

République Algérienne Démocratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère De l'Enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

جامعة جيلالي بونعامة خميس مليانة

Université de Djilali Bounaama Khemis Miliana

Faculté : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département Des Sciences De La Matière



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention d'un diplôme de MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : physique théorique

Thème

**Etude d'un capteur solaire
thermique plan et stockage
de l'énergie solaire thermique**

Devant le jury composé de :

M^r. M. MODERRES

Président

M^{me}. F. BOUDJEMAA

Examinatrice

M^r. M. DOUCHA

Encadreur

Présenté par :

TEBOUB Amina

GHOUL Fatiha

Année Universitaire : 2019 / 2020

A la mémoire de mes très chers parents,

A mes chères sœurs

A mes chère frères : Ilyess Feyçal

A mon fiancé Imad.

A ma sœur et chère amie Fatiha,

A mon encadreur M.Doucha.

Je dédie ce mémoire

Amina

A la mémoire de mes grands-parents,

A mes très chers parents,

A ma sœur Aicha et à toute ma famille généreuse

A ma sœur et chère amie Amina

A mon encadreur M.Doucha

Je dédie ce mémoire

Fatiha

Remerciements

Je tiens à remercier spécialement les différentes personnes qui ont rendu possible l'aboutissement de ce travail de **Master**.

Avant tout, je tiens à remercier mon **DIEU**, notre créateur, pour m'avoir donné la force d'accomplir ce travail.

En premier lieu, j'aimerais remercier vivement, mon directeur de mémoire, **Monsieur M. DOUCHA**, Enseignant à la faculté des sciences et de la technologie **UDBKM**, pour l'attention et le soutien qu'il a portés à mon travail de master et pour m'avoir guidé et encouragé tout au long de ce travail. Ses précieux conseils m'ont été d'une grande utilité.

Je tiens également à remercier **Monsieur M. MODERRES**, Enseignant à la faculté des sciences et de la technologie **UDBKM**, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury d'évaluation de mon travail. Qu'il trouve ici, l'expression de toute ma gratitude.

Je prie **Mme F. BOUDJEMAA**, Enseignante à la faculté Enseignant à la faculté des sciences et de la technologie **UDBKM**, d'accepter mes sentiments respectueux et reconnaissants pour avoir accepté de faire partie du jury.

J'adresse avec tout mon respect mes remerciements à tous le groupe « Physique » chaque un par son nom

Je remercie aussi tout ce qui m'a contribué de pré ou de loin.

A mes **Sœurs** et mes **Frères** pour leur soutien moral.

Je dédie ce travail à toute ma famille, en particulier, *la mémoire de mes très chers* Parents.

Enfin, pour leur soutien moral, je voudrais également remercier tous mes collègues de faculté.

Résumé

Le but de ce travail est d'étudier un composite solaire thermique plan ainsi que le stockage de l'énergie thermique. Afin d'accomplir ce travail, nous avons considéré une ensemble de critères, notamment : la densité, le stockage thermique, la durée de stockage, les propriétés des matériaux de stockage en fournissant une ensemble de spécifications pour chaque système, en analysant et en discutant les données et également pour étudier l'énergie solaire photovoltaïque dans les applications industrielles.

ملخص

إن الهدف من هذا العمل هو دراسة مجمع حراري شمسي مسطح و كذا تخزين طاقة حرارية. ولإنجاز هذا العمل اعتبرنا مجموعة من المعايير من بينها كثافة تخزين حراري، مدة تخزين، صائص مواد تخزين وذلك بتقديم مجموعة من مواصفات كل نظام وتحليل ومناقشة معطيات وأيضاً دراسة طاقة شمسية كهرو- ضوئية في تطبيقات صناعية.

Abstract

The aim of this research is to study a flat solar thermal complex and storage of thermal energy .In order to accomplish this work, we considered a set of criteria, including: density, thermal storage, storage duration, properties of storage materials by providing a set of specifications for each system, analyzing and discussing the data and also to study solar photovoltaic energy in industrial applications.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LA NOMENCLATURE

INTRODUCTION

CAPITRE I : Partie bibliographique

I.1.Introduction	03
I.2. Différents types de capteurs solaire	03
I.3. Avantages et inconvénients des capteurs solaires plans	10
I.4. Etude d'un capteur solaire plan	11
I.4.1. Etat de l'art dans les capteurs solaires plan	12
I.4.2. La puissance rayonnée	13
I.5. Principe de fonctionnement du capteur solaire plan	14
I.6. Différentes composantes d'un capteur solaire plan	14
I.7. Différentes modes de transfert thermiques dans un capteur solaire	15
I.8. Le rendement	16
I.9. Différents paramètres influant sur le rendement du capteur solaire plan	16
I.10. fluides caloporteurs	17
I.10.1. Définition	17
I.10.2. Différents types des fluides caloporteurs	17
I.10.3. Avantages et inconvénients de l'air	18
I.11. Les fluides de Biodetex	19
I.12. Stockage d'énergie	19
I.12.1 Différents types de stockage	20
I.13. Matériaux de stockage par chaleur sensible	22
I.13.1. L'eau	23
I.13.2. L'Acier	23
I.13.2.1. Propriétés thermiques	24
I.13.2.2. Masse volumique de l'acier	24
I.13.2.3. Conductivité thermique de l'acier	24
I.13.2.4. Chaleur spécifique de l'acier	24
I.13.2.5. Dilatation thermique de l'acier	24
I.13.3. Stockage par chaleur latente	24
I.13.4. Stockage par réaction chimique	25
I.14. Conclusion	25

CHAPITRE II : Etude thermique d'un capteur solaire plan

II.1. Introduction	27
II.2. Le capteur solaire plan	27
II.3. Principe de fonctionnement	28

II.4. Bilan thermique	28
II.5. Calcul des rendements	29
II.5.1. Rendement instantané	29
II.5.2. Rendement Optique	29
II.6. Les pertes thermique dans un capteur solaire plan	29
II.6.1. Pertes par conduction	29
II.6.2. Pertes par convection	30
II.6.3. Pertes par rayonnement	30
II.6.4. Pertes totales	31
II.. /Conclusion	31

CHAPITRE III : L'utilisation de l'énergie solaire thermique

III.1. Introduction	33
III.2. Production d'eau chaude sanitaire	33
III.2.1. Les besoins d'eau chaude sanitaire	34
III.2.2. Besoins journalires d'une habitation	34
III.2.3. Les modes de production	35
III.2.3. 1. Production centralisée	35
III.2.3. 2. Production individualisée	35
III.2.3. 3. La production solaire d'eau chaude sanitaire	36
III.3. Circulation naturelle (à thermosiphon)	36
III. 4. Circulation forcée (à l'aide d'une pompe)	37
III. 5. Types de stockage	37
III. 6. La température de l'eau	38
III.7. Production de froid	38
III.7.1. Production de froid par absorption	39
III. 8. Principe de fonctionnement	39
III. 9. Etude thermique de la cuve de stockage	40
III. 9. 1. Géométrie et modèle physique	40
III. 9. 2. Convection en milieu poreux	41
III. 10. Hypothèses simplificatrices	41
III. 11. Equation générale de conservation	41
III. 12. Conditions aux limites	42
III. 13. Equation adimensionnelles	42
III. 14. Conclusion	43

CHAPITRE IV : Résultats et discussion

IV .1. Introduction	45
IV.2. Simulation pour une journée (du 1 ^{er} Avril, de 0 à 24)	46
IV.2.1. Le capteur solaire plan	46
IV.2.2. Le ballon solaire	47

IV.2.3. Local	47
IV.3. Simulation de la période d'hiver (de 1 jour de Janvier au dernier jour de Mars).	48
IV.3.1. Le capteur solaire plan	49
IV.3.2. Le ballon solaire	50
IV.3.3. Local	50
IV.4. Simulation pour une année	51
IV.4.1. Le capteur solaire plan	51
IV.4.2. Le ballon solaire	52
IV.4.3. Local	53
IV.4.4. Bilan environnemental	53
IV.5. Interprétation	54
IV. 6. Conclusion	54
Conclusion générale	54
Références bibliographiques	56

LISTE DES FIGURES		
Figure	Légende	Page
CHAPITRE I		
Fig. I. 1	Les types du capteur à concentration.	04
Fig. I. 2	Concentrateur solaire Filière Fresnel.	04
Fig. I. 3	Concentration cylindro-parabolique	05
Fig. I. 4	Concentration parabolique.	06
Fig. I. 5	Le central à tour, Thémis(France).	06
Fig. I. 6	Capteur à air.	07
Fig. I. 7	Capteur solaire vitré.	08
Fig. I. 8	Capteur plan non vitré.	09
Fig. I. 9	Capteur solaire sous vide.	10
Fig. I. 10	Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan.	14
Fig. I. 11	Composant d'un capteur solaire plan.	14
Fig. I. 12	Les modes de transfert thermique.	15
Fig. I. 13	L'eau.	18
CHAPIRE II		
Fig. II. 1	Rayonnement solaire.	27
CHAPITRE III		
Fig.III.1	CES thermosiphon à éléments séparés	36
Fig.III.2	CES thermosiphon Monobloc.	36
Fig.III.3	CESI à circulation forcée Sous pression.	37
Fig.III.4	CESI à circulation forcée auto-vidangeable.	37
Fig.III.5	Cycle de production de froid par absorption.	39
Fig.III.6	Géométrie de la cuve stockage.	40
CHAPITRE IV		
Fig. IV.1	Schéma d'installation de production d'eau chaude sanitaire	45
Fig.IV.2	Profil de différentes températures journalières en fonction du temps.	46
Fig.IV.3	Variation de la température de sortie du capteur en fonction du temps.	47
Fig.IV.4	Variation de la température du ballon solaire en fonction du temps	47
Fig.IV.5	Variation de température journalière du local en fonction du temps.	48
Fig.IV.6	Profil de différentes températures en fonction du temps pendant les mois d'hiver	48
Fig.IV.7	Variation de la Température de sortie du capteur pendant l'hiver	49
Fig.IV.8	Variation de la Température en fonction du temps de ballon solaire pendant.	50
Fig.IV.9	Variation de la température local pendant les mois d'hiver	50
Fig.IV.10	Profil annuel de différentes températures en fonction du temps	51
Fig.IV.11	Variation annuelle de la température de sortie du capteur en fonction du temps	51
Fig.IV.12	Variation annuelle de la température du ballon solaire en fonction du temps.	52
Fig.IV.13	Variation de la température du local en fonction du temps pendant toute l'année.	53
Fig.IV.14	Bilan environnemental annuel.	53

LISTE DES TABLEAUX		
Tableau	Légende	Page
CHAPITRE I		
Tab. I.1	Caractéristiques de quelques matériaux de stockage sous l'effet de chaleur sensible (Hadron,2005).	22
CHAPITRE III		
Tab.III.1	Besoins journaliers d'une habitation en (kWh).	34

NOMENCLATURE

1/ Caractères latins minuscules

Caractère	Signification	Unités
A	Surface d'échange	[m ²]
A_f	Aire du fond	[m ²]
A_b	Aire latérale du capteur	[m ²]
C_p	Capacité calorifique du matériau	[Kj/Kg.K]
D_{conso}	Débit de soutirage	[l]
E	Ensoleillement	[kWh/m ²]
e_a et λ_b	Épaisseur et la conductivité thermique de l'absorbeur	[m]
e_b et λ_b	Épaisseur et la conductivité thermique de cadre	[m]
e_i et λ_i	Épaisseur et la conductivité thermique de l'isolation	[m]
g	Accélération de la pesanteur	[m/s ²]
H	Distance entre les deux plans médians horizontaux du réservoir et du capteur	[m]
K	Perméabilité	[kg / m ²]
L	Longueur	[m]
L_v	Chaleur latente	[]
M	Masse du matériau de stockage	[J]
P	Puissance qui représente les besoins de l'eau	[J]
Q	Chaleur absorbée	[J]
Q₀	Flux arrivant sur le plan du capteur	[J]
Q_a	Flux absorbée par l'absorbeur	[K]
Q_{cd}	Flux de chaleur par conduction	[K]
Q_{CV}	Flux échangé par convection	[K]
Q_p	Flux perdu par le capteur vers l'extérieur	[kg / m ³]
Q_r	Flux de chaleur émis par rayonnement	[m]
Q_s	Flux emmagasiné dans le capteur	[kg/(m·s)]
Q_u	Flux utile	[J/(kg K)]
S	Surface de la paroi solide en contact avec le fluide	[m ²]
S	Surface	[m ²]
S	Surface interne des porses	[m ²]
T	Température absolue du corps	[°C]
2/ Nombres adimensionnels		
f	Coefficient adimensionnel d'énergie cinétique	
J	Coefficient global de pertes de charge dans la conduite de circulation	
h	Coefficient de convection	

INTRODUCTION

L'expression « **Energie renouvelable** » est la forme courte et usuelle des expressions « **sources d'énergies renouvelables** » ou « **énergies d'origine renouvelable** » qui sont plus correctes d'un point de vue physique.

