

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude
Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Génie mécanique
Spécialité : Energétiques Énergies renouvelables

Thème

**Étude expérimentale d'un panneau solaire pour chauffe d'eau
avec l'intégration d'une matière de stockage d'énergie**

Devant le jury composé de :

ATIA Abdelmalek
MEGHDOUD Sofiane
Gherbi Med Tahar
Zine Ali

Président
Examineur
Encadreur
Co-Encadreur

Présenté par :

Thabet Ben Amor
Ali Ferhat

2016-2017

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur GHERBI MED TAHAR ET Mr. ZINE Ali pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département de g.M Ms. MENACER Ridha qui a contribué à notre formation par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel

BEN AMOR THABRT

FERHAT ALI

SOMMAIRE

Liste des figures ...	I
Liste des tableaux	II
Nomenclature.....	III
Introduction générale.....	8

Chapitre I: Recherche bibliographie et généralité sur le système solair

I.1.Introduction.....	10
I.2. Stockage thermique de l'énergie.....	10
I.3. Types de stockage de l'énergie thermique.....	12
I.3.1. Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible.....	12
I.3.2. Stockage thermique par chaleur Latente	13
I.3.3. Stockage Thermochimique.....	15
I.4. Aperçu sur la ressource de l'énergie solaire.....	19
I .5.Généralités sur le soleil.....	20
I .5.1. Présentation.....	20
I .5.2.Carte d'identité du soleil.....	20
I.6. La Terre.....	20
I.7.Mouvement de la terre autour du soleil.....	21
I.8.Rayonnement solaire.....	22

Chapitre II : Étude théorique et bilan thermique d'un capteur solaire plan à chauffe d'eau

II.1.Introduction.....	25
II.2.Description des capteurs solaires plans	25
II.2.1. Couverture transparente	26
II.2.2. L'absorbeur.....	27
II.2.3 Isolation thermique	28
II. 3. Mode de fonctionnement d'un capteur solaire plan	29
II.4.Modélisation du capteur solaire plan	29

II.4.1 Les différents paramètres influant sur le rendement du capteurs solaire plan...	29
II.4.1.1 Les paramètres externes	30
II.4.1.2 Les paramètres internes.....	30
II.4.2 Le bilan thermique d'un capteur solaire plan	31
II.4.3 Le bilan énergétique du capteur solaire plan	32
II.4.3.1 Le bilan thermique du capteur en régime permanent.....	35
II.4.4. Rendement instantané du capteur.....	36

Chapitre III : Étude expérimentale et l'appareil de mesure

III.1.Introduction.....	38
Partie I : l'appareil de mesure.....	38
III.2. Dispositif expérimental	38
III.2.1 Description du banc d'essai	38
III.3.Les étapes de l'installation du capteur solaire plan.....	39
III.4. Paramètres mesurés et instruments de mesure	41
III.4.1 Mesure des températures.....	41
III.4.2.Mesure de l'éclairement global.....	42
III.5. Présentation de l'interface	42
III.5.1 Fenêtre de calcul du rayonnement solaire.....	42
III.6. Préparation des tests	43
III.6.1 Détermination expérimentale de la superficie du capteur.....	43
III.6.2 Régulation expérimentale du débit massique.....	44
III.6.3. Conditionnement préalable aux essais	44
Partie II : résultat et discussions.....	44
CONCLUSION GENERALE	50
Références bibliographiques.....	51

Liste des figures

Figure .I.1 : Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique.....	11
Figure .I.2 : principales technique de stockage de l'énergie thermique.....	11
Figure I. 3 : Classification des matériaux à changement de phase.....	14
Figure .I.4 : Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente(solide / liquide).....	14
Figure .I.5 : Schéma de principe du stockage thermochimique.....	15
Figure .I.6 : Critères de choix d'une technologie de stockage.....	16
Figure .I.7 : application d'énergie solaire.....	18
Figure .I.8 : Réparation spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère.....	19
Figure .I.9 : Structure du soleil.....	20
Figure .I.10 : Mouvement annuel de la terre autour du soleil.....	21
Figure .I.11 : Rayonnement solaire reçu sur la terre.....	22
Figure .I.12 : Rayonnement direct, diffus et global.....	23
Figure .II.1: Différents éléments d'un capteur solaire plan.....	27
Figure .II.2 : Bilan thermique d'un capteur solaire plan.....	31
Figure .II.3 : Différents nœuds du capteur.....	32
Figure .III.1 : Représentation du capteur solaire plan.....	38
Figure .III.2 : Un thermocouple de type K.....	42
Figure .III.3 : Fenêtre de calcul du rayonnement solaire.....	43
Figure .III.4 : Méthode artisanale de mesure de débit (0-150cl).....	44
Figure III.5 : Le rendement instantané.....	46
Figure III.6 : Le rendement instantané.....	47
Figure III.7 : Le rendement instantané.....	48

Liste des tableaux

Tableau I .1 : Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C.....	13
Tableau I.2 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur	17
Tableau II.1 : Quelques caractéristiques optiques des verres.....	27
Tableau II.2 : Caractéristiques optiques des matériaux.....	27
Tableau II.3 : Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur.....	28
Tableau II.4 : Revêtements des surfaces d'absorbeur.....	28
Tableau II.5 : Quelques propriétés des isolants.....	29
Tableau III.1 :Caractéristiques du capteur.....	39
Tableau III .2 :Paramètres mesurés et instruments de mesure.....	41
Tableau .III.3 : mesure Lundi 06 Mars 2017.....	44
Tableau .III.3 : mesure Lundi 06 Mars 2017.....	45

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
Ac	Surface du capteur solaire plan.	m ²
Cp	Chaleur spécifique de l'eau.	J/kg.°C
ET	Correction de l'équation du temps.	Mn
ei	Epaisseur d'un corps d'indice i.	m
G	Rayonnement global incident.	W/m ²
a	Azimut du soleil.	Degré
h	Hauteur angulaire du soleil.	Degré
h _{cij}	Coefficient d'échange thermique par convection entre deux surfaces indicées i et j.	W/m ² . °C
h _{rij}	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre deux surfaces indicées i et j.	W/m ² . °C
i	Angle d'incidence.	Degré
I	Rayonnement direct.	W/m ²
D	Rayonnement diffus.	W/m ²
j	Numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.	
L _{St}	Méridien standard du lieu.	Degré
L _g	Méridien local du lieu.	Degré
Le	Longitude du lieu.	Degré
m	Débit massique	Kg/s
P _i	Puissance solaire absorbée par un corps d'indice i.	W/m ²
q _{rij}	Flux de chaleur échangé par rayonnement entre deux surfaces indicées i et j.	W
q _{cdij}	Flux de chaleur échangé par conduction entre deux surfaces indicées i et j.	W
T _i	Température d'un corps d'indice i.	°C
TSV	Temps solaire vrai.	H
TU	Temps universel standard.	Mn

Lettres Grecques

Lettre	Désignation	Unité
α	Azimut d'un plan.	Degré
β	L'inclinaison d'un plan par rapport à un plan horizontal.	Degré
δ	La déclinaison du soleil.	Degré
ω	Angle horaire.	Degré
Φ	Latitude du lieu.	Degré
γ	Hauteur du plan.	Degré
τ	Coefficient de transmission de la vitre.	
α_v	Coefficient d'absorptivité de la vitre.	
α_{ab}	Coefficient d'absorptivité de l'absorbeur	
η_i	Rendement instantané du capteur solaire plan	

Indices

Indice	Désignation
a	Air ambiant.
ab	Absorbeur.
c	Ciel.
f	Fluide.
ie	Isolant extérieur.
ii	Isolant intérieur.
ve	Vitre extérieure
vi	Vitre intérieure.

INTRODUCTION GENERALE

La demande croissante d'énergie à cause de la forte augmentation de la pollution et le développement industriel en particulier en Algérie, il est impératif pour nous chercher des sources d'énergie nouvelles et renouvelable. Notamment l'énergie solaire, qui est une source importante et grande. Surtout dans notre zone saharienne EL-OUED cette énergie a plusieurs usages, comme la production d'électricité l'eau chaud, séchage.....mais il existe quelques inconvénients permis, l'absence du soleil dans la nuit, dans le cas de changement de climat, mais cela ne nous empêche pas de l'utiliser.

Dans cette étude, nous voulons utiliser cette énergie pour chauffer l'eau, car le coût de chauffe d'eau prend la majorité de la facture électrique à domicile. et nous tenons également à exploiter les ressources locales qui permettent. Le sable qui a une grande capacité de stocker la chaleur à des degrés très élevés. ou nous l'utilisons le sable traité comme plaque absorbante pour cela nous allons faire une étude expérimentale sur deux types de chauffe d'eau solaire l'une réalisée par une plaque galvanisée comme plaque absorbante, et l'autre par du sable noir comme plaque absorbante.

Ensuite, nous comparons les résultats obtenus.

La question est actuellement posée : est-il possible. Le chauffage d'eau solaire à l'huile peut être comme une solution de recharge alternative à la chauffe d'eau à plaque métallique pour répondre à cette question, nous allons faire cette étude et nous allons suivre les étapes suivantes.

- 1) Introduction générale
- 2) Chapitre un : recherche bibliographique et généralité sur le système solaire
- 3) chapitre deux : étude théorique et bilan thermique d'un capteur solaire plan à chauffe d'eau
- 4) Chapitre trois : Étude expérimentale et l'appareil de mesure
Partie I : l'appareil de mesure
Partie II : résultats et discussions
- 5) Conclusion générale

I.1.Introduction :

La technique de stockage de l'énergie thermique mise en oeuvre dans ce travail de thèse Pour cela, quelques généralités sur les différents types de stockage de l'énergie thermique sont décrites et comparées. Ensuite, un état de l'art des procédés de stockage de l'énergie thermique par voie sensible est présenté. Cet état de l'art permettra de faire le point sur les technologies qui sont ou qui ont été étudiées et sur les matériaux appropriés à chaque technologie. Des critères de sélection seront présentés et confrontés aux matériaux afin de choisir le plus prometteur. A l'issue de ce chapitre, les techniques les mieux adaptées pour mettre en oeuvre le matériau choisi seront sélectionnées .

I.2. Stockage thermique de l'énergie :

Le stockage de l'énergie thermique concerne principalement la chaleur provenant du soleil, Comme il concerne également la chaleur produite par certaines industries (industrie Métallurgique, centrale à gaz, centrale d'incinération...).

Les technologies de stockage de l'énergie thermique peuvent être classifiées dans diverses Catégories selon différents critères .Si le critère est la plage de température, les Systèmes de stockage sont divisés en « stockage de la chaleur » et « stockage du froid » Dans le cas où le critère est la durée de stockage deux classes sont considérées, « le Stockage long terme » et le stockage « court terme ». D'autre part, si le critère est l'état du Matériau de stockage, il existe trois principaux types : « stockage par chaleur sensible », « Stockage par chaleur latente », et « stockage par chaleur thermochimique ». . [1]

Les Systèmes de stockage de l'énergie thermique peuvent aussi être classés en deux autres Catégories : actifs ou passifs. Le terme de stockage actif est utilisé dans le cas où le Matériau de stockage circule dans le système. À l'opposé, dans le cas d'un système de Stockage d'énergie thermique passif (aussi appelé régénérateur), le matériau de stockage ne circule pas dans le procédé. L'énergie thermique est transportée via un fluide caloporteur, est transférée vers le matériau de stockage à l'aide d'un échangeur. La structure de L'échangeur de chaleur est installée au sein du matériau de stockage

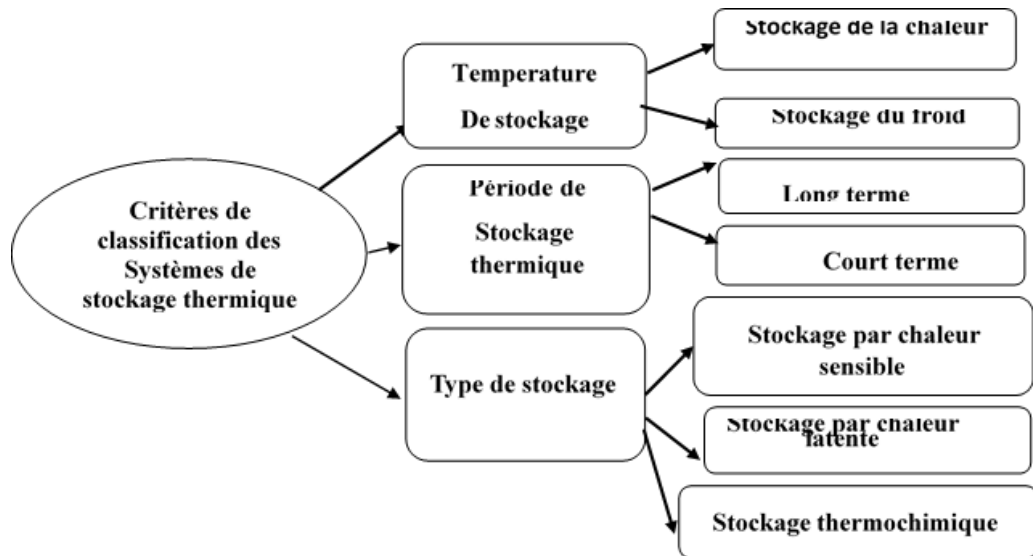


Figure I .1: Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique. [1]

Dans le cadre de cette thèse, nous nous concentrons sur la classification selon le type de stockage. Ces types seront introduits brièvement dans la section. En revanche la technologie de stockage par chaleur sensible fera l'objet d'un état de l'art détaillé.

L'énergie thermique est la somme du potentiel et des énergies cinétiques des atomes et des molécules qui composent la substance. À la suite de vibrations atomiques et moléculaires, l'énergie thermique se produit dans la substance.

Ainsi l'énergie thermique peut être stockée comme un changement de l'énergie interne d'un matériau en tant que chaleur sensible, chaleur latente, et chaleur thermochimique, ou en combinaison de ces derniers.

