

Sommaire

CHAPITRE I : Gisement solaire

I.1 Introduction.....	13
I.2 Le Soleil	13
I.3 Nature de l'énergie solaire.....	16
I.4 Composante du rayonnement solaire.....	17
I.4.1 Solaire thermique	21
I.4.1.1Capteurs photothermiques	23
I.4.1.2 Effet photothermique (Principe de l'effet de serre)	23
I.4.2 Energie solaire thermodynamique	24
I.4.3 Solaires photovoltaïques	24
I.4.3.1 Principe de fonctionnement	25

CHAPITRE II : Classification des capteurs solaires thermiques

II.1Introduction	27
II.2 Les capteurs plans	27
II.2.1 Capteurs plan à air (SAC)	27
II.2.2 Capteur plan à eau (FPC)	28
II.2.2 moquette solaire.....	29
II.2.3 Capteur sous vide	29
II.4 Les capteurs solaires à concentration	31
II.4.1 Les capteurs paraboliques et sphériques.....	32
II.4.2 Les centrales solaires à tour	32

II.4.3 Les capteurs cylindro-paraboliques	34
II.4.4 Les captures solaires type Fresnel	34
II.4.5 Les capteurs à parabole composé (CPC)	35

CHAPITRE III : Matériaux à changement de phase

III.1 Stockage de l'énergie solaire thermique	36
III.1.1 Introduction	36
III.1.2 Stockage par chaleur sensible	37
III.1.3 Le stockage par chaleur latente	38
III.1.3.1 Les contraintes technologiques du stockage par chaleur latente	39
III.1.3.2 Les avantages du stockage par chaleur latente	39
III.2 Classification des matériaux à changement de phase	40
III.2.1 Les MCP inorganiques	41
III.2.2 Les MCP organiques	41
III.2.3 Les MCP eutectiques	41
III.3 Les applications des MCP dans l'industrie	42
a/ Le refroidissement électronique	43
b/ Autres applications	44
c/ Chauffage des serres avec stockage d'énergie à MCP	45

CHAPITRE IV : Position du problème

IV.1 Formulation mathématique	47
IV.1.1 Dans la région fluide	47
IV.1.1.1 Model dynamique	47
IV.1.1.1.1 Equation de conservation de la masse	47
IV.1.1.1.2 Equation de la quantité de mouvement	47
IV.1.1.2 Model thermique	47
IV.1.2.1 Equation de l'énergie	47
IV.1.2 Dans la région solide	47
IV.1.2.1 Equation de l'énergie	47

IV.1.2.2 Dans les sphères type MCP.....	48
IV.1.2.2.1 Equation de l'énergie.....	48
IV.2 Conditions initiales et aux limites.....	48
IV.2.1 Conditions initiales.....	48
IV.2.2 Conditions aux limites.....	48
IV.2.2.1 A la frontière des parois	48
IV.2.2.2 A la sortie du capteur	48
IV.2.2.3 A l'entrée du capteur.....	49
IV.3 L'équation de la variation de l'éclairement en fonction de temps.....	49
IV.4 L'équation de la variation de température ambiante en fonction de temps.....	49
IV.5 maillage.....	51

CHAPITRE V : Interprétation et discussions des résultats

V Interprétation et discussions des résultats	52
V.1 Introduction	52
V.2 La distribution de la température à l'intérieur des trois capteurs	52
V.2.1 distribution de la température au niveau des trois capteurs à 10h	53
V.2.2 distribution de la température au niveau des trois capteurs à 12h	54
V.2.3 distribution de la température au niveau des trois capteurs à 16h	55
V.2.4 distribution de la température au niveau des trois capteurs à 18h	56
V.2.1 distribution de la température au niveau des trois capteurs à 20h	57
V.2.1 distribution de la température au niveau des trois capteurs à 00h	58
V.3 L'évolution de la température à la sorties.....	61
V.3.1 Capteur sans milieu poreux.....	61
V.3.2 Capteur avec milieu poreux (gravier.....	61
V.3.3 Capteur avec milieu poreux (mcp	62
V.3 L'influence de la vitesse sur la température de la sortie.....	63
V.3.1 L'influence de la vitesse sur la température à 10h.....	64
V.3.2 L'influence de la vitesse sur la température à 16h.....	64

V.3.3 L'influence de la vitesse sur la température à 20h.....	65
Conclusion	66
Conclusion générale.....	67

Liste des tableaux

HAPITRE I : gisement solaire

Tableau I.1: Caractéristiques principales du soleil	11
Tableau I.2 : Emission du rayonnement solaire	14

HAPITRE III : Matériaux à changement de phase

Tableau III.1 : Comparaison entre différents milieux de stockage de l'énergie	40
Tableau III.2 : Certaines propriétés thermiques de certains MCP	42

HAPITRE IV : position du problème

Tableau IV.1 : dimensions du capteur	46
Tableau IV.2 : propriété thermophysique des matériaux utilisés dans les capteurs	52

Liste des figures

CHAPITRE I : gisement solaire

Figure I.1 : structure du soleil	14
Figure I. trajectoire de la terre	15
Figure I.2 : Répartition du rayonnement solaire	18
Figure I.3 : rayonnement solaire annuel	21
Figure I.4 : capteurs solaire thermique	22
Figure I.5 : Habitation écologique	22
Figure I.6 : Four Solaire à concentration	22
Figure I.7 : principe de l'effet de serre	24
Figure I.8 : Champ de panneaux photovoltaïques (capteurs), compose de cellules	26

CHAPITRE II : Classification des capteurs solaires thermiques

FigureII.1 : capteur plan à eau	28
FigureII.2 : moquette solaire	29
Figure II.3 :capteur sou vide	29
Figure II.4 : Capteurs sous vide à concentration	29
Figure II.1 : capteurs paraboliques et sphériques	32
Figure II.2 : centrales solaires à tour	33
Figure II.3 : captures cylindro-paraboliques	34
FigureII.4 : captures solaires type Fresnel	35

CHAPITRE VI : position du problème

Figure IV.1 : capteur solaire thermique avec milieu poreux (gravier ou MCP)	46
Figure IV.2 : variation de l'éclairement en fonction de temps	50
Figure IV.3 : variation de la température ambiante en fonction de temps	50
Figure IV.4 : maillage du capteur sans milieu poreux	51
Figure IV.5 : maillage du capteur avec milieu poreux	51

CHAPITRE VI : Interprétation et discussions des résultats

Figure V.1 : l'évolution de température dans le capteur sans milieu poreux à 10h	53
Figure V.2 : l'évolution de température dans le capteur avec milieu poreux (gravier) à 10h	53
Figure V.3 : l'évolution de température dans le capteur avec milieu poreux (mcp) à 10h	53
Figure V.4 : l'évolution de température dans le capteur sans milieu poreux à 12h	54
Figure V.5 : l'évolution de température dans le capteur avec milieu poreux (gravier) à 12h	54
Figure V.6 : l'évolution de température dans le capteur avec milieu poreux (mcp) à 12h	54
Figure V.7 : l'évolution de température dans le capteur sans milieu poreux à 16h	55
Figure V.8 : l'évolution de température dans le capteur avec milieu poreux (gravier) à 16h	55
Figure V.9 : l'évolution de température dans le capteur avec milieu poreux (mcp) à 16h	55
Figure V.10 : l'évolution de température dans le capteur sans milieu poreux à 18h	56

Figure V.11: l'évolution de température dans le capteur avec milieu poreux (gravier) à 18h	56
Figure V.12 : l'évolution de température dans le capteur avec milieu poreux (mcp) à 18h	56
Figure V.13 : l'évolution de température dans le capteur sans milieu poreux à 20h	57
Figure V.14 : l'évolution de température dans le capteur avec milieu poreux (gravier) à 20h	57
Figure V.15 : l'évolution de température dans le capteur avec milieu poreux (mcp) à 20h	57
Figure V.16 : l'évolution de température dans le capteur sans milieu poreux à 00h	58
Figure V.17: l'évolution de température dans le capteur avec milieu poreux (gravier) à 00h	58
Figure V.18 : l'évolution de température dans le capteur avec milieu poreux (mcp) à 00h	58
Figure V.20: l'évolution de la température à la sorties en fonction de temps Capteur sans milieu poreux	61
Figure V.21 : l'évolution de la température à la sorties en fonction du temps Capteur avec milieu poreux (gravier)	61
Figure V.22 : l'évolution de la température à la sorties en fonction du temps du capteur avec milieu poreux (mcp)	62

Liste des symboles

MCP :	matériau à changement de phase.
T :	la température.
E_0 :	la constante solaire.
J :	numéro du jour.
S :	le rayonnement direct.
D :	le rayonnement diffus.
G :	le rayonnement global.
Q :	flux de chaleur exprimée en (W).
A :	aire de la section, exprimée en (m ²).
λ :	conductivité thermique du solide exprimée en (W/mk).
dT/dx :	gradient de température dans la section d'aire A exprimée en (°C/m).
h :	coefficient d'échange de chaleur par convection exprimée en (W/m ² .K).
($T_p - T_\infty$) :	la différence de température de la paroi et du fluide respectivement (K).
ϵ_p :	facteur d'émissivité du corps.
σ :	constante de Stephan- Boltzman. $\sigma = 5.66 \cdot 10^{-8}$ en J/s m ² K ⁴ .
STS :	stockage thermique sensible.
ΔH :	variation d'enthalpie.
H_{finale} :	valeur d'enthalpie finale.
H_{initiale} :	valeur d'enthalpie initiale.
$C_{(T)}$:	capacité thermique massique.
m :	la masse.
SLT :	stockage thermique latent.
Δh_f :	l'enthalpie spécifique de fusion.
T_i :	la température initiale [K].
T_f :	la température de fusion.
C_p :	chaleur spécifique [J/Kg K].
$C_s (T)$:	chaleur spécifique du corps à l'état solide.
$C_l (T)$:	chaleur spécifique du corps à l'état liquide.



$L :$	chaleur latente de changement de phase [J/Kg].
$H :$	la hauteur du module PV.
$e_{vi} :$	épaisseur du vitrage.
$e_{si} :$	épaisseur du silicium.
$e_{AL} :$	épaisseur d'aluminium.
$e_{MCP} :$	épaisseur du MCP.
$\rho :$	masse volumique ρ [Kg/m ³].
$\lambda :$	conductivité thermique [W/mk].
$\alpha :$	coefficient d'absorption.
$\tau :$	transmittivité

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'énergie a toujours constitué un enjeu vital pour l'homme et les sociétés humaines. Les comportements humains sont fortement induits par sa disponibilité ou sa non-disponibilité, son abondance ou sa pénurie. De ces comportements vont découler de nouveaux enjeux, en particulier pour l'environnement et les équilibres socio-économiques. La prise de conscience de l'importance de ces enjeux (réchauffement climatique, épuisement des ressources, augmentation des coûts de la santé, ...) devrait, nous l'espérons, permettre de tendre vers une utilisation plus rationnelle de l'énergie, une optimisation des processus énergétiques que nous mettons en œuvre tous les jours. [1]

Les énergies renouvelables ont connu une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contre-choc de 1986, avant de retrouver un second souffle en 1998 à la suite de la signature du protocole de Kyoto, protocole qui prévoit notamment une baisse de 5.2% des émissions de gaz à effet de serre des pays riches sur la période 2002-2012 par rapport à 1990.[2]

La branche des composants solaires est un secteur actuellement en plein développement. Ce contexte a amené plusieurs pays à développer l'intégration des énergies renouvelables dans l'industrie, notamment par le biais de composants solaires. Ces technologies sont en effet bien placées par rapport aux autres filières énergétiques vis à vis de la plupart des critères de développement durable: ressources renouvelables, réduction des émissions et des déchets générés par les usines. Les dispositifs solaires ayant le plus d'impact sur l'environnement puisqu'ils produisent de l'énergie à partir de sources renouvelables et non polluantes. En d'autres termes, l'intensité du soleil ne diminue pas quand on pose des capteurs solaires, le vent ne s'arrête pas de souffler si on installe des éoliennes. En revanche les réserves de pétrole, de charbon, de gaz naturel et d'uranium diminuent irrémédiablement lorsqu'on les exploite. [1]

Il est admis que les composants solaires intégrés améliorent le bilan environnemental. Cependant, les concepteurs désirant intégrer de tels composants

INTRODUCTION GENERALE

ont besoin d'outils d'aide à la conception qui permettent d'argumenter des projets, de comparer des variantes, ou encore, si tel était le cas, de valider la conformité du projet par rapport à une norme existante.

L'énergie solaire peut être exploitée à l'aide des dispositifs qu'on l'appelle les capteurs solaires. Il existe plusieurs types de capteur, dans notre cas, nous intéressant par les capteurs plans précisément les capteurs plans à double passe avec milieu poreux qui peut interceptent le rayonnement solaire, afin de le converti en énergie calorifique utilisable directement ou après stockage par milieu poreux, comme va montrer notre étude.

Ce travail est subdivises en quatre chapitre :

Le premier chapitre est un aperçu général sur la source de l'énergie solaire.

Le deuxième chapitre englobe les différents capteurs et leur classification.

Les différents types de stockage et les matériaux utilisés dans le stockage d'énergie figurent dans le troisième chapitre.

Le domaine d'étude, les différentes équations qui gouvernent le phénomène étudié et les résultats obtenus par une simulation numérique avec le logiciel fluent sont présentés dans le dernier chapitre.

Finalement on résume l'essentiel des résultats dans la conclusion.

I Gisement solaire [3]

I.1 Introduction

L'énergie solaire est l'une des formes des énergies renouvelables (ENR) primaires (Soleil, eau douce, océans, vent, biomasse) pouvant être convertie en énergies finales (chaleur, électricité carburants). L'énergie solaire est à l'origine de toutes les énergies sur Terre à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. Elle est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse créée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires.

L'énergie solaire par son rayonnement, directement ou de manière diffuse à travers l'atmosphère est utilisée pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie alimentaire, énergie cinétique, énergie thermique, électricité ou biomasse. L'énergie solaire, transmise par rayonnement, rend possible la vie sur Terre par apport de chaleur et de lumière, permettant la présence d'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement du Soleil est aussi responsable des climats et de la plupart des phénomènes météorologiques observés sur notre planète.