Depuis le premier choc pétrolier d'octobre **1973**, l'ensemble de la communauté internationale a pris conscience de l'importance vitale des ressources énergétiques pour le développement de notre monde moderne. Les perspectives d'épuisement, à plus ou moins longue échéance, des ressources fossiles sur lesquelles reposent presque exclusivement l'activité humaine ont fait que depuis, la problématique énergétique est au centre des préoccupations de tous.

Pour y répondre, des politiques énergétiques ont été mises en place à travers le monde pour, notamment, parvenir à réaliser des économies d'énergie en rationalisant l'utilisation des énergies fossiles et pour trouver des énergies de substitution à ces énergies fossiles.

L'une des premières solutions vers laquelle on s'est tourné dès le départ a été le recours aux énergies renouvelables, principalement l'énergie solaire. En effet, il est de notoriété que l'énergie qui nous provient du Soleil sous forme de rayonnement pourrait, en théorie, suffire à couvrir tous les besoins énergétiques de l'humanité s'il était effectivement possible de la recueillir et de la convertir en totalité. Malheureusement, ce n'est pas le cas. Dans l'état actuel des choses, seule une très petite partie de cette énergie est réellement mise à profit çà et là à travers le monde à partir d'applications spécifiques.

Parmi les premières applications solaires auxquelles on a fait appel, l'utilisation photovoltaïque de l'énergie solaire par le biais des capteurs solaires plans pour assurer une telle quantité d'énergie électrique des locaux publics et d'habitations en individuel ou en collectif.

Reposant sur un principe scientifique simple faisant appel à la réalisation de l'effet de serre, le capteur solaire plan a été développé très rapidement pour être utilisé dans le secteur de l'habitat individuel et collectif ainsi que pour certains locaux publics et administratifs. Aujourd'hui, il est d'une application très courante dans plusieurs pays à travers le monde, notamment ceux du pourtour méditerranéen. Bien évidemment, au plan technologique, on est assez loin des premières « boîtes vitrées » réalisées de façon assez rudimentaire. Les systèmes actuels font appels à de hautes technologies pour atteindre de bonnes performances électrique, garantir une solidité et une durabilité dans le temps pour les équipements et respecter une esthétique moderne en accord avec l'environnement dans lesquels ils sont intégrés.

En tant que pays jouissant d'une bonne position géographique lui permettant de bénéficier d'un des meilleurs taux d'ensoleillement annuel au monde, l'Algérie s'est intéressée dès les premières années à l'utilisation de l'énergie solaire. Diverses applications solaires ont ainsi fait l'objet d'études scientifiques ayant abouti à la réalisation de prototypes qui auraient pu être développés à grande échelle. Malheureusement, les choix politiques inhérents au développement d'une politique énergétique basée sur l'exploitation de ses ressources fossiles ont fortement entravé le développement d'une politique d'économie d'énergie et de recours aux énergies renouvelables, empêchant le développement industriel de ces filières. Beaucoup de réalisations sont ainsi demeurées pendant de longues années au stade embryonnaire.

Toutefois, ces dernières années, l'Algérie semble vouloir réinvestir le secteur des énergies renouvelables et affiche une volonté de développer les applications solaires tant photovoltaïques que thermiques. Une redynamisation du secteur est en cours avec la planification de diverses réalisations

concrètes à travers le pays, une réactivation de la recherche dans le domaine, une mise en œuvre d'un cadre législatif approprié et la promotion d'une véritable industrie, dans le secteur publique et privé.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail qui s'intéresse à la réalisation d'une étude sur un système solaire de production d'eau chaude sanitaire.

Le travail qui a été effectué est exposé dans ce mémoire suivant quatre chapitres :

- ❖ Un premier chapitre correspondant à une étude bibliographique permettant de situer les travaux effectués autour du sujet proposé. Dans cette étude, divers travaux relatifs au stockage de l'eau chaude sanitaire dans des cuves de stockage de différents types et aux performances des systèmes d'eau chaude solaire à usage domestique (**ECSD**) ont été consultés pour dégager les meilleures corrélations et les résultats les plus intéressants en relation avec le travail à accomplir.
- ❖ Un second chapitre consacré à une étude thermique du capteur solaire plan envisagée. Les différentes équations analytiques nécessaires à la formulation des phénomènes dynamique et thermique dans le capteur.
- ❖ Un troisième chapitre est dédié aux différentes utilisations de l'énergie thermique solaire ainsi qu'une modélisation théorique du phénomène de stockage a été faite.
- ❖ Un quatrième chapitre où sont exposés les divers résultats de notre étude. Les tracés des courbes de température à travers ce capteur sont représentés et interprétés.

Une conclusion synthétise les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives envisagées suite à la réalisation de cette étude.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

Il est possible d'utiliser des technologies qui dépendent de l'exploitation de la chaleur du soleil, dans le cas de secteur thermodynamique et de ses applications, les études sont nombreuses et variées et on peut citer par exemple, dans le chauffage de l'eau, le chauffage et refroidissement des locaux, le processus de génération de chaleur et les stations thermodynamiques pour produire Électricité. En parlant de cas de panneaux solaire thermiques ou du système solaire en chaleur, le restituent et l'utilisent sous forme d'eau chaude.

Un certain nombre de détails différencient les capteurs solaires les uns des autres, principalement, la structure de la surface des absorbeurs, les circuits hydrauliques et la perte de charge, la conception des raccords, l'épaisseur, l'isolation, le caisson, le vitrage, les joints et l'assemblage, le cadre de montage en toiture, les dispositifs pour le transport, la conception optique et la durée de vie [1], [22], [24].

I.2. Différents types de capteurs solaires

➤ les capteurs solaires à concentration

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.

Il existe cinq types de capteur à concentration :

- Filière Fresnel.
- Réflecteur cylindro - parabolique.
- Réflecteur parabolique.
- Central à tour.

- **Capteurs solaires fixes à concentration**

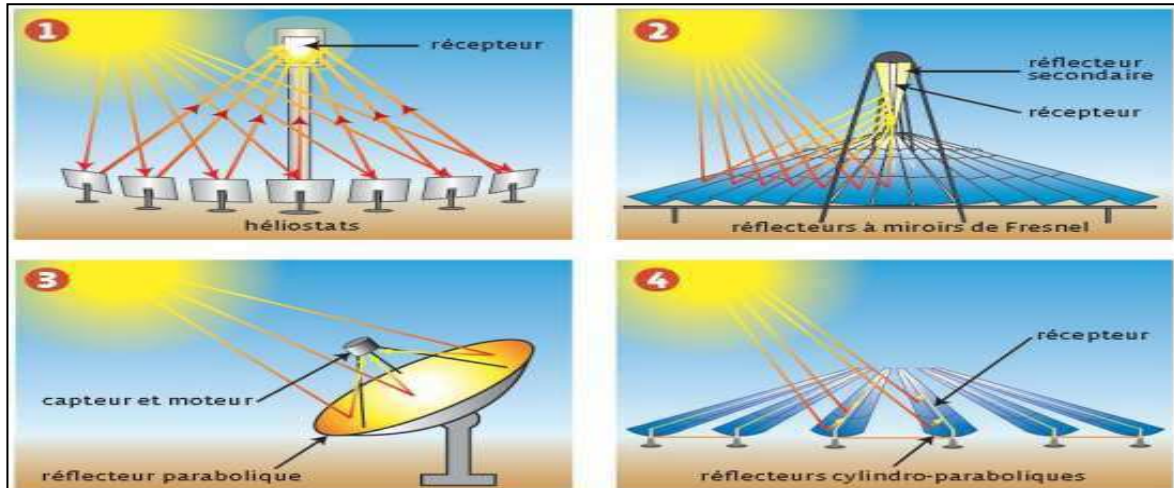


Fig. I.1: Les types du capteur à concentration.

- **Filière Fresnel**

Cette filière est simple et peu coûteuse. Les collecteurs sont des miroirs en bandes parallèles disposés à plat et sol près du sol concentrant les rayons sur des tubes récepteurs fixes. L'eau, portée à 100 bars et à 500°C. Est utilisée comme fluide caloporteur et comme fluide travail qui fait fonctionner une turbine/générateur électrique. Cette technologie est encore au stade de la démonstration. Son principe est similaire à celui de la filière cylindro-parabolique mais elle utilise des miroirs plans ou légèrement incurvés moins chers que les réflecteurs paraboliques. Cette filière possède les plus faibles performances optiques et le plus faible rendement solaire-électrique annuel net (10%) mais son empreinte au sol est de 1.5 ha/MW, soit moins de 60% par rapport aux centrales à collecteurs cylindro-paraboliques.



Fig. I. 2: Concentrateur solaire Filière Fresnel

- **Filière cylindro-parabolique**

C'est la filière de loin la plus mature. Ces systèmes utilisent une série de longs réflecteurs cylindriques en forme de parabole. La parabole concentre la lumière sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur [38]. Le concentrateur suit la course du soleil en tournant sur un axe. Le fluide caloporteur, généralement une huile de synthèse, chauffé lors de son passage dans les tubes, circule à travers une série d'échangeurs de chaleur pour produire de la vapeur surchauffée et les températures peuvent atteindre 400°C qui fait fonctionner une turbine /générateur électrique.

Le rendement solaire-électrique maximal est dans le meilleur des cas d'environ 25 % tandis que le rendement annuel net est de 15%. L'empreinte au sol est de l'ordre de 3.25 ha/MW pour les centrales sans stockage.

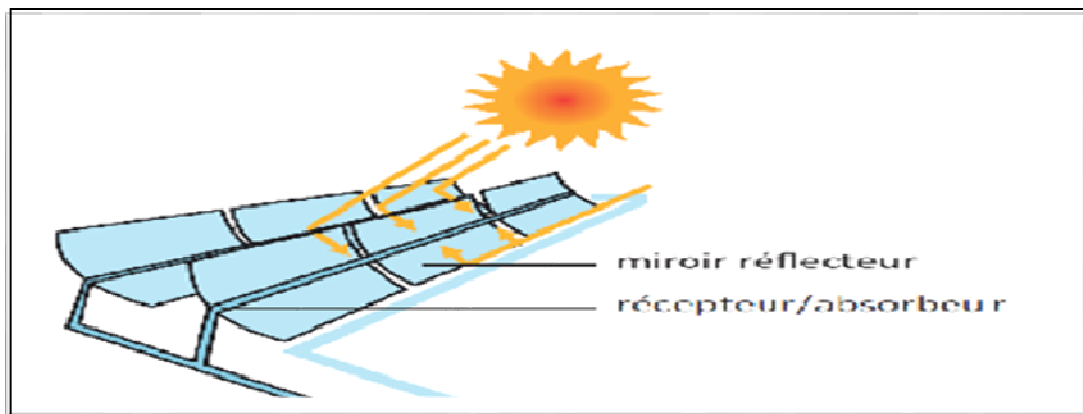


Fig. I. 3 : Concentration cylindro-parabolique.

- **Réflecteur parabolique**

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils suivent le soleil sur 2 axes afin de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est souvent supérieur à 2000 avec une température de 750°C.

De toutes les technologies solaires, les capteurs paraboliques ont démontré les meilleurs rendements solaire-électricité, qui est d'ordre de (29.4%).

Un de leurs principaux avantages est qu'ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Ils possèdent donc également un important potentiel de développement, particulièrement dans des régions peu peuplées de certains pays du sud. En outre cette technologie reste de même la plus coûteuse de toutes.