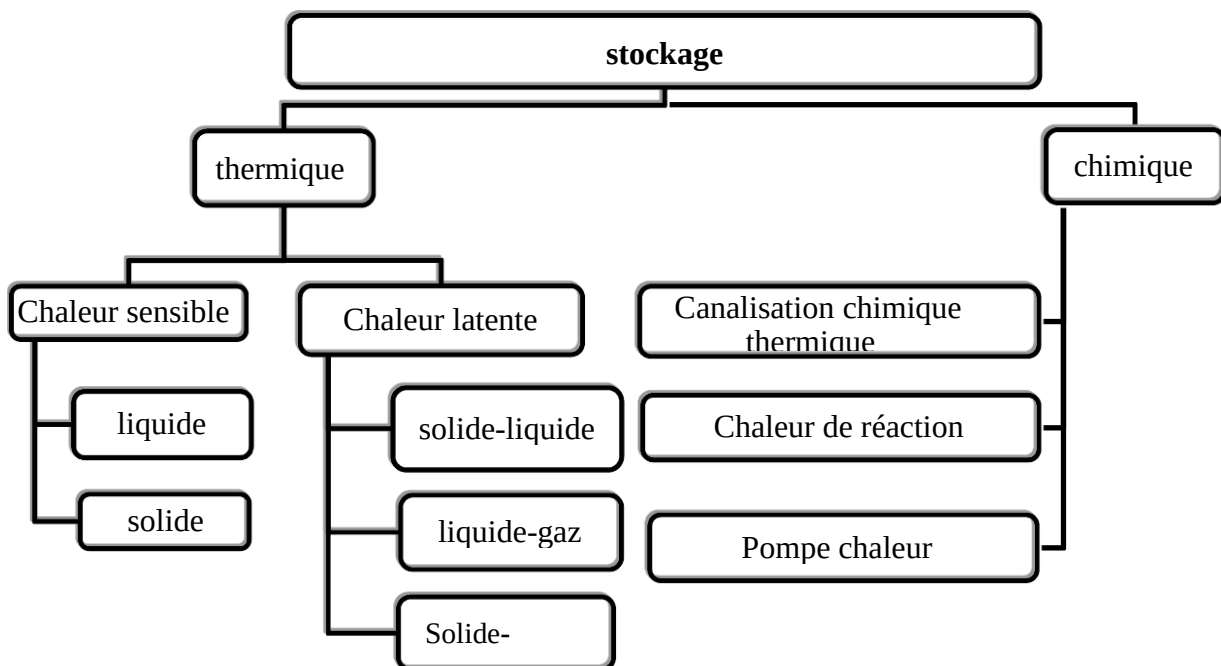


Figure I .2: principales technique de stockage de l'énergie thermique. [3]

I.3. Types de stockage de l'énergie thermique :

I.3.1. Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible :

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

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

Cependant, l'exigence d'un volume important du support de stockage peut être considérée comme un inconvénient pour ce système.

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

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

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

On distingue les deux cas suivants :

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

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

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

Certaines propriétés des substances utilisées comme Matériau de stockage de chaleur sensible Sont données dans le tableau suivant:

Tableau I .1 : Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C. [1]

Matériaux	Densité (Kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Capacité thermique Volumétrique (J/m ³ K)
Argile	1458	879	1.28
Briques	1800	837	1.51
Grés	2200	712	1.57
Bois	700	2390	1.67
Béton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
Ferre	7900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68
Eau	988	4182	4.17

I.3.2. Stockage thermique par chaleur Latente :

Pendant le changement de phase des matériaux, solide/liquide ou liquide/vapeur, l'énergie Thermique peut être stockée de façon isotherme, dépendant ainsi de la chaleur latente, Propriété intrinsèque du matériau et de la quantité de matériau utilisée. Ce type de stockage Peut être efficace pour des différences de températures très faibles. Les matériaux utilisés dans ce cas sont appelés : Matériaux à Changement de Phase (MCP, PCM pour change phase Matérielle). De nombreuses substances ont été étudiées comme des matériaux à changement de phase potentiels, mais seuls quelques-uns sont commercialisés en tant que tels.

La Figure I.3 classification des matériaux à changement de phase. [1]

Durant l'étape de charge, l'énergie thermique fournie au matériau permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. Cette énergie est ensuite stockée à la température de charge. Lors de l'étape de restitution de l'énergie Stockée, le matériau de stockage change de nouveau de phase et reprend son état initial.

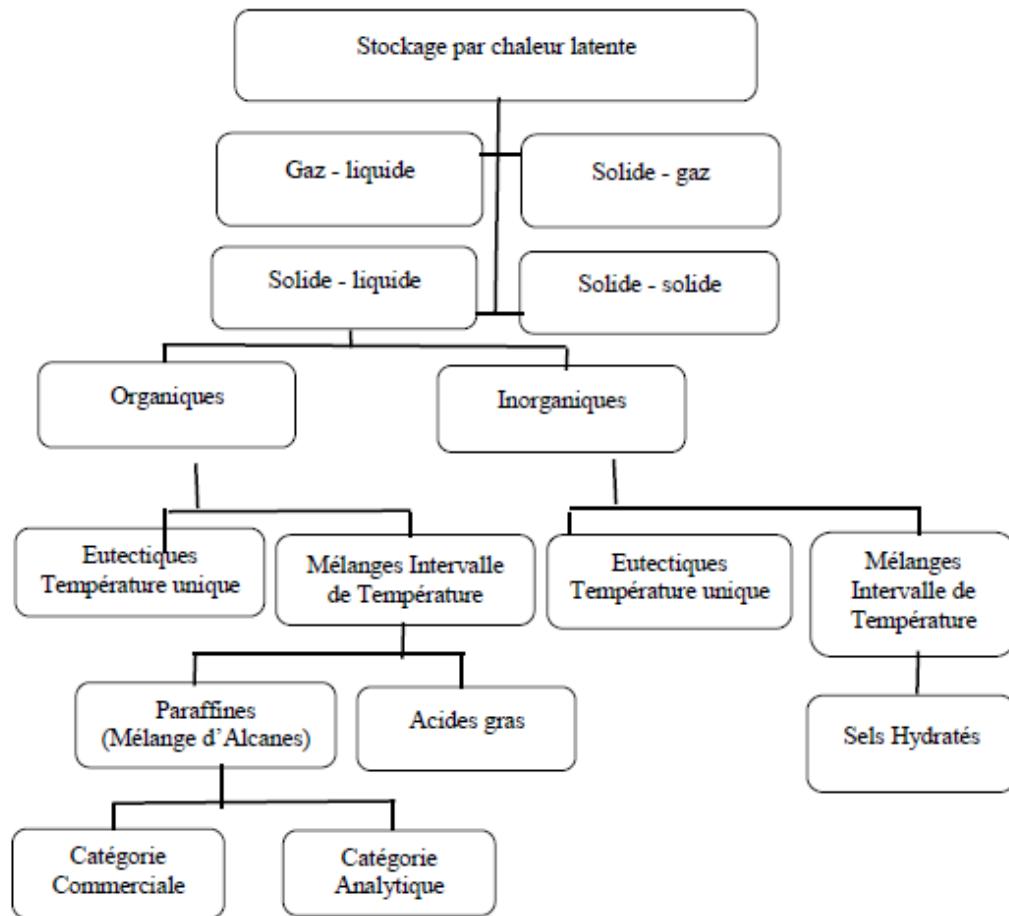


Figure I. 3 : Classification des matériaux à changement de phase. [1]

La Figure I.4 illustre les différentes étapes d'un tel système de stockage:

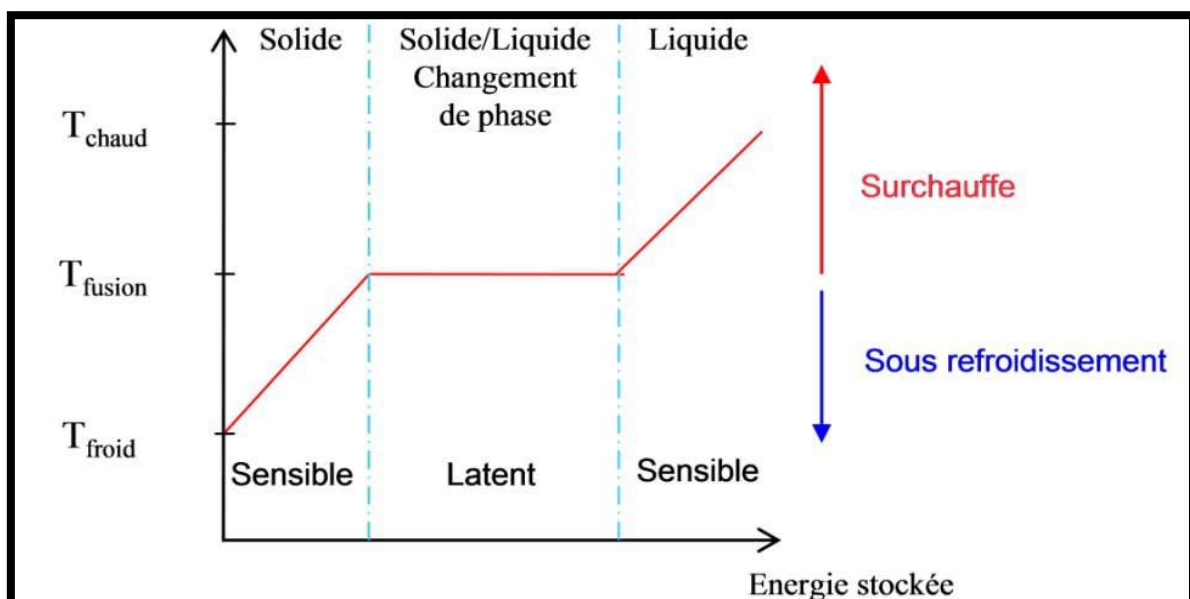


Figure I.4 : Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente (solide / liquide).

[1]

La quantité d'énergie stockée dans le matériau à changement de phase est la somme de l'énergie sensible et de l'énergie latente suivant la relation (I.2). La majeure partie de l'énergie stockée est comprise dans l'enthalpie de changement de phase du matériau.

Critères de choix et de conception de systèmes de stockage.

I.3.3. Stockage Thermochimique :

L'énergie thermochimique est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le stockage d'énergie thermochimique est basée sur l'énergie des liaisons des composés chimiques mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles. Dans ce système, la capacité de stockage de chaleur est généralement élevée parce qu'une énergie chimique élevée se produit au cours de la rupture et de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction chimique réversible. Le stockage d'énergie thermochimique peut être effectué à l'aide de caloduc chimique ou d'une pompe à chaleur chimique. Ce système est plus compliqué que le stockage de la chaleur sensible et latente. Pour ce système, la réaction chimique doit être réversible et les composés chimiques utilisés doivent être inoffensifs et non corrosifs.

Pour ce type de stockage, la réaction mise en jeu doit être totalement réversible afin que le procédé ne perde pas sa capacité de stockage au cours des cycles. Le schéma de principe du stockage de chaleur par voie thermochimique est présenté sur la figure I.5

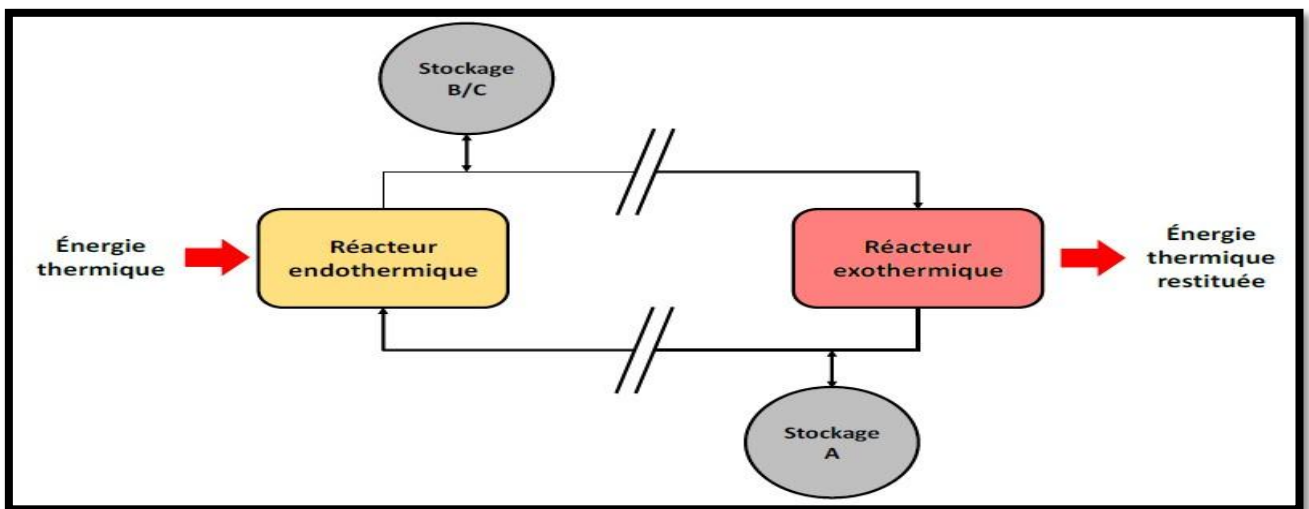


Figure I.5 : Schéma de principe du stockage thermochimique. [1]

Lors de l'étape de charge, l'énergie thermique issue d'une source de chaleur, notamment du champ solaire, permet de mettre en œuvre la réaction endothermique. Les produits de cette réaction (A et B) sont séparés et stockés. Lorsque l'énergie thermique doit être restituée, les produits stockés (A et B) sont mis en contact afin de réaliser la réaction exothermique réversible et ainsi restituer la chaleur emmagasinée et régénérer le produit initial(AB).

Si la capacité thermique, qui est la quantité d'énergie stockée et restituée, est un point clé dans la conception d'un système de stockage, le choix de la technologie de stockage est crucial. Les critères de choix d'une technologie de stockage dépendent du besoin, auquel on associe un cahier de charges, des contraintes de réglementation, de coût et d'environnement...