I.2Le Soleil :

(Sol en latin, Helios ou Ἥλιος en grec) est l'étoile centrale du système solaire, de notre système planétaire. Il est composé d'hydrogène (74 % en masse ou 92,1 % en volume) et d'hélium (24 % en masse ou 7,8 % en volume). Autour de lui gravitent la Terre, 7 autres planètes, 5 planètes naines, des astéroïdes, des comètes et de la poussière. Le Soleil représente à lui seul 99,86 % de la masse du système solaire ainsi constitué (Jupiter représente presque tout le reste).

La densité thermique à la surface de la Terre est (en moyenne) à 99,97 % d'origine solaire. Les 0,03 % restants proviennent de la chaleur issue de la Terre elle-même. Comme pour tous les autres corps, ces flux thermiques sont continuellement émis dans l'espace, sous forme de rayonnement infrarouge, la Terre restant ainsi en «

quasi-équilibre».

Le Soleil fait partie d'une galaxie constituée de matière interstellaire et d'environ 200 à 400 milliards d'étoiles : la Voie lactée. Il se situe à 15 parsecs du plan équatorial du disque, et est distant de 8 600 parsecs (environ 25 000 années-lumière) du centre galactique.

Le demi-grand axe de l'orbite de la Terre autour du Soleil, 149 597 870 km, est la définition originale de l'unité astronomique (ua). Il faut 8 minutes (et une vingtaine de secondes) pour que la lumière du Soleil parvienne jusqu'à la Terre. Le symbole astronomique et astrologique du Soleil est un cercle avec un point en son centre

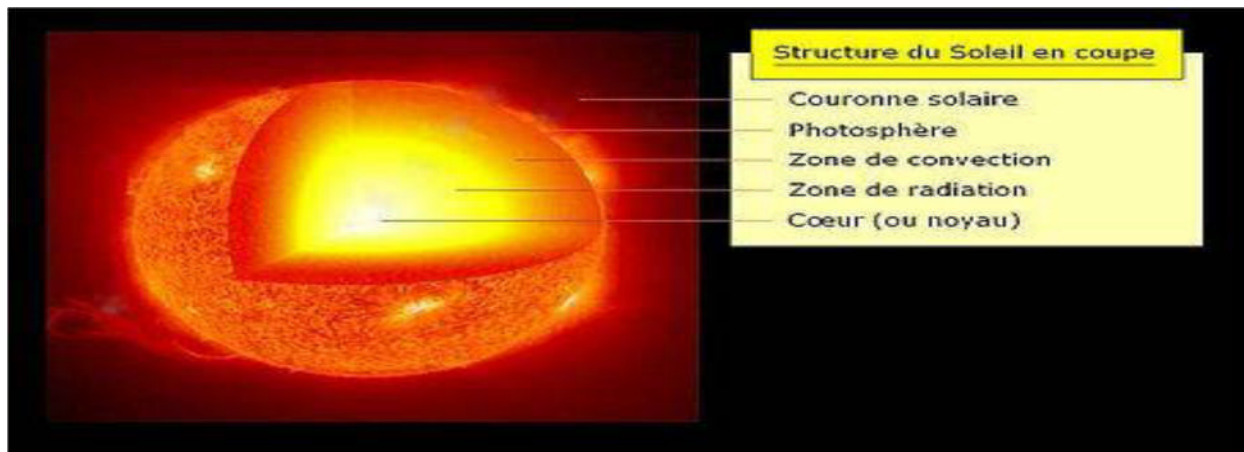
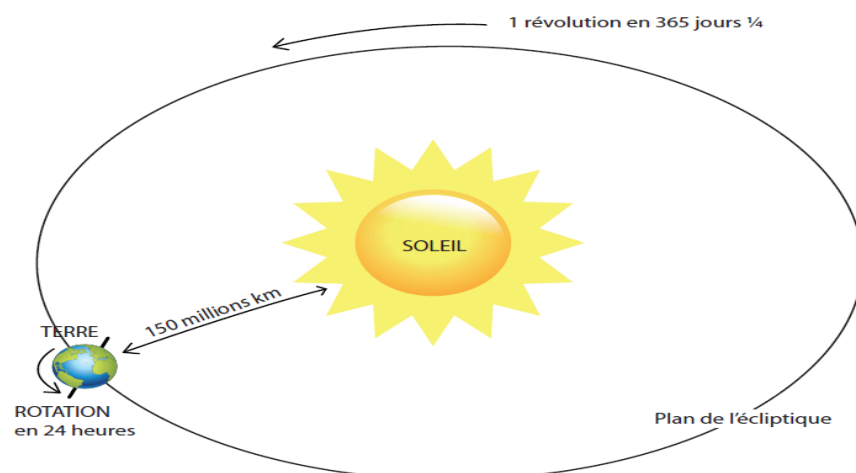


Figure I.1 : structure du soleil

Diamètre (km)	14×10^5
Masse (kg)	2×10^{30}
Surface (km ²)	6.09×10^{12}
Volume (km ³)	1.41×10^{18}
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	2.5×10^{47}

Tableau I.1:Caractéristiques principales du soleil



FigureI.2 :trajectoire de la terre

I.3 Nature de l'énergie solaire:

L'énergie solaire provient de la fusion nucléaire d'atomes (ou plutôt de noyaux d'atomes) d'hydrogène qui se produit au cœur du Soleil. Elle se propage dans le

système solaire et dans l'Univers sous la forme d'un rayonnement électromagnétique (photons) selon la théorie corpusculaire. La Terre est illuminée par le Soleil en permanence.

L'une des deux faces du globe terrestre se trouve privée d'énergie solaire pendant la nuit, en raison de la rotation de la Terre. La puissance solaire reçue en un point du globe varie en fonction de l'heure de la journée, de la saison et de la latitude du lieu considéré.

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

- la latitude, vers l'équateur l'angle d'incidence est proche de 90° donc la surface éclairée est plus petite et l'énergie est plus concentrée.
- la nébulosité (nuages), qui est importante à l'équateur et plus faible en milieu intertropical.

L'énergie solaire envoyée par le Soleil (fluctuations décennales, saisonnières, et même si certaines formes de vies au fond des océans peuvent s'en passer, la lumière du soleil est la première source d'énergie des écosystèmes terrestres, via la photosynthèse. Elle contrôle donc les cycles écogéobiologiques et le stockage fossile du carbone tels qu'ils existent depuis 3,7 milliards d'années. Elle joue aussi un rôle important en entretenant la couche d'ozone et en limitant la pullulation des microbes sensibles aux ultra-violets et/ou à l'infrarouge. Cette sensibilité est utilisée par certaines techniques de stérilisation. Elle contribue à certaines formes de pollution dites « photochimiques » (ozone troposphérique, oxydes d'azote) et inversement à dégrader (photodégradation) certains polluants de l'air, du sol superficiel ou de l'eau (certains pesticides présents dans l'air) par exemple. C'est encore la lumière qui via la durée du jour corrige les horloges biologiques animales, par la production de mélatonine qui est une hormone uniquement produite la nuit, chez la plupart des animaux. Chez les plantes, la durée du jour contrôle aussi, avec la température, l'apparition des bourgeons, feuilles, fleurs, ou l'ouverture ou la fermeture de fleurs. C'est pourquoi la présence de lumière artificielle dans l'environnement nocturne peut altérer le comportement ou les fonctions de certaines

espèces ou des écosystèmes, phénomène généralement décrit sous le nom de « pollution lumineuse ».

I.4. Composante du rayonnement solaire:

Le rayonnement qui nous parvient du soleil est émis par sa surface extérieure dont la température est d'environ 6000 K. A une telle température, 40% de l'énergie est émise dans le domaine visible (gamme de longueur d'onde allant de 0,3 μm (violet -bleu) à 0,7 μm (rouge)). La décomposition du rayonnement solaire peut être réalisée en projetant un faisceau lumineux sur un prisme de verre ou sur un réseau de diffraction. Tout un éventail de couleurs apparaît, du bleu au rouge en passant par le vert et le jaune. Chacune de ces couleurs est associée à un rayonnement d'une certaine longueur d'onde. William Herschell (Vers 1800) qui étudiait le rayonnement solaire, avait placé un thermomètre derrière un tel prisme. Il s'aperçut qu'il indiquait une élévation de température (et donc qu'il recevait de l'énergie) non seulement dans le domaine visible mais également dans la région au-delà du rouge. Ce fut la découverte du rayonnement infrarouge qui représente 50% du rayonnement émis par le soleil. Les 10% restant du rayonnement solaire total sont émis à l'opposé du domaine visible, à des longueurs d'onde plus petites que celles du violet (l'ultra-violet).

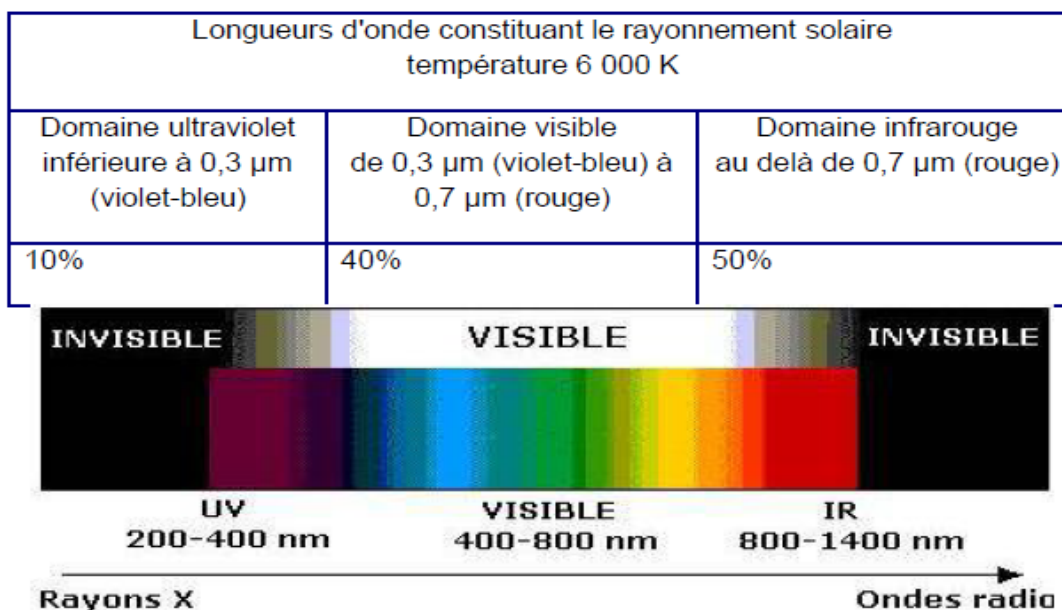


Tableau I.1 : Emission du rayonnement solaire



Figure I.2 : Répartition du rayonnement solaire

La lumière désigne les ondes électromagnétiques visibles par l'œil humain, c'est-à-dire comprises dans des longueurs d'onde de 0,38 à 0,78 micron (380 nm (violet) à 780 nm(rouge) , le symbole nm désigne le nanomètre. La lumière est intimement liée à la notion de couleur. C'est Newton qui propose pour la première fois au XVIIe siècle un cercle des couleurs chromatiques basé sur la décomposition de la lumière blanche.

Outre la lumière visible, par extension, on appelle parfois « lumière » d'autres ondes électromagnétiques, telles que celles situées dans les domaines infrarouge et ultraviolet.

Le rayonnement infrarouge (IR) est un rayonnement électromagnétique d'une longueur d'onde supérieure à celle de la lumière visible mais plus courte que celle des micro-ondes. Le nom signifie « en deçà du rouge » (du latin infra : « plus bas »), car l'infrarouge est une onde électromagnétique de fréquence inférieure à celle

de la lumière rouge (et donc de longueur d'onde supérieure à celle du rouge qui va de 500 à 780 nm. La longueur d'onde de l'infrarouge est comprise entre 780 nm et 1 000 000 nm. L'infrarouge est subdivisé en IR proche (PIR : de 0,78 μm à 1,4 μm), IR moyen (MIR: de 1,4 à 3 μm) et IR lointain (de 3 μm à 1 000 μm). Cette classification n'est cependant pas universelle : les frontières varient d'un domaine de compétence à l'autre sans que l'on ne puisse donner raison à qui que ce soit. Le découpage peut être lié à la longueur d'onde (ou à la fréquence) des émetteurs, des récepteurs (détecteurs), ou encore aux bandes de transmission atmosphérique. L'infrarouge est associé à la chaleur car, à température ambiante ordinaire, les objets émettent spontanément des radiations dans le domaine infrarouge, la relation est modélisée par la loi du rayonnement du corps noir dite aussi loi de Planck. La longueur d'onde du maximum d'émission d'un corps noir porté à une température absolue T (en kelvin) est donnée par la relation $2\,898/T$ connue sous le nom de loi du déplacement de Wien. Cela signifie qu'à température ambiante ordinaire (T aux environs de 300 K), le maximum d'émission se situe aux alentours de 10 μm , la plage concernée étant 8-13 μm . Sur la terre, un télescope observant dans cette gamme de longueur d'onde serait donc aveuglé par le fond thermique émis par les objets environnants, c'est pourquoi on envoie les télescopes infrarouges dans l'espace. Cette association entre l'infrarouge et la chaleur n'est cependant due qu'à la gamme de température observée sur la terre. Il est parfaitement possible de générer un rayonnement infrarouge qui ne soit pas thermique, c'est-à-dire dont le spectre ne soit pas celui du corps noir, par exemple, les diodes électroluminescentes utilisées dans les télécommandes « n'émettent pas de chaleur ».

Le rayonnement solaire au sol se divise en plusieurs rayonnements, directs, diffus, réfléchis et globale ; à partir des conditions physiques quelque soit l'atmosphère (les caractéristiques de l'atmosphère soit massique ou thermique).à travers l'année.

Rayonnement direct : C'est le rayonnement solaire qui se forme de rayons parallèles provenant du soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

Rayonnement diffus : C'est une partie du rayonnement du soleil qui a subi de multiples réflexions (dispersion) par les molécules et les aérosols de l'atmosphère ; pour un observateur au sol, le rayonnement diffus est un ensemble des directions rayonnées.

Rayonnement réfléchi : C'est le rayonnement qui provient du sol par suite à la réflexion ; cette composante dépend de la nature du sol et de sa couleur.