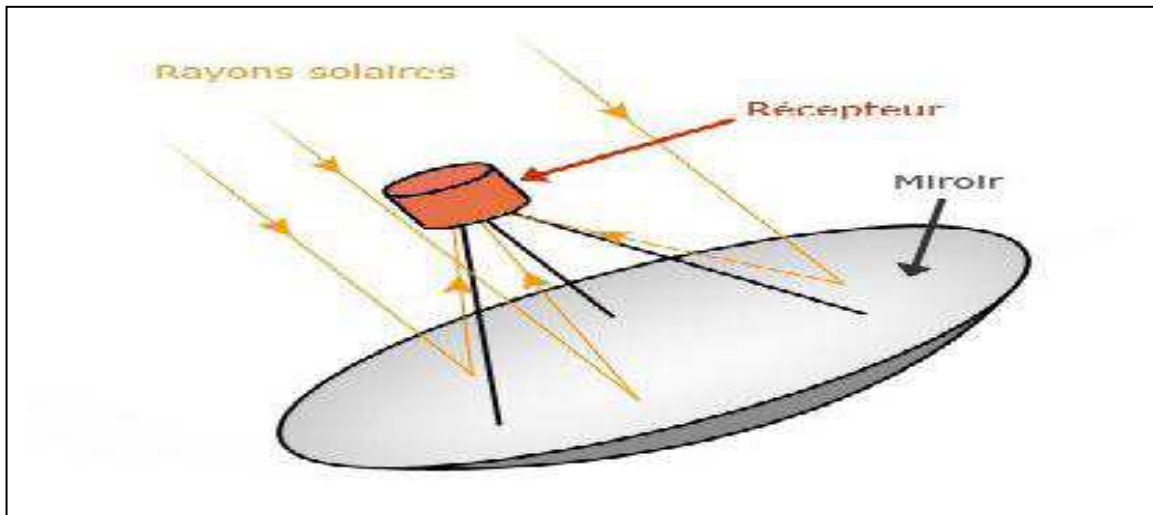


Fig. I.4. : Concentrateur parabolique.

o **Central à tour**

La technologie la plus souple d'utilisation. Des baisses de coûts importantes sont attendues.

Deux technologies : la production directe de vapeur, à coûts moindres, et l'utilisation de sels fondus pouvant être utilisés comme fluide caloporteur et milieu de stockage thermique. Le stockage est trois fois plus efficace qu'avec la filière cylindro-parabolique.



Fig. I.5.: Le central à tour, Thémis (France).

Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat traque le soleil individuellement et le réfléchit en direction d'un récepteur situé au sommet de la tour solaire. Le facteur de concentration varie de 600 à plusieurs milliers, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600 °C à 1000 °C [15]. Le rendement maximal des centrales à tour à cycle de Rankine est de l'ordre de 22% pour un rendement annuel net d'environ 16%.

L'avantage de la tour solaire par rapport aux capteurs cylindro-paraboliques est que les pertes à est de 4 ha/MW. Les héliostats acceptent un terrain pentu.

○ Capteurs solaires fixes à concentration

Les capteurs solaires fixes à concentration utilisent des réflecteurs à composés paraboliques ainsi que des réflecteurs plans afin d'orienter l'énergie solaire vers un absorbeur d'accompagnement ou une fente à travers un important angle d'admission. L'importance de l'angle d'admission pour ces réflecteurs élimine la nécessité d'avoir un système de pointeur solaire [18].

○ les capteurs solaires plans

Un capteur solaire plan est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du rayonnement solaire et la transmettre à un fluide caloporteur, en complément de panneaux solaires photovoltaïques, qui transforment le photon en électricité.

Il existe différents types de capteurs solaires plans classés selon

- le type d'application considérée.
- la nature du fluide caloporteur utilisé.
- le niveau de la température à atteindre.

Ils sont principalement utilisés pour la production d'eau sanitaire, le chauffage d'habitation ou des piscines, l'éclairage.

On distingue généralement les capteurs à air, les capteurs à eau et les capteurs solaires sous vide [17], [44].

○ Capteur solaire plan à air

Contrairement au capteur à eau où le fluide passe dans les tuyaux, le conduit d'air est en générale formé par l'espace situé entre la couverture et l'absorbeur. De même que pour le capteur à eau, l'écoulement peut être forcé ou naturel. Le coefficient de transfert de chaleur de l'air est approximativement de deux ordres de grandeurs plus faible que celui de l'eau.

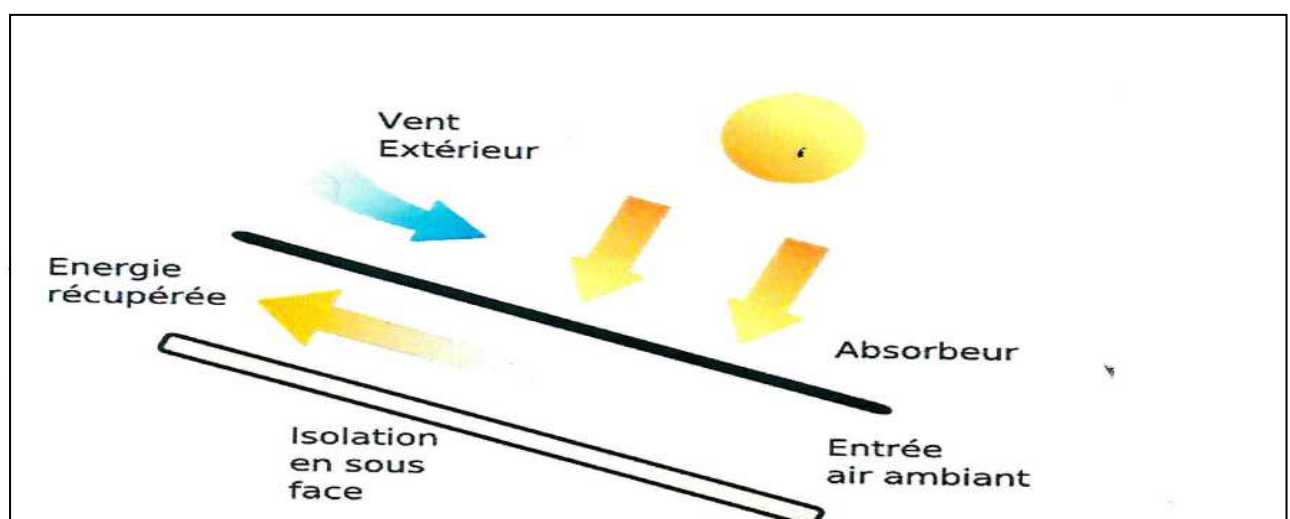


Fig. I.6. : Capteur à air

○ Capteur solaire plan à eau

Le capteur solaire thermique à eau constitué principalement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un conduit permettant à l'eau de collecter l'énergie cédée par l'absorbeur, et d'un isolant.

Le principe est le suivant : le rayonnement solaire, dont le spectre se situe essentiellement dans les longueurs d'onde du visible (courtes longueurs d'onde). Passe à travers la couverture transparente (constituée ici d'un vitrage), et arrive à l'absorbeur, celui-ci s'échauffe, et transmet de l'énergie thermique par convection à l'eau qui circule dans les conduits, et réémet du rayonnement thermique vers l'extérieur (grande longueur d'onde). L'isolant permet de réduire les Pertes thermiques du capteur.

Les capteurs à eau fonctionnent en réalité à l'aide d'un fluide caloporteur. Ils se répartissent comme suit :

a. Capteurs solaires plans vitrés

Les capteurs solaires plans vitrés sont très répandus. Ils existent sous formes de capteurs à eau et de capteurs à air.

Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où les températures souhaitées se situent entre 30°C et 70°C. Les capteurs à circulation d'eau sont plus couramment utilisés pour la production de l'eau chaude sanitaire à l'échelle individuelle ou collective, pour un usage industriel, ainsi que pour les piscines intérieures. Les capteurs à air sont utilisés pour le séchage, pour le chauffage des locaux aussi l'air de ventilation.

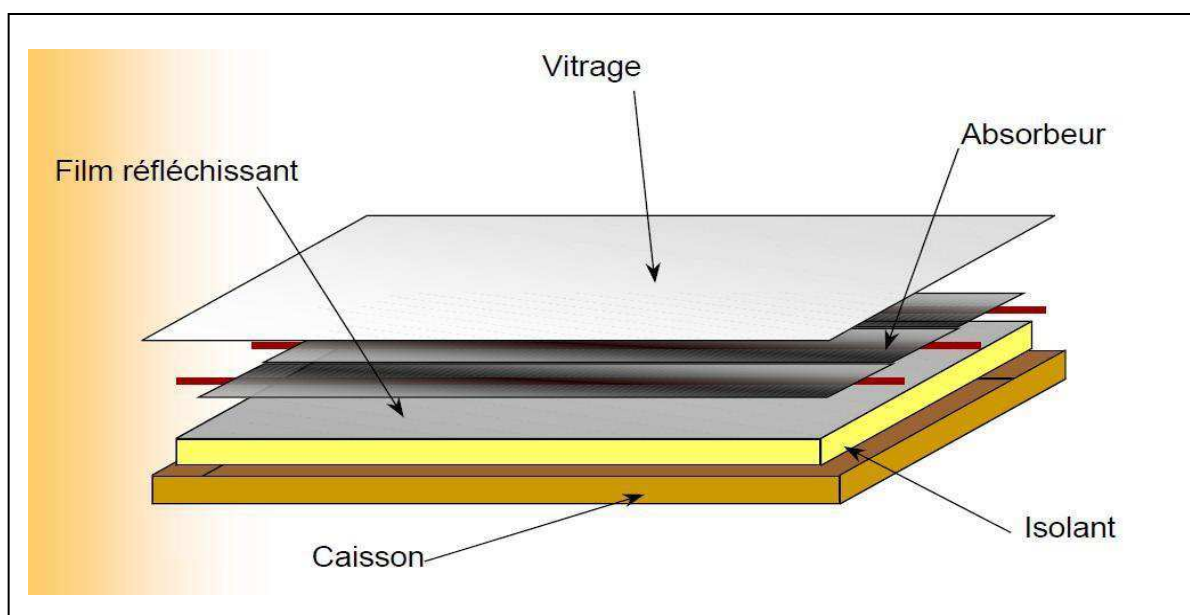


Fig. I.7 : Capteur solaire vitré

b. Capteurs solaires plans non vitrés

C'est le modèle le plus simple, le plus économique mais le moins performant. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) sur laquelle sont collés plusieurs tubes porteurs de fluide caloporteur. Les capteurs plans non vitrés ne sont pas isolés sur la face avant, c'est pourquoi ils répondent mieux à des applications à basse températures (inférieure à 30°C). Le domaine d'utilisation principal de ce type de capteurs est le chauffage des piscines extérieures. Parce qu'ils n'ont pas de vitrage, ces capteurs absorbent une grande partie de l'énergie solaire. Toutefois, parce qu'ils ne sont pas isolés sur leur face avant, la grande partie de la chaleur absorbée est perdue lorsqu'il y a notamment du vent et que la température extérieure n'est pas assez élevée. Brassé par de l'air chaud, ces capteurs absorbent la chaleur échangée en particulier au cours de la nuit lorsque la température est élevée en présence du vent à l'extérieur.

La typique intégration architecturale qu'autorise ce type de produit permet la mise en plans vitrés, en particulier pendant l'hiver.



Fig. I.8 : Capteur plan non vitré [11]

o Capteur solaire à tubes sous vide

Les capteurs solaires "sous vide" sont composés d'une série de tubes en verre transparent.

Dans chaque tube il y a une plaque absorbante pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour favoriser le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermique convectives de la plaque absorbante et la plaque absorbante reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement à ce dissiper sous forme de grande longueur d'onde. Ainsi, on peut réaliser des capteurs solaires performants sans une isolation thermique rapportée ou un coffre de protection.

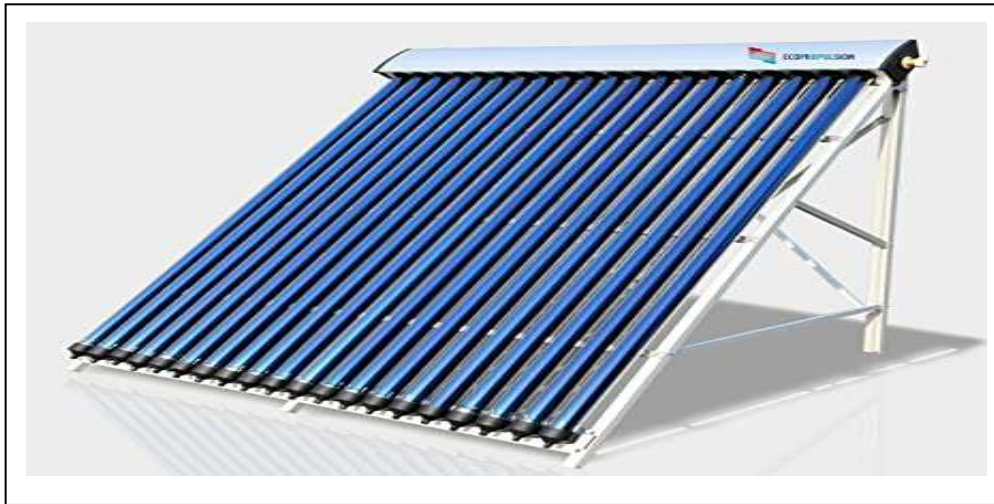


Fig. I.9 : Capteur solaire sous vide

○ **Capteur solaire VOLTHER-HYBRIDE PV-T**

Un capteur solaire Volther Hybride PV-T est un ensemble de capteurs solaires combinés qui est composé d'un module photovoltaïque (PV) pour la conversion d'énergie électrique et d'un capteur solaire plan d'une grande efficacité pour la conversion d'énergie thermique, dans un même et unique cadre [6].

