.3.vue de test par les lampes

V.3.1.Avec lampe infrarouge 120w : test le 26 /11/2018 pour (3h)

Dans le but d'arriver à produire de l'eau distiller, on a monté un corps de forme pyramide comme support pour la lampe et on a procédé à l'enregistrement des températures aux différents points du distillateur. Et les résultats sont présentés sur le tableau suivant :

Avec :

T1 : température de l'eau de la marmite

T2 : température de la vapeur

T3 : température de l'absorbeur

T4 : température dans le corps pyramide

T5 : température de réservoir

T6 : température ambiante

Tableau V.3 : les différentes températures mesurées avec une lampe infrarouge

Temps secondes	T1 (eau marmite)	T2 (la vapeur)	T3 (absorbeur)	T4 (dans corps pyramide)	T5 (le réservoir)	T6 (ambiante)
0	18,71	30,78	21,28	18,04	16,55	17,51
52	19,00	32,95	21,73	18,03	16,55	17,55
230	20,00	39,01	23,06	18,02	16,51	17,59
415	21,00	43,36	24,29	18,01	16,49	17,61
615	22,04	46,46	25,47	18,00	16,47	17,82
815	23,05	48,51	26,58	18,01	16,44	17,66
1017	24,10	50,06	27,60	18,02	16,43	17,65
1250	25,26	52,38	28,63	18,05	16,41	17,63

Chapitre V : Résultats et discussions

1500	26,58	54,94	29,68	18,08	16,42	17,64
2000	29,00	59,34	31,41	49,98	16,40	17,64
2250	30,18	60,87	32,20	51,08	16,40	17,68
2650	31,99	62,68	33,38	52,81	16,38	17,89
2900	33,02	63,67	34,08	53,84	16,40	17,74
3400	34,96	65,48	35,39	55,59	16,39	17,75
3650	35,83	66,18	35,98	56,15	16,39	17,93
4000	36,97	67,12	36,78	56,87	16,37	17,46
4320	37,94	67,96	37,52	57,44	16,40	17,59
4700	38,98	68,84	38,41	58,37	16,40	17,44
5075	39,98	69,64	39,28	58,98	16,42	17,49
5460	40,97	70,20	39,98	57,29	16,41	17,86
5850	41,97	71,05	40,82	60,05	16,42	17,92
6230	42,94	71,92	41,60	61,07	16,44	17,72
6640	43,98	72,71	42,39	61,74	16,42	17,86
7020	44,97	73,50	43,17	62,35	16,42	17,53
7420	45,98	74,20	43,89	63,08	16,43	17,62
7800	46,97	74,90	44,62	63,79	16,46	17,69
8160	47,88	75,50	45,25	64,09	16,45	17,52
8595	48,98	76,35	46,01	64,43	16,44	17,77
8990	49,99	76,88	46,70	64,93	16,47	17,49
9400	50,97	77,71	47,33	65,42	16,48	17,49
9840	51,98	78,44	47,98	66,34	16,50	17,37
10330	52,98	79,42	48,62	66,83	16,48	17,89
10797	53,85	80,08	49,25	67,64	16,48	17,49
10799	53,86	80,09	49,26	67,50	16,48	17,59