Les techniques pour capter directement une partie de cette énergie sont disponibles et sont

constamment améliorées. On peut distinguer :

- Solaire thermique
- Solaire photovoltaïque
- Solaire thermodynamique

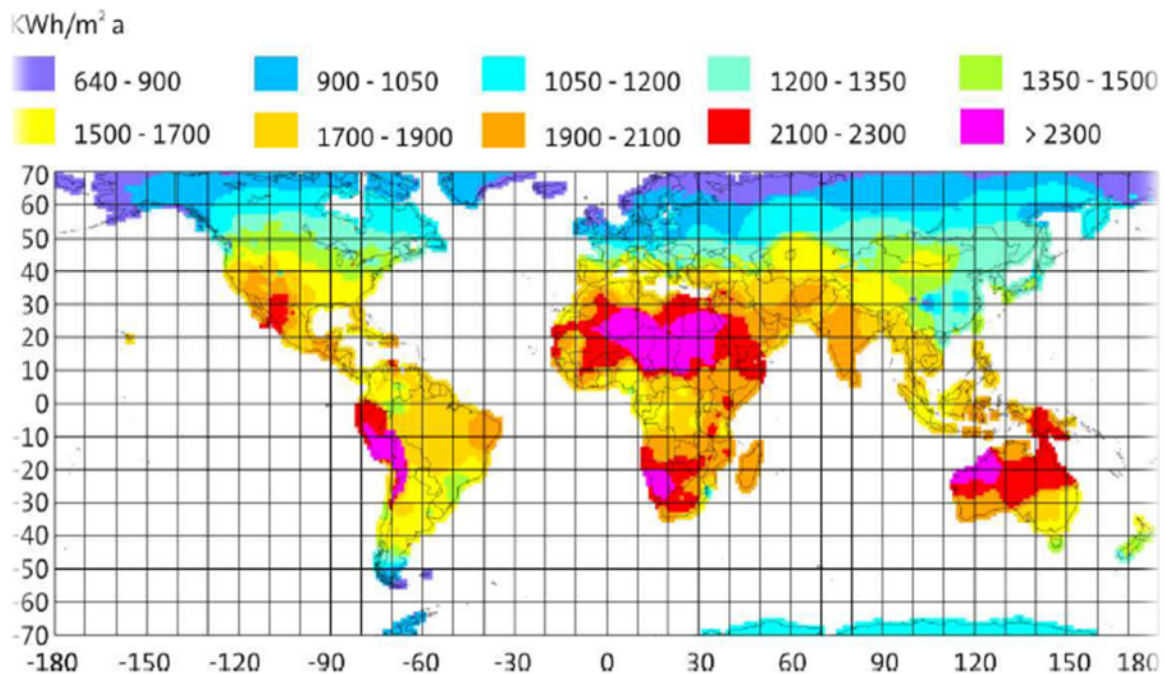


Figure I.3 : rayonnement solaire annuel.[4]

I.4.1 Solaire thermique

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire. La chaleur utilise une onde électromagnétique propulsée par des photons lesquels sont des quantas d'énergie résultant de l'interaction électrons-protons. La conversion thermique s'effectue dans un capteur solaire thermique (ou capteur héliothermique ou panneaux solaires thermiques). C'est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du soleil en convertissant la lumière en chaleur et la transmettre à un fluide caloporteur liquide (eau ou antigel ou air). Le capteur thermique est désigné comme capteur photothermique.



Figure I.4: capteurs solaire thermique. [3]

Le rayonnement se décline de différentesfaçons :

- en usage direct de la chaleur (basse température): chauffe-eau, chauffages solaires, cuisson solaire, séchage solaire.
- en usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage : climatisation solaire centrales solaires thermodynamiques.
- Concentration solaire (haute température), fours solaires.



Figure I.5 : Habitation écologique**Figure I.6 : Four Solaire à concentration.** [3]

I.4.1.1Capteurs photothermiques :

Le solaire thermique actif permet de récupérer la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, parfois de l'air, le plus souvent de l'eau, par la mise en œuvre de capteurs solaires.

Ces techniques peuvent assurer la production d'eau chaude sanitaire ou d'eau distillée, le chauffage des piscines et des habitations ainsi que le séchage de céréales, par exemple.

Un capteur solaire photothermique est compose des éléments suivants:

- le corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant, (absorbeur) en plaque ou tube en forme de serpentin.
- une couverture transparente (face avant, exposée au rayonnement) qui assure l'effet de serre.
- un isolant thermique (dos et cotes non exposes), pour diminuer les échanges thermiques avec le milieu extérieur.
- un système de refroidissement par le fluide caloporteur,

- Subsidiairement un coffrage étanche a l'eau sous forme de boitier et un système de support mécanique de l'ensemble.

I.4.1.2 Effet photothermique (Principe de l'effet de serre) :

Le rayonnement solaire (figure), symbolise par les flèches jaune, ne traverse pas entièrement le vitrage **V** du capteur car une petite partie (**Pr1**) est réfléchié par la vitre, surtout si l'angle d'incidence est important . Malgré l'excellente transparence du verre, une petite partie (**Pv1**) de l'énergie reçue sera absorbée par le verre. le rayonnement reçue par l'absorbeur **a**, une partie(**Pd**) sera réfléchi ou communiquée a l'air ambiant par convection. Une partie (**Pr2**) de **Pd** va traverser la vitre et sera perdue définitivement, une autre partie (**Pv2**) sera absorbée par la vitre et le reste retournera vers l'absorbeur (**Pa2**). On négligera les pertes au travers de l'isolant **i**.

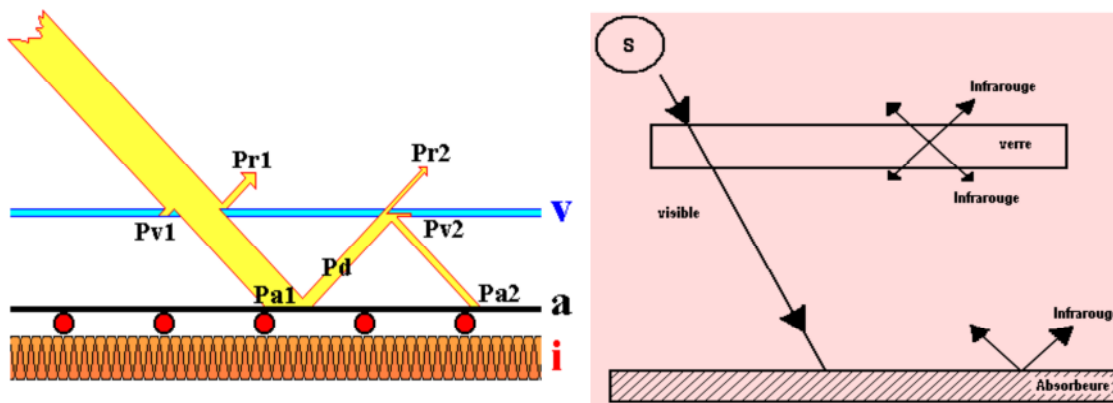


Figure I.7: principe de l'effet de serre.

I.4.2 Energie solaire thermodynamique

L'énergie solaire thermodynamique est une technique solaire qui utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité, ou éventuellement directement du travail mécanique (le terme solaire mécanique est alors employé), sur le même principe qu'une centrale électrique classique (production de vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée). Centrale solaire thermodynamique.

On désigne par « solaire thermodynamique » l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis celle-ci en énergie mécanique (et électrique) à travers un cycle thermodynamique.

I.4.3 Solaires photovoltaïques

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie, elle produit de l'électricité à partir du rayonnement solaire. L'énergie solaire étant une énergie renouvelable, l'énergie solaire photovoltaïque l'est aussi.

Le terme photovoltaïque désigne indifféremment le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - et/ou la technologie associée.

La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui est la base des installations produisant cette énergie. Elle fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre-elles sur un module solaire photovoltaïque, plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être stockée, consommée sur place ou servir à l'alimentation d'un réseau de distribution.

Une cellule photovoltaïque (ou « photo-galvanique ») est un composant électronique qui, expose à la lumière (photons), génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est fonction de la lumière incidente. L'électricité produite est fonction de l'éclairement, la cellule photovoltaïque produit un courant continu.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de *semi-conducteurs*, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autre semi-conducteurs : sulfure de cadmium (CdS), tellurure de cadmium (CdTe), etc. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques, rondes ou carrées, d'une dizaine de centimètres de cote, prends-en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques (ou "panneaux solaires"), en fonction de la puissance recherchée.

I.4.3.1 Principe de fonctionnement

Dans un semi-conducteur expose à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant au passage un "trou". Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se replacer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule

photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner simplement en son sein : ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme une pile.



Figure I.8: Champ de panneaux photovoltaïques (capteurs), composés de cellule

II.1 Introduction

Les capteurs solaires sont des échangeurs de chaleur qui fonctionnent à partir d'une source radiante le soleil et un fluide appelé fluides caloporteurs. Leur 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 des capteurs 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. Les premiers chauffe-eau solaires apparaissent en 1910 en Californie.

Dans ce chapitre on site les différents capteurs solaires thermiques et leur classification

II.2 Les capteurs plans :

Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150°C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil. Le niveau relativement bas de la température du capteur plan est dû à la réémission par rayonnement du récepteur, et les pertes de chaleur périphérie du capteur.

Il existe trois types de capteurs solaires plans : les capteurs à air, à eau et sous vide.

II.2.1 Capteurs plan à air (SAC) :

Ils sont utilisés pour le chauffage direct de l'air, généralement pour le préchauffage de l'air neuf. Ils sont utilisés lorsque la température de fonctionnement doit pas dépassée (70°C), car le rendement baisse fortement avec l'augmentation de la température de l'air caloporteur. L'avantage de ces capteurs se présente dans leur faible coût ainsi que la faible complexité d'installation. Des ailettes sont dessinées dans l'absorbeur pour augmenter le coefficient d'échange convectif entre le fluide caloporteur (l'air) et l'absorbeur.

II.2.2 Capteur plan à eau (FPC) :

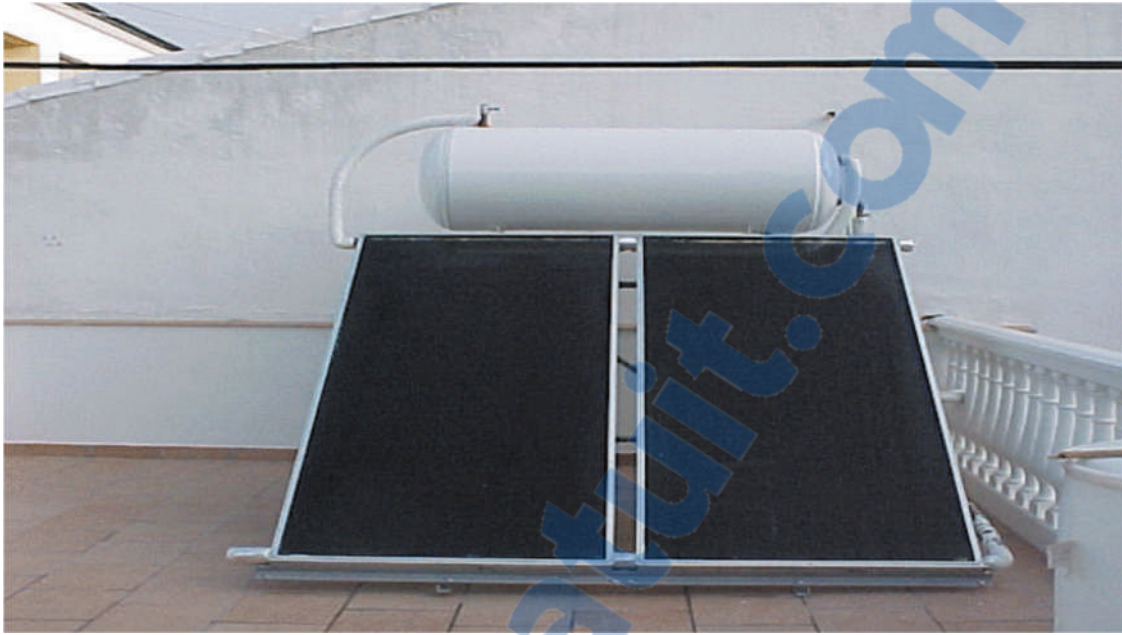


Figure II.1 : capteur plan à eau

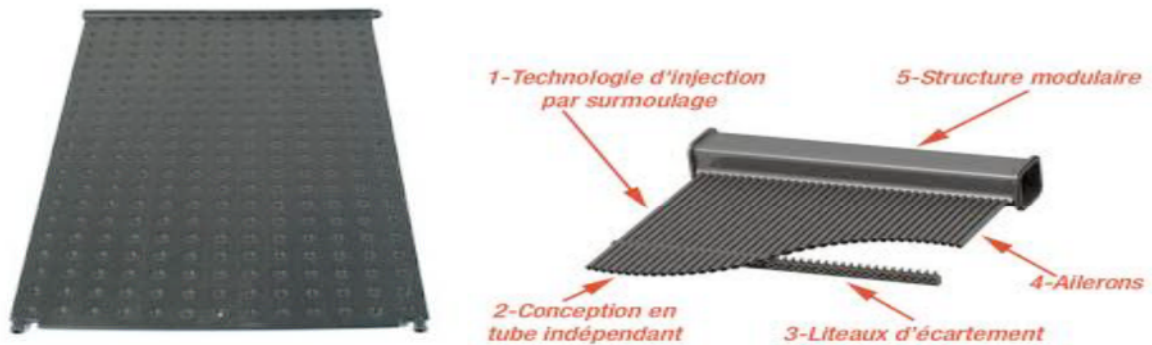
Le capteur plan à eau est constitué d'une plaque de verre sous laquelle est situé des tuyaux contenant l'eau et de l'antigel. Ce tuyau repose sur une plaque isolante (isolation thermique) peinte en noir afin d'avoir une absorption de l'énergie solaire maximale. En effet, la couleur noire est la couleur qui absorbe le plus l'énergie solaire (le blanc étant celui qui l'absorbe le moins). Le principe de ce capteur est bien connu par les agriculteurs : c'est le principe de l'effet de serre. Ils s'en servent pour cultiver des plantes sous serres dans les régions froides. Le capteur plan fonctionne donc comme une serre : le rayonnement solaire traverse le vitrage, il est absorbé par le revêtement noir qui s'échauffe, afin de transmettre sa chaleur au fluide (eau et antigel). L'antigel est utilisé pour éviter le gel de l'eau pendant l'hiver. Ces capteurs permettent de chauffer un liquide caloporteur (généralement un mélange eau-glycol). Ils sont utilisés généralement pour la production d'eau chaude sanitaire. Un absorbeur sélectif, ainsi qu'une vitre en verre technique permettent de garder un bon rendement avec des températures de l'ordre de 80°C.