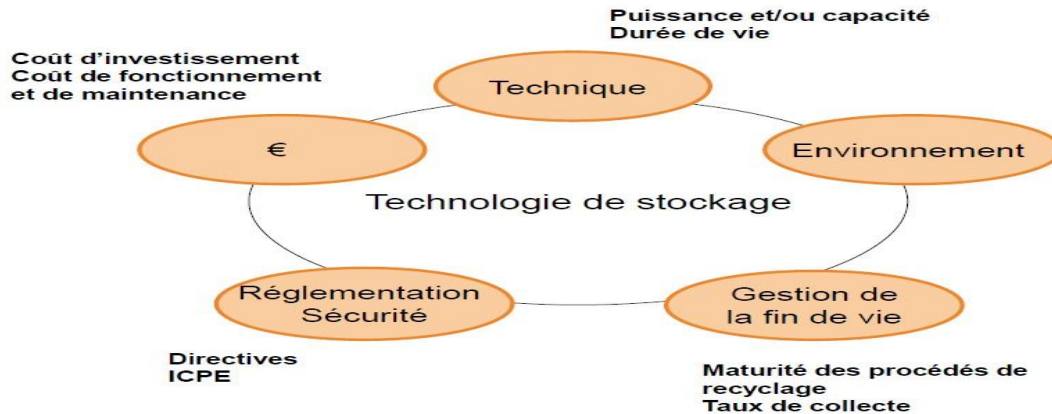


Figure I.6 : Critères de choix d'une technologie de stockage. [1]

Lors de l'étude du besoin, se pose également la question de la durée de stockage :

- ✓ de quelques heures à une journée, pour la gestion des sources intermittentes productrices de la chaleur en journée et restituée le soir ;
- ✓ de plusieurs mois, stockage saisonnier du surplus de la chaleur produit en été et restituée en hiver.

Parmi les trois principes de stockage thermique (sensible, latent ou thermo chimique) le choix porte donc sur des critères :

- ✓ thermodynamiques (température de fusion, capacité calorifique, conductibilité thermique...);
- ✓ physiques et chimiques (stabilité chimique, absence de décomposition et corrosion...).

Parmi les critères de choix, la prise en compte de l'impact environnement a les également importante, notamment sur la nature des sels fondus utilisés dans certaines technologies de stockage qui peuvent être polluants et difficilement retraités.

La maturité de la technologie de stockage peut également faire partie des critères de sélection.

La technologie du chauffe-eau sanitaire est particulièrement mature et ne nécessite donc plus d'effort, contrairement au stockage associé aux centrales thermodynamiques ou encore au stockage par réaction chimique qui, pour l'instant, n'existe qu'au stade de démonstrateur.

D'un point de vue économique, l'évaluation nécessite de prendre en compte le coût d'investissement mais aussi les coûts d'exploitation, de maintenance et de recyclage. Le volume

du système de stockage est souvent la variable prépondérante de cette évaluation, parce qu'il induit des coûts en termes d'isolation et en raison de la quantité de matériaux mobilisés.

Tous ces points doivent être pris en compte lors de la conception et du dimensionnement de l'unité de stockage.

En se basant sur le type du matériau de stockage, on peut classer le stockage par chaleur sensible en deux catégories : stockage par un liquide (eau, huile, sel fondus,...) et stockage par un solide (pierre, sable, métaux,...). Chacun de ces deux types de stockage a ses propres caractéristiques et ses applications propres.

Tableau I.2 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur. [1]

		Stockage sensible	Stockage Latent	Stockage Thermochimique
Densité Energétique	Volumique	Faible ~15 – 60 kWh.m-3	Moyenne ~ 50 - 100 kWh.m-3	Elevée ~100 - 500 kWh.m-3
	Massique	Faible ~ 0,02-0,03 kWh.kg-1	Moyenne ~ 0,05-0,1 kWh.kg-1	Haute : ~0,5-1 kWh.kg-1
Température de stockage		Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge ou Température ambiante
Durée de stockage		Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes thermiques)	Théoriquement Illimitée
Transport de l'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance théoriquement Illimitée
Maturité		Echelle industrielle (20 MWe)	Echelle pilote (100 kWth)	Echelle laboratoire (1-5 kWth)
Technologie		Simple	Moyenne	Complexe

Le Soleil est une étoile de type [G2](#), vieille de 4.5 milliard d'années et qui possède un diamètre de 1 392 000 km, ce qui représente environ 109 Terre. Cela fait de lui l'objet le plus gros du système solaire en contenant plus de 99.8% de la masse totale de celui-ci. Il est aussi la principale source de lumière, de chaleur et d'énergie de notre système solaire. C'est donc en partie grâce à lui que la vie a pu être permise sur Terre. Le Soleil représente une source d'énergie considérable. Au niveau de la Terre l'énergie solaire **reçue** annuellement correspond à environ 7000 fois l'énergie consommée par l'humanité. Il s'agit d'une énergie lumineuse portée par les photons qui a pour origine les réactions de fusion nucléaire de l'hydrogène ayant lieu à l'intérieur du Soleil. Elle a le potentiel de couvrir largement nos besoins énergétiques, à condition de pouvoir la convertir efficacement et à faible coût. C'est tout l'enjeu du développement actuel des deux grandes voies d'utilisation de l'énergie solaire la filière thermique et la filière photovoltaïque. La première utilise directement la chaleur du Soleil et la seconde, certainement la plus connue du grand public, convertit le rayonnement solaire en électricité.

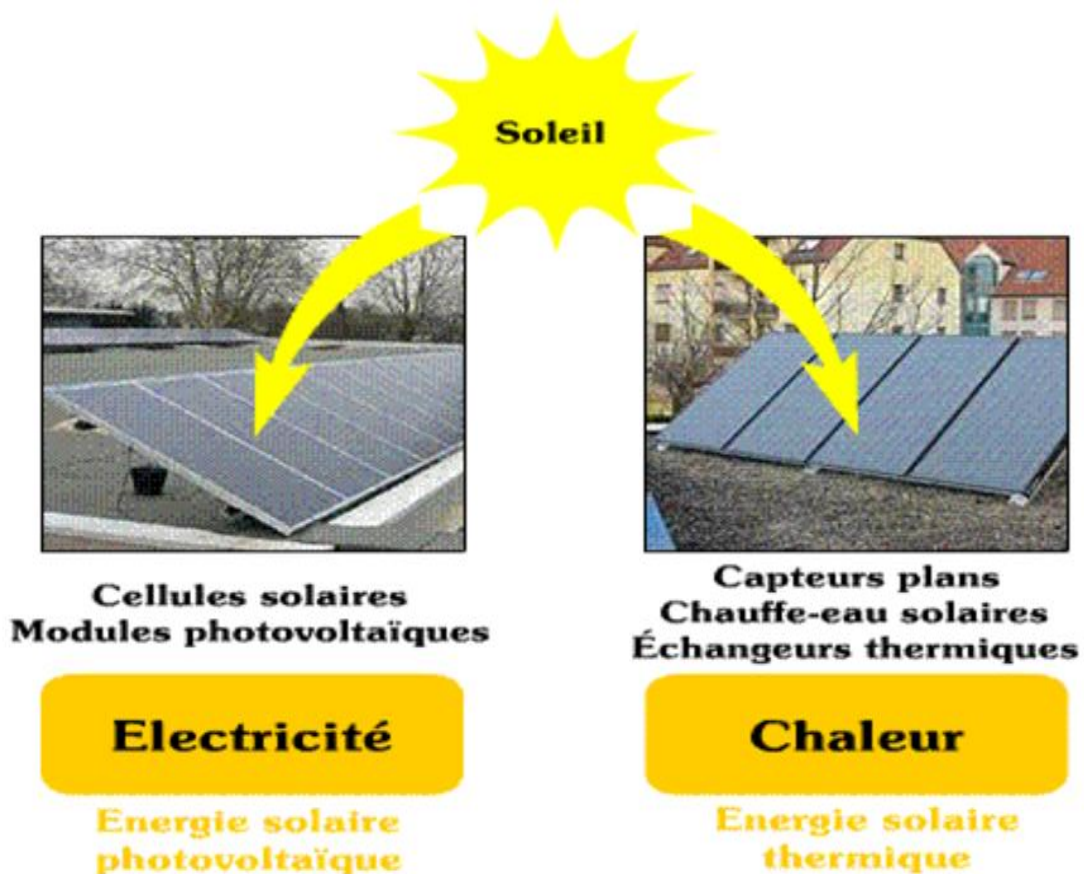


Figure I.7 : application d'énergie solaire [7]

I4. Aperçu sur la ressource de l'énergie solaire :

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391 000 km (100 fois celui de la Terre), sa masse est de l'ordre de 2.10^{27} tonnes.

Toute l'énergie du Soleil provient de réactions thermo-nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564.106 tonnes d'hydrogène en 560.106 tonnes d'Hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ($E = mc^2$), ce qui représente une énergie totale de 36.1022 kW. La Terre étant à une distance de 150.106 km du Soleil, elle reçoit une énergie de 1,8.1017 W. La valeur du flux de rayonnement solaire E reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne E_0 est appelée la constante solaire, elle vaut $E_0 = 1353 \text{ W.m}^{-2}$. En première approximation, on peut calculer la valeur de E en fonction du numéro du jour de l'année j par : $E = E_0 [1 + 0.033 \cos (0.984j)]$.

On trouvera sur la figure I-8 la répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère

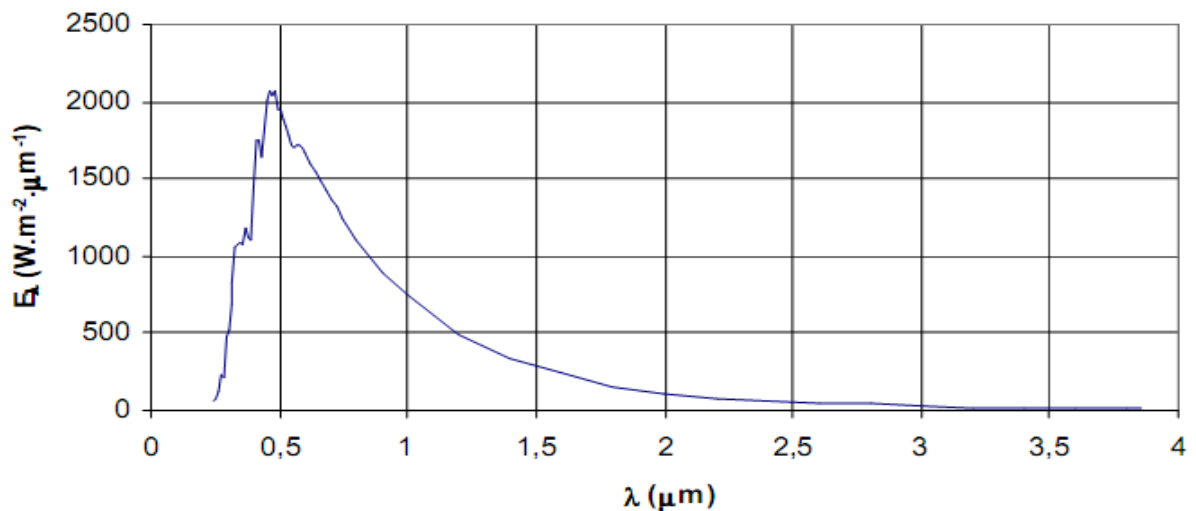


Fig.I.8 : Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère.

On notera que 98% du rayonnement solaire est émis dans des longueurs d'onde inférieures à $4 \mu\text{m}$. En première approximation, le rayonnement solaire peut être assimilé au rayonnement d'un corps noir à une température de 5777 K.

I 5.Généralités sur le soleil :

I .5.1. Présentation :

Le soleil est situé au centre d'un système dit « système solaire » dont la terre fait partie avec d'autres planètes.

Le Soleil a une forme sphérique qui est constitué d'hydrogène (71%), d'hélium (27%), et d'autres éléments, plus lourds (2%). Au centre du Soleil, la température atteint environ 16 millions de degrés Celsius, en surface la température du soleil est d'environ 5900 K.

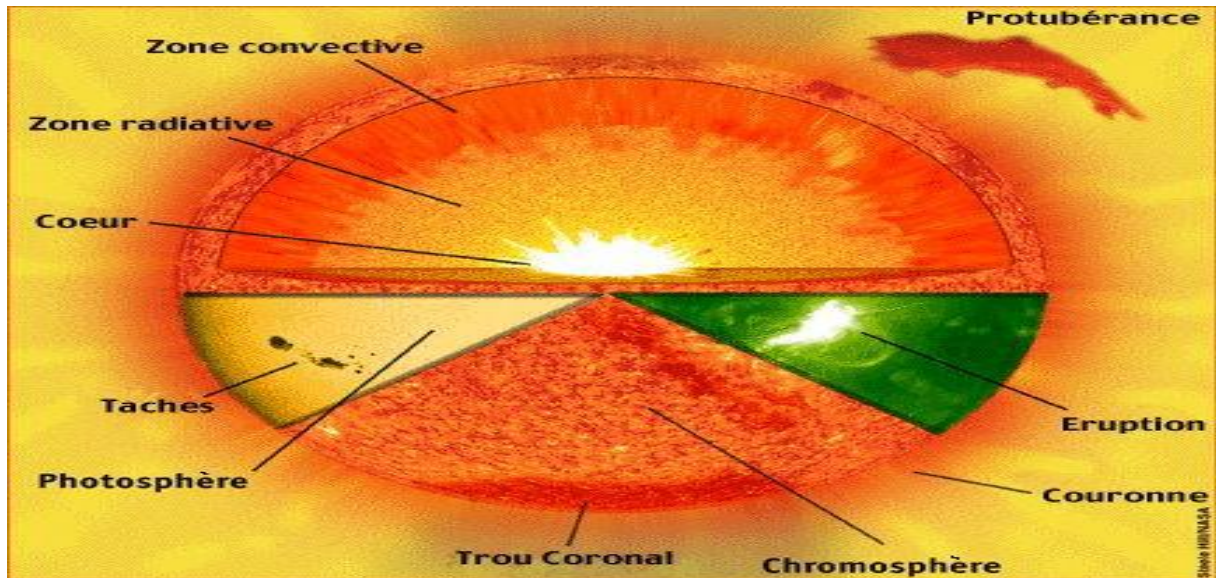


Fig.I.9. Structure du soleil. [8]

I .5.2.Carte d'identité du soleil :

L'étude astrophysique du soleil conduit aux valeurs suivantes :

- Masse : 2.10^3 kg, soit 333432 fois celle de la terre.
- Rayon : 7. 108 m, soit 109 fois celui de la terre.
- Densité du soleil: 1400 kg/m³.
- Age de soleil : 4,7. 109 années.
- Puissance rayonnée par le soleil : 4.1023kw.
- Distance moyenne (d) à la terre : 149,6. 109 m, il faut de plus de 8mn pour que la lumière solaire nous parvienne.