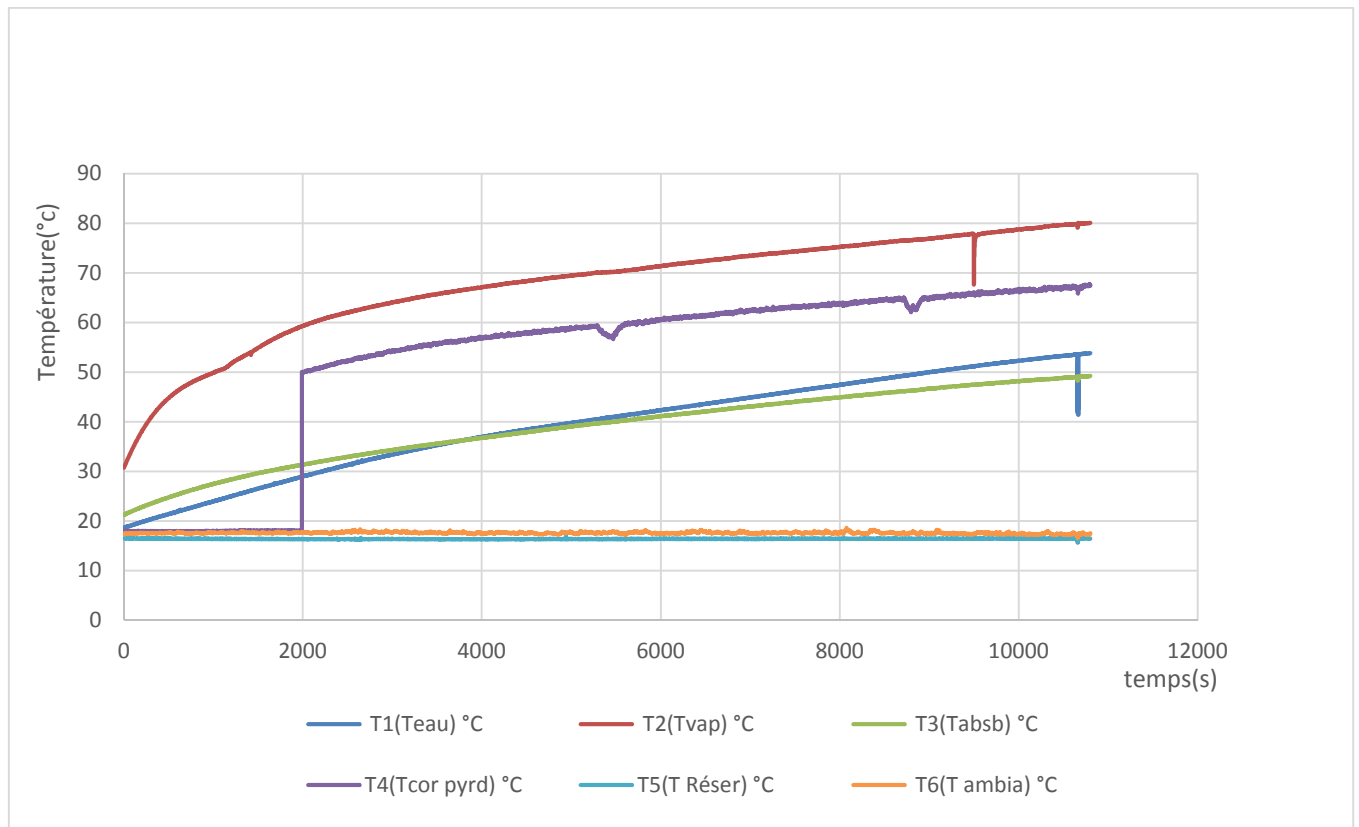


Fig.V.4.Evolution des températures en fonction du temps pour lampe infrarouge.

V.3.1.Discussion des résultats obtenus du test effectué par la lampe infrarouge 120w

Dans ce test on a mesuré des températures qui augmentent progressivement et vite sur tous les éléments rayonnés sauf l'eau de la marmite ce qui explique que le couvercle de la marmite est impacté aux rayons infrarouge donc il ne laisse pas le rayonnement infrarouge passer facilement vers l'eau, et malgré que la température de l'eau n'est pas arrivée à la température d'ébullition mais y'a l'évaporation de l'eau qui se condense sur les surfaces latérales de la marmite car la température de couvercle est élevée par rapport à celle des parois de la marmite et les photos suivantes montrent ça. Et le matériau à changement de phase est en cours de charger en chaleur sensible (la température augmente) donc on est pas arrivé à la température de fusion du composite le palier de la chaleur latente (ou de changement de phase).