MOQUETTE SOLAIRE

La moquette solaire est un capteur rudimentaire qui a un très bon rendement pour la plage de températures correspondant au réchauffage de l'eau d'une piscine. Elle

apporte quelques degrés à la température de l'eau et permet d'augmenter la période d'utilisation de la piscine. Très utilisée pour les piscines municipales.

L'eau de la piscine est pompée jusqu'aux capteurs, chauffée puis retourne dans la piscine. En règle générale, la surface des capteurs doit être de 25 à 40 % plus grande que la piscine. Dans des conditions normales, avec une température ambiante de 15°C, les capteurs peuvent augmenter la température de l'eau d'une dizaine de degrés.



FigureVI.1 : moquette solaire

II.3 Capteur sous vide :



Figure II.1 :capteur sou vide



Figure II.2 : Capteurs sous vide à concentration

Ces capteurs diffèrent dans leur conception car ils sont composés de plusieurs tubes en verre dans lesquels règne un vide poussé, limitant les échanges convectifs entre

l'absorbeur (placé à l'intérieur du tube) et le verre. On distingue plusieurs types de capteurs sous vide.

- ❖ **Circulation directe (EDF):** Le fluide caloporteur passe successivement dans chaque tube pour y être chauffé. Le principe est simple, mais la fabrication est difficile à cause des liaisons verre/métal nécessaires pour la circulation du fluide caloporteur.
- ❖ **Capteur à caloduc (EHP):** Le liquide à l'intérieur du tube est vaporisé et se condense dans un condenseur et relâche ainsi l'énergie de condensation à un fluide caloporteur circulant au sommet des tubes. Cette conception permet le remplacement aisé d'un tube, car le circuit du tube et le circuit du champ de capteurs n'est pas connecté.
- ❖ **Capteur de type "Sydney" (à effet « Thermos ») (SYC):** Ils sont réalisés avec deux tubes de verre l'un dans l'autre (obturés aux extrémités par deux soudures verre/verre) et entre lesquels on fait le vide après avoir déposé un absorbeur sélectif concentrique sur la paroi extérieure du tube intérieur. On place ensuite au centre des deux tubes, un tube de cuivre creux en U qui permet l'échange de chaleur, soit directement, ou soit par le biais d'un caloduc.

Cette conception permet d'avoir une soudure verre/verre beaucoup plus sûre que les soudures métal/verre dans d'autres technologies. Cette technologie a été largement reprise en Chine, où 65% du marché des chauffe-eau solaires utilisent ces capteurs sous vide.

- ❖ **Capteur à tube sous vide "Schott":** Le tube sous vide fabriqué par l'entreprise Schott-Rohrglas en Allemagne utilise le principe "thermos" avec plusieurs perfections techniques. D'abord, une partie de la paroi intérieure du tube extérieur est un réflecteur cylindrique et ensuite, le tube intérieur sert comme absorbeur aussi bien qu'échangeur de chaleur avec le fluide caloporteur. L'utilisation des métaux est réduite à des traitements de surface du tube et les différentes pièces du collecteur.

La conception des capteurs sous vide les rend plus efficaces pour capter le rayonnement diffus du soleil, et leur rendement diminue peu lorsque la température

du fluide augmente. Et cela grâce à la très bonne isolation thermique obtenue par le vide poussé. Des réflecteurs peuvent être installés sous les tubes afin de réfléchir le rayonnement lumineux sur les faces intérieures.

II.4 Les capteurs solaires à concentration dessin !!!!

Pour atteindre des températures élevées (supérieures à 120°C), il est nécessaire de concentrer les rayons solaires par des jeux appropriés d'éléments réfléchissants (miroirs) ou de lentilles. La contrainte principale, outre le coût des dispositifs plus élevé que celui des capteurs plans, est le système de poursuite destiné à suivre le soleil dans sa course.

Le flux solaire reçu par le capteur est d'abord réfléchi sur les miroirs du concentrateur, puis il traverse généralement un vitrage destiné à isoler thermiquement le foyer où il est absorbé par une surface appropriée. La réflexion, la transmission à travers le vitrage, et l'absorption se traduisent par des pertes optiques, caractérisées globalement par une efficacité. Dans les capteurs à concentration élevée, seule la composante directe du rayonnement solaire peut être dirigée vers le foyer, la composante diffuse ne pouvant être concentrée.

L'absorbeur s'échauffe et perd de la chaleur vers l'extérieur sous forme essentiellement de rayonnement et de convection. Cette perte peut être caractérisée par un coefficient de pertes thermiques U . Un fluide caloporteur refroidit l'absorbeur en emportant la chaleur utile qui est ensuite convertie ou transférée pour différents usages.

II.4.1 Les capteurs paraboliques et sphériques :

Le concentrateur parabolique ou sphérique est aussi appelé assiette (Figure II.1). Les rayonnements solaires réfléchis par le miroir parabolique convergent vers un seul point, le foyer de la parabole. Le système doit être orienté à tout instant vers le soleil, ce qui implique une motorisation précise selon deux axes. Le facteur de concentration moyen dépasse le millier, ce qui permet de porter le fluide à très haute température, au-delà de 700 °C.

Il existe plusieurs modèles de ces assiettes, de 50 à 100 m², bien adaptées à des puissances modestes (5 à 25 kW électriques). La concentration maximale de ce capteur est

$C_{\max}^* = 46165$ et le rendement maximal est $\eta_{\max} = 25 \%$

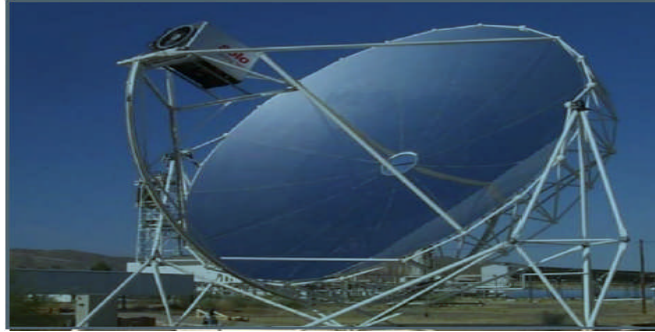


Figure II.1 : capteurs paraboliques et sphériques

II.4.2 Les centrales solaires à tour :

Sont considérées comme hautement prometteuses bien qu'elles souffrent d'une moins longue expérience que la technologie des miroirs cylindro-paraboliques. Une tour de 40 étages soutient un capteur dominé par un champ équipé de centaines de miroirs héliostats (miroirs orienteurs), des miroirs qui suivent chacun le soleil (figure II.2). Comme pour les miroirs cylindro-paraboliques, un liquide transporte l'énergie vers la centrale énergétique. La tour solaire nécessite moins de tuyaux sur le terrain, mais elle souffre du grand nombre d'héliostats équipés de suiveurs complexes à deux axes.

Les tours solaires sont entrées dans le domaine commercial en avril 2007 avec le lancement de la centrale Abengoa de 10 mégawatts, PS10, à Sanlúcar près de Séville en Espagne. AbengoaSolar et BrightSourceEnergy (Californie) développent des tours

.



Figure II.2 : centrales solaires à tour

II.4.3 Les capteurs cylindro-paraboliques :

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire. De nombreuses installations ont déjà été testées et commercialisées, dont certaines dans les années 80. Il est composé d'un réflecteur parabolique (miroir), d'une structure métallique, d'un tube récepteur et du système de poursuite solaire (figure II.3).

Aussi appelés concentrateurs linéaires à auge, ces miroirs de section parabolique concentrent les rayons du soleil vers une ligne focale. Le récepteur est un tube placé sur ce foyer linéaire, au-dessus de l'auge, et dans lequel circule un fluide caloporteur.

Avantage de ces miroirs paraboliques, le suivi du soleil est simplifié : il s'effectue sur un seul axe au lieu de deux pour les héliostats. Les concentrateurs sont généralement orientés nord-sud et pivotent d'est en ouest pour suivre la course du soleil (K.Heinloth 2006). La concentration maximale de ce capteur est $C^*_{\max}=215$ et le rendement maximal est $\eta_{\max} = 50 \%$

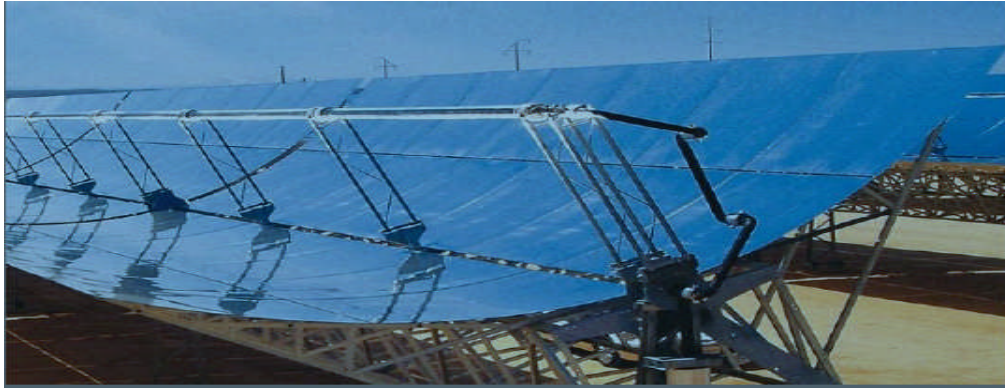


Figure II.3 :capture cylindro-parabolique

II.4.4 Les captures solaires type Fresnel :

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques est la mise à forme du verre pour obtenir la forme parabolique requise. Afin de diminuer ce coût, plusieurs groupes de recherche travaillent sur des prototypes de collecteurs de Fresnel à focalisation linéaire. L'idée est d'approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans, comme le montre la figure II.4.

Un premier étage de réflecteur est installé sur le sol. Le rayonnement est réfléchi au foyer de la parabole approximée par le jeu de miroirs. Un deuxième étage de réflecteurs redirige le rayonnement vers le tube récepteur (K.Heinloth 2006).

Ce second étage de réflecteurs, en plus de réfléchir le rayonnement, joue aussi le rôle d'isolant pour le tube récepteur. Il est en effet recouvert d'une importante couche d'isolation en sa partie supérieure. Les principaux avantages de cette technologie par rapport aux concentrateurs traditionnels sont :

- ✓ Coût inférieur des miroirs.
- ✓ Pas de vide à l'intérieur du tube récepteur, ce qui facilite sa conception et sa durabilité
- ✓ Les contraintes mécaniques dues à la poussée du vent sont réduites par la disposition plane des miroirs.



Figure II.4 : capture solaire type Fresnel

II.4.5 Les capteurs à parabole composé (CPC)

Ces capteurs sont du même type que les capteurs plans, mais ils concentrent les rayons du soleil sur les absorbeurs à l'aide de réflecteurs disposés en sous face. Ces capteurs sont très efficaces lorsque l'ensoleillement direct est très fort, mais perdent rapidement en efficacité lors des ensoleillements moindres, ou lorsque le fluide monte en température. Ils sont généralement prévus pour la production d'eau chaude

III.1 Stockage de l'énergie solaire thermique

III.1.1 Introduction

Le stockage est un moyen privilégié pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet en effet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus favorables à cette gestion en réalisant une relation constante entre l'énergie demandée et l'énergie fournie.

- o La gestion de l'énergie thermique produite dans les installations industrielles.

On réalise des systèmes qui récupèrent la chaleur perdue pendant la durée de fonctionnement de l'installation pour l'utiliser au moment et à l'endroit où on en a besoin.

- o La gestion de l'électricité produite pendant les heures creuses.

L'énergie électrique produite pendant les heures creuses peut être transformée en énergie thermique pour alimenter les bâtiments ou les installations industrielles pendant les heures de pointes où le besoin d'énergie peut dépasser les capacités de production des centrales.

- o La gestion de l'énergie frigorifique.

Le stockage de l'énergie et en particulier le stockage par la chaleur latente permet une réelle gestion de l'énergie frigorifique en fonction des besoins. En effet, en froid industriel et enclimatisation, le procédé de production ne permet pas de grands écarts de la température d'exploitation, c'est ce qui rend quasi-impossible l'utilisation d'un stockage par chaleur sensible. L'énergie disponible est utilisée pour charger un stockage et l'énergie stockée sera utilisée dans les installations lors de pointes de consommation, quand la puissance appelée est supérieure à la puissance de la centrale comme dans le cas de la gestion de l'énergie électrique.

- o les systèmes solaires passifs :

Parmi les problèmes pratiques qui concernent les systèmes à énergie solaire, c'est le besoin d'un moyen efficace, avec lequel on peut stocker la chaleur pendant un jour ensoleillé pour l'utiliser pendant la nuit ou dans une autre période.

Le fonctionnement en transitoire des circuits électroniques nécessite généralement des puissances de refroidissement bien supérieures aux puissances nominales qui conduisent à surdimensionner les circuits, leurs alimentations et leur système de refroidissement.

L'utilisation d'un stockage d'énergie associé à ces circuits permet de faire face aux appels transitoires de puissance sans ce surdimensionnement.

o la gestion du confort thermique dans les bâtiments

Le confort thermique est fonction non seulement de la température et de l'humidité de l'air ambiant mais encore des températures des parois. C'est une des raisons pour laquelle dans ce cas le stockage par chaleur latente est attractif. Cette application fait partie de la présente étude et sera donc décrite plus loin.

Il existe deux techniques principales de Stockage Thermique :

Le stockage par la chaleur sensible (Stockage Thermique Sensible, STS) dans lequel la température des matériaux de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée.

Le stockage par la chaleur latente (Stockage Thermique Latente, STL) qui utilise l'énergie emmagasinée ou restituée lorsqu'un corps change d'état (solide, liquide, gaz).

III.1.2 Stockage par chaleur sensible

Dans le stockage par chaleur sensible, l'énergie thermique transférée fait varier la température du matériau. Si h est l'enthalpie massique du matériau, la variation de la quantité de chaleur Q échangée par le matériau lorsqu'il passe d'un état initial noté avec l'indice i à un état final noté avec l'indice f est :

$$Q = m (h_f - h_i) \quad (\text{III.1})$$

m est la masse du matériau [kg],

h_i est l'enthalpie massique initiale [J kg^{-1}],

h_f est l'enthalpie massique finale [J kg^{-1}]

Si la capacité thermique massique du matériau c_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) est constante, l'expression de l'enthalpie massique permet d'écrire:

$$Q = m C_p(T_f - T_i) \quad (\text{III.2})$$

T_i est la température initiale [K],

T_f est la température finale [K].