I.3. Avantages et inconvénients des capteurs solaires plans

○ **les avantages**

Les panneaux solaires présentent de nombreux avantages, la médiatisation de ce sujet en témoigne.

- La lumière du soleil étant disponible partout, elle est exploitable quelle que soit la région.
- D'un point de vue écologie, les panneaux solaires ont une énergie propre non polluante pour l'environnement aucun gaz à effet de serre n'est rejeté et il n'y a aucun déchet radioactif produit.
- L'énergie solaire recueillie par les capteurs solaires est une énergie propre et renouvelable, installer cet équipement c'est participer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, en effet. Si un foyer de 4 personnes utilise des capteurs solaires thermiques complétés d'un chauffe-eau solaire, cela évite l'émission d'un tonnage de CO₂ par an dans l'atmosphère.
- L'énergie solaire permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage.
- Une faible surface de capteur solaire est nécessaire (coûts faibles 3 à 5 m²).

○ Les Inconvénients

Les panneaux solaires possèdent également des limites.

- L'énergie solaire est une énergie intermittente, Il faut donc un système de chauffage d'appoint.
- Il est nécessaire d'utiliser une autre source d'énergie (électricité, gaz, fuel ou bois) comme appoint de chauffage si l'ensoleillement est insuffisant.
- Les couts d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevée.
- L'énergie solaire ne produit qu'en journée et en fonction de la météo, et non en fonction de besoins énergétiques, il faut donc investir dans les moyens de stockage de l'énergie que coutent très cher.

I.4. Etude capteur solaire plan

La conversion du rayonnement solaire incident en énergie calorifique est susceptible d'être effectuée avec de bons rendements par une technologie simple qui est le capteur solaire plan.

Le capteur solaire plan est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie transportée par les radiations solaires, la convertir en énergie calorifique et la transmettre à un fluide caloporteur.

Il combine deux principes physiques : l'effet de serre et celui du corps noir.

La chaleur produite par les capteurs peut ensuite être utilisée pour [10] :

- Chauffer les locaux et fournir l'eau chaude sanitaire.
- Activer la croissance des végétaux.
- Sécher les grains et les fourrages.
- Faire fonctionner des moteurs thermiques.
- Alimenter des machines de réfrigération.

Les capteurs solaires 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 [1], [10].

* Effet de serre :

L'effet de serre est souvent mis à profit température du rayonnement solaire. On désigne normalement par «effet de serre», L'ensemble des modifications apportées à l'équilibre énergétique et thermique d'un corps récepteur (le sol par exemple) [28].

* Corps noir :

C'est un corps ou une surface qui absorberait de façon idéale la totalité d'un rayonnement qu'il reçoit, et qui aussi, à une température donnée et pour une longueur d'onde donnée, il émettrait le maximum de flux par rayonnement [28].

I.4.1. Etat de l'art dans les capteurs solaires plans

Les premiers travaux sur la théorie du capteur plan ont été établis en 1942 par HATELL et WOERTZ [29]. Ces travaux ont été menés afin de déterminer empiriquement le coefficient de perte thermique vers l'avant du capteur (entre l'absorbeur et l'ambiance).

Depuis, d'autres recherches ont été faites sur différentes configurations du capteur plan, comme celle de BLISS en 1959 [27], qui a déterminé le rapport des résistances thermiques représentant les échanges thermiques entre le fluide, l'absorbeur et l'extérieur, ceci pour un fluide circulant entre deux plaques parallèles en premier, un absorbeur constitué de tubes soudés à des ailettes et enfin à des tubes soudés, au dessus d'une plaque absorbante.

Des études portant sur différentes configurations de la plaque, ont été menées, ABDEL KHALIF [43]. a étudié un capteur plan dont le tube en serpentins est soudé au dessus de l'absorbeur.

En 1959, les recherches de WHILIER [12], ont été faites pour des zones particulières des capteurs, elles étaient basées sur la détermination de la fixation la plus appropriée entre le tube et la plaque absorbante.

Les recherches de KLEIN [31], portent sur la détermination du coefficient de perte thermique vers l'avant du capteur en se basant sur les résultats de HOTELLE et WORTZ [29], qui seront améliorées plus tard par d'autres.

Des études plus récentes visent à l'optimisation des capteurs solaires plans sont effectuées, dans lesquelles on cherche à augmenter les rendements par la minimisation des pertes vers l'avant du capteur comme par exemple A.BENKHLIFA [1], en comparant des résultats numériques avec les résultats expérimentaux trouvés par les auteurs précités. De même, l'influence de quelques paramètres sur le coefficient des pertes thermiques au l'avant du capteur.

Des études ont été faites également sur les transferts radiatifs dans l'absorbeur, ainsi que la position optimale du capteur par rapport au soleil, à savoir l'orientation et l'inclinaison du capteur [25].

Dans le système de chauffage d'eau, qui est considéré comme l'une des applications les plus importantes de l'énergie solaire, on trouve plusieurs configurations d'installations, selon le type de CHAOUACHI, S.GABSI [4].

Les études de B.CHAOUACHI et S.GABSI ont été faites pour examiner expérimentalement un chauffe-eau solaire, déterminer ses performances et la manière idéale de stocker l'énergie thermique qu'on récupère. Les performances peuvent être améliorées par l'utilisation de surfaces sélectives de captation et d'absorption, et le perfectionnement de l'isolation thermique pour diminuer les pertes nocturnes.

Il y a dans la littérature de très nombreuses études sur l'analyse économique et environnementale (étude de l'impact sur l'environnement) du cycle de vie des chauffe-eau solaires.

Ces travaux ont été complétés par les recherches de SOTERIS A.KALOGIROU en 2008, où il a discuté en détail les bénéfices des systèmes solaires dans la réduction de l'impact néfaste des systèmes à énergie conventionnelle [23].

Dans cette étude, faite par SOTERIS A.KALOGIROU, L'auteurs ont fait la présentation des différents systèmes de collecte de l'énergie solaire et leurs applications, l'étude s'étale sur plusieurs points parmi lesquels, une introduction sur l'historique de l'utilisation l'énergie solaire, la description des différentes technologies de captation de l'énergie, une analyse optique, thermique et thermodynamique des collecteurs, et la description des méthodes utilisées pour augmenter leurs performances. Et enfin, la présentation de quelques applications types, afin de démontrer l'extension de leurs applicabilités dans l'industrie.

Une étude des transferts thermiques dans une cuve de stockage et son enveloppe d'un système solaire de production d'eau chaude sanitaire à été faite par M.DOUCHA. en 2012, où il s'intéressé aux transferts thermiques qui ont lieu en son sein aussi bien au niveau de l'enveloppe que dans la cuve elle-même. Cette étude a pour objectifs d'aider au développement de cette cuve de stockage et à l'optimisation de ses performances. [48].

I.4.2. La puissance rayonnée

Le rayonnement solaire est un flux d'énergie, émis uniformément par le Soleil dans toutes les directions. Une puissance de 1.36 KW/m^2 est reçue par la terre en dehors de l'atmosphère. Cette valeur est appelée constante solaire. Au cours de sa traversée de l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est affaibli par la réflexion, les diffusions multiples et l'absorption par les particules de poussière et les molécules de gaz. La part du rayonnement qui traverse sans encombrer l'atmosphère rencontre directement la surface terrestre : c'est le rayonnement direct. La part du rayonnement solaire réfléchi ou absorbé par des particules solaires ou des gaz est rayonnée à nouveau et rencontre la surface terrestre dans toutes les directions : c'est le rayonnement diffus.

La somme des rayonnements, direct et diffus est appelée rayonnement global R_g . Il est de 1000 W/m^2 maximum dans des conditions optimales (ciel clair et sans nuages, à midi). Les capteurs solaires sont, selon le modèle et le dimensionnement de l'installation, en mesure d'utiliser jusqu'à 75% environ du rayonnement global.

I.5. Principe de fonctionnement du capteur solaire plan

Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan est très simple (fig.10) [20].

Le rayonnement solaire traverse la vitre et arrive sur l'absorbeur muni d'une surface sélective où il est converti en chaleur à sa surface. Le fluide caloporteur qui circule dans l'absorbeur conduit la chaleur captée vers un échangeur de chaleur, à partir duquel elle est transmise au consommateur.

Le vitrage est transparent pour le rayonnement visible et le proche I.R mais opaque pour le rayonnement I.R lointain émis par l'absorbeur, ainsi, la couverture transparente crée un effet de serre.

L'isolation thermique en dessous et autour du capteur diminue les déperditions thermique et augmente ainsi son rendement.

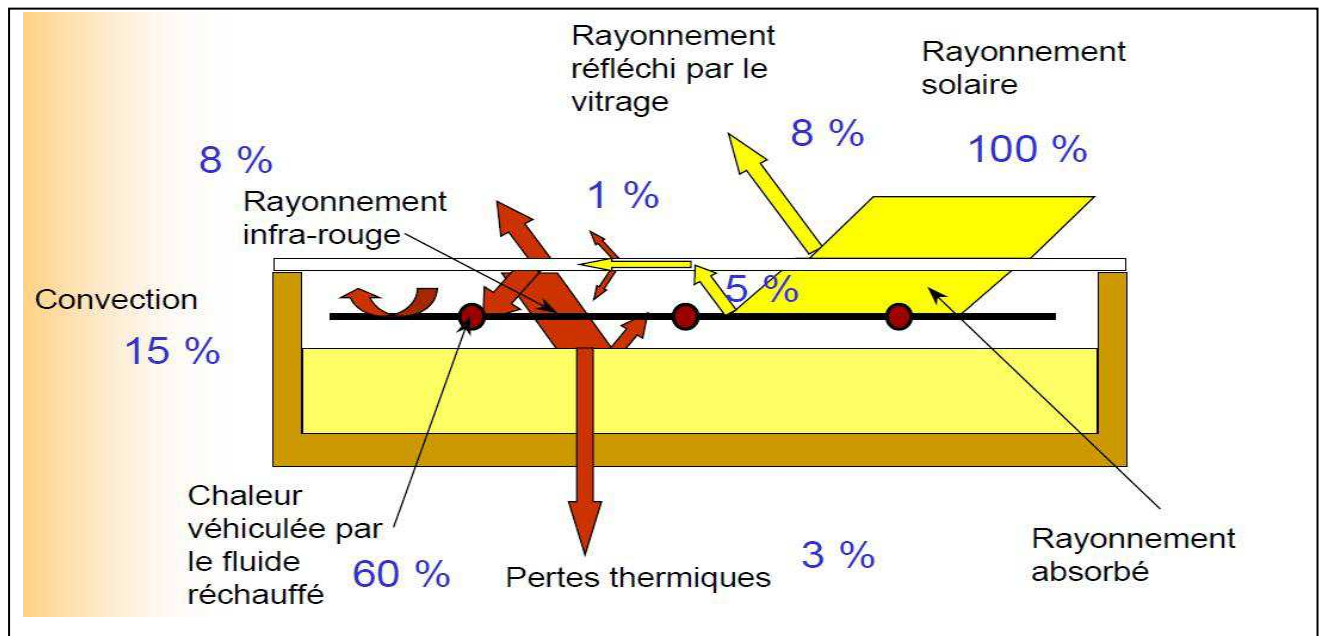


Fig. I. 10 : Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan

I.6. Différents composants d'un capteur solaire plan

Un capteur plan est constitué essentiellement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'une isolation thermique et d'un coffre.