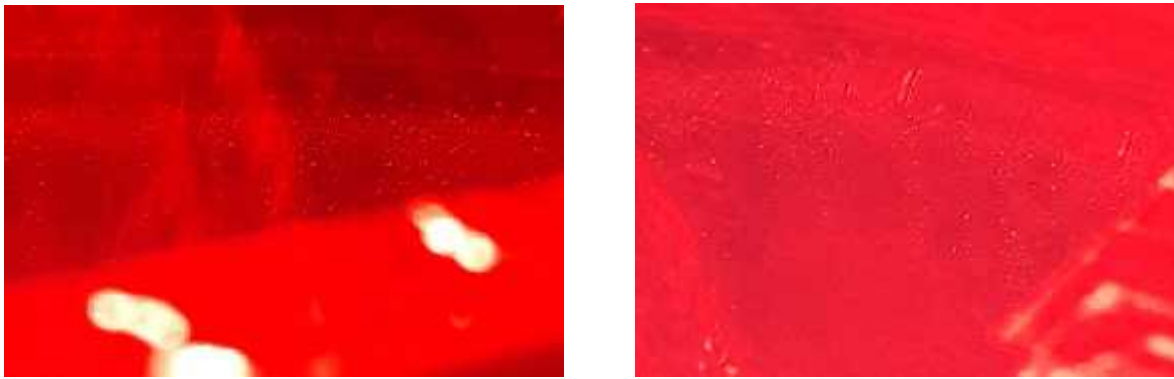


Fig.V.5.La condensation sur les parois de la marmite

V.3.2.Avec une lampe de 200w : test le 28 /11/2018 pour (3h)

Dans ce test on a les mêmes conditions que le test précédent juste on a changé l'emplacement du thermocouple T4 pour le mettre sur le couvercle de la marmite qui est en verre pour savoir pourquoi y'a pas de condensation sur le couvercle en verre. Les résultats du test effectué sont présentés sur le tableau qui suit :

Avec :

T1 : Température de l'eau de la marmite.

T2 : Température de la vapeur.

T3 : Température de l'absorbeur.

T4 : Température de la vitre du couvercle en verre.

T5 : Température du réservoir.

T6 : Température ambiante.

Tableau.V.4. les différentes températures mesurées avec une lampe 200w

temps Secondes	T1 (eau de la marmite)	T2 (la vapeur)	T3 (absorbeur)	T4 (couvercle en verre)	T5 (réservoir)	T6 (ambiante)
0	18,41	22,47	19,76	20,80	16,38	17,09
265	19,98	34,40	22,24	23,75	16,39	17,24
445	20,98	39,77	23,53	25,39	16,37	17,33
630	21,97	43,36	24,70	27,09	16,34	17,43
830	22,98	45,52	25,72	28,61	16,31	17,64
1035	23,99	46,89	26,72	30,31	16,29	17,65
1230	24,98	47,92	27,73	31,93	16,28	17,77
1430	25,99	48,79	28,64	33,47	16,27	18,20
1640	27,01	49,29	29,48	34,91	16,24	17,97
2050	29,00	50,62	31,00	37,82	16,25	18,68

Chapitre V : Résultats et discussions

2500	31,02	60,56	32,32	40,37	16,25	19,01
2980	32,99	62,81	33,64	42,83	16,26	19,32
3250	33,98	63,56	34,31	44,01	16,26	19,53
3525	34,99	64,67	35,09	45,42	16,26	20,10
3820	35,99	65,66	35,77	46,60	16,27	20,45
4120	36,99	66,79	36,55	47,79	16,28	20,76
4470	37,98	67,46	37,27	48,80	16,27	20,94
4848	38,99	68,16	38,17	49,94	16,27	21,35
5197	39,98	69,35	39,08	50,89	16,29	21,36
5550	40,98	70,52	39,98	51,68	16,30	21,37
5925	41,98	71,58	40,84	52,73	16,29	21,59
6308	42,99	72,44	41,69	53,81	16,30	22,07
6686	43,99	73,17	42,47	54,11	16,30	21,99
7061	44,99	73,92	43,29	54,90	16,33	22,15
7443	45,99	74,67	44,04	55,51	16,34	22,42
7818	46,99	75,41	44,78	56,58	16,33	22,79
8195	47,98	76,05	45,50	57,14	16,33	22,89
8570	48,99	76,57	46,18	57,31	16,33	22,52
8955	49,98	77,22	46,90	57,87	16,34	22,89
9365	50,99	78,02	47,57	58,19	16,35	23,52
9786	51,99	78,86	48,23	58,76	16,37	23,25
10265	52,99	79,63	48,84	59,59	16,36	23,69
10799	54,00	80,45	49,51	61,31	16,38	23,99