I.6. La Terre:

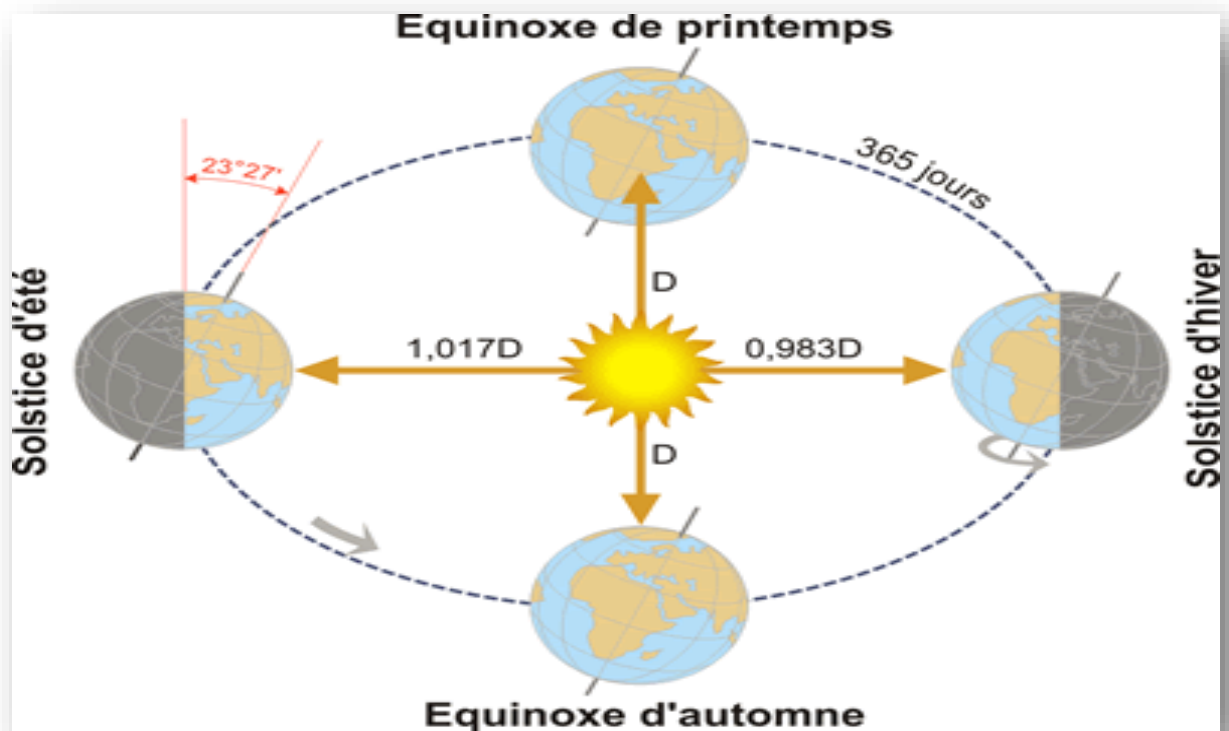
La terre a la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati .Sa superficie est de 510101.10^3Km^2 , son volume est égale à 1083320.106Km^3 , sa masse vaut 6.10^{21} tonne et sa densité moyenne est de 5.52.

La terre décrit autour du soleil une ellipse presque circulaire Figure(I-2).Cette est située dans un plan appelé écliptique .L'axe de rotation terrestre fait un angle de $23^027'$ ce qu'on

appelle déclinaison .L'intersection du plan de l'équateur avec le plan l'écliptique définit la ligne des équinoxes .L'intersection de cette ligne avec l'orbite terrestre , lors de l'équinoxe de printemps définit le point vernal celui-ci est pris comme origine pour le celui des angles définissants la position relative du soleil par rapport à la terre.

I.7.Mouvement de la terre autour du soleil :

La trajectoire décrite par la terre autour du soleil est elliptique .Le mouvement de la terre sur sa trajectoire est uniforme, la terre se déplace à vitesse constante (une vitesse moyenne de 29.8km/s soit 107280km/h).Avec une durée du parcours est d'une année, le déplacement de la terre sur sa trajectoire circulaire est donc d'environ 1° par jour ($360^\circ/365\text{jours}$).



FigureI.10:Mouvement annuel de la terre autour du soleil. [6]

I.8.Rayonnement solaire :

Le rayonnement Solaire est une énergie produite par le Soleil à la suite de réactions de fusion thermonucléaire qui dégage une très grande quantité d'énergie, source de la plupart des énergies disponibles sur Terre et exploitable pour la production d'électricité.

L'énergie solaire se propage dans l'espace sous la forme de « grains », ou quanta d'énergie, les Photons ; elle est sans cesse renouvelée.

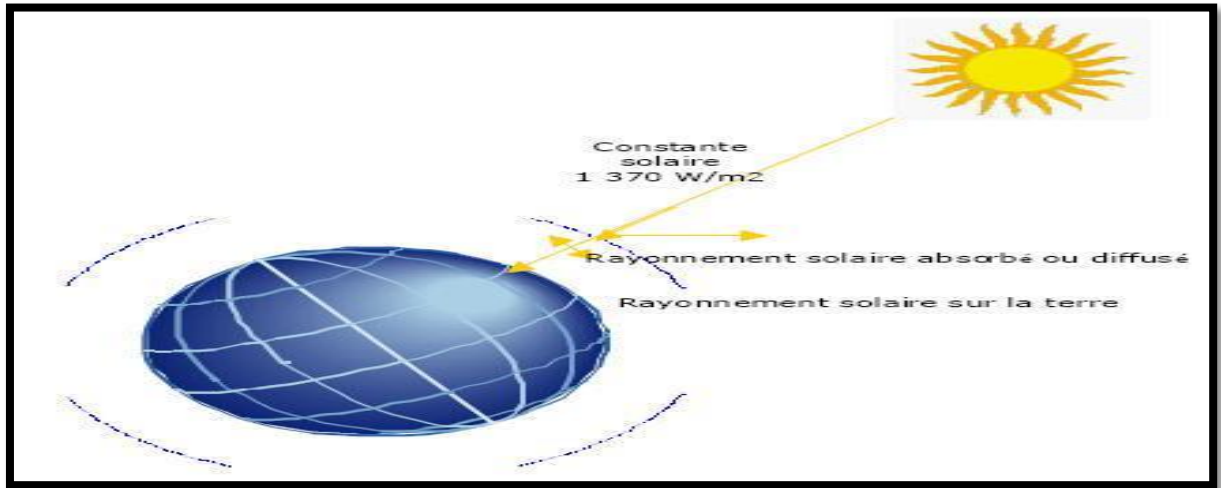


Figure I.11: Rayonnement solaire reçu sur la terre. [6]

-Le rayonnement direct:

Est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de Modifications, il provient du disque solaire seulement à l'exclusion de tout Rayonnement diffusé, réfléchi ou réfracté par l'atmosphère.

- Le rayonnement diffus:

Est la part du rayonnement solaire provenant de toute la Voûte céleste, à l'exception du disque solaire, et diffusé par les particules solides ou Liquides en suspension dans l'atmosphère il n'a pas de direction privilégié

-Le rayonnement global:

Est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du Soleil et de la totalité de la voûte céleste. IL est la somme du rayonnement direct et du Rayonnement diffus. La figure 1.8 illustre les différents composants du rayonnement solaire au niveau du sol.

Les trois quantités, le rayonnement direct noté I, le rayonnement diffus D, et le rayonnement global G, sont reliés par la relation suivante :

$$G = I \cdot \sin(h) + D.$$

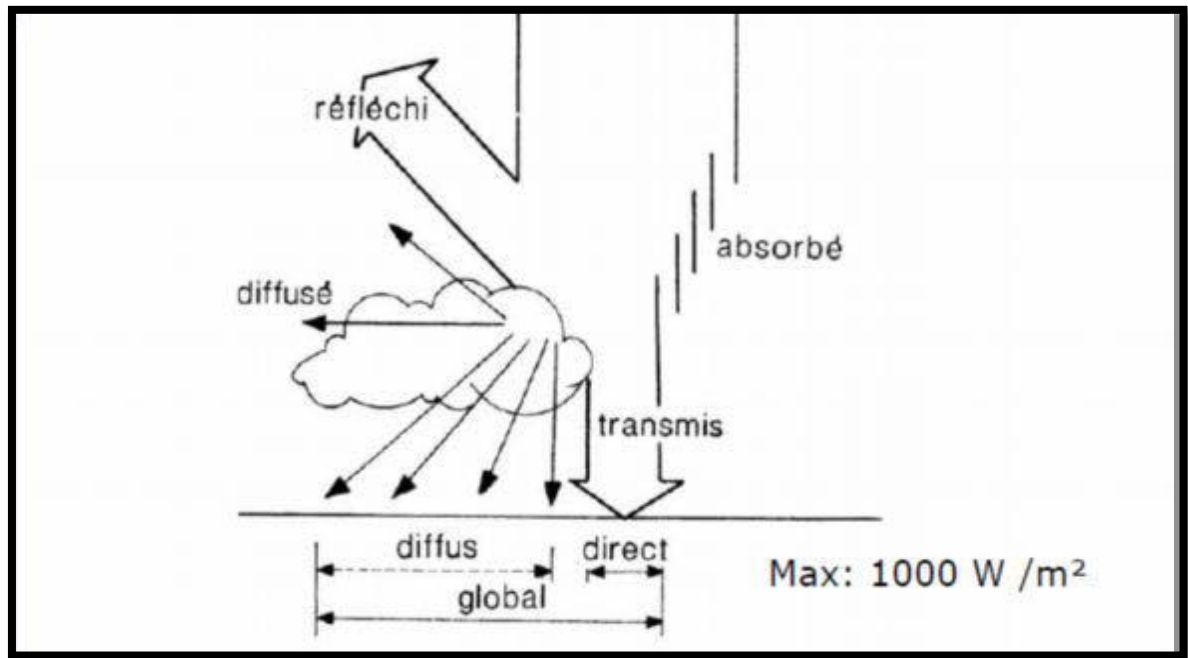


Figure .I.12 : Rayonnement direct, diffus et global.[8]

II.1.Introduction :

Le capteur solaire est un échangeur de chaleur qui fonctionne entre une source radiante le soleil et un fluide. Son rôle est la conversion de l'énergie apportée par le rayonnement solaire en énergie calorifique. La chaleur collectée par l'absorbeur est cédée au fluide caloporteur qui circule dans des canalisations qui servent à transporter la chaleur du capteur vers le point d'utilisation.

L'histoire des capteurs thermiques à basse température remonte à Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799) qui met en évidence l'effet de serre obtenu par un vitrage au dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé. Il faut cependant attendre 1910 pour voir apparaître les premiers chauffe-eau solaires en Californie.

Dans le présent chapitre on décrit les différents composants des capteurs solaires plans et leurs fonctionnements. Il s'agira de présenter le capteur solaire plan à un seul vitrage, objet de notre présent travail.

II.2. Description des capteurs solaires plans :

Il existe une grande gamme de capteurs solaires qui permettent de répondre aux différents Besoins de chauffage des liquides. Leur choix dépend de la température de besoin et des Conditions climatiques pendant la période d'utilisation du système.

Les technologies les plus courantes sont :

- Le capteur plan non vitré : Ce type de capteur est conseillé pour des basses Températures de service ; moins de 40°C. Il est généralement utilisé pour le Chauffage des piscines.
- Le capteur plan vitré : Il est recommandé pour les moyennes températures de Service ; entre 30° C à 80°C. Il est utilisé généralement pour le chauffage de l'eau.
- Le capteur à tubes évacués : Ce capteur est conseillé pour des hautes températures De service; plus de 70°C. Il est surtout appliqué pour le chauffage des locaux ou la Production du froid solaire.

Il existe d'autres technologies, telles que les capteurs à double-vitrage, les capteurs à Concentrateurs et les capteurs avec stockage intégré (auto stockeur).

Les pays froids ont généralement besoin de dispositifs à rendement élevé, pour ce faire, on Peut équiper un capteur :

- D'un double vitrage ;
- D'un couvert muni d'une couche anti-reflet ;
- D'un revêtement sélectif sur l'absorbeur qui ne réémet qu'une faible portion de l'énergie absorbée.

Le capteur solaire plan objet de la présente étude, est constitué d'un cadre fixe, sur lequel sont Posé un simple vitrage à l'avant et un isolant à l'arrière. Une feuille métallique noire, sur laquelle est posé une échelle tubulaire joue le rôle de l'absorbeur qui, transmet les calories Vers le fluide.