Il est donc utile d'utiliser des matériaux à forte capacité thermique qui emmagasineront un maximum d'énergie. Mais ces matériaux doivent avoir d'autres propriétés comme une stabilité à long terme lors des cyclages thermiques, la comptabilité avec le récipient de stockage et également un coût raisonnable.

Le classement du type de stockage par chaleur sensible dépend du milieu de stockage, en particulier de son état physique. On définira ainsi:

- ✚ le stockage par un fluide (l'eau, l'huile, des sels fondus).
- ✚ le stockage par un solide (pierre, métaux,...).

III.1.3 Le stockage par chaleur latente

Comme le stockage par chaleur latente permet de stocker une grande densité d'énergie, ce type de stockage est une technique attractive. De plus, il permet de stocker la chaleur sous la forme de chaleur latente de fusion à une température constante, cette température correspondant à la température de la transition de phase.

La chaleur latente est beaucoup plus importante que la chaleur sensible (pour un écart de température pas trop important).

Les points de fusion dépendent des corps utilisés; ce critère permet d'utiliser des matériaux différents en fonction des températures souhaitées. Ces matériaux sont les matériaux à changement de phase (MCP).

Dans le cas d'un changement d'état (fusion), la quantité de chaleur mise en jeu s'écrit :

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

Où Δh_f est l'enthalpie spécifique de fusion.

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

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

Les avantages de la chaleur latente sont donc:

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

III.1.3.1 Les contraintes technologiques du stockage par chaleur latente

Le stockage par chaleur latente utilise l'enthalpie de changement d'état pendant la fusion ou la solidification du milieu utilisé, mais il peut utiliser également la chaleur sensible nécessaire pour chauffer le solide jusqu'à son point de fusion. Il faut donc :

- ✓ Que le système de stockage supporte le changement de phase dans les limites de températures demandées pour ce changement,
- ✓ Que le système de stockage supporte le changement de phase avec le changement de volume qui lui est lié,
- ✓ Un conteneur capable de stocker les matériaux suivant leur nature,
- ✓ Une surface d'échange pour transférer l'énergie thermique entre la source de chaleur et le matériau à changement de phase.

III.1.3.2 Les avantages du stockage par chaleur latente

Les principaux avantages du stockage par chaleur latente peuvent être résumés ainsi :

- ❖ Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures de confort en thermique (20 à 30°C), peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible.
- ❖ Quand la décharge d'énergie thermique a lieu, la température de la surface de MCP reste proche de la valeur de la température de changement d'état. On a

donc un contrôle passif de la température de la surface. La quantité d'énergie de la décharge ne dépend donc que de la température de l'environnement.

- ❖ Le stockage par chaleur latente ne pose pas de problème de surchauffe saisonnière grâce à sa faible masse.

III.2 Classification des matériaux à changement de phase [5]

Les MCP décrits seront donc uniquement des corps avec changement d'état solide/liquide dans la gamme de températures considérée.

On peut classer les MCP couramment utilisés selon trois catégories :

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

Cette classification est effectuée en comparant les ordres de grandeur des énergies spécifiques pouvant être stockées. Une telle comparaison est effectuée sur le tableau III.1

Tableau III.1 : Comparaison entre différents milieux de stockage de l'énergie (Énergie stockée = 106 kJ = 300 kWh; $\Delta T = 15K$)

Propriétés	Les matériaux de stockage de la chaleur			
	Le stockage par la chaleur sensible		Les matériaux à changement de phase	
	Pierre	Eau	Organique	Inorganique
Chaleur latente de fusion [kJ/kg]	*	*	190	230
Capacité thermique massique [kJ/kg K]	1,0	4,2	2,0	2,0
Masse volumique [kg/m ³]	2 240	1 000	800	1 600
Masse nécessaire au stockage de 10 ⁶ kJ [kg]	67 000	16 000	5 300	4 350
Masse relative **	15	4	1,25	1,0
Volume nécessaire au stockage de 10 ⁶ kJ [m ³]	30	16	6,6	2,7
Volume relatif **	11	6	2,5	1,0

III.2.1 Les MCP inorganiques :

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre -100°C et $+1000^{\circ}\text{C}$. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0°C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0°C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieure à 150°C). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (c'est-à-dire une plage de fusion étroite). Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables (Farid et al. 2004 et VineetVeet, 2005).

III.2.2 Les MCP organiques

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0°C et 150°C . Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables (Farid et al. 2004 ; VineetVeer et BUDDHI, 2005).

III.2.3 Les MCP eutectiques

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux



principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels (Vineet Veer et BUDDHI, 2005).

Tableau III.2 : Certaines propriétés thermiques de certains MCP (d'après Vineet Veer, 2005)

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)
PCMs Organiques	Eau	0	333.6
	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique-laurique	21	143
PCMs	KF.4H ₂ O	18.5	231
Inorganiques	Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	25.8	125.9
	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	32	251
PCMs	66,6%CaCl ₂ .6H ₂ O+33,3%Mgcl ₂ 0. 6H ₂ O	25	127
Eutectiques	48%CaCl ₂ +4,3% NaCl+47,3%H ₂ O	26,8	188
	47%Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O+53%Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	30	136

III.3 Les applications des MCP dans l'industrie

Les MCP sont bien les meilleurs candidats pour les systèmes de stockage thermique grâce à leur grande densité d'énergie. Un autre avantage des MCP est que le transfert de chaleur a lieu à une température constante. Ceci convient parfaitement aux systèmes de chauffage et de refroidissement qui nécessitent un contrôle précis de la température.

On peut classer les principales applications sous les rubriques suivantes :

➤ Climatisation :

- Aéroports
- Banques
- Hôpitaux

- Immeubles de bureaux
- Palais des congrès
- Musées
- Centres commerciaux
- Salles de spectacle
 - Procédés
- Laiteries
- Fromageries
- Abattoirs
- Brasseries, malteries
- Charcuteries, salaisons
- Cuisines centrales-UCP
- Procédés chimie finie
 - Secours
- Salles informatiques
- Salles de contrôle
- Salle d'opération
- Centraux téléphoniques
 - Transport
- motorisation
- conservation des produits

a/ Le refroidissement électronique

Le conditionnement et la gestion thermique des équipements électroniques sont devenus des questions fondamentales compte tenu des niveaux de puissance accrus et de la miniaturisation des dispositifs. Le nombre des recherches récentes, qui concernent l'utilisation de MCP dans les systèmes électroniques, est en constante augmentation dû à la nature passive de ces techniques. En effet, l'utilisation d'une technique passive de refroidissement à l'avantage d'une maintenance minimale et d'une grande fiabilité. Il n'y a pas de parties mobiles ou d'éléments à remplacer

dans les systèmes proposés. L'utilisation des MCP dans la gestion thermique des équipements intervient actuellement à trois niveaux :

- La réalisation d'interfaces permettant de minimiser la résistance thermique entre un composant agissant comme une source de chaleur et le dispositif d'évacuation de la chaleur,
- La réalisation de stockages thermiques permettant d'absorber les transitoires,
- Des applications spécifiques (éléments thermoélectriques, climatisation de volumes contenant des dispositifs à température contrôlée...)

Dans les applications spécifiques, on peut citer la climatisation de cabines téléphoniques ou la climatisation de pièces, de conteneurs ou de boîtiers contenant du matériel électronique. Par exemple certains systèmes à MCP stockent la chaleur de l'équipement pendant le jour et la transfèrent au toit pendant la nuit. Ils maintiennent la pièce ou le conteneur à une température légèrement supérieure à la température nocturne extérieure. Parce qu'un tel système ne possède aucune pièces mobiles et n'a pas besoin de source d'énergie, il est plus fiable, puisqu'il n'introduit aucun air extérieur et contrairement à un système classique, il n'introduit aucune poussière à l'intérieur. Enfin, gardant l'équipement à une température légèrement supérieure à la température extérieure il permet de contrôler l'humidité dans des limites acceptables. De tels systèmes sont maintenant étendus aux boîtiers électroniques limitant ainsi les apports extérieurs d'énergie électrique.

b/ Autres applications

Parmi les autres applications des MCP on peut noter:

- L'utilisation du stockage par chaleur latente pour préchauffer les moteurs à combustion interne comme les moteurs diesel avant l'allumage. Ce système fonctionne avec le dégagement de la chaleur pendant le changement de l'état de liquide à solide du MCP. Cette opération évite un grand nombre d'effets négatifs dus au démarrage à froid du moteur comme l'augmentation de la consommation du

gazole, la grande concentration de CO et de CnHndans les gaz d'échappement [9]. Le MCP fonctionne comme une batterie de stockage de la chaleur latente. Cette batterie est connectée au radiateur, où elle stocke une chaleur supplémentaire quand le moteur tourne à sa température de fonctionnement. Cette chaleur est utile pour le démarrage à froid suivant et pour une mise en température rapide du moteur. Grâce à l'excellente isolation de cette batterie, l'énergie peut être gardée pendant deux jours à une température de -20°C à l'extérieur [5].

Le stockage de froid est devenu également un moyen de gérer les pics de demandé'énergie. Les systèmes de stockage conventionnels utilisent de la glace à 0°C mais la cinétique d'échange thermique est limitée par la résistance thermique de la glace et la capacité thermique des fluides secondaires (eau glycolée par exemple). De nombreuses études sont encore effectuées pour étudier l'influence de l'agent thermique (sel de Glauber, glace), de la taille des réservoirs d'encapsulation et d'autres paramètres sur les cinétiques [5]. L'utilisation de particules de polymères hydrophiles est également étudiée et semble offrir de nouvelles possibilités [6].

c/ Chauffage des serres avec stockage d'énergie à MCP

Le but principal d'une serre est la possibilité d'obtenir des produits agricoles à n'importe quelle période de l'année. Les systèmes conventionnels de chauffage conduisent à la production de CO₂ dont la concentration dans l'atmosphère doit être réduite. Des systèmes de récupération de chaleur peuvent être utilisés pour économiser le combustible et un bon choix semble être l'utilisation de récupérateurs à MCP qui permettent également de stocker la chaleur pour un usage nocturne. Enfin, il est intéressant de coupler le récupérateur à MCP à un capteur solaire. [10]

On propose d'étudier des capteurs à double passe avec milieu poreux soumis à un rayonnement direct instationnaire et une température ambiante qui varie dans le temps.

La limite inférieure est isolée on impose une limite adiabatique

Les capteurs misent en études sont constituées des composants suivants :

- L'isolant : le bois
- Le vitrage : le verre
- L'absorbeur : l'aluminium
- Avec des sphères en gravier ou MCP(RT25) pour les deux capteurs avec milieu poreux.

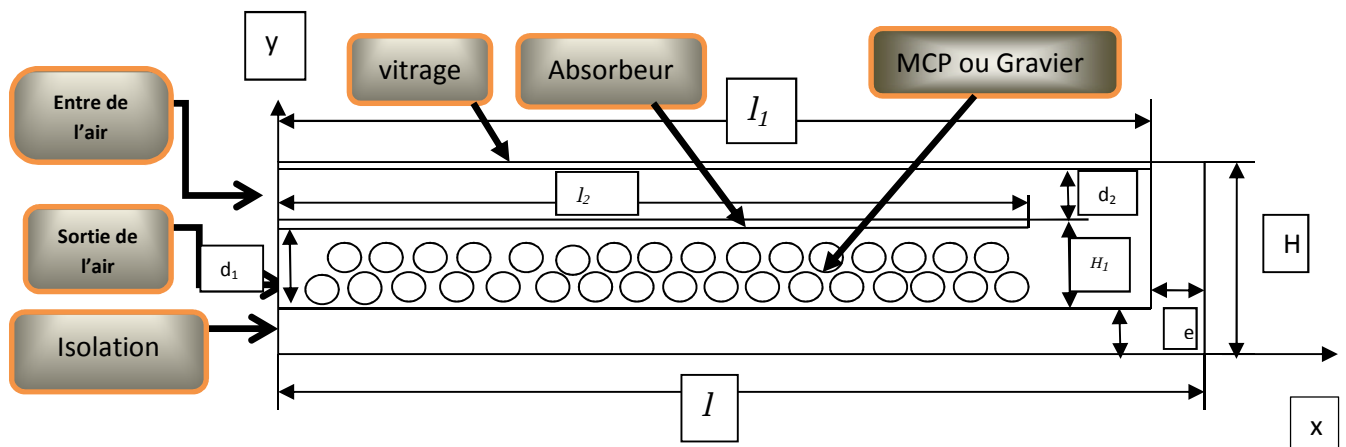


Figure IV.1 : capteur solaire thermique avec milieu poreux (gravier ou MCP)

Tableau IV.1 : dimensions du capteur [11]

	H	l	l_1	l_2	H ₁	d ₁	d ₂	e
Dimension(m)	0.163	2.4	2.35	2.10	0.074	0.07	0.035	0.05

IV.1 Formulation mathématique

On suppose que la phase liquide est un fluide newtonien, incompressible en écoulement laminaire

VI.1.1 Dans la région fluide

IV.1.1.1 Model dynamique

IV.1.1.1.1 Equation de conservation de la masse

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{IV.5})$$

IV.1.1.1.2 Equation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho U u) = \text{div}(\mu. \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{IV.6})$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho U v) = \text{div}(\mu. \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g \beta (T - T_{\text{réf}}) \quad (\text{IV.7})$$

IV.1.1.2 Model thermique

IV.1.2.1 Equation de l'énergie

$$\rho c p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(\rho c p U T) - \text{div}(\lambda \text{grad} T) = 0 \quad (\text{IV.8})$$

IV.1.2 Dans la région solide

IV.1.2.1 Equation de l'énergie

$$\rho c p \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \text{grad} T) = 0 \quad (\text{IV.9})$$

IV.1.2.2 Dans les sphères type MCP

IV.1.2.2.1 Equation de l'énergie

$$\rho c p_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \text{grad} T) = 0 \quad (\text{IV.11})$$

$$Cp_{eff} = \begin{cases} Cp_s & \text{si } T < T_f \\ \frac{(Cp_s + Cp_l)}{2} + \frac{L_s}{(T_l - T_s)} & \text{si } T = T_f \\ Cp_l & \text{si } T > T_f \end{cases} \quad (\text{IV.12})$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_s & \text{si } T < T_f \\ \frac{(\lambda_s + \lambda_l)}{2} & \text{si } T = T_f \\ \lambda_l & \text{si } T > T_f \end{cases} \quad (\text{IV.13})$$