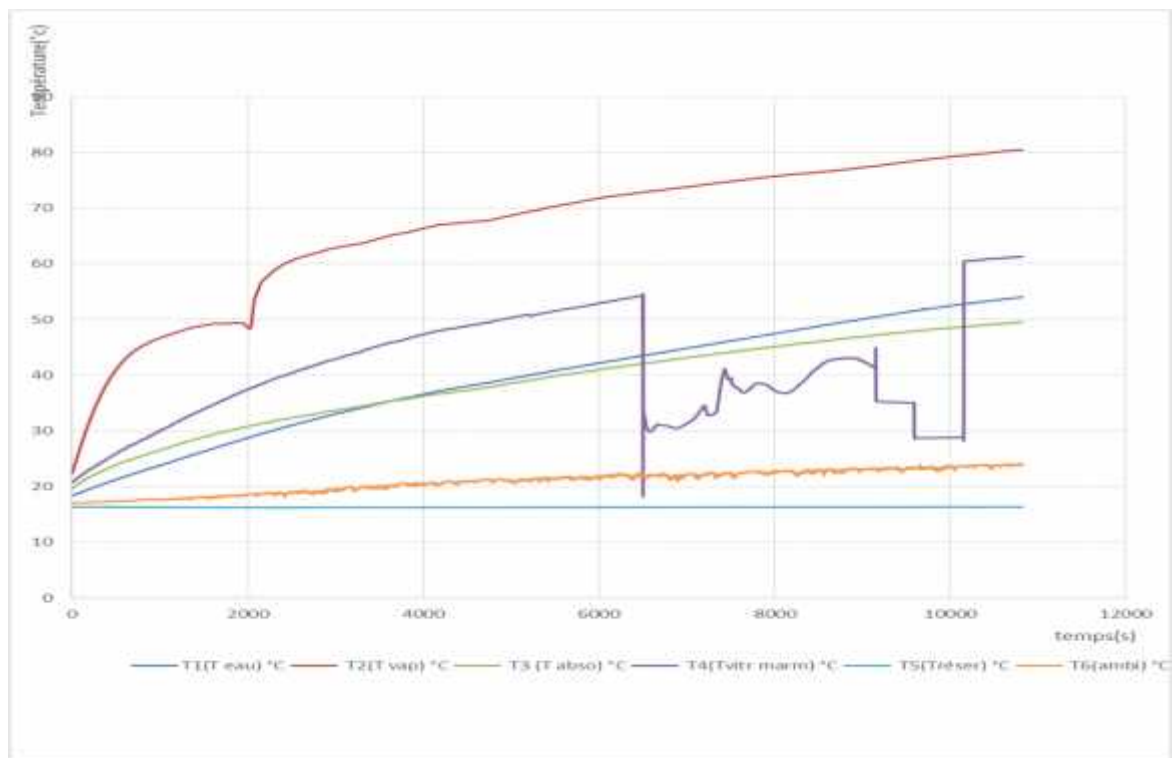


Fig.V.6.Evolution des températures en fonction du temps pour lampe 200w

V.3.2. Discussion des résultats obtenus du test effectué par la lampe 200w

Dans cet essai on a remarqué que les températures augmentent progressivement et vite sur tous les éléments rayonnés et la température de l'absorbeur et celle de l'eau dans la marmite sont presque confondues. Cela s'explique par le fait que l'eau du récepteur absorbe la totalité de la chaleur disponible au niveau de l'absorbeur, et comme le test précédent on a toujours la température du couvercle est élevée donc y'aura pas de condensation sauf sur les parois latérales qui sont plus froides que à la température de la vitre .Et les photos suivantes le montrent.



Fig.v.7.La condensation sur les parois latérales de la marmite par le test lampe 200w

Conclusion

D'après les essais effectués sur le prototype, on a remarqué qu'au cours de l'insolation, la température des différents éléments du distillateur suit l'évolution du rayonnement solaire ; d'où les maximas se trouvent là où le rayonnement solaire est maximal, et comme l'intensité du rayonnement est faible alors on n'a pas eu les températures voulus.