En figure. II.1 sont représentés les différents composants du capteur solaire plan étudié :

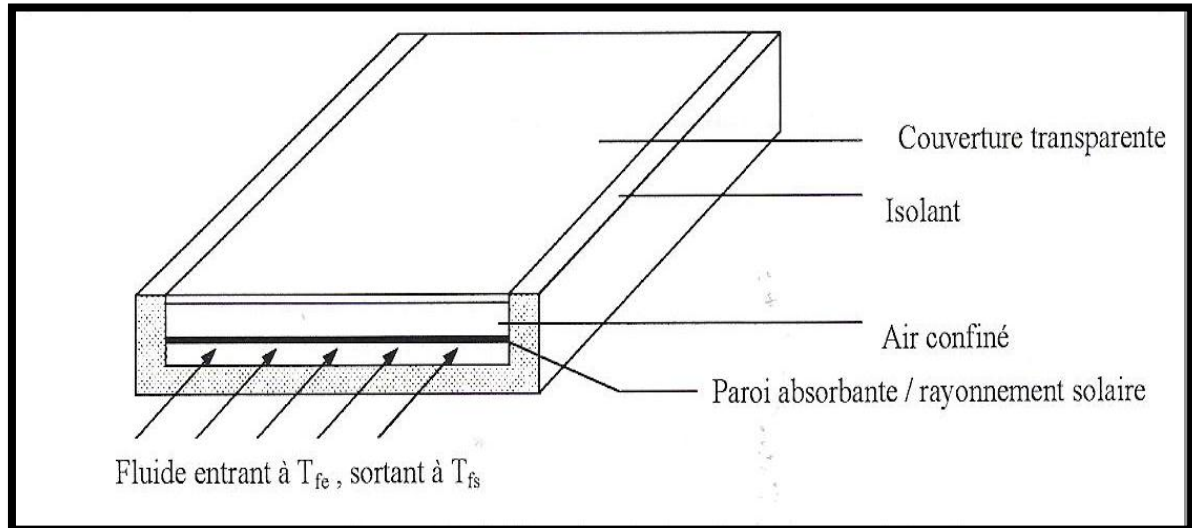


Figure II.1. Différents éléments d'un capteur solaire plan [8]

II.2.1. Couverture transparente :

Du fait de sa résistance aux chocs, aux contraintes mécaniques (grêle, neige) et aux chocs Thermiques (brusque refroidissement en cas d'orage), le verre sécurisé est principalement Utilisé comme couverture transparente. Il est de préférence pauvre en oxyde de fer afin d'être le plus transparent possible à la transmission du rayonnement solaire.

Dans le cas de capteurs intégrés en toiture, des matières synthétiques sont parfois utilisées. Leur durée de vie est plus faible que celle du verre ordinaire, mais elles sont plus légères, Moins chères et plus facile à mettre en œuvre.

La plupart du temps le vitrage est légèrement structuré et disperse ainsi la fraction réfléchi du Rayonnement solaire incident, afin de diminuer un éventuel éblouissement.

Les caractéristiques essentielles d'un vitrage sont :

- Le coefficient de transmission (τ).
- et l'émissivité (ϵ).

Le coefficient de transmission (τ) est essentiellement déterminé par la structure du vitrage (Double ou triple, l'épaisseur des vitres, des espaces et la nature du gaz de remplissage).

Les propriétés de divers types de verre sont données au tableau II.1.

Tableau II.1 : Quelques caractéristiques optiques des verres. [8]

Verre	Réflexion	Absorption	Transmission
Verre clair	8%	9%	83%
Verre basse teneur en Fe_2O_3	8%	2%	90%

Le vitrage n'absorbe que faiblement le rayonnement solaire d'où il transmet donc un maximum d'énergie vers l'absorbeur.

Au tableau II.2 sont données les caractéristiques optiques des matériaux, utilisés comme couverture transparente.

Tableau II.2 : Caractéristiques optiques des matériaux. [8]

Matériaux	Indice de réfraction	Epaisseur (mm)	Transmittivité
Verre	1,518	3-4	0,840
Lexan	1,586	3-4	0,840
Teflon	1,343	0,05	0,960
Tedlar	1,460	0,10	0,920
Mylar	1,640	0,10	0,870
Kyna	1,410	0,10	0,930
Marlex	1,50	0,10	0,920

Actuellement le verre le plus utilisé pour les capteurs solaire plan est le verre prismé. Sa Particularité est de diminuer la partie du rayonnement réfléchi (1.5%). Contrairement au verre Trompé classique. Lorsque l'angle d'incidence est faible. Ce verre peut atteindre jusqu'à 96% de transmission.

II.2.2. L'absorbeur

L'absorbeur joue le rôle principal dans le capteur solaire plan. C'est généralement un corps Noir qui absorbe toutes les rayonnements dans le spectre du visible, de l'ultraviolet et une Petite quantité dans l'infrarouge. Il converti le rayonnement solaire capté en énergie calorifique.

Un absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- ✓ Un bon coefficient d'absorption ;
- ✓ Une bonne conductivité thermique ;
- ✓ Une bonne résistance à la corrosion.

Le choix du matériau et le mode de construction a une grande influence sur la qualité du capteur.

Du fait de leurs conductivités élevées, les absorbeurs sont généralement en cuivre, en acier ou en aluminium.

Au tableau II.3 sont données les caractéristiques de divers métaux pouvant être utilisés comme Absorbeur

Tableau II.3 : Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur.[8]

Matière	Conductibilité (w/m °C)	Coefficient de dilatation
Aluminium	230	2,38
Cuivre	380	1,65
Zinc	112	2,9
Acier	52	1,15
Inox	52	1,15
Plastique	0,2-0,4	7-20

Pour diminuer les pertes par rayonnement, les absorbeurs sont souvent revêtus d'une couche Sélective. Pour la plupart des capteurs, le revêtement sélectif est obtenu à partir de nickel et de Chrome. Les modes de revêtements les plus courants sont donnés au tableau II.4.

Tableau II.4 : Revêtements des surfaces d'absorbeur.[8]

Revêtement	Absorption	Emission
Peinture noire	0,92-0,97	0,95
Chrome noir sur cuivre (sélectif)	0,95	0,14
Chrome noir sur acier (sélectif)	0,91	0,07
Tinox (sélectif)	0,95	0,05

II.2.3 Isolation thermique :

Le capteur doit être isolé thermiquement avec des matériaux appropriés. Ceux-ci doivent avoir un faible coefficient de conductivité thermique, afin de limiter les pertes thermiques par Conduction à travers les faces postérieures et latérales du capteur plan. L'isolation doit Généralement avoir une épaisseur de l'ordre de 4 à 10 cm. Les matières isolantes utilisées sont Soient des laines minérales, soient des matières synthétiques (de laine de verre, mousses

Expansives de polyuréthane ou polystyrène). Elle doit résister aux hautes températures atteintes à l'intérieur du capteur. Pour choisir un matériau isolant, les paramètres suivants doivent être considérés :

- ✓ La masse volumique;
- ✓ La température maximale d'utilisation en régime permanent;
- ✓ La résistance au feu. Aux rongeurs et à la putréfaction ;
- ✓ La sensibilité à l'humidité et son coût.

Les propriétés des isolants les plus utilisés sont citées au tableau II.5.

Tableau II.5 : Quelques propriétés des isolants.[8]

Isolant	Conductivité thermique à 500W/m°C max	Température max
Laine de verre	0,041	150
Polyuréthane	0,027	110
Polystyrène	0,039	85

II. 3. Mode de fonctionnement d'un capteur solaire plan :

Le capteur plan effectue la transformation de l'énergie solaire incidente arrivant sur celui-ci en énergie thermique à basse température. Cette transformation est assurée par un processus appelé l'effet de serre. Les rayons du soleil émis en majorité dans la gamme des longueurs d'onde visible ($\sim 0.5\mu\text{m}$), traversent la couverture transparente du capteur et tombent sur l'absorbeur. Celui-ci étant noir, il absorbe la majeure partie de la lumière reçue et par conséquent il se chauffe. Du fait de sa température, il réémet vers l'avant dans la gamme Infrarouge ($\sim 9\mu\text{m}$).

Le verre est parfaitement opaque à l'infrarouge et réfléchit à nouveau les rayons vers l'absorbeur. La chaleur reste donc prisonnière entre la couverture transparente et l'absorbeur.

Cette énergie est transmise vers le liquide caloporteur qui circule dans l'échelle tubulaire du capteur qui conduit cette chaleur vers l'utilisation.

II.4 Modélisation du capteur solaire plan :

II.4.1 Les différents paramètres influant sur le rendement du capteur solaire plan :

Le rendement d'un capteur solaire plan est influencé par différents paramètres. On distingue

II.4.1.1 Les paramètres externes :

1- Les paramètres d'ensoleillement :

- ✓ Eclairement énergétique dû au rayonnement global.
- ✓ Position du soleil et durée d'insolation.
- ✓ L'heure de la journée et la saison.
- ✓ La position géographique du lieu considéré (latitude).

2- Température ambiante.

3- Vitesse du vent.

II.4.1.2 Les paramètres internes

1- Les paramètres de position

- Orientation, inclinaison et emplacement du capteur.
- Capteur fixe ou suiveur du soleil.

2- Les paramètres de construction, Parmi lesquels nous citons :

- L'absorbeur
 - Les propriétés thermophysiques et optiques.
 - Dimensions des tubes, de la plaque absorbante et espacement entre les tubes.
 - Introduction des rugosités artificielles et de la surface sélective.
 - Epaisseur de la lame d'air entre l'absorbeur et la vitre.
 - Géométrie des canaux (carrée, rectangulaire, hexagonale, circulaire).
 - Configuration du réseau de circulation du fluide caloporteur.
 - Température de l'absorbeur.
 - La différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.
 - La surface sélective.
- Propriétés optiques.
 - Couverture transparente :
 - Propriétés optiques et thermophysiques.
 - Epaisseur.
 - Le nombre de vitrage et la forme.
 - L'isolant
- Propriétés thermophysiques et optiques.
- Epaisseur.

- Fluide caloporteur
- Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) et le débit.
- Température d'entrée.
- Propriétés thermophysiques.

II.4.2 Le bilan thermique d'un capteur solaire plan :

La modélisation d'un capteur plan solaire passe par l'établissement d'un bilan thermique, pour l'évaluation des gains et des pertes du système.

Le bilan thermique d'un capteur solaire plan, comme illustré sur la figure II.2, s'obtient simplement en écrivant que l'énergie absorbée pendant l'intervalle de temps dt soit Q_{abs} se répartie en :

- ❖ Q_u : énergie extraite du capteur par le fluide caloporteur.
- ❖ Q_p : énergie perdue par le capteur dans l'environnement.
- ❖ de_c : accroissement de l'énergie e_c emmagasinée dans le capteur.

$$Q_{abs} = Q_u + Q_p + de_c \quad (II.1)$$

En termes de puissance on aura :

$$P_{abs} = P_u + P_p + P_c \quad (II.2)$$

Cette équation caractérise le fonctionnement d'un capteur solaire plan en régime transitoire, en régime permanent, on aura :

$$P_{abs} = P_u + P_p \quad (II.3)$$

P_{abs} : Puissance incidente du rayonnement solaire absorbé par unité de surface.

P_u : Puissance utile récupérée par le fluide caloporteur.

P_p : Pertes thermiques.

P_c : Puissance stockée sous forme de chaleur vive dans les différents éléments du capteur lorsque le régime est transitoire.

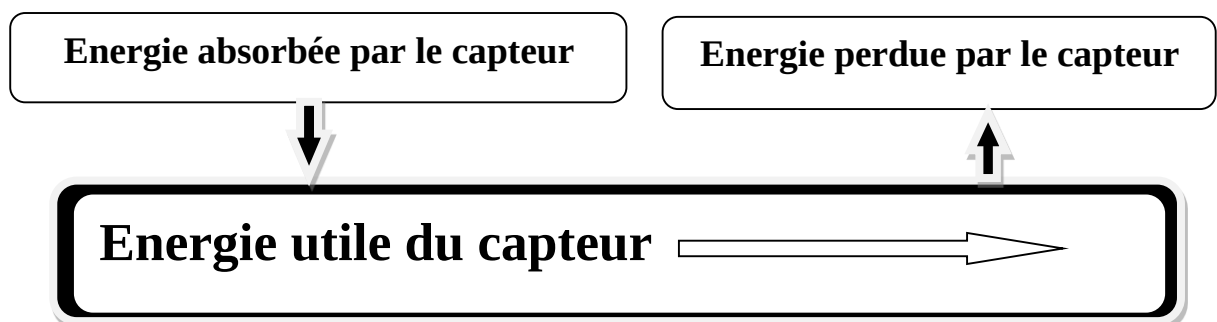


Figure II.2 : Bilan thermique d'un capteur solaire plan.[8]

II.4.3 Le bilan énergétique du capteur solaire plan :

Pour l'établissement des bilans thermiques du capteur solaire en régimes permanent et transitoire, on est amené à considérer chaque partie du capteur comme un nœud, sur lequel nous établirons un bilan thermique, figure II.3 :

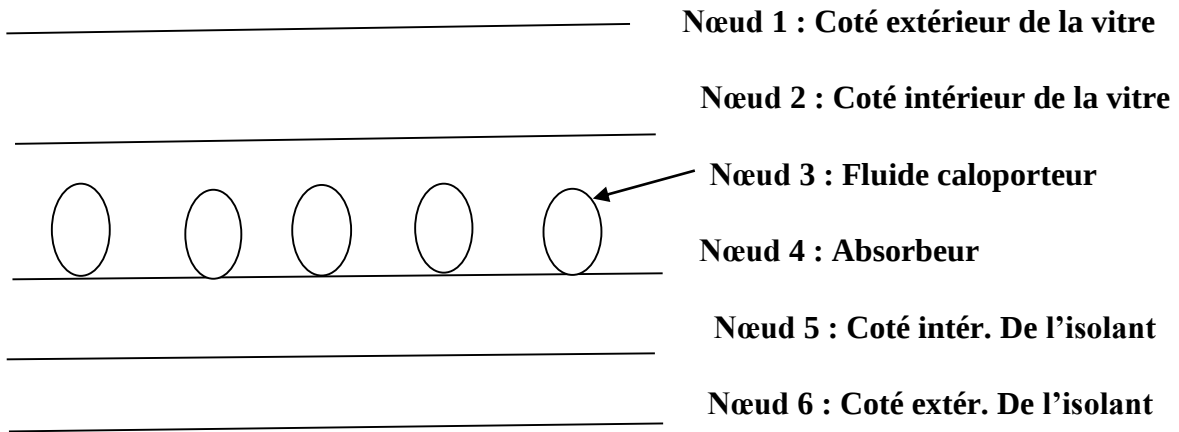


Figure II.3 : Différents nœuds du capteur. [8]

Soit une section du système à l'instant t , soit i un des milieux représentés dans cette section, m_i sa masse, C_{pi} sa chaleur spécifique et T_i sa température.