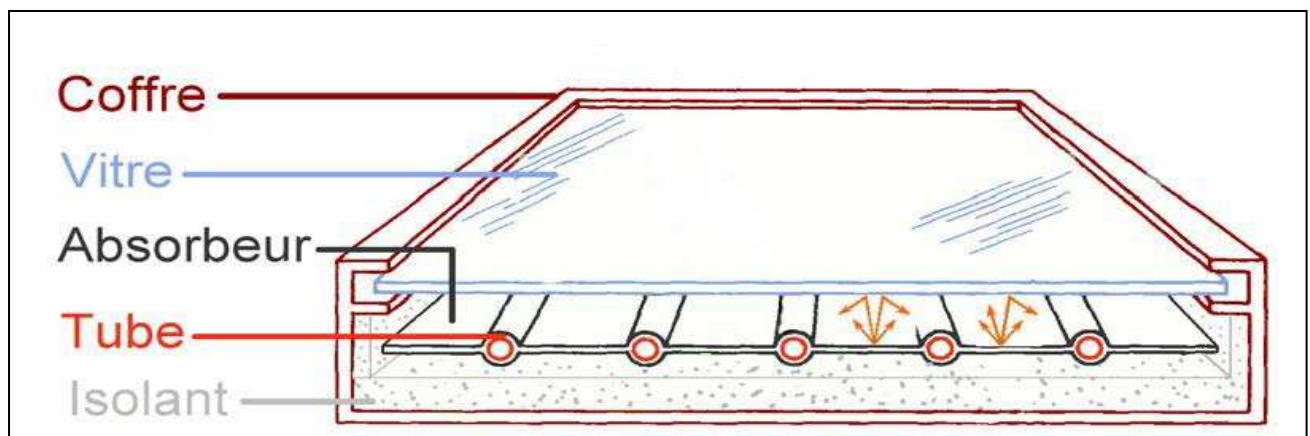


Fig. I. 11 : Composant d'un capteur solaire plan

I.7. Différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique; conduction, convection et rayonnement.

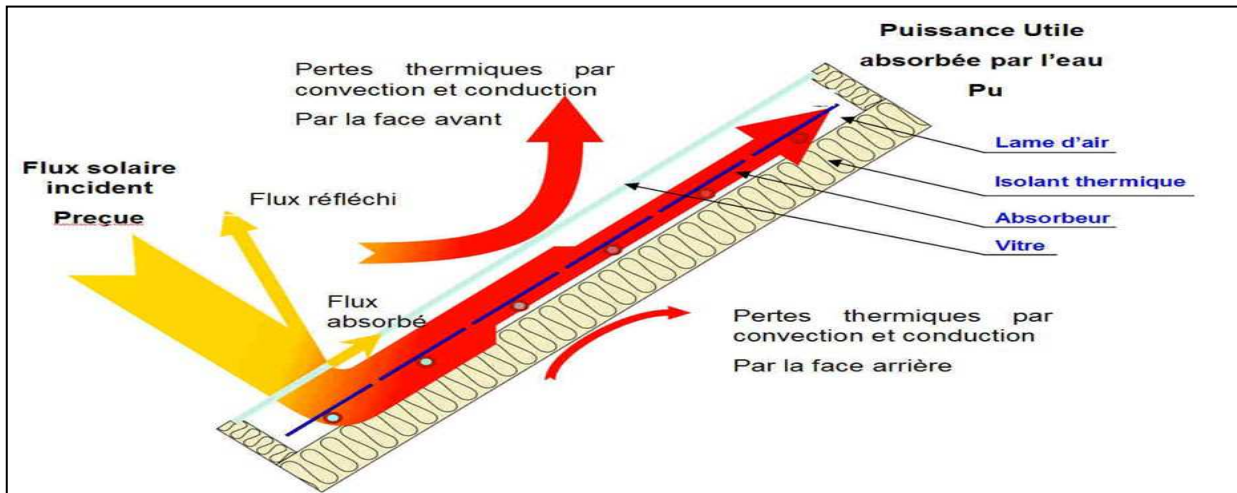


Fig. I. 12 : Les modes de transfert thermique

○ **La conduction**

La conduction est le mode de transfert de chaleur caractérisé par la propagation de l'énergie thermique dans un milieu sans déplacement de matière. La loi correspondant au processus de la conduction est la loi de Fourier donnée par la relation [33] :

$$Q_{cd} = -\lambda \times A \times \text{grad}T \tag{I.1}$$

Où:

- Q_{cd} : flux de chaleur par conduction.
- λ : coefficient de conductivité thermique.
- A : surface d'échange.

Dans le capteur solaire plan les échanges par conduction existent principalement entre :

- Les faces supérieures et inférieures de la vitre.
- Les faces supérieures et inférieures de l'isolant.
- L'absorbeur et l'isolant.

➤ **La convection**

La convection est un transport de à des mouvements macroscopiques [7]. On distingue de convection :

• **La convection forcée**

Le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe comme le vent, une pompe, un ventilateur, etc.

• **La convection naturelle**

Le mouvement de fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein de fluide, tel est le cas de la thermo circulation.

Le transfert thermique convectif est régi par la loi de Newton [7] :

$$Q_{cv} = h \times S \times (T_p - T_f) \tag{I.2}$$

Avec:

Q_{cv} : le flux échange par convection.

h : coefficient de convection.

S : surface de la paroi solide en contact avec le fluide.

T_p : Température de la paroi solide.

T_f : Température du fluide.

Dans un capteur plan l'échange par convection s'effectue entre :

- La vitre et l'ambiance, par convection libre ou forcée par le vent.
- La vitre et la plaque de l'absorbeur par convection libre.
- Le tube et le fluide par convection libre.
- Entre le fluide et l'isolant par convection libre.
- Entre l'isolant et l'ambiance par convection libre ou forcée par le vent.

➤ Le rayonnement

C'est le mode de transfert de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques à la vitesse de la lumière ; il peut intervenir même dans le vide sans milieu matériel.

Bien qu'il existe plusieurs types d'ondes électromagnétiques, on considère seulement le rayonnement thermique qui transporte l'énergie-chaleur.

L'énergie thermique émise par une surface dépend de la température et de sa nature.

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann :

$$Q_r = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (I.3)$$

Avec:

Q_r : flux de chaleur émis par rayonnement.

ε : émissivité thermique du matériau.

σ : constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5.6 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

T : température absolue du corps.

Dans un capteur solaire plan le transfert par rayonnement s'effectue entre :

- La vitre et l'absorbeur.
- La vitre et le ciel.
- L'isolant et le sol [47].

I.8. Le rendement

Le rendement d'un capteur est le rapport entre l'énergie extraite par le fluide caloporteur pendant un intervalle de temps donné et le produit de l'irradiation solaire pendant le même intervalle du temps, sur le capteur par sa superficie, dans les conditions de l'état stationnaire.

I.9. Différents paramètres influencé sur le rendement du capteur solaire plan

L'efficacité thermique du capteur solaire dépend fortement du matériel, de la forme, des dimensions, de la disposition du capteur et des conditions environnantes. Tous ces facteurs peuvent être classés en deux catégories principales :

➤ **Les paramètres externes**

- Les principaux paramètres externes qui peuvent intervenir directement sur les performances d'un capteur plan sont :
- Paramètre d'ensoleillement : le rayonnement solaire, position du soleil, durée d'insolation, ...etc.
- Température ambiante.
- Vitesse du vent.

➤ **Les paramètres internes**

Paramètre géométrique :

- Les paramètres de position : angle d'inclinaison, orientation du capteur.
- La surface du capteur.
- Les dimensions de différents éléments : épaisseur, longueur et largeur.

Paramètre de fonctionnement :

- La température d'entrée du fluide caloporteur.
- Le débit massique du fluide caloporteur.
- Les températures des différents éléments du capteur.

Ces paramètres sont très importants. Ils permettent, en tenant compte du coût, d'avoir une température de sortie du fluide élevée (puissance utile élevée). En d'autres termes; un meilleur rendement du capteur.

I.10. Les fluides caloporteurs

I.10.1. Définition

Un fluide caloporteur est un fluide qui transporte la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Ces fluides sont utilisés dans de nombreux systèmes, à différentes échelles intégrant des échangeurs de chaleur : les systèmes de réfrigérateurs, les chaudières, les capteurs solaires thermiques, les centrales électriques thermiques ou nucléaires ... les « fluides caloporteurs » peuvent être des gaz, des fluides organiques, des métaux liquides ou de l'eau. Selon les utilisations, ils sont choisis en fonction des quantités nécessaires et de leurs propriétés physico-chimiques, leur conductivité thermique, leurs propriétés anticorrosives, leur coût et leurs impacts sur l'environnement.

L'eau est l'un des plus utilisés en raison de sa capacité température élevée (3 fois plus élevée que l'iso-pentane et 1,2 fois plus élevée que l'eau glycolée à 46%), de sa grande conductivité thermique.

I.10.2. Différents types des fluides caloporteurs

On distingue :

L'eau, L'air, Les sels fondus, monopropylène glycol, Les fluide de Biodetex...

• L'eau

L'eau peut se présenter, comme fluide caloporteur, sous ses deux phases : liquide et vapeur. Sous forme liquide, compte tenu de ses propriétés, l'eau constitue un excellent caloporteur et sert de fluide de référence pour les autres fluides. Son usage, à l'état pur, est limité à des températures supérieures à 300 °C (point triple) et inférieures à 300 °C, compte tenu des pressions importantes de saturation et des coûts induits pour l'installation que ces températures élevées engendrent. Prouvent dissoudre de très nombreuses espèces minérales sous forme d'ions et de gaz (O₂, CO₂), l'eau naturelle doit être soigneusement filtrée, traitée et purifiée pour une utilisation industrielle.



Fig. I.13 : L'eau

• L'air

L'air, par sa disponibilité, est le caloporteur le plus fréquemment utilisé malgré des caractéristiques thermiques médiocres (capacité thermique massique de 1J/(kg. K) et conductivité thermique de 300 °C 0.024 °C W / (m.k)).

I.10.3. Avantages et inconvénients de l'air**a. Avantages**

- Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été.
- Avec l'air sec, il n'y a pas de problème de corrosion.
- Mise en œuvre simple.
- Système fiable.

b. Inconvénients

- L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux.
- Le produit de la masse volumique par la chaleur spécifique est faible pour l'air comparativement à celui de l'eau.
- Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant compte tenu de la remarque précédente.
- Les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau.

I.11. Les fluides de Biodetex

➤ Le mono propylène

Le monopropylène, ajouté au caloporteur, permet de modifier son point de congélation en fonction de sa concentration. Quant aux différents agents que l'on peut ajouter, ils permettent de modifier les propriétés chimiques et ainsi, de pouvoir conférer au caloporteur certaines résistances : anticorrosion, antitartre, antibactérien...

DETEX-TERMISOLAR L

- ✓ Concentration de propylène glycol USP qualité alimentaire la solution à 40%.
- ✓ Point d'ébullition à environ 124°C.
- ✓ Point de congélation à 24°C.
- ✓ Complètement biodégradable.
- ✓ Évite les dépôts de boue dans le circuit réfrigérant.
- ✓ Liquide de détection de figure disponible en format 5.25 y 1000 litres.

DETEX-TERMISOLAR M

- ✓ Concentration de propylène glycole USP qualité alimentaire la solution à 60%.
- ✓ Point d'ébullition à environ 180°C.
- ✓ Point de congélation à - 52°C.
- ✓ Complètement biodégradable.
- ✓ Évite les dépôts de boue dans le circuit réfrigérant.
- ✓ Liquide de détection de fuites disponible de en format 5.25 200 y 1000 litres.

DETEX-TERMISOLAR X

- ✓ Propylène glycole USP qualité alimentaire concentré et d'autres agents organiques avec bonnes caractéristique cryoscopiques et conductométriques.
- ✓ Point d'ébullition à environ 180°C.
- ✓ Point de congélation à < 52 °C.
- ✓ Complètement biodégradable.
- ✓ Evite les depotes de boue dans le circuit réfrigérant.
- ✓ Liquide de détection de fuites disponible en format 5.25 200 y 1000 litres.

I.12. Stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie.

Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la consommation d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est

supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante.

Les méthodes de stockage dépendent du type d'énergie. Les sources d'énergie fossiles (charbon, gaz, pétrole), sous forme de réservoirs à l'état naturel, remplissent naturellement la fonction de stocks. Une fois extraites, elles peuvent facilement être isolées, hébergées et transportées d'un point de vue technique. Le stockage s'avère plus complexe pour les énergies intermittentes : leur production est relayée par des vecteurs énergétiques tels que l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène, nécessitant des systèmes spécifiques de stockage.