Et pour compenser la faible intensité du rayonnement on a procédé aux essais par les lampes infrarouge 120w et lampe simple de 200w, on remarque que les deux tests n'ont pas arrivé à la température de fusion du matériau à changement de phase, donc il est en charge par chaleur sensible et y'a pas de palier de changement de phase (chaleur latente).

Même le couvercle n'est pas perméable aux rayons infrarouges et il a une absorption de chaleur élevée car c'est un couvercle d'une marmite et il doit résister aux hautes températures.

Conclusion générale

Dans cette étude, le composite paraffine/perlite/graphite est préparé comme un matériau de stockage d'énergie thermique à forme stabilisée pour des applications de stockage d'énergie, et en particulier dans un distillateur solaire. Ce composite a été préparé par la méthode dite de mélange de poudre de perlite et de graphite avec le MCP (paraffine).

Ce composite est placé autour de la marmite et sous l'absorbeur pour absorber l'énergie thermique provenant du rayonnement solaire incident ou des lampes (infrarouge 120w et lampe à 200w).

Et ce travail a visé principalement le distillateur solaire conventionnel, ce dernier est basé sur le principe de l'effet de serre. Le distillateur se compose de deux éléments principaux (évaporateur et condenseur), une couche noire absorbante et d'un couvert transparent en verre ordinaire. Ce dernier est composé de : la conception et la réalisation d'un prototype à faible coût destiné surtout pour les communautés rurales et pauvres. Par ailleurs, une série de mesures expérimentales à lieu durant le mois de novembre qui a une faible intensité du rayonnement solaire alors on a procédé aux tests par les lampes (infrarouge 120w et lampe à 200w).

Les variations des températures nos suggèrent à dire que la production d'eau distillée dépend évidemment de l'énergie solaire incidente et aussi de la surface absorbante et principalement de la surface d'échange entre l'absorbeur et la marmite. Le constat qui a été fait est que les conditions pour réussir l'opération de distillation n'étant pas réunies avec la faible intensité de rayonnement solaire. Le remplacement du rayonnement solaire par celui d'une lampe infrarouge doit se faire sur un verre sélectif qui laisse passer le rayonnement de la lampe, ce qui n'a été pas le cas avec le verre thermique utilisé. On a, par exemple constaté que le verre servant de couvercle du distillateur monte très haut en température (95 °C) alors que l'eau de distillation ne pouvait atteindre que 60 °C. On peut cependant retenir les recommandations suivantes :
.avec tous ces imperfections et résultats obtenus par les tests expérimental on propose :

D'effectuer les tests dans les périodes de chaleur sous un rayonnement solaire intense.

Une pompe à vide est nécessaire pour aspirer la vapeur produite dans le test par rayonnement solaire. Ceci permet de baisser la température de changement de phase de l'eau et un gain en énergie de chauffage.

Choisir un verre qui est perméable à la totalité des radiations et qui n'absorbe pas de la chaleur (sa température ne doit pas augmenter).

Et pour les résultats obtenus, on invite les promotions qui vont suivent à prendre en compte ces inconvénients pour améliorer les performances du prototype réalisé.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **Taib Ajzoul** , Cours de l'énergie solaire photovoltaïque : professeur au département de physique (FS de Tétouan) .
- [2] **R, Bernard, G Merguy, M.Schwartz**, Le rayonnement solaire : conversion Thermique et application .Technique et documentation, deuxième édition - 1980.
- [3] **Tabet Ismail** , Etude d'un distillateur solaire à cascade : Mémoire de magister en physique ,Université Mentouri Constantine (2010).
- [4] **Rym Rahmani**. Rendement d'un distillateur solaire à plusieurs étages effet de certain paramètre thermo physique sur le rendement, mémoire de Magister université Mentouri, Constantine (2007).
- [5] **ZERGUINE Bilal**, modélisation d'un système de production électrique par la cellule photovoltaïque, université BADJI Mokhtar Annaba, 2010.
- [6] **J. M. Chassériaux**, Conversion thermique du rayonnement solaire, Bordas Paris.1984.
- [7] : **Bouden Abdelmalek**, mémoire de Magistère, Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [8] **Ait saada sonia**, mémoire de Master, refroidissement d'un panneau photovoltaïque avec stockage de chaleur, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2016.
- [9] **A. Maurel**, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres : Et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce, Tec & Doc Lavoisier, 2006.
- [10] **A.A.S. Malik, G.N. Tiwari, A. Kumar and M.S. Sodha**, Solar Distillation, Pergamon Press, Oxford, England, 1982.
- [11] **A.A. Sfeir and G. Guarracina**, Ingénierie des Systèmes Solaires, Applications à l'Habitat, Technique et Documentation, Paris, 1981.