Au nœud i , le bilan est :

$$m_i \cdot C_{pi} \cdot dT_i/dt = \sum_{j=1}^n Q_{ij} + P_i \quad (II.4)$$

n : ensemble de nœuds j pour lesquels T_j est un potentiel connecté à T_i

P_i : terme de source

On pourra considérer que :

$$m_i \cdot C_{pi} \cdot dT_i/dt = 0 \quad (II.5)$$

- Un capteur à inertie thermique négligeable (faible masse de ses composants, ou faible chaleur spécifique).
- Le régime d'écoulement est permanent

Avant d'établir les bilans énergétiques globaux en régimes permanent et transitoire du capteur Plan, il faut déterminer en premier lieu, les principaux transferts de chaleur à l'intérieur et à l'extérieur du capteur, à savoir

-La vitre reçoit :

- * La puissance P_v rayonnée par le soleil et absorbée par la vitre:

$$P_v = \alpha_v \cdot G \cdot A_v \quad (II.6)$$

α_v : absorptivité de la vitre.

A_v : surface de

G : rayonnement global incident.

- * Une quantité d'énergie Q_{rav} cédée par l'absorbeur par rayonnement:

$$Q_{rav} = h_{rav} \cdot A_v \cdot (T_{ab} - T_{vi}) \quad (II.7)$$

- * Une quantité d'énergie Q_{cav} cédée par l'absorbeur par convection:

$$Q_{cav} = h_{cav} \cdot A_v \cdot (T_{ab} - T_{vi}) \quad (II.8)$$

-La vitre cède :

- * Une quantité d'énergie par convection Q_{cva} vers le milieu ambiant:

$$Q_{cva} = h_{cva} \cdot A_v \cdot (T_{ve} - T_a) \quad (II.9)$$

- * Une quantité d'énergie par rayonnement Q_{rvc} vers le ciel:

$$Q_{rvc} = h_{rvc} \cdot A_v \cdot (T_{ve} - T_c) \quad (II.10)$$

-L'absorbeur reçoit :

- * Une puissance rayonnée par le soleil, transmise par la vitre et absorbée par l'absorbeur

Q_{ab} donnée par l'équation suivante:

$$Q_{ab} = \alpha_{ab} \cdot \tau_v \cdot G \cdot A_{ab} \quad (II.11)$$

α_{ab} : absorptivité de l'absorbeur.

τ_v : transmissivité de la vitre.

A_{ab} : surface de l'absorbeur.

-L'absorbeur cède :

- * Une quantité d'énergie par convection au fluide de travail Q_{caf} :

$$Q_{caf} = h_{caf} \cdot A_{fa} \cdot (T_{ab} - T_f) \quad (II.12)$$

- * Une quantité d'énergie par convection Q_{cav} à la vitre (équation II.8):

$$Q_{cav} = h_{cav} \cdot A_v \cdot (T_{ab} - T_{vi}) \quad (II.13)$$

- * Une quantité d'énergie par rayonnement Q_{rav} à la vitre (équation II.7):

$$Q_{rav} = h_{rav} \cdot A_v \cdot (T_{ab} - T_{vi})$$

* Une quantité d'énergie par conduction Q_{cdai} à l'isolant:

$$Q_{cdai} = (T_{ab} - T_{ii})/\varphi_1 + (T_{ab} + T_{il})/\varphi_2 \quad (II.14)$$

φ_1 et φ_2 sont exprimées par :

$$\varphi_1 : (e_{ab} / S_{abi} \cdot k_i) + (e_i / S_{abi} \cdot k_{ab}) \quad (II.15)$$

$$\varphi_2 : (e_{ab} / S_{abil} \cdot k_{il}) + (e_i / S_{abil} \cdot k_{ab}) \quad (II.16)$$

Q_{cdai} : quantité de chaleur échangée par conduction entre l'absorbeur et l'isolant.

T_{ab} : température de l'absorbeur.

T_{ii} : température de la face intérieure de l'isolant.

T_{il} : température de l'isolant latéral.

e_{ab} : épaisseur de l'absorbeur.

S_{abi} : surface de contact entre l'absorbeur et l'isolant horizontal.

S_{abil} : surface de contact entre l'absorbeur et l'isolant latéral.

K_i : conductivité thermique de l'isolant horizontal.

e_i : épaisseur de l'isolant horizontal.

e_{il} : épaisseur de l'isolant latéral.

K_{ab} : conductivité thermique de l'absorbeur.

K_{il} : conductivité thermique de l'isolant latéral.

-Le fluide reçoit :

* Une quantité d'énergie par convection Q_{caf} de l'absorbeur (équation II.12).

Le fluide cède :

* Une quantité d'énergie par convection Q_{cfi} à l'isolant :

$$Q_{cfi} = h_{cfi} \cdot A_{fi} \cdot (T_f - T_{ii}). \quad (II.17)$$

-L'isolant reçoit :

* Une quantité d'énergie par convection Q_{cfi} cédée par le fluide caloporteur (équation II.17).

* Une quantité d'énergie par conduction Q_{cdai} cédée par l'absorbeur (équation II.14).

-L'isolant cède :

* Une quantité d'énergie par rayonnement Q_{ris} au sol :

$$Q_{ris} = h_{ris} \cdot A_i \cdot (T_{ie} - T_s) \quad (II.18)$$

* Une quantité d'énergie par convection Q_{cia} au milieu ambiant :

$$Q_{cia} = h_{cia} \cdot A_i \cdot (T_{ie} - T_a) \quad (II.19)$$

II.4.3.1 Le bilan thermique du capteur en régime permanent

Il est nécessaire d'avancer les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le régime de l'écoulement est quasi stationnaire;
- La température du ciel est uniforme;
- La voûte céleste est assimilée à un corps noir pour de grandes longueurs d'ondes;
- Les propriétés des matériaux du capteur sont supposées constantes par rapport à la Température;
- La température du vitrage est uniforme;
- La vitesse d'écoulement et la distribution de la température sont unidimensionnelles;
- La construction du capteur est uniforme;
- L'effet de la température suivant l'axe des z est négligeable car la plaque est supposé Très mince ;
- Le régime est établi;
- L'effet d'ombre est négligeable;
- La couverture transparente est nette de toute poussière ou autre saleté;
- La température de l'absorbeur est uniforme;
- La température du sol est supposée égale à la température ambiante;
- La température de la plaque absorbante est supposée égale à Celle des tubes:

• Bilan thermique au niveau de la face extérieure de la vitre :

$$P_v/2 + k_v/e_v = Q_{cva} + Q_{rvc} \quad (II.20)$$

k_v : conductivité thermique de la vitre

e_v : épaisseur de la vitre.

• Bilan thermique au niveau du côté intérieur de la vitre

$$P_v/2 = Q_{rav} + Q_{cav} = k_v/e_v \quad (II.21)$$

- **Bilan thermique au niveau l'absorbeur**

$$P_{ab} = Q_{caf} + Q_{cav} + Q_{rav} + Q_{cdai} \quad (II.22)$$

- **Bilan thermique au niveau du fluide caloporteur**

$$Q_{caf} = Q_{cfi} \quad (II.23)$$

- **Bilan thermique au niveau de la face intérieure de l'isolant**

$$k_i/e_i = Q_{cfi} + Q_{cdai} \quad (II.24)$$

k_i : conductivité thermique de l'isolant.

e_i : épaisseur de l'isolant.

- **Bilan thermique au niveau de la face extérieure de l'isolant**

$$k_i/e_i = Q_{ris} + Q_{cia} \quad (II.25)$$

Après l'établissement du bilan thermique du capteur solaire en régime permanent, on a obtenu Un système de six équations à résoudre par la méthode itérative de Gauss-Seidel.

II.4.4. Rendement instantané du capteur :

Le rendement instantané est définit comme étant le rapport de la puissance thermique utile Récupérée par le fluide caloporteur (P_u) et la puissance solaire arrivant sur le plan incliné du Capteur (P_{ab}).

Selon, la norme C.E.C stipule que l'étude la plus significative des performances thermiques d'un capteur plan est de déterminer son rendement instantané donné par la relation suivante :

$$\eta_i = P_u/P_{ab} = P_u/A_c . G \quad (II.26)$$

P_{ab} : la puissance solaire arrivant sur le capteur.

P_u : la puissance utile récupérée par le fluide caloporteur.

A_c : surface du capteur.

G : flux solaire global incident.

* Le rendement instantané du capteur en fonction du débit massique est donné par :

$$\eta_i = m . C_p . (T_{fs} - T_{fe})/A_c . G \quad (II.27)$$

Avec,

m : débit massique du fluide caloporteur

C_p : chaleur spécifique de l'eau.

T_{fs} : température de sortie du fluide.

T_{fe} : température d'entrée du fluide.

A_c : surface du capteur solaire.

G : flux solaire global incident

III.1.Introduction :

Notre objectif est l'étude de l'effet de stockage de la chaleur dans un boîtier d'huile intégrée dans le capteur solaire plan sur le rendement instantané de ce dernier.

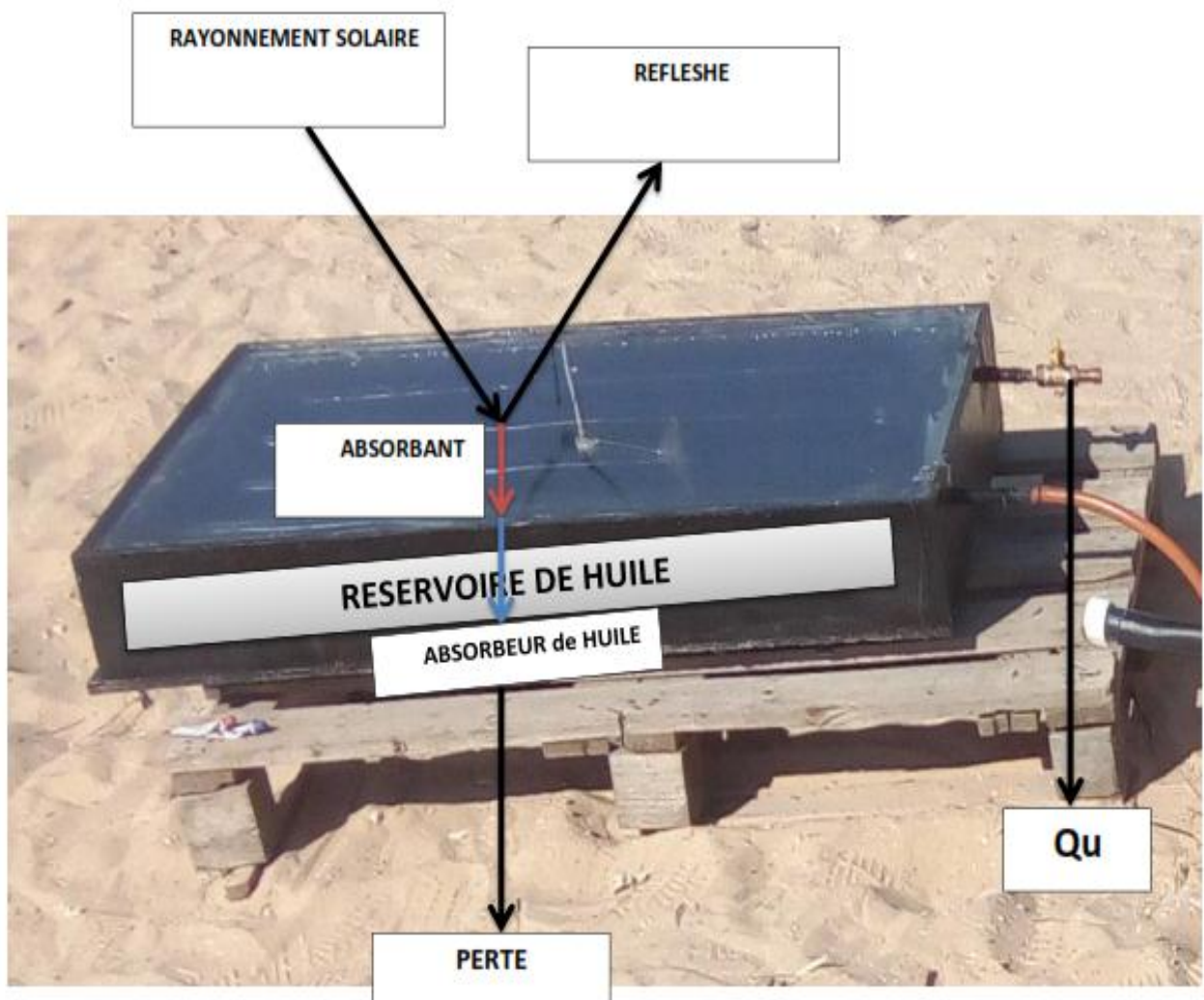
Ce capteur réalisé comme une bonc d'essai dans Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued.

Partie I : l'appareil de mesure

III.2. Dispositif expérimental :

III.2.1 Description du banc d'essai :

Le banc d'essai a été réalisé au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Eloued . Un site situé au sud Algérien à une latitude 31° - 34° , une longitude de 6° - 8° et une altitude de 80m. Il est caractérisé par un ensoleillement très important.



FigureIII.1 : Représentation du capteur solaire plan.

Les caractéristiques du capteur sont données au tableau III.1.