I.12.1. Différents types de stockage

Plusieurs techniques de stockage de l'énergie sont utilisées et peuvent être classées selon la forme de l'énergie intermédiaire [30], on distingue deux grandes catégories :

a. Énergie intermédiaire : stockage électrochimique de l'énergie

Le stockage de l'énergie dans les batteries électrochimiques est la technique la plus répandue pour les petites quantités d'énergie électrique. En fonction du type de batterie (plomb-acide, lithium-ion, nickel-métal hydrure, etc.), différentes réactions chimiques sont provoquées à partir de l'électricité : il s'agit de la phase de charge de la batterie. Selon la demande, les réactions chimiques inversées produisent ensuite de l'électricité et déchargent le système.

Les batteries électrochimiques sont souvent destinées à des applications portables. De puissance relativement faible, elles présentent néanmoins une grande capacité de stockage pour des durées de décharge élevées (jusqu'à plusieurs heures) avec un taux de rendement de 70% à 80%. Ces dispositifs peuvent également avoir des fonctions de secours lorsque le réseau électrique est défaillant ou dans le cas d'une production d'électricité issue des énergies renouvelables, avec des valeurs d'énergie stockée de quelques Wh jusqu'à 40 MWh.

b. Énergie intermédiaire: stockage mécanique de l'énergie

Cette catégorie regroupe les voies les plus connues de stockage hydraulique et à air comprimé. Elle inclut aussi les volants d'inertie.

- Énergie mécanique potentielle.
- Stockage hydraulique.

Il permet de stocker de grande quantité d'énergie électrique par l'intermédiaire de l'énergie potentielle de l'eau. Une STEP (station de transfert d'énergie par pompage), type de centrale hydroélectrique, est utilisée pour transférer l'eau entre deux bassins situés à des altitudes différents. Lorsque le réseau fournit un surplus d'électricité, l'eau du bassin inférieur est pompée dans le bassin supérieur. Sous l'effet de la pesanteur, cette masse d'eau représente une future capacité de production électrique.

Lors d'un déficit de production électrique, la circulation de l'eau est inversée : la pompe devient turbine et restitue l'énergie accumulée. Avec un rendement pouvant atteindre plus de 80%, il s'agit de la solution la plus employée pour stocker l'énergie des centrales électriques.

a. 1. Stockage à air comprimé

Quand la demande d'électricité est faible, les systèmes existants utilisent d'anciennes mines de sel comme réservoirs et un ensemble moteur-générateur-turbine. Quand la demande d'électricité est importante, l'air comprimé est utilisé pour faire tourner une turbine couplée à un alternateur produisant de l'électricité. Le rendement, actuellement aux environs de 50%, est un axe de recherche et de développement. Le stockage à air comprimé à partir des énergies éolienne et solaire fait l'objet d'installations pilote en Allemagne et aux Etats-Unis.

a. 2. Energie mécanique cinétique

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie cinétique dans un « volant d'inertie », dispositif en forme de roue tournant autour de son axe central. Une machine électrique lui fournit l'énergie cinétique (fonctionnement moteur) et la récupère selon les besoins (fonctionnement générateur), entraînant une baisse de la vitesse de rotation du volant d'inertie. Ce système permet de restituer plus de 80% de l'énergie accumulée mais pour un temps de stockage limité. En pratique, le volant d'inertie est utilisé pour un lissage à très court terme de la fourniture d'énergie au sein d'appareils de production. C'est notamment le cas des moteurs thermique et surtout des moteurs Diesel.

c. Stockage d'énergie solaire thermique

Actuellement, le stockage thermique est peu exploité. Son usage devrait croître à l'occasion du développement des fermes solaires thermodynamiques.

c. 1. Modes de Stockage d'énergie thermique

Il existe différents modes de stockage d'énergie thermique connus à ce jour. Ces recherches sont orientées vers la sélection de systèmes adaptés au stockage à longue durée. Chaque système est associé à deux étapes, qui constituent un cycle de fonctionnement : une phase de stockage de chaleur, la charge, succède ou précède et une phase de production de chaleur, la décharge.

Avant l'évaluation des performances d'un système complet de stockage, l'étude de faisabilité du système débute par le choix d'un matériau. La sélection des matériaux de stockage repose sur les critères suivant :

- une grande chaleur latente et une grande conductivité thermique.
- une température de fusion adaptée à leur utilisation pratique et leur stabilité chimique.
- La densité de stockage d'énergie du matériau, correspondant à l'énergie stockage par unité de masse ou de volume, est un facteur indispensable pour assurer la compacité du système de stockage.
- non corrosifs.

- Le non toxicité.
- Le coût.
- La capacité d'autodécharge liée à la stabilité chimique et mécanique du matériau.

Nous présentons ci-dessous les grands principes de stockage d'énergie thermique en faisant ressortir les avantages des uns et des autres et en décrivant brièvement les idées émergentes liées à ces principes.

La transformation du matériau peut désigner une variation de température (stockage à chaleur sensible), un changement de phase (stockage à chaleur latente), une transformation physique (adsorption) ou une réaction chimique (stockage thermochimique) [35].

c.1.1 Stockage par chaleur sensible

Pour le stockage thermique par chaleur sensible, l'énergie thermique est stockée par le changement de la température du matériau de stockage. Ainsi, la capacité de stockage dépend de la différence de température, de la chaleur spécifique et de la quantité de matériau de stockage.

$$Q = mC_p (T_{\min} - T_{\max}) \tag{I.4}$$

Où :

- Q : Chaleur absorbée (J).
- m : Masse du matériau de stockage (Kg).
- C_p : Capacité calorification du matériau (KJ/Kg.K).

Les systèmes de stockage de chaleur sensible peuvent être classés sur la base du matériau de stockage : stockage par un liquide (l'eau, les liquide à base d'huile, de sels fondus, etc.) ou par un solide (comme l'acier, les roches, les métaux et autres).

I.13. Matériaux de stockage par chaleur sensible

Les matériaux de stockage par chaleur sensible les plus courants sont l'eau, le béton, la roche et la terre. Les principales caractéristiques de ces matériaux sont regroupées dans le tableau suivant :

Tab. I. 1 : Caractéristiques de quelques matériaux de stockage sous l'effet de chaleur sensible (Hadron, 2005).

	Béton	Roche compacte	Terre Avec gravier	Agile
Capacité thermique (J K ⁻¹ Kg ⁻¹)	1130	800	1840	880
Masse volumique (Kg ⁻³)	2400	2600	2000	1500
Densité de stockage (KWh. K ⁻¹ m ⁻³)	0.75	0.58	1.02	0.36
Conductivité thermique (W m ⁻¹ K ⁻¹)	2.3	2.5	0.52	1.28
Gamme de température (°C)	0 - 130	illimitée	illimitée	illimitée

I.13.1. L'eau

L'eau est le matériau d'accumulation thermique presque universellement choisi toutes les fois que l'on emploie des capteurs solaires plans à circulations du même corps. Sous les climats où la température reste au dessus de son point de congélation, elle présente une plus grande chaleur spécifique que d'autres matériaux, L'eau peut être utilisée sur la large gamme de température de 25 à 90°C. Pour une variation de température de 60°C, l'eau peut stocker 250KJ/Kg soit 2.5×10^5 KJ/m³. L'eau utilisée pour l'accumulation circule dans le circuit du capteur de sorte qu'elle serve aussi de fluide de transfert (caloporteur). L'eau est un excellent milieu de stockage en raison de son coût insignifiant. Malheureusement, quand la température dépasse 60°C, la pression doit être maintenue à des valeurs élevées et le coût des réservoirs deviennent vite prohibitifs pour des stockages de quelques importances.

On utilise aussi les pressions importantes rencontrées dans le sous-sol pour réaliser des stockages de la chaleur. Il en existe deux procédés :

- 1) Le stockage en milieu poreux où l'eau sert essentiellement au niveau du transfert de chaleur et ne participe donc qu'accessoirement à son stockage.
- 2) Le stockage en cavités creusées dans le sol et contenant de l'eau sous pression.

L'eau présente plusieurs avantages, comparée aux fluides solaires conventionnels

- L'eau présente un meilleur transfert de chaleur.
- L'eau a une capacité de chaleur plus haute.
- L'eau a une viscosité moins élevée et plus constante. Les pertes de pression dans les tubulures sont ainsi réduites.
- L'eau est un aliment sans risques.

Le seul inconvénient de l'eau est qu'elle gèle en hiver.

Les conditions de faisabilité sont :

- faible diffusivité thermique ($\alpha = \lambda/\rho C$),
où : λ : conductivité thermique, C : chaleur massique, ρ : densité volumique) du matériau de stockage sol.
- forte chaleur massique C [36].

I.13.2. L'Acier

Aujourd'hui les aciers sont des matériaux d'un grand intérêt industriel en raison de leur large gamme d'emploi. La métallurgie, l'industrie mécanique, l'industrie des bâtiments considèrent et utilisent différents aciers comme matériau de base.

Un acier est un alliage dont le fer est l'élément prédominant, dont la teneur en carbone est généralement inférieure à 2% et qui contient d'autres éléments d'addition.

I.13.2.1. Propriétés thermiques

La variation de température au sein d'un élément structurel dépend de :

- la masse volumique du matériau ρ .
- la conductivité thermique du matériau λ qui représente la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C , 1 m d'épaisseur de ce matériau en 1s.
- la chaleur spécifique du matériau C qui représente la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température de 1 Kg de ce matériau.

Les propriétés thermiques de l'acier sont connues, ce qui nous permet de ne présenter que les lois conventionnelles de ce matériau [21].

I.13.2.2. Masse volumique de l'acier

Conventionnellement, la masse volumique de l'acier ρ_a est considérée comme indépendante de la température, $\rho_a = 7850 \text{ Kg/m}^3$ [32].

I.13.2.3. Conductivité thermique de l'acier

La courbe de variation de la conductivité thermique de l'acier λ_a en fonction de la température est de type bilinéaire. En notant θ_a la température de l'acier :

$$\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta_a \quad \text{Si } \theta_a \leq 800^\circ\text{C}$$

$$\lambda_a = 27,3 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \quad \text{Si } \theta_a > 800^\circ\text{C}$$

I.13.2.4. Chaleur spécifique de l'acier

La chaleur spécifique de l'acier C_a peut s'exprimer de quatre façons suivant l'intervalle de température considéré [32] :

$$C_a = 2.22 \times 10^{-6} T_a^3 - 1.69 \times 10^{-3} T_a^2 + 7.73 \times 10^{-1} T_a + 425 \quad \text{Si } T_a \leq 600^\circ\text{C}$$

$$C_a = 666 + \frac{13002}{738 - T_a} \quad \text{Si } 600^\circ\text{C} < T_a \leq 735^\circ\text{C}$$

$$C_a = 545 + \frac{17820}{T_a - 731} \quad \text{Si } 735^\circ\text{C} \leq T_a \leq 900^\circ\text{C}$$

$$C_a = 650 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad \text{Si } T_a > 900^\circ\text{C}$$

I.13.2.5. Dilatation thermique de l'acier

La dilatation thermique de l'acier $\Delta l/l$ peut s'exprimer de trois façons suivant l'intervalle de température considéré [32] :

$$\Delta l/l = 0.4 \times 10^{-8} T_a^2 + 1.2 \times 10^{-5} T_a - 2.416 \times 10^{-4} \quad \text{Si } T_a \leq 750^\circ\text{C}$$

$$\Delta l/l = 1.1 \times 10^{-2} \quad \text{Si } 750^\circ\text{C} < T_a < 860^\circ\text{C}$$

$$\Delta l/l = 2 \times 10^{-5} T_a - 6.2 \times 10^{-3} \quad \text{Si } T_a > 860^\circ\text{C}$$

I.13.3. Stockage par chaleur latente

Ce mode de stockage est basé sur l'énergie mise en jeu lorsqu'un matériau change d'état (par exemple solide-liquide). La transformation inverse permet de libérer l'énergie accumulée sous

forme de chaleur ou de froid, avec un rendement d'environ 60%. Cette technique peut être appliquée dans les bâtiments, par l'intermédiaire des Matériaux à changement de phase (MCP). Incorporés aux parois, ils servent de régulateur thermique en fonction de la chaleur apportée par le soleil.

$$Q = m L_p \quad (I.5)$$

Avec L_p : La chaleur latente.

I.13.4. Stockage par réaction chimique

Le principe du stockage de chaleur par réaction chimique est $A+B \leftrightarrow AB+\text{chaleur}$.

Au cours de la phase d'été, le composé AB est séparé en composants A et B par l'action de l'énergie solaire. A et B peuvent être stockés séparément pendant la phase de stockage.

Pendant la phase d'hiver, A et B sont mis en contact pour la réaction et AB est formé. La chaleur de réaction est libérée pour le chauffage des logements ou d'autres usages. La capacité de stockage dépend de la chaleur de la réaction.