Références bibliographiques

- [12] **M. Telks.** Solar Distiller for Life Rafts, Office of Science, USA, 1945.
- [13] **E.D. Howe and B.W. Theimat,** Twenty Years of Work on Solar Distillation at the University of California, Solar. Energy, 16 (1974) 97–195.
- [14] **L.G. Savornin,** Etude sur l'Evaporation et la Condensation de l'Eau dans les Distillateurs Solaires, Application Thermique de l'Energie Solaire dans le Domaine de la Recherche et de l'Industrie, Colloques Internationaux, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), 1961, 589–600. Bibliographie et webgraphie 110.
- [15] **E. Delyannis,** The patros solar distillation plant, Sol. Energy, 12 (1968) 113–115.
- [16] **P.I. Cooper,** Digital simulation of transient solar stills process, Sol. Energy, 12 (3) 313, (1969).
- [17] **L. Cherrared,** Amélioration du Rendement d'un Distillateur Solaire à Effet de Serre, Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Revue. Energie. Renouvelable, Valorisation pp 121-124,1999
- [18] **Boukerzaza nassima** étude des pertes thermique sur les caractéristiques de Fonctionnement d'un distillateur solaire .thèse magister université mentouri de Constantine (2005) .
- [19] **Fedali saida** modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales, thèse magister université Batna 2008.
- [20] **Rajesh Tripathi, G.N. Tiwari** "Effect of Water Depth on Internal Heat and Mass Transfer for Active Solar Distillation", Desalination, 173,187-200, 2005.
- [21] **R. Tchinda et E. Kaptoum,** Simulation numérique des performances d'un distillateur solaire fonctionnant en mode indirect. African journal of science and technology (AJST) science and engineering series vol.5, no1, pp.79-91, 2004.

Références bibliographiques

- [22] **Halima Zaidi**. Etude et optimisation des paramètres thermo physique en vue l'amélioration de la performance d'un distillateur solaire. Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2006.
- [23] **A. Sadi**. "Le Dessalement : Procédés et Energie Solaire "Division Thermique Solaire, CDER, Alger, Bulletin N°6 Décembre, 2004.
- http://peresblanc.org/le_solaire_pour_revolutionner_l'_afrique.htm
- <http://cipcsp.com/tutorial/centralessolaire-csp.html>
- <http://travelpics.fr/2010/08/Four-solaire-odeillo-font-romer-pyrnees-france.html>
- [24] **LANE G.A** phase change materials for energy storage nucleation to prevent supercooling. Solar energy materials and solar cells 27:135-160 (1992).
- [25] **Adele Soupart-Caron**. Stockage de chaleur dans les matériaux a changement de phase. Genie des procédés. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. <NNT : 2015GREAI078>. <tel-01266813>
- [26] **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>
- [27] **ABHAT A**, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage material. Solar energy, VOL, 30, NO313-332.5(1983).
- [28] : **Maha AHMAD**, Thèse De Doctorat, Couplage matériaux à changement de phase, super isolation, apport solaire, Université Josef Fourier, 2004.
- [29] : **Amina Akrouche**, Mémoire de master, Etude du stockage et déstockage d'énergie dans matériaux à changement de phase, Ecole Des mines de Nantes 29/10 /2011.
- [30] : **Tripanagnostopoulos Y, Nousia Th, Souliotis M, Yianoulis P**. Hybridphotovoltaic/thermal solar systems. Sol Energy 2002.

Références bibliographiques

[31] R. Velraj, R. V Seeniraj, B. Hafner, C. Faber et K. Schwarzer «Heat transfert enhancement in latent heat storage systeme». Sol. Energy. Vol. 65. No 3, pp 171-180 Feb 1999.