IV.2 Conditions initiales et aux limites

IV.2.1 Conditions initiales

$$t=0 \longrightarrow u=v=0$$

$$T_i = 294.7955 \text{ K}$$

IV.2.2 Conditions aux limites

IV.2.2.1 A la frontière des parois :

$$u=v=0$$

$$-\lambda_f \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial \vec{n}}$$

$\vec{n}$: la normale à la paroi

IV.2.2.2 A la sortie du capteur :

$$A \quad x=0, e \leq y \leq e+d_1 \quad \frac{du}{dx} = \frac{dv}{dx} = \frac{dT}{dx} = 0$$

IV.2.2.3 A l'entrée du capteur :

$$x=0, e+H_1 \leq y \leq e+H_1+d_2 \left\{ \begin{array}{l} u = u_{in} \text{ (0.01, 0.05 et 0.08 m/s)} \\ v = 0 \\ T = T_{amb}(t) \end{array} \right.$$

Pour la région de Tlemcen, on suppose une température moyenne $T_{ao}=27^\circ\text{C}$ durant le mois de juillet .le rayonnement maximale durant cette période peut atteindre 700w/m^2

IV.3 L'équation de la variation de l'éclairement en fonction de temps (Figure IV.3)

$$G_{\text{sun}}(\tau) = \hat{G}_{\text{sun}} \sin\left(\frac{\tau-a}{b-a}\pi\right), \quad a < \tau < b \quad [12] \quad (\text{VI.1})$$

IV.4 L'équation de la variation de température ambiante en fonction de temps (Figure IV.4) :

$$T_{ao}(\tau) = \bar{T}_{ao} + \bar{T}_{ar} \cos\left(\frac{\pi}{12}(\tau - 14.5)\right) \quad [12] \quad (\text{VI.2})$$

$\hat{G}_{\text{sun}}$: l'éclairement solaire maximum = 700 W/m^2

τ : Le temps en heure

a : heure du lever de soleil = 6h

b : heure de couché de soleil = 19h30

$$\left. \begin{array}{l} a: \text{heure du lever de soleil} = 6\text{h} \\ b: \text{heure de couché de soleil} = 19\text{h}30 \end{array} \right\} a-b = 14\text{h}50$$

$\bar{T}_{ao}$: température ambiante moyenne = 27°C

$\bar{T}_{ar}$: amplitude de température 6°C

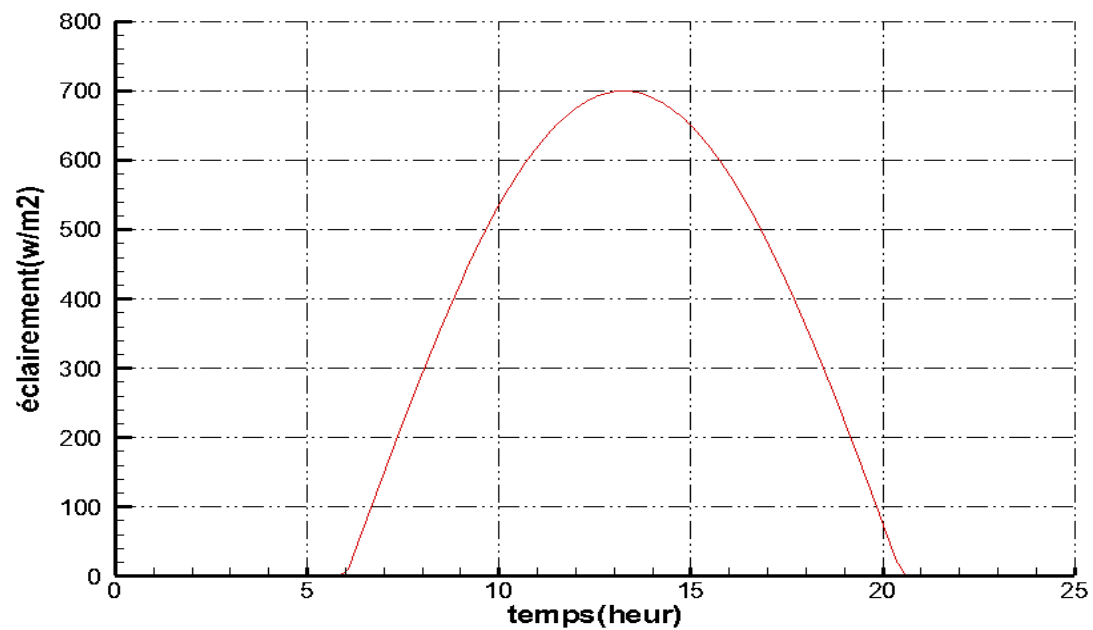


Figure IV.2: variation de l'éclairement en fonction de temps

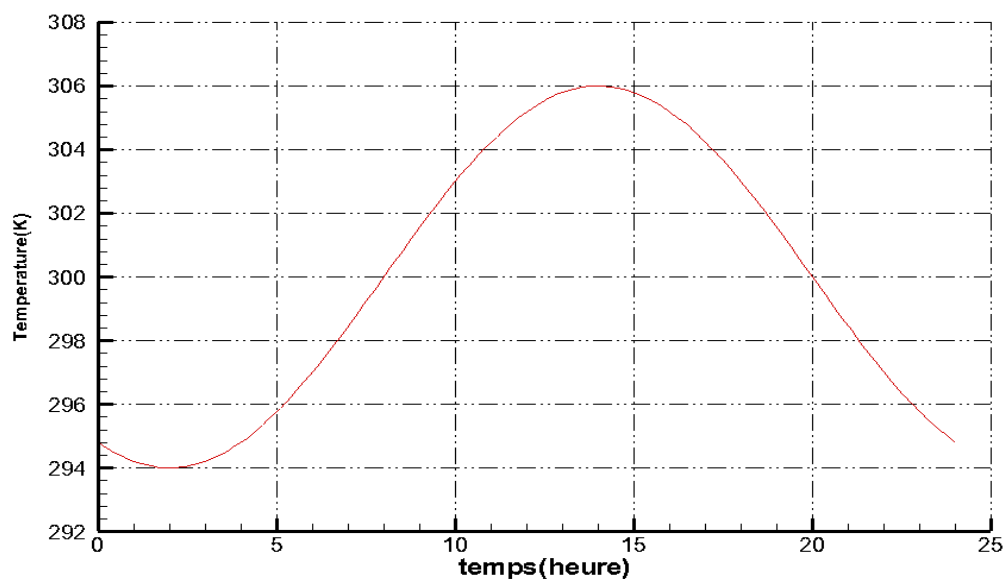


Figure IV.3 : variation de la température ambiante en fonction de temps



IV.5 maillage

La simulation a été effectuée sur le logiciel FLUENT pour résoudre le problème posé. L'acquisition géométrique a été réalisée à l'aide du logiciel GAMBIT.

Un test sur le maillage numérique pour déterminer la meilleure approximation convergence précision.

Le nombre de nœud et cellule adopté est de 16012 nœuds, est de 16024 cellules pour les capteurs avec milieu poreux et de 18777 nœuds, et de 17520 cellules pour le capteur sans milieu poreux

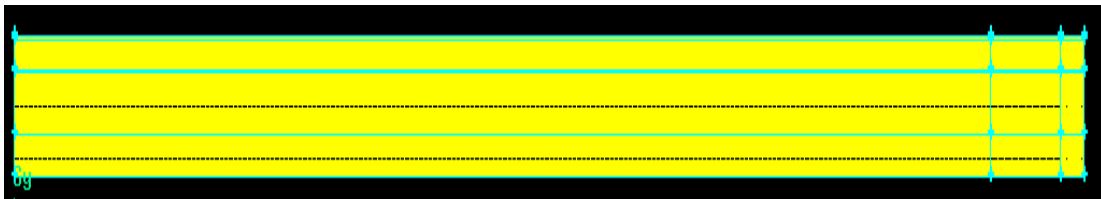


Figure IV.4 : maillage du capteur sans milieu poreux

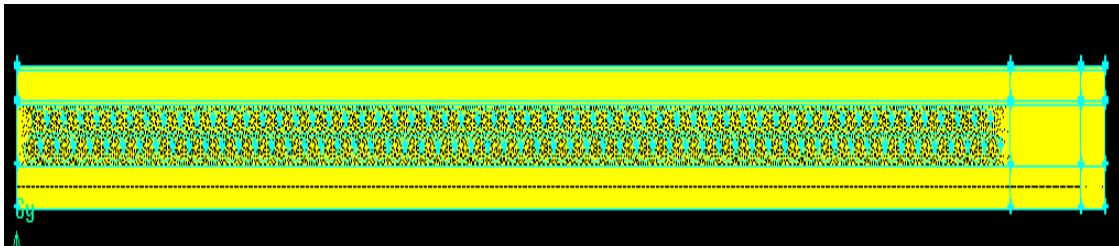


Figure IV.5 : maillage du capteur avec milieu poreux

Tableau IV.2 : propriété thermophysique des matériaux utilisés dans les capteurs solaires misent en étude [10] [11]

	bois	verre	aluminium	air	gravier	MCP
Masse volumique ρ (kg/m ³)	800	2530	2719	1.225	2629	767
Capacité calorifique c_p (j/kg.K)	2093	720	871	1006.43	790	(VI.9)
Conductivité thermique λ (w/m.K)	0.16	1.2	202.4	0.0242	4.8	(VI.10)
Température de liquidus T_l (°C)	↘	↘	↘	↘	↘	27.6
Température de solidus T_s (°C)	↘	↘	↘	↘	↘	25.6
Chaleur latente L_s (J/kg)	↘	↘	↘	↘	↘	232000
Viscosité dynamique μ (kg/m.s)	↘	↘	↘	1.789×10^{-5}	↘	↘

V Interprétation et discussions des résultats

V.1 Introduction

Ce présent chapitre a pour but d'exploiter les résultats obtenus après une simulation avec fluent de trois capteurs plans à air à double passes, afin de comparé leurs performances thermique.

V.2 La distribution de la température à l'intérieur des trois capteurs

Pour bien pouvoir interprété les résultats on a choisie six déférents temps de la journée (10h, 12h, 16h, 18h, 20het00h), et on a fixé la vitesse de l'air à l'entrée au niveau des trois capteurs a 0.01m/s.

V.2.1 distribution de la température au niveau des trois capteurs à 10h

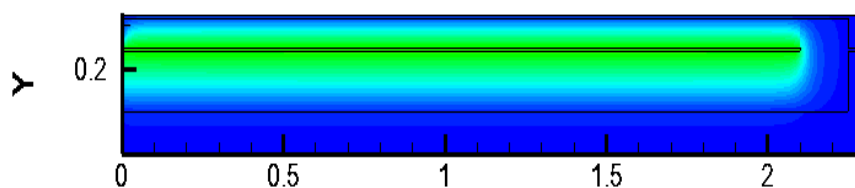
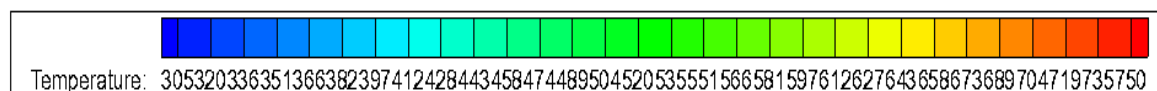


Figure V.1 : capteur sans milieu poreux

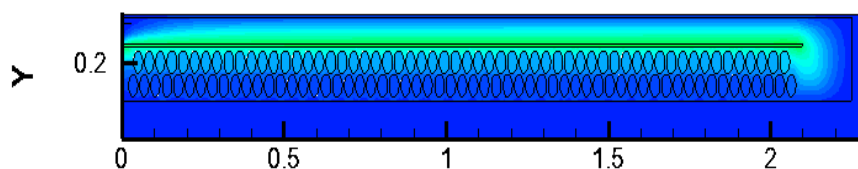
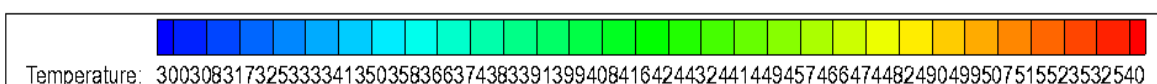


Figure V.2 : capteur avec milieu poreux (gravier)

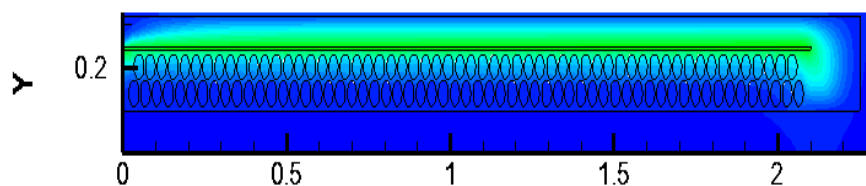
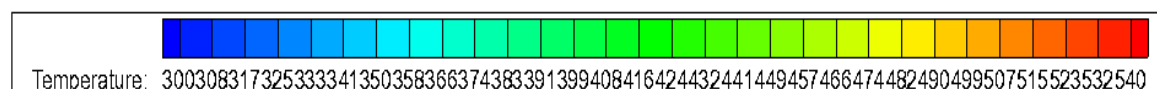


Figure V.3 : capteur avec milieu poreux (mcp)

V.2.2 distribution de la température au niveau des trois capteurs à 12h

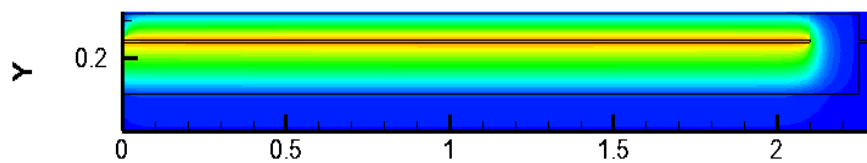
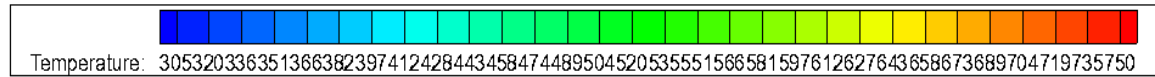