Pour ce type de stockage, il est nécessaire que les réactions chimiques en jeu soient totalement réversibles. La chaleur produite par le capteur solaire est utilisée pour exciter une réaction chimique endothermique. Si cette réaction est totalement réversible, de la chaleur peut être récupérée complètement par la réaction inverse. Souvent, des catalyseurs sont nécessaires pour libérer la chaleur.

Les avantages fréquemment cités du stockage d'énergie thermique par réaction sont leurs fortes densités de stockage de l'énergie et une durée indéfiniment longue de stockage à température ambiante. Leurs inconvénients peuvent comprendre : la complexité, des incertitudes sur les propriétés thermodynamiques des composants de la réaction et de la cinétique de réactions dans le cadre d'un large éventail de conditions d'exploitation, un coût élevé, la toxicité et l'inflammabilité.

Bien que le stockage d'énergie thermique par des réactions ait plusieurs avantages d'un point de vue thermodynamique, leur développement est à un stade pas très avancé. A ce jour, aucun prototype viable n'a été construit [21].

I.14. Conclusion

Malgré toutes ses recherches concernant l'exploitation des énergies, les énergies renouvelables (gratuites) en particulier; restent insuffisantes pour épargner les besoins journaliers de cette matière vitale.

CHAPITRE II

ETUDE THERMIQUE D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN

II.1. Introduction

Un corps chauffé émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Une des particularités de ce rayonnement dit " thermique " est qu'il peut se propager dans le vide.

Au niveau microscopique, ce phénomène ne peut s'expliquer en physique classique. Cependant, on retiendra comme image que plus la température du corps n'est élevée, plus l'agitation thermique responsable de l'émission n'est élevée.

Comme tout rayonnement électromagnétique, le rayonnement dit thermique est caractérisé par une densité d'énergie et un spectre (répartition de l'énergie suivant la longueur d'onde). Le rayonnement thermique se déplace vers les courtes longueurs d'ondes quand la température du corps augmente.

Ainsi le filament de tungstène utilisé dans les lampes à incandescence a une couleur caractéristique de sa température. A faible température, il est rouge-orangé, puis jaune puis blanc. Le pic du spectre d'émission se déplace de limite entre l'infra-rouge et le visible (rouge) vers le milieu du visible (blanc).

Il faut finalement distinguer la nature des récepteurs de ce rayonnement thermique : certains le réfléchissent d'autres l'absorbent et la transforment en énergie interne pour rayonner à leur tour.

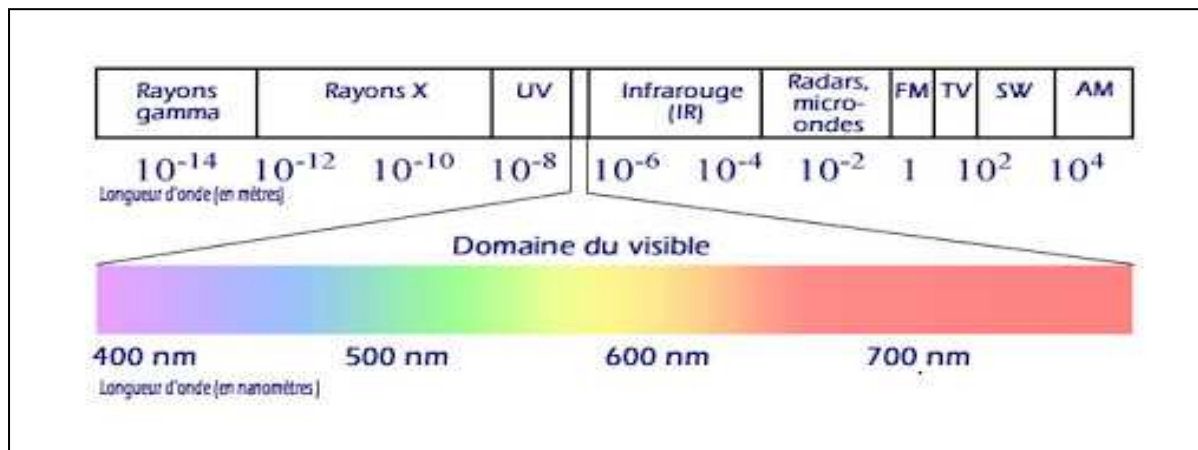


Fig. II.1 : Rayonnement solaire

II.2. Le capteur solaire plan

Les capteurs plans sont des collecteurs solaires thermiques qui transforment l'énergie solaire en chaleur à basse température grâce à un absorbeur.

Sans concentration du rayonnement solaire, le flux solaire tombant sur une surface située au niveau de la mer ne peut guère dépasser 1KW/m^2 . Cette valeur ne permet pas d'atteindre des températures supérieures à 100°C . Par contre, ils ne nécessitent pas un suivi du soleil et utilisent la composante directe diffuse du rayonnement incident [34].

. C'est-à-dire que même par temps couvert le fluide caloporteur parvient s'échauffer.

II.3. Principe de fonctionnement

Le rayonnement solaire est transmis par le vitrage à l'absorbeur qui s'échauffe et rayonne à son tour sous de grandes longueurs d'ondes. Ces dernières émissions emprisonnées par le vitrage contribuent à l'échauffement de l'absorbeur. Ainsi, cette chaleur est transmise à l'eau qui transporte la chaleur vers le réservoir de stockage.

o La Vitre

La majeure partie du rayonnement solaire est transmis par le verre, un faible pourcentage est réfléchi ou absorbé.

o L'absorbeur

L'absorbeur, absorbe une grande proportion du rayonnement solaire et s'échauffe. Il émet de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge.

o Le vitrage

Le vitrage absorbe la quasi-totalité du rayonnement émis par le corps absorbeur et s'échauffe. Le vitrage, à son tour émet de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge. En supposant la température du verre uniforme, ce dernier émet une puissance aussi bien vers l'atmosphère que vers l'absorbeur [41].

II.4. Bilan thermique

Une partie de la totalité de l'énergie solaire frappant le collecteur plan n'est pas transmise à cause de la transparence imparfaite de la plaque transparente de couverture et une partie n'est pas absorbée à cause de l'absorbance imparfaite de la surface noire.

Ce comportement représente une première perte d'énergie absorbée par la surface noire et dissipée de la manière suivant :

- o Pertes par conduction vers la partie postérieure et les cotés du collecteur.
- o Pertes par convection et rayonnement à travers le système de couverture.

La quantité restante d'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur et représente dans ; l'énergie utile du système.

Il en résulte que le bilan thermique d'un capteur plan, dans les conditions de régime variable est représenté par l'équation suivante [5] :

$$Q_a = Q_u + Q_p + Q_s \quad (\text{II.1})$$

- Où :
- Q_a : chaleur absorbée par l'absorbeur (J).
 - Q_u : chaleur utile (J).
 - Q_p : chaleur perdue par le capteur vers l'extérieur (J).
 - Q_s : chaleur emmagasinée dans le capteur (J).

II.5. Calcul des rendements

Il dépend de l'ensoleillement et de l'écart de températures entre le milieu ambiant et l'absorbeur, ainsi que des vents (qui favorisent les pertes par convection) [22].

II.5.1. Le rendement instantané

C'est le rapport entre l'énergie utile Q_u (l'énergie réellement transférée vers le fluide caloporteur ou vers un milieu de stockage) et la puissance solaire globale Q_0 (le flux arrivant sur le plan du capteur).

$$\eta_{cap} = \frac{Q_u}{Q_0} = 1 - \frac{Q_p}{Q_0} \quad (\text{II.2})$$

Où : η_{cap} : Rendement instantané d'un capteur solaire plan.
 Q_0 : le flux arrivant sur le plan du capteur.

II.5.2. Rendement optique

$$\eta_{cap} = \frac{Q_a}{Q_0} \quad (\text{II.3})$$

Où : η_0 : Rendement optique du capteur.

II.6. Les pertes thermiques dans un capteur solaire plan

II.6.1. Pertes par conduction

Observées sur la face arrière et sur les cotés de l'isolateur, les pertes par conduction sont données par la relation [5] :

$$Q_c = \frac{T_i - T_e}{e_i/\lambda_i + e_b/\lambda_b + e_a/\lambda_a} \times A_b + \frac{T_1 - T_2}{e_i/\lambda_i + e_b/\lambda_b} \times A_f \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- A_b et A_f : Aires latérale et du fond du capteur.
- E_i et λ_i : Epaisseur et conductivité thermique de l'isolation.
- E_b et λ_b : Epaisseur et conductivité thermique du cadre.
- E_a et λ_a : Epaisseur et conductivité thermique de l'absorbeur.
- T_1 : Température de la surface absorbante.
- T_2 : Température de la surface inférieure du cadre.
- T_i : Température à la surface de l'isolant au niveau des flancs.

Le premier terme représente les pertes sur le second terme celle sur les flancs.

Notons cependant que dans cette formule il est supposé qu'on a le même isolant sur toutes les faces.

II.6.2. Pertes par convection

On note deux cas de convection : en dessous de la surface (entre la vitre et l'absorbeur) et celle au dessus.

Ces pertes correspondent au transfert de chaleur par conduction dans l'air entre l'absorbeur et la vitre distants de e . Elles sont alors données par la relation [5] :

$$Q_{cv} = \frac{\lambda_{air}}{e} (T_1 - T_v) \quad (II.5)$$

Avec :

λ_{air} est la conductivité thermique de l'air.

T_1 et T_v . Sont respectivement les températures de l'absorbeur et de la vitre.

Pour réduire ces pertes, on a deux alternatives:

- Réduire λ_{air} c'est à dire remplacer l'air par un autre gaz par exemple le dioxyde de carbone.
- Augmenter e ; L'augmentation de l'espacement semble plus facile mais se trouve être inefficace du fait de la convection.

II.6.3. Pertes par rayonnement

On distingue : les pertes par réémissions et les pertes par réflexions.

○ Pertes par réémission

Cette quantité notée Q_r est obtenue par le biais de la relation suivante [5] :

$$Q_r = \frac{\sigma_0 \times S (T_1^4 - T_v^4)}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_v - 1} \quad (II.6)$$

Avec :

T_1 et ε_1 : représentent respectivement la température et l'émissivité de l'absorbeur.

T_2 et ε_2 : représente respectivement la température et l'émissivité de la vitre.

Un vitrage multiple permet de réduire la réémission. Soulignons par ailleurs que, dans ce cas, la première vitre doit être placée à 18 mm environ de l'absorbeur puis l'interface entre les autres à 15 mm. Seule la vitre supérieure sera à fixer rigidement, pour les autres on devra prévoir un jeu de 2 mm pour leur permettre de se dilater librement.

o **Pertes par réflexion**

Elles s'observent au niveau du couvercle transparent et de l'absorbeur.

Le verre ordinaire réfléchit 7 à 8% du rayonnement incident et la peinture noire mate en réfléchit 2 à 6% [42] :

On a alors:

$$Q_{rf} = (p + 0.61 + \alpha_a) \times E \times S + 0.006 \times E \times S \quad (\text{II.7})$$

Avec :

p : Facteur de réflexion.

α_a : Facteur d'absorption.

S : La surface (m²).

Le premier terme représente la réflexion de vitrage et le second celle de l'absorbeur.

II.6.4. Pertes totales

Les pertes totales notées Q_t est la somme de l'ensemble des pertes évaluées dans ces paragraphes.

$$Q_r = Q_c + Q_{cv} + Q_s + Q_{rf} \quad (\text{II.8})$$

II.7. Conclusion

Malgré les améliorations menées aux équipements d'accumulation de l'énergie solaire thermique ou photovoltaïque, on' a pas pu arriver au niveau requis pour exploiter toute l'énergie fournie par le soleil. Mais, il existe des recherches permanentes jusqu'atteindre le but « rêvé ».

CHAPITRE III

UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE

III.1. Introduction

Les usages thermiques de l'énergie solaire rencontrent un réel intérêt, moins pour des raisons économiques; la filière solaire est en phase de développement que pour leurs capacités à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Sur le plan technique, c'est tout d'abord au niveau de l'enveloppe des bâtiments qu'il faut intervenir. Alliés à une bonne isolation et une maîtrise des pertes dues au renouvellement d'air, les apports solaires directs par les ouvertures des bâtiments constituent une voie économique et sûre.

Le deuxième axe d'intervention consiste à utiliser des systèmes de production d'eau chaude. De chauffage, voire de climatisation, qui utilisent l'énergie solaire associée à une énergie conventionnelle.