Tableau III.1 : Caractéristiques du capteur. [8]

Paramètre	Caractéristique
Cadre extérieur	Caractéristique
Dos du capteur	Profile de bois
Isolation arrière	Tôle galvanisée $\varnothing 0,3\text{mm}$
Isolation latérale	Polystyrène, épaisseur=40 mm
Absorbeur	Polystyrène, épaisseur=40mm
Tuyaux de l'absorbeur	Ailette en cuivre $\varnothing = 0.3\text{mm}$
Couverture	Tuyaux en cuivre, $\varnothing 16\text{mm}$
Matériel d'étanchéité	Verre Trempe, épaisseur=4mm

III.3. Les étapes de l'installation du capteur solaire plan :

Chaque ensemble capteur est constitué :

- D'une couverture transparente
- D'un absorbeur avec circuit échangeur et revêtement de surface
- D'une isolation thermique sur les côtés et à l'arrière de l'absorbeur
- D'un cadre et d'un coffre.

Nous allons étudier chaque élément en particulier, en donnant les indications nécessaires pour réaliser ou choisir un bon capteur.

✓ 1^{er} étape :



✓ 2^{eme} etape :



✓ 3^{eme} etape



✓ 4^{eme} etape :



III.4. Paramètres mesurés et instruments de mesure :

Pour déterminer les performances instantanées du capteur solaire plan à eau, le rendement instantané dans notre cas ; un certain nombre de paramètres doivent être mesurés. Les différents paramètres mesurés et les instruments de mesure utilisés sont décrits (tableau III.2).

Tableau III .2 : Paramètres mesurés et instruments de mesure.[8]

Paramètre	Instrument	Caractéristiques
Températures	Thermocouples	Type C° (Cromel-Alumel)
Rayonnement solaire global	Le logiciel	

III.4.1. Mesure des températures :

Trois mesures de température sont nécessaires pour les essais du capteur solaire. Il s'agit de la température du fluide à l'entrée, à la sortie du capteur et la température de l'air ambiant. Les températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur sont mesurées à l'aide de thermocouples de type K (Alumel –Chromel) représentés en la figure 3.8, leurs précisions

est de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Ils sont plongés dans des doigts de gant qui baignent dans de l'huile minérale. La température de l'air ambiant est mesurée par la station-météo de l'unité.



Figure III. 2: Un thermocouple de type K

III.4.2. Mesure de l'éclairement global :

III.5. Présentation de logiciel de calcul de rayonnement :

Le logiciel est composé de trois interfaces simples et conviviales. La première interface permet à l'utilisateur de sélectionner et introduire tous les données géographiques (mois, nombre de jours, lieu, type de ciel, albédo du sol ou réflectivité du sol, angle d'inclinaison...etc.) ; en cliquant sur le bouton qui sélectionne le modèle de calcul, permet de visualiser les résultats (courbe d'évolution du rayonnement global en fonction de temps). [8]

III.5.1. Fenêtre de calcul du rayonnement solaire

La fenêtre de la figure (III.2) est utilisée pour calculer le rayonnement solaire globale du lever jusqu'au coucher du soleil, ainsi que le traçage des allures en fonction du temps. Pour choisir les données (mois, jour, type de ciel, lieu, albédo et le modèle de rayonnement) on utilise le combo Box talque le montre l'exemple suivant :

Albédo Sol recouvert de feuilles mortes

Modele de rayonnement

PERRIN DE BRICHAMBEAUT

PERRIN DE BRICHAMBEAUT

LIU JORDAN

-L'angle d'inclinaison choisi est saisi dans l'éditeur de texte

angle d'inclinaison 34,8

- Pour exécuter l'enchaînement de la procédure du calcul des

calculer et tracer

Données sélectionnées, il faut cliquer sur le bouton

- « calculer et tracer ».

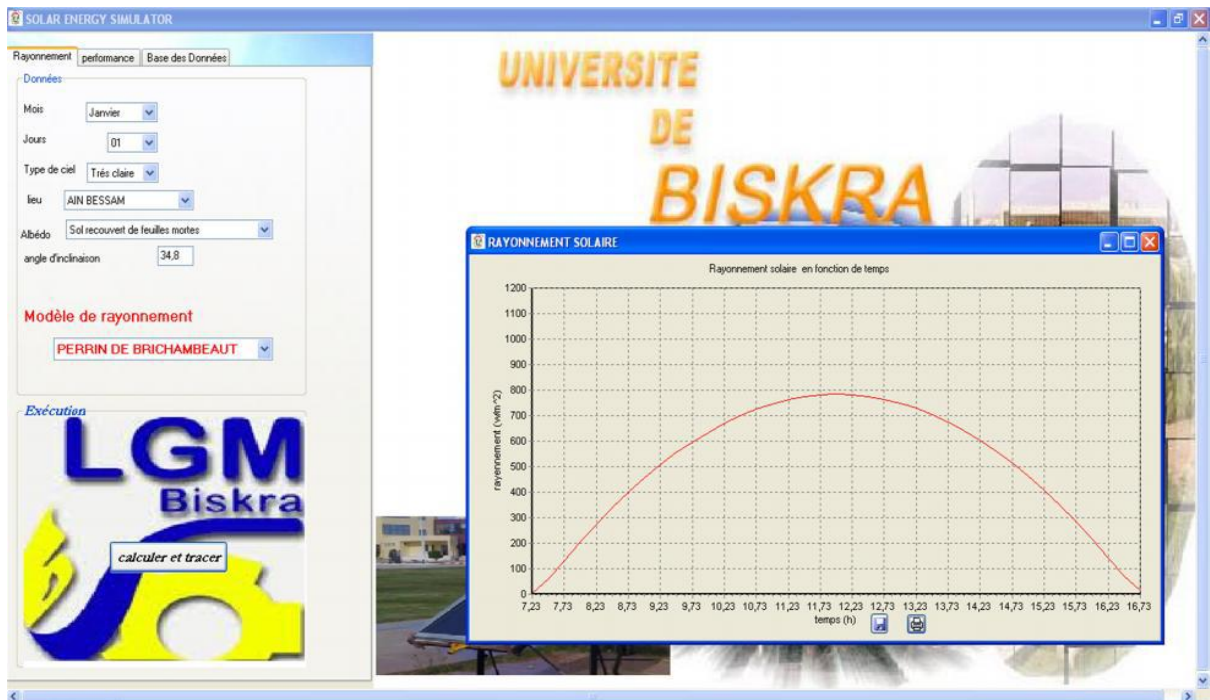


Figure .III.3: Fenêtre de calcul du rayonnement solaire.

III.6. Préparation des tests :

III.6.1. Détermination expérimentale de la superficie du capteur :

Les dimensions du capteur mesurées sont :

- ✓ Dimensions (globale) : 111cm X 61 cm.
- ✓ Dimensions (ouverture) : 101cm X 50cm.

Le calcul de la superficie a donné les résultats suivants :

- ✓ Surface (globale) : $6771 \text{ cm}^2 = 0.6771 \text{ m}^2$.
- ✓ Surface (d'ouverture) : $5050 \text{ cm}^2 = 0.5050 \text{ m}^2$.

III.6.2. Régulation expérimentale du débit massique :

Le débit massique des tests est déterminé par une méthode simple (artisanale), qui consiste à chronométrer le temps nécessaire pour remplir un réservoir de (1L ou 1.5L).

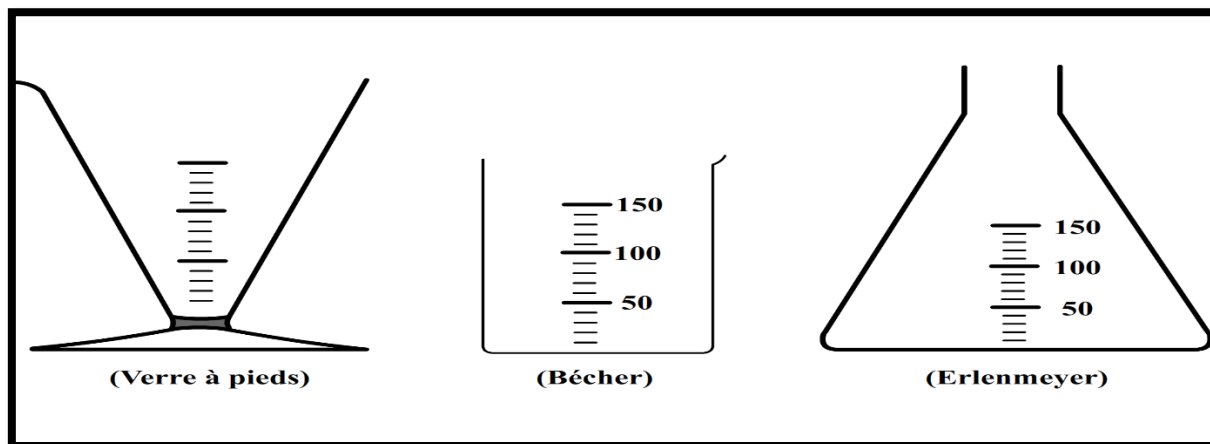


Figure III.4 : Méthode artisanale de mesure de débit (0-150cl)..[8]

III.6.3. Conditionnement préalable aux essais :

Les préparatifs suivants ont été effectués avant les tests :

- Le capteur a été vérifié pour détecter un éventuel dommage ou anomalie ;
- La couverture du capteur a été nettoyée avec le plus grand soin ;
- Le capteur a été exposé dans des conditions de ciel clair, sans nuage afin de déterminer sa caractéristique de performance réelle ;
- Le débit est stable.

Partie II : résultat et discussions.

Tableau .III.3 : mesure Lundi 06 Mars 2017

Temps	Lumière du soleil	T(C°) entrer	T1(C°) plaque	T2(C°) huile	T(C°) air
8:00	En partie couverte avec du l'air	27.5	28.3	26.3	17.0
8:30	En partie couverte avec du l'air	28.5	31.5	28.1	18.4
9:00	En partie couverte avec du l'air	28.5	34.7	29.5	19.9
9:30	En partie couverte avec du l'air	27.5	35.6	29.7	20.3
10:00	En partie couverte avec du l'air	29.3	39.8	34.0	21.0
10:30	En partie couverte avec du l'air	30.8	40.0	34.2	21.6
11:00	Air net	30.3	41.1	35.3	22.0

11:30	Air net	30.8	43.0	36.7	22.2
12:00	Air net	31.0	44.7	38.8	23.4
12:30	Air net	32.0	46.0	40.0	27.5
13:00	Air net	31.0	46.8	42.0	29.3
13:30	Air net	31.1	48.1	44.6	30.0
14:00	Air net	31.2	46.7	45.1	26.7
14:30	En partie couverte avec du l'air	31.4	45.2	44.3	26.9
15:00	En partie couverte avec du l'air	30.6	43.0	43.0	26.6
15:30	Air net	30.0	41.9	41.5	27.1

Tableau .III.4 : mesure Lundi 06 Mars 2017

temps	Rayonnement	η_{i1}	η_{i2}
8:00	450	0.074311111	0.111466667
8:30	575	0.218086957	0.029078261
9:00	675	0.383940741	0.061925926
9:30	775	0.436877419	0.118658065
10:00	850	0.516352941	0.231129412
10:30	900	0.427288889	0.148622222
11:00	1050	0.429942857	0.199047619
11:30	1075	0.474381395	0.229413953
12:00	1075	0.532706977	0.303293023
12:30	1050	0.557333333	0.31847619
13:00	1025	0.644331707	0.448585366
13:30	950	0.748	0.594
14:00	875	0.740457143	0.664022857
14:30	675	0.854577778	0.798844444
15:00	575	0.901426087	0.901426087
15:30	525	0.947466667	0.915619048

$$\eta_{i1} = m \cdot c_p \cdot (T_{s1} - T_e) / A_c \cdot G$$

$$\eta_{i2} = m \cdot c_p \cdot (T_{s2} - T_e) / A_c \cdot G$$

η_{i1} : rendement de capteur à plaque.

η_{i2} : rendement de capteur à huile.

m : débit massique du fluide caloporteur

C_p : chaleur spécifique de l'eau

T_{s1} : température de sortie

T_{s2} : température de sortie

T_e : température d'entrée

G : Rayonnement global incident.

A_c : Surface du capteur solaire plan.

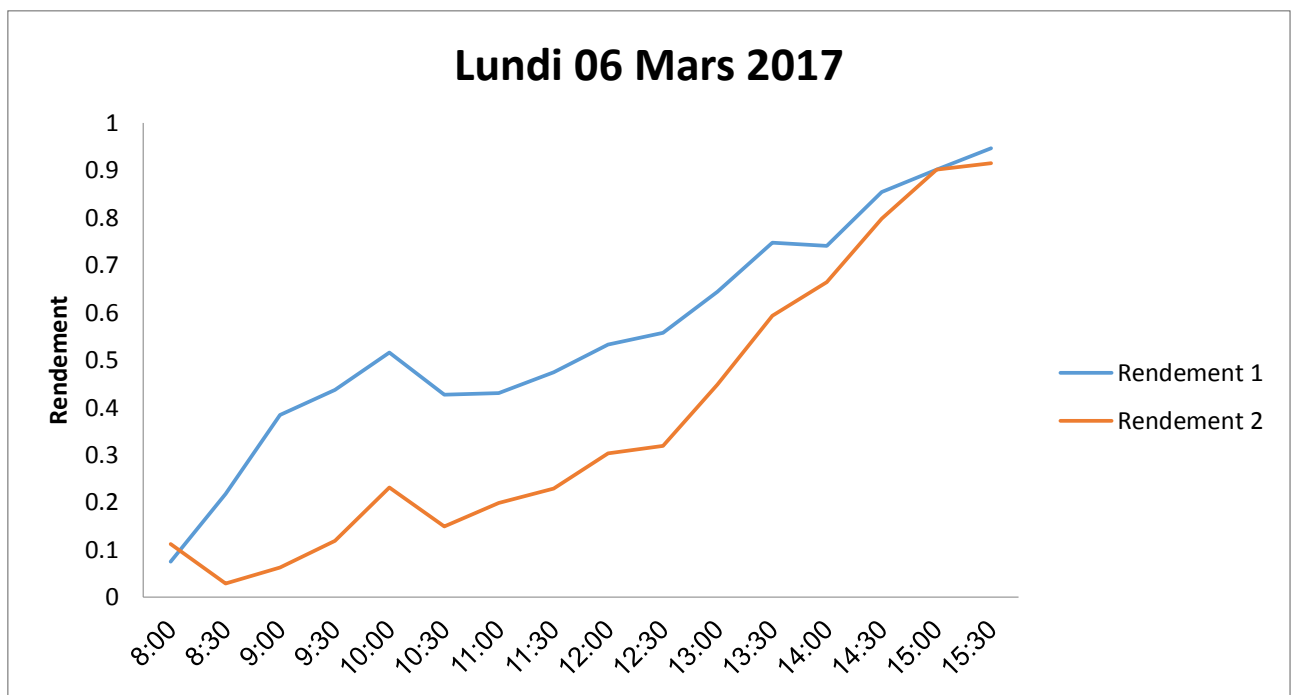


Figure III.5. Le rendement instantané (06-03-2017).