Figure V.4: capteur sans milieu poreux

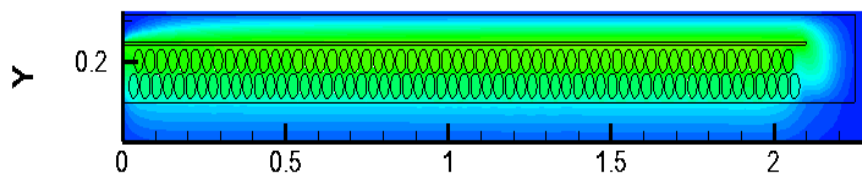
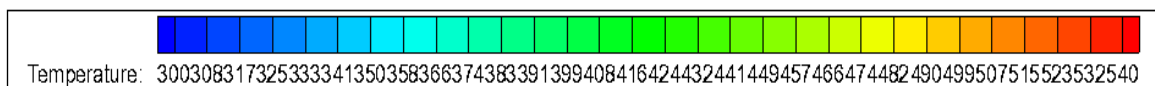


Figure V.5 : capteur avec milieu poreux (gravier)

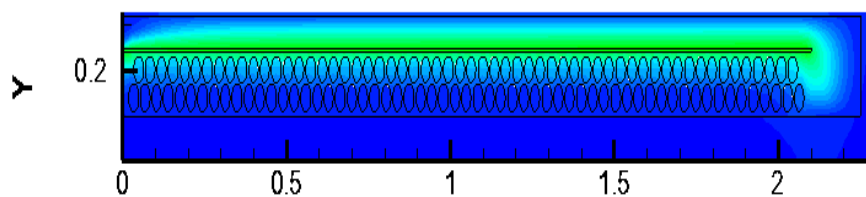
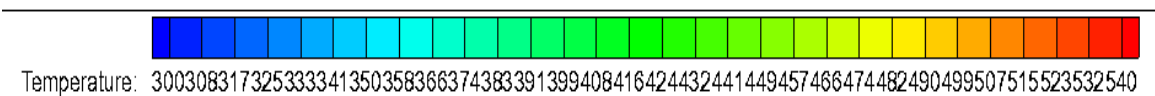


Figure V.6 : capteur avec milieu poreux (mcp)

V.2.3 distribution de la température au niveau des trois capteurs à 16h

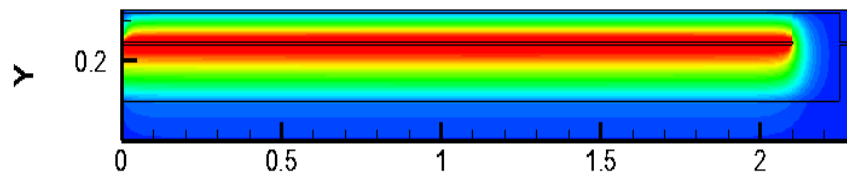
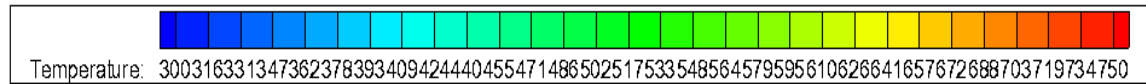


Figure V.7 : capteur sans milieu poreux

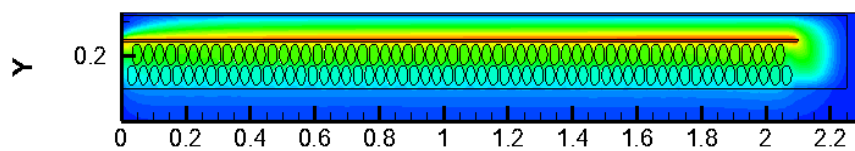
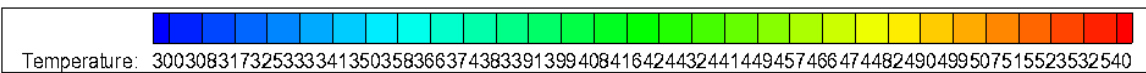


Figure V.8 : capteur avec milieu poreux (gravier)

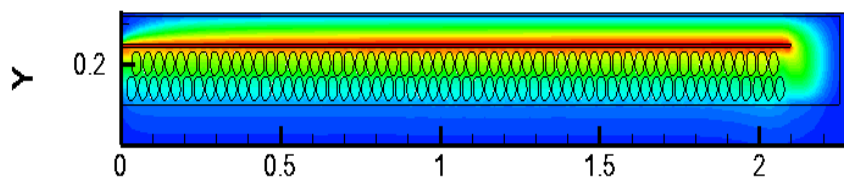
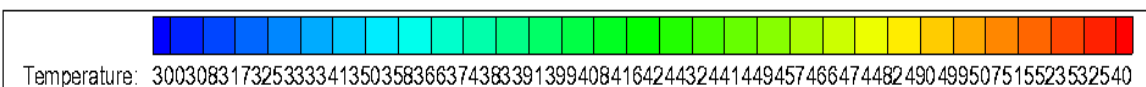


Figure V.9 : capteur avec milieu poreux (mcp)

V.2.4 distribution de la température au niveau des trois capteurs à 18h

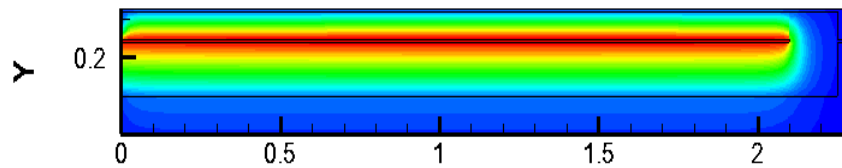
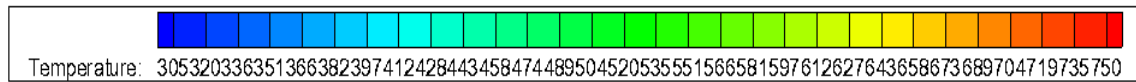


Figure V.10 : capteur sans milieu poreux

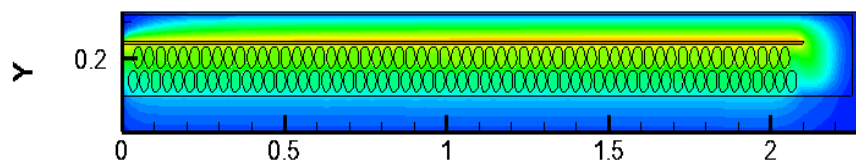
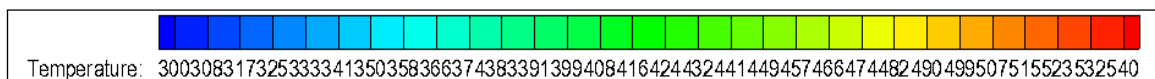


Figure V.11: capteur avec milieu poreux (gravier)

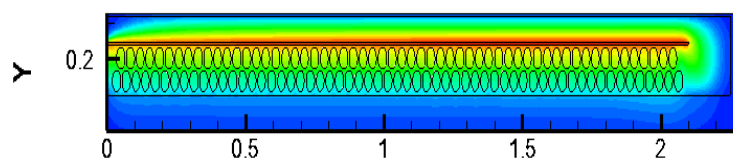
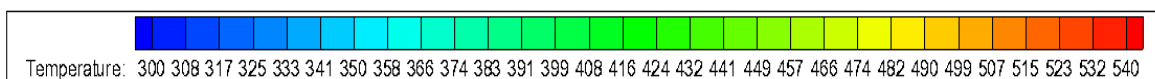


Figure V.12 : capteur avec milieu poreux (mcp)

V.2.1 distribution de la température au niveau des trois capteurs à 20h

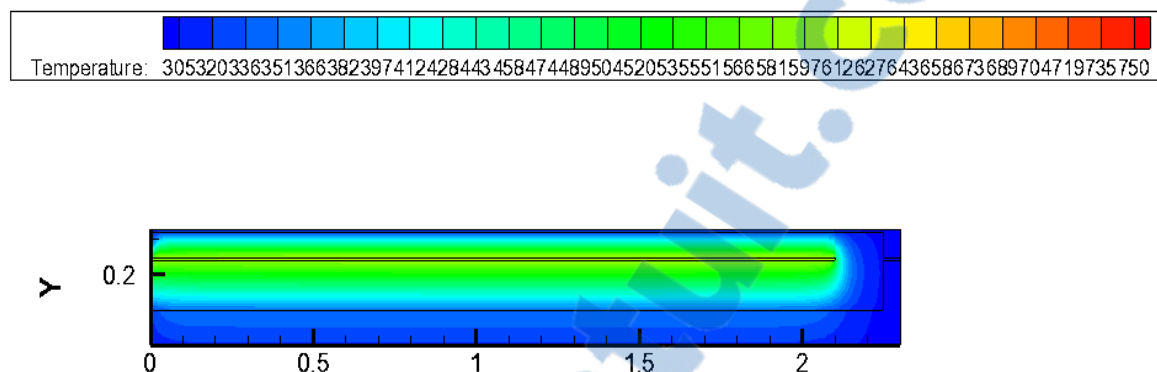


Figure V.13 : capteur sans milieu poreux

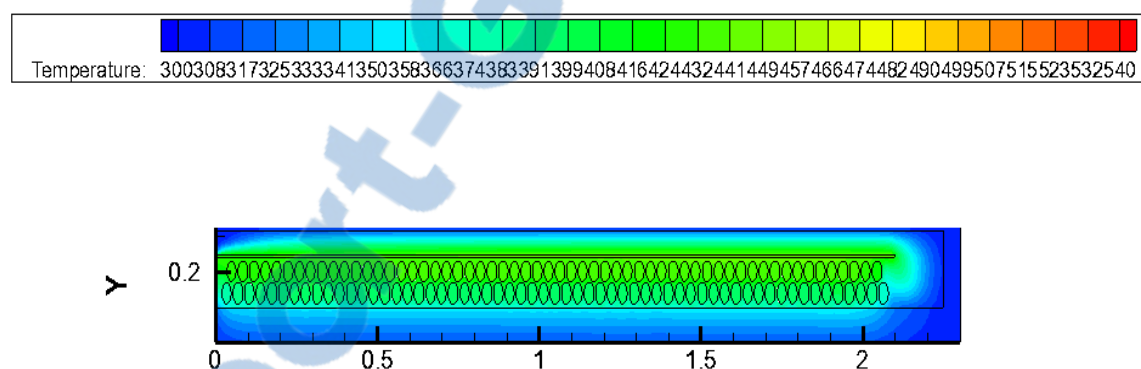


Figure V.14 : capteur avec milieu poreux (gravier)

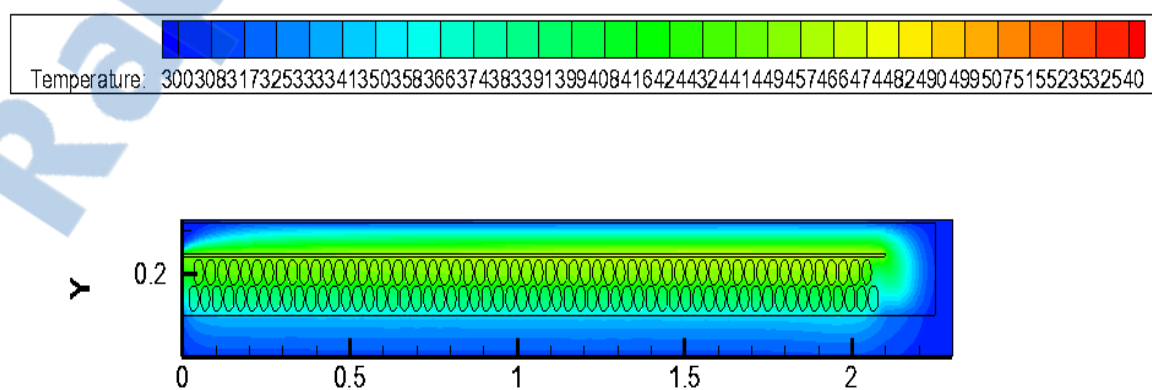


Figure V.15 : capteur avec milieu poreux (mcp)

V.2.1 distribution de la température au niveau des trois capteurs à 00h

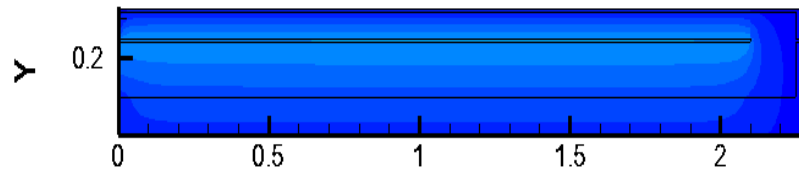
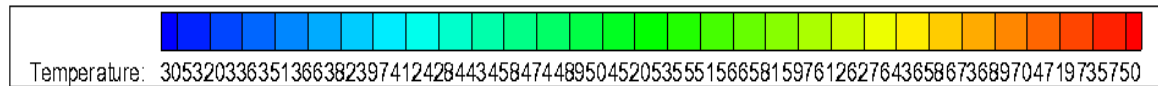


Figure V.16 : capteur sans milieu poreux

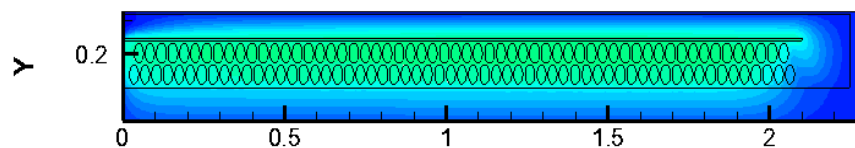
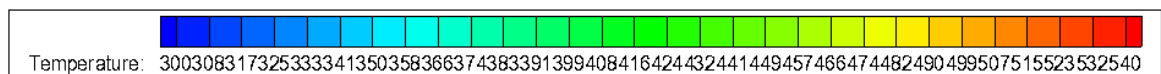


Figure V.17: capteur avec milieu poreux (gravier)

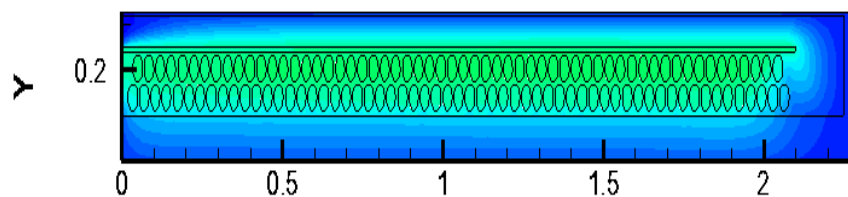
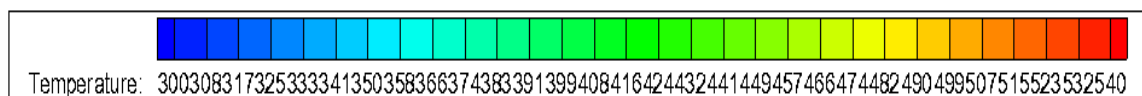


Figure V.18 : capteur avec milieu poreux (mcp)

La figure montre l'évaluation des contours des températures en fonction de temps pour un capteur à double passe :

a/avec du gravier comme milieu poreux

b/avec du MCP comme milieu poreux

c/sans milieu poreux

Pour les trois types on observe des températures maximales, en effet ce dernier absorbe la majeure partie du rayonnement solaire néanmoins le temps pour l'atteinte est différente.

La température maximale atteinte aux niveaux de l'absorbeur et du capteur sans milieu poreux est de 700K voisinage de 16h, à la même heure le maximum de température atteint pour les deux autres capteurs égale 500K. Cette différence est due au milieu poreux qui absorbe une partie de la chaleur.

A 10h, on remarque un fort gradient de température au niveau de l'air dans le deuxième passage sans milieu

A 12h la température au niveau de gravier est plus importante que celle de MCP cela dû la bonne capacité calorifique de l' MCP et de sa mauvaise conductivité thermique.

A 16h Les trois capteurs atteints leurs la température maximale de captation de chaleur. Malgré que le rayonnement solaire commence à diminuer à 14h Le retard est expliqué par le temps de repense causé par la cinétique thermique du capteur en général et de milieu poreux en particulier.

A 18h avec la diminution de rayonnement, la diminution de la température maximale commence, elle est plus importante au niveau du capteur sans milieu poreux et moins importante au niveau des autres capteurs. Néanmoins la



température au niveau du MCP est plus importante que celle du gravier cela peut être expliqué par le phénomène d'absorption de la chaleur latente.

A 20h Après le couché de soleil, les trois capteurs gardent une partie de la chaleur, mais le capteur sans milieu poreux perd cette chaleur plus rapidement que les deux autres, et elle s'épuise dans le capteur avec le gravier plus vite que le capteur avec MCP

A 00h on voit clairement la chute de température au niveau du capteur sans milieu poreux elle est autour 362K. Par contre les deux autres sont à plus de 370K, la température du capteur avec du gravier est de 381K, et la température du capteur avec MCP est de 394K, ce dernier fournit plus de chaleur après minuit.

V.3 L'évolution de la température à la sorties

V.3.1 Capteur sans milieu poreux

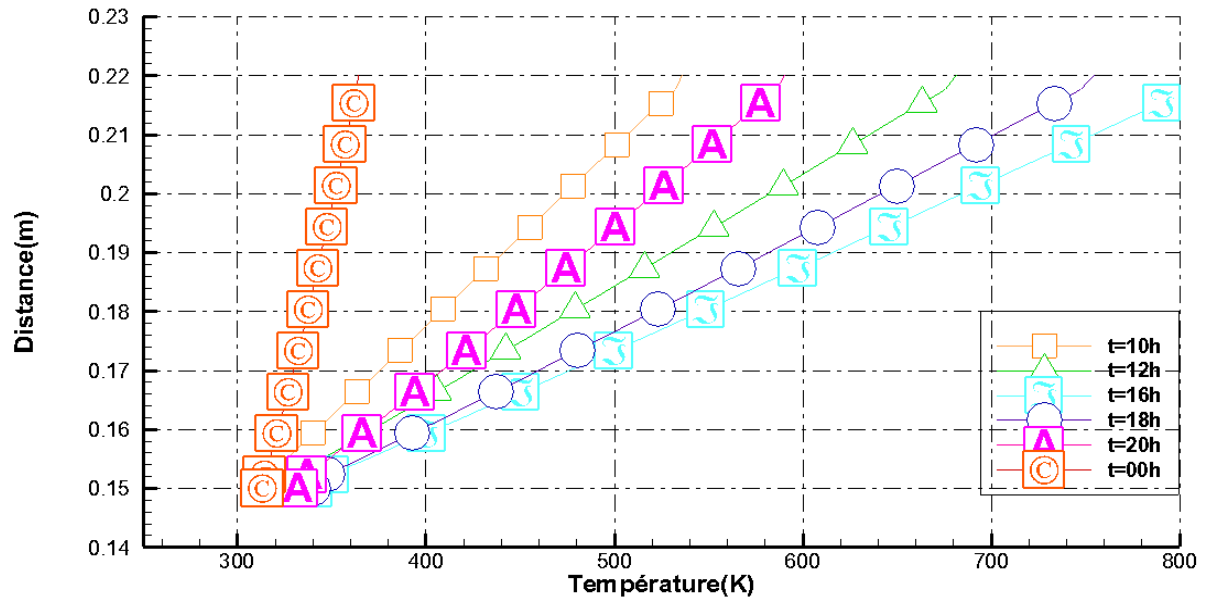


Figure V.20 : l'évolution de la température à la sortie en fonction de temps

V.3.2 Capteur avec milieu poreux (gravier)

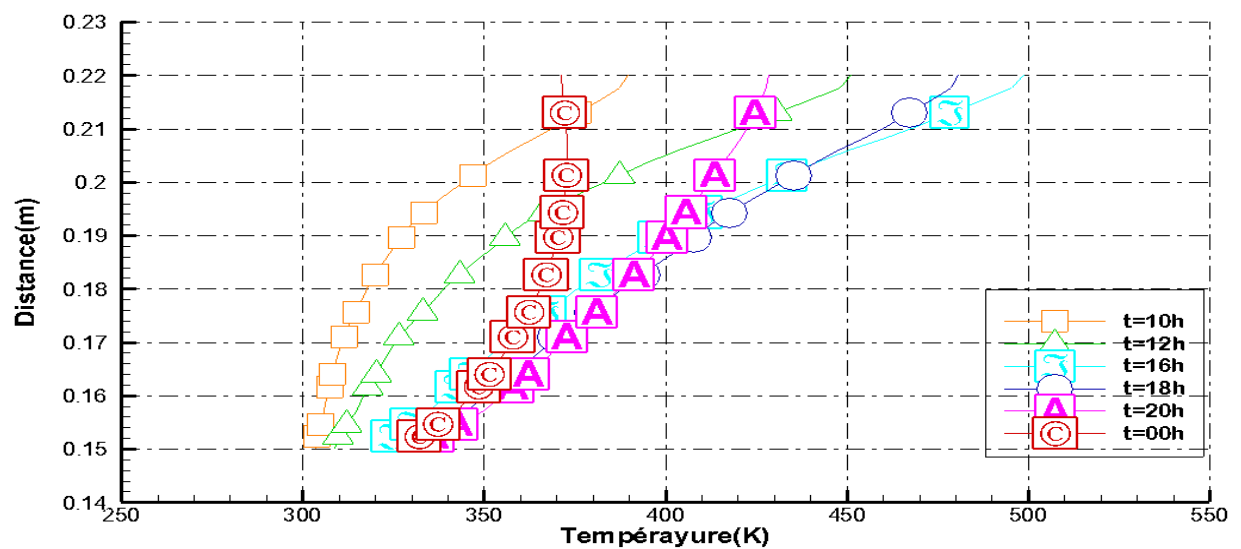


Figure V.21 : l'évolution de la température à la sortie en fonction du temps

V.3.3 Capteur avec milieu poreux (mcp)

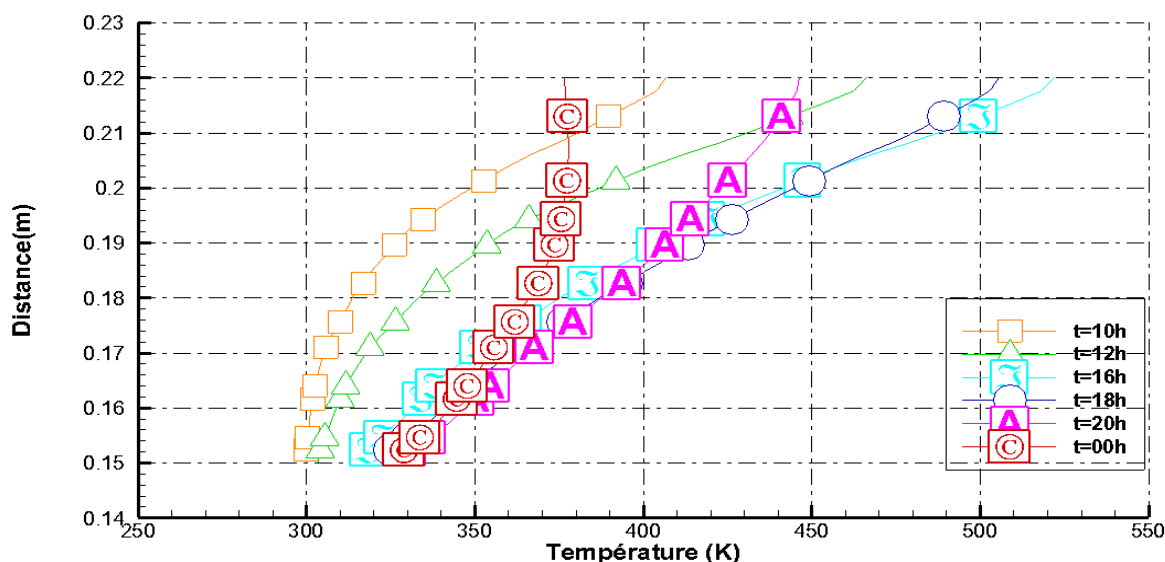


Figure V.22 : l'évolution de la température à la sortie en fonction du temps

La première remarque qu'on peut tirer des trois figures : la température à la sortie est plus élevée pendant l'ensoleillement au niveau du capteur sans milieu poreux qui atteint 800K au voisinage de l'absorbeur. Pour les capteurs avec mp cette température est de 550K.

Dû au stockage thermique, les graphes sont courbés pour les capteurs avec milieu poreux, et linéaires pour le capteur sans milieu poreux : l'évolution de la température est plus importante dans ce dernier.

La température à la sortie varie en fonction de la hauteur, plus on s'approche de l'absorbeur plus elle augmente.

Après le coucher du soleil ; on remarque la diminution de la température de sortie pour les trois capteurs. Mais la température du capteur sans milieu poreux subit une chute remarquable par rapport aux capteurs avec milieu poreux qui gardent une quantité de chaleur plus considérable. Pour le MCP, on enregistre une température de 13°C plus importante que celle du gravier. Le matériau à changement de phase est plus performant que le gravier dû au stockage de l'énergie par chaleur latente qui caractérise les MCP.

Conclusion générale

L'intérêt de ce travail est de mettre en valeur une comparaison entre deux capteurs à doubles passes avec milieu poreux et un capteur doubles passes sans milieu poreux.

La simulation à permet de déterminer l'évolution de température à des différents temps de la journée à des différentes emplacements au niveau du capteur (milieu poreux, la sortie d'air)

L'étude a été réalisée l'aide de simulateur FLUENT.

L'étude est effectuée avec plusieurs étapes commençant par le dessin de la géométrie sur GAMBIT et la maillée puis la charger sur FLUENT a fin de la simuler.

On a supposé que le régime est instationnaire avec des conditions aux limites bien définie.

Dans un premier lieu on constate que la température à la sortie du capteur avec milieu poreux est plus importante après le coucher de soleil donc on peut dire que le milieu poreux joues son rôle de stockeur de l'énergie.

En outre le MCP est un meilleur stockeur que le gravier citant que les MCP stock avec chaleur latente et le gravier stock avec chaleur sensible la différence de température au même temps est de l'ord de 13°C.

[1] L. Angélique, « Séchage », Dans le cadre du Printemps des Sciences 2002, Faculté des Sciences Appliquées, Département de Chimie Appliquée, Laboratoire de Génie Chimique. Université de Liège, Haute Ecole Charlemagne, Hemes, Les métiers de l'Energie,

[2] H. Rakotondramiarana¹, D. Morau, L. Adelard, J. GATINA, « Modélisation du Séchage Solaire: Application au Séchage en Couche Mince des Boues Solides des Stations d'Épuration », 12^{èmes} Journées Internationales de Thermique, Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre 2005.

[3] A. Mefti et al. « Estimation et Cartographie de la Composante Globale du Rayonnement Solaire ». *Rev. Energy. Renouvelable*, 1999: 219-22

[4] L.L. Vasiliev, V.S. Burak, A.G. Kulakov, D.A. Mishkinis, P.V. Bohan, Latent heat storage modules for preheating internal combustion engines: application to a bus petrol engine, *Applied Thermal Engineering*, Vol, 20, pp. 913 – 923, 2000.

[5] S.M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: Heat storage materials and techniques, *Energy research*, Vol. 39(11), pp. 1127 – 1138, 1997.

[6] MERCK, Thermal management with PCM-technology, <http://www.merck-ti.de/download>

[7] S.A. Omer, S.B. Riffat, Xiaoli Ma, Experimental investigation of a thermoelectric refrigeration system employing a phase change material integrated with thermal diode (Thermosyphons), *Applied Thermal Engineering*, Vol.21, pp.1265-1271, 2001.

[8] P.C. Augood, M. Newborough, D.J. Highgate, Thermal behaviour of phase-change slurries incorporating hydrated hydrophilic polymeric particles, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 25, pp. 457-468, 2001.

[9] Cristopia Energy System. *Manuel technique*. Vence 5 France, 2000.

[11] K. Sopian^{a,*}, Supranto^b, W.R.W. Daud^b, M.Y. Othman^c, B. Yatim^c. Thermal performance of the double-pass solar collector with and without porous media
aDepartment of Mechanical and Material Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600, Bangi, Selangor, Malaysia
bDepartment of Chemical and Process Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600, Bangi, Selangor, Malaysia
cDepartment of Physics, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600, Bangi, Selangor, Malaysia. Received 7 December 1998; accepted 22 December 1998

[10] A. Kürklü, Energy storage applications in greenhouses by means of phase change materials (PCMs). A review, *Renewable Energy*, Vol. 13, pp. 89-103, 1998.

[12] Wei Chen a*, Wei Liu b. Numerical analysis of heat transfer in a passive solar compositewall with porous absorber. a School of Merchant Marine, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, PR China , School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, PR China Received 18 March 2007; accepted 24 October 2007 .Available online 30 October 2007

[13] Korti A. N., Khadraoui Y., SAIM R. Modélisation numérique des problèmes de convection-diffusion avec changement de phase. Séminaire sur les Technologies Mécaniques avancées STEMA03.Université de Tlemcen, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département de Mécanique.B. P. 230, Tlemcen 13000, Algérie
Fax : 213 43 28 56 85.Email : korti72@yahoo.fr