Le premier constat qu'on peut tirer de l'analyse de cette figure est que l'allure de la courbe décrivant l'évolution du rendement instantané théorique et l'allure de la courbe décrivant

L'évolution du rendement instantané expérimental sont identiques, chose qui nous permet d'affirmer que les résultats obtenus sont très satisfaisants.

Nous remarquons également que le rendement instantané commence à diminuer après avoir atteint son maximum (presque 98%) aux environs de 15h30 malgré l'augmentation de la température de sortie du fluide caloporteur, ceci est dû à l'augmentation des pertes thermiques vers le milieu ambiant extérieur.

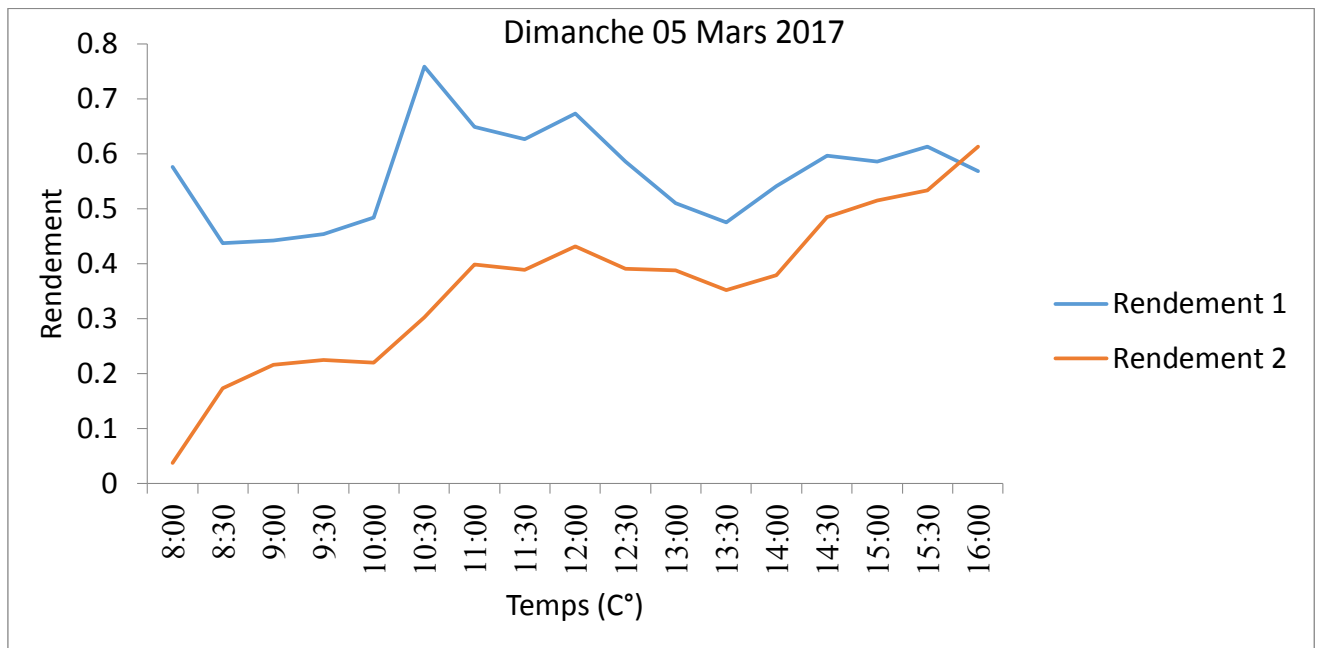


Figure III.6. Le rendement instantané (05-03-2017).

Le premier constat qu'on peut tirer de l'analyse de cette figure et que l'allure de la courbe décrivant l'évolution du rendement instantané théorique et l'allure de la courbe décrivant

L'évolution du rendement instantané expérimental sont identiques, chose qui nous permet d'affirmer que les résultats obtenus sont très satisfaisants.

Nous remarquons également que le rendement instantané commence à diminuer après avoir atteint son maximum (presque 78%) aux environs de 15h30 malgré l'augmentation de la température de sortie du fluide caloporteur, ceci est dû à l'augmentation des pertes thermiques vers le milieu ambiant extérieur.

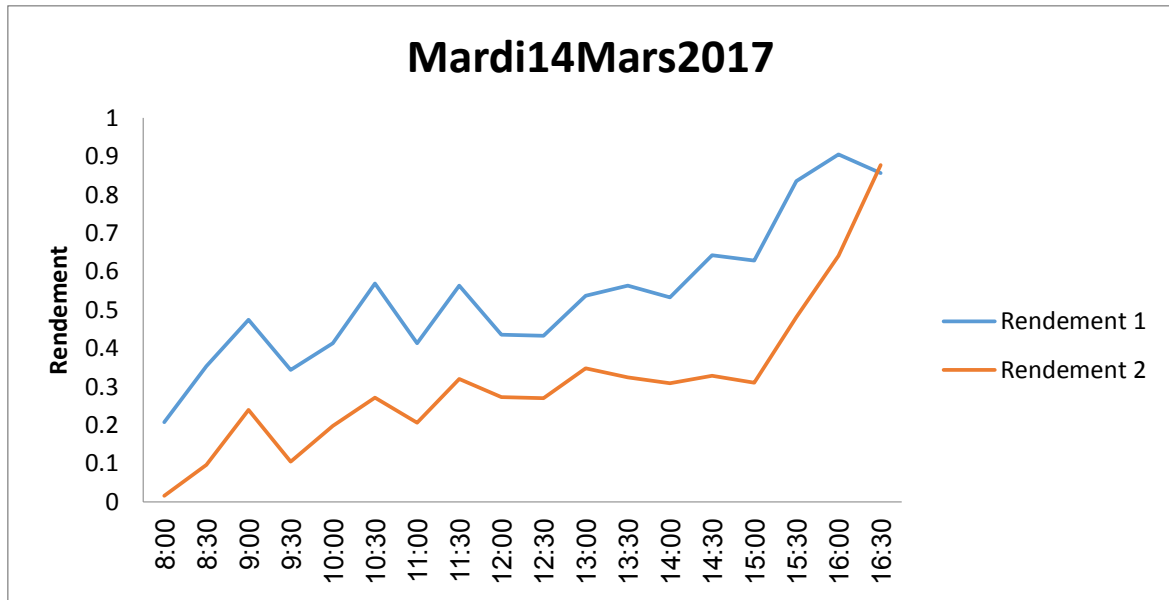


Figure III.7. Le rendement instantané (14-03-2017).

Le premier constat qu'on peut tirer de l'analyse de cette figure est que l'allure de la courbe décrivant l'évolution du rendement instantané théorique et l'allure de la courbe décrivant

L'évolution du rendement instantané expérimental sont identiques, chose qui nous permet d'affirmer que les résultats obtenus sont très satisfaisants.

Nous remarquons également que le rendement instantané commence à diminuer après avoir atteint son maximum (presque 90%) aux environs de 15h30 malgré l'augmentation de la température de sortie du fluide caloporteur, ceci est dû à l'augmentation des pertes thermiques vers le milieu ambiant extérieur.

Conclusion Générale :

Dans le cadre de ce travail, nous avons fait une étude théorique et expérimentale de deux Capteur solaire plans à eau dans le but de mettre en évidence l'influence de la couche de réservoir d'huile noire comme un absorbeur sur le rendement instantané de capteur.

Après avoir passé en revues quelques données astronomiques nécessaires pour toute l'étude de dispositifs solaire. Un bilan thermique du capteur solaire plans a été développé qui nous

Donne les différentes équations qui régissent le comportement thermique de ce dispositif en régime permanent, aussi que l'expression de son rendement instantané le dispositif solaire objet de notre étude, est un capteur à huile pour le chauffage d'eau réalise au sein de notre université (EUCHL) située à EL-OUED Tous les éléments qui le constituent ainsi que les appareils et le logiciel de mesure utilisés dans le test ont été présentés.

Les résultats obtenus mettent en évidence L'influence de huile comme un absorbeur sur le rendement instantané.

- [1] A. Labed, N. Moumami, K. Aoues, M. Zellouf, and A. Moumami, "Etude théorique et expérimentale des performances d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle," 2014
- [2] N. Mahfoudi, "Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide," Université Mohamed Khider-Biskra, 2016
- [3] A. Amina, "Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase," Université M'hamed Bougara de Boumerdès, 2011.
- [4] capteurs hybrides (PV/T) à eau intégrés dans B. Chaouki, "Production et performance des .le bâtiment," 2017
- [5] K. Aoues, N. Moumami, M. Zellouf, A. Moumami, A. Labed, E. Achouri, *et al.*, "Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air: Etude expérimentale dans la région de Biskra," *Revue des Energies renouvelables*, vol. 12, pp. 237.248, 2009
- [6] L. A. P. (Donia), "STOCKAGE DE CHALEUR : ENERGIE SOLAIRE ET AUTRES APPLICATIONS (HEAT STORAGE: SOLAR ENERGY AND OTHER APPLICATIONS)," .Année Scolaire 2009 -2010
- [7] V. KELNER, "Régulation solaire thermique et stockage de chaleur,* 2012*
- [8] BENKHELIFA-Abdelaziz.pdf, "Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire > plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur," /2012.
- [9] A. BRAHIMI, "Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau," Février 2016
- [10] Développement d'un logiciel de simulation des performances " , <^ .1 and ^/^J .Khider-Biskra, 2013 thermiques des capteurs solaires plans," Université Mohamed
- [11] B. Chaouachi* and e. S. Gabsi, "<Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire.pdf>," .21 Juin 2006
- [12] C. d. Développement, d. E. Renouvelable, and C. d. B. (Alger), "Etude de performances .d'un capteur solaire plan à eau," 2016
- [13] D. KHALED, "Etude théorique et expérimentale des performances d'un séchoir couplé à un capteur solaire plan à air," Université Mohamed Khider de Biskra, 2012

Résumé :

Compte tenu de l'épuisement des énergies usuelles conventionnelles et leur impact négatif sur l'homme et la nature il devient impératif d'utiliser des énergies propres non polluantes et gratuites comme l'énergie solaire. L'objectif de ce projet est d'utiliser cette énergie pour obtenir de l'eau chaude sanitaire (ECS) d'une maison solaire.

Dans le cadre de ce travail, nous allons nous intéresser à l'exploitation de l'énergie solaire par voie thermique en utilisant un capteur solaire plan pour la production de l'eau chaude.

La novation dans ce capteur est l'utilisation d'une couche d'huile usée comme un stockeur d'énergie pour améliorer le rendement thermique du capteur après la coucher du soleil.

Afin d'évaluer l'efficacité de ce système Nous allons comparer entre deux types de capteurs, pour le premier nous allons l'utiliser un réservoir d'huile usé au-dessous de plaque absorbante et le deuxième un capteur normal. LA réalisation et l'utilisation de deux capteurs seront en même conditions (dimensions, l'isolant, couvrent, vitrent, l'environnement...).

Après la réalisation de deux capteurs on va mesurer la température d'entrée et de sortie de chaque capteur à chaque une demi-heure Nous allons ensuite calculer le rendement instantané de chaque capteur.

Mots clés : stockage d'énergie, capteur solaire, huile usée, chauffe-eau solaire.

ملخص :

ونظرا لنضوب مستوى الطاقة التقليدية وتأثيرها السلبي على الإنسان والطبيعة يصبح من الضروري استخدام الطاقة غير الملوثة والحررة النظيفة مثل الطاقة الشمسية. والهدف من هذا المشروع هو استخدام هذه الطاقة لتسخين الماء في المنازل (DHW) من منزل الشمسية.

وكجزء من هذا العمل، ونحن سوف ننظر في استخدام الطاقة الشمسية الحرارية باستخدام خطة الطاقة الشمسية لإنتاج المياه الساخنة.

التجديد في هذا الاستشعار هو استخدام طبقة من النفايات النفطية كجهاز تخزين الطاقة لتحسين الكفاءة الحرارية من أجهزة الاستشعار بعد غروب الشمس.

لتقييم فعالية هذا النظام سنقارن بين نوعين من أجهزة الاستشعار، لأول مرة سنستخدم دبابة النفط يرتديها تحت لوحة امتصاص والثاني جهاز استشعار العادي. THE إنتاج واستخدام اثنين من أجهزة الاستشعار هي نفس الشروط (أبعاد، والعزل، والغطاء، vitrent والبيئة ...).

سيتم قياس بعد الانتهاء من اثنين من أجهزة الاستشعار من المدخلات والمخرجات درجة حرارة كل أجهزة الاستشعار في كل نصف ساعة ثم سنقوم بحساب الكفاءة لحظية من كل أجهزة الاستشعار.

كلمات البحث: تخزين الطاقة، جميع الطاقة الشمسية، وتستخدم النفط، سخان المياه بالطاقة الشمسية.