Les chercheurs rêvent toujours de bâtiment énergétiquement autonome, ses constructions qui entretiendront les relations équilibrées avec les réseaux auxquels elles seront reliées. Ainsi les installations solaires photovoltaïque produiront dans la journée une quantité d'électricité équivalente à la consommation et le solaire thermique sera mis à contribution pour réduire les besoins de chauffage, d'eau chaude et de climatisation. Ces nouveaux "bâtiments à énergie positive" s'imposeront par la volonté des consommateurs, et donc des gouvernements qui intégreront cette démarche dans les réglementations régissant les nouvelles constructions. Cela se traduira par une plus grande fusion de l'énergie solaire avec l'architecture associée à une croissance des marchés et à une baisse continue de prix.

Pour les basses températures ($\leq 100^{\circ}\text{C}$), nous utilisons les capteurs solaires plans qui sont étudiés haut, pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique, on utilise cette dernière pour stocker dans un ballon solaire pour chauffer l'eau sanitaire (principe d'un chauffe-eau solaire).

Pour les hautes températures ($\geq 100^{\circ}\text{C}$), on utilise les concentrateurs qui donnent une chaleur très élevée, nous stockons cette chaleur dans un milieu poreux pour un bon transfert de chaleur, ce milieu est rempli par des petits sphères d'acier. L'acier est un bon milieu de stockage thermique et il faut une grande température pour qu'il chauffe, parce qu'il a respectivement une grande capacité calorifique et une conductivité thermique élevée. La chaleur stockée dans ce milieu est utilisée pour la production de froid par absorption.

III.2. Production d'eau chaude sanitaire

En habitat collectif, la production d'eau chaude sanitaire (celle que l'on utilise dans la salle de bains et dans la cuisine) peut prendre des formes très diverses. Comme pour le chauffage, la tendance du moment est à l'individualisation. Chaque copropriétaire «gère» l'usage de son

eau chaude et ne dépend pas des autres. Pourtant, les thermiciens et les économistes restent souvent favorables aux solutions collectives, souvent plus simples et moins coûteuses.

- L'eau chaude sanitaire doit être produite ou présente en quantités suffisantes pour satisfaire la demande. C'est le principe de base pour garantir le confort demandé.
- Assurer une alimentation ECS confortable
 - Température d'eau
 - Débit de puisage : débit de pointe, profil de puisage
 - Quantité d'eau : litre/jour (moyenne)
 - Temps d'attente
- Exigences par rapport à l'hygiène (problématique des légionelles) :
 - Température de l'eau stockée
 - Stagnation

III.2.1. Les besoins d'eau chaude sanitaire

La gestion des puisages d'eau chaude sanitaire revêt une grande importance pour un bon dimensionnement d'une installation solaire.

La température de l'eau sanitaire aux points de puisage « Température de l'eau chaude » doit être saisie pour tous les types de profils. Cette température doit être inférieure à la température de consigne du ballon d'eau chaude.

III.2.2. Besoins journaliers d'une habitation en KWh

Les besoins en eau chaude sanitaire peuvent être exprimés en termes de puissance. La relation suivant permet de passer des besoins en litres par jour (l/j) à (kWh/j) [13] :

$$P = 0,0011611 \times V_b (T_c - T_f) \tag{III.1}$$

Avec :

P : La puissance représentant les besoins de l'eau en (kW/j).

V_b : Le volume des besoins.

T_c : La température de l'eau chaude.

T_f : La température de l'eau froide.

La température de l'eau chaude entre pendant la journée de 6h : 00 à h 18h: 00, varie entre 70°C et 65°C, donc la variation de température est ΔT=5°C.

Le tableau suivant présente les besoins journaliers des personnes de l'habitation en kWh.

Tab.III.1 : Besoins journaliers d'une habitation en (kWh).

Nombre de Personnes	Besoins journaliers	Puissance demandée durant une journée (kWh/j)
1	75	0.435
4	325	1.886
10	789	4058

III.2.3. Les modes de production

L'eau chaude sanitaire peut être produite, soit de manière centralisée pour l'usage de plusieurs logements, soit de manière individualisée par logement.

III.2.3. 1. Production centralisée

Le chauffage central est l'appellation donnée à une installation de chauffage avec chaudière fioul ou gaz distribuant un réseau bitube pouvant alimenter des radiateurs, des planchers chauffants et des ventilos convecteurs.

Dans les installations de chauffage central, la chaudière peut être remplacée ou couplée par un générateur comme la pompe à chaleur.

III.2.3. 2. Production individualisée

➤ La chaude individuelle

- Techniquement, toute chaudière peut produire de l'eau chaude via un stockage ou un échangeur à plaque, intégré ou non à la chaudière.

- Le choix dépendra :

- Des combustibles disponibles (gaz de ville)
- De l'encombrement « acceptation » pour le projet (stockage pellet par exemple)
- Du choix effectué pour le chauffage
- De la performance énergétique.... et donc la rentabilité

- Eléments abordés :

- Rendement et performance
- Condensation et ECS

- **Le chauffe-eau ou l'accumulateur autonome au gaz**

Si vous choisissez le gaz pour produire votre eau chaude sanitaire, deux solutions s'offrent à vous : le chauffe-eau instantané ou le chauffe-eau à accumulation. Avec un chauffe-eau instantané, l'eau est chauffée à la demande. Il ne nécessite pas de cuve de stockage et est donc moins encombrant qu'un chauffe-eau à accumulation. Il est indépendant du système de chauffage. Au contraire, le chauffe-eau à accumulation est plus encombrant. Mais, il permet de stocker un volume important d'eau chaude. Il est associé au système de chauffage central et, avec un chauffe-eau à accumulation, l'eau est chauffée indépendamment du puisage.

- **Chauffe-eau électrique**

Comme pour les chauffe-eau au gaz, vous avez la possibilité de choisir entre chauffe-eau instantané et chauffe-eau à accumulation. Les chauffe-eau électriques instantanés sont très faciles à installer et peu encombrants. Cependant, ils offrent un débit très faible et servent plutôt comme système d'appoint. Au contraire, les chauffe-eau électriques à accumulation

proposent des réservoirs importants qui permettent d'utiliser de l'eau chaude en continue. De plus, avec un chauffe-eau électrique à accumulation, la température de l'eau reste constante.

III.2.3. 3. La production solaire d'eau chaude sanitaire

Dans un capteur solaire, un liquide protégé du gel circule dans un réseau de tuyaux recouvert par une plaque de couleur noire et placé sous un vitrage.

Par effet de serre, le rayonnement solaire réchauffe le réseau de tuyaux et le liquide. A la sortie du capteur, le liquide chauffé cède sa chaleur à l'eau contenue dans une cuve de stockage d'eau chaude isolée thermiquement. Il existe plusieurs types de chauffe-eau solaire que nous allons choisir : chauffe eau solaire à circulation naturelle et chauffe eau solaire à circulation forcée.

III.3. Circulation naturelle (à thermosiphon)

Sous l'effet d'un rayonnement solaire, l'eau contenue dans le capteur s'échauffe et sa densité diminue, selon le principe de gravitation elle s'élève dans le circuit et elle est remplacée par de l'eau plus froide (et donc plus lourde) en provenance du ballon. C'est l'effet thermosiphon. Pour que la circulation du fluide dans le circuit soit assurée, le ballon de stockage doit être obligatoirement placé plus haut que les capteurs selon une hauteur prédéfinie.

Les avantages d'un CES à thermosiphon sont :

- Il ne comporte pas de pompes ni de régulation, et ne nécessite pas de raccordement à un réseau électrique.
- Les risques de panne et de dysfonctionnement sont, par conséquent, très réduits.

Selon la disposition du ballon de stockage par rapport aux capteurs on distingue les CESI thermosiphon Monobloc et les CESI thermosiphon à éléments séparés, figure (1,2), [45].

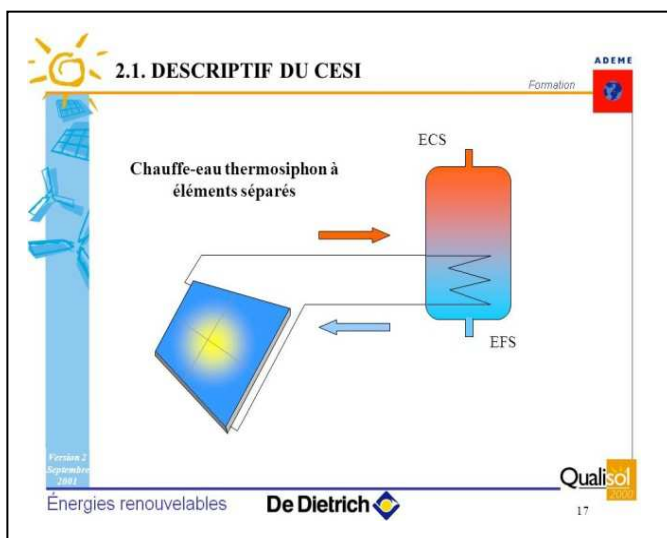


Fig.III.1: CES thermosiphon à éléments séparés

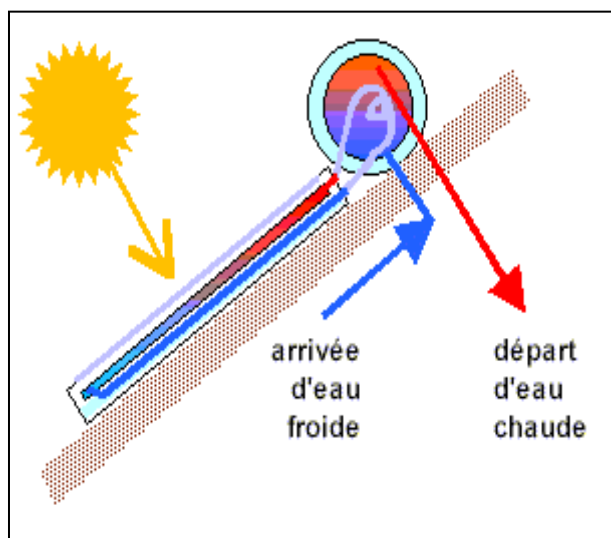


Fig.III.2 : CES thermosiphon Monobloc

Le mouvement du fluide est caractérisé par la relation suivante [16] :

$$H \times g \times (\rho_f - \rho_c) = \frac{f \times v^2}{2} \times \rho_{moy} \tag{III.2}$$

Avec :

H : distance (en mètres) entre les deux plans médians horizontaux du réservoir et du capteur,

g : accélération de la pesanteur en m/s².

ρ_f : masse volumique de l'eau froide en kg/m³.

ρ_c : masse volumique de l'eau chaude en kg/m³.

$\rho_m = \sqrt{\rho_f \times \rho_c}$: Masse volumique moyenne de l'eau en Kg/m³.

f: coefficient adimensionnel d'énergie cinétique.

U: vitesse d'écoulement du fluide donnée par la formule suivant : $U^2 = \frac{2}{f} \times H \times \Delta T$.

J : coefficient global de pertes de charge dans la conduite de circulation.

ΔT : différence de température entre le fluide chaud et le fluide froid.

L'effet thermosiphon dépend donc de la charge H et la variation de température ΔT .

III. 4. Circulation forcée (à l'aide d'une pompe)

Cette catégorie regroupe les chauffe-eau solaires qui font appel à un circulateur pour transférer l'eau chauffée dans le collecteur depuis le capteur solaire vers le ballon de stockage. Contrairement aux chauffe-eau fonctionnant par thermosiphon, la disposition relative du ballon et du capteur est totalement libre. Ce qui représente un des avantages d'un système de chauffe-eau solaire à circulation forcée.

Plusieurs types de CESI à circulation forcée sont utilisés [14]:

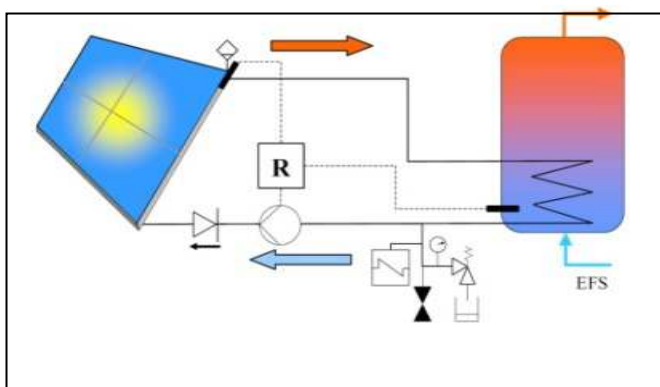


Fig.III.3: CESI à circulation forcée Sous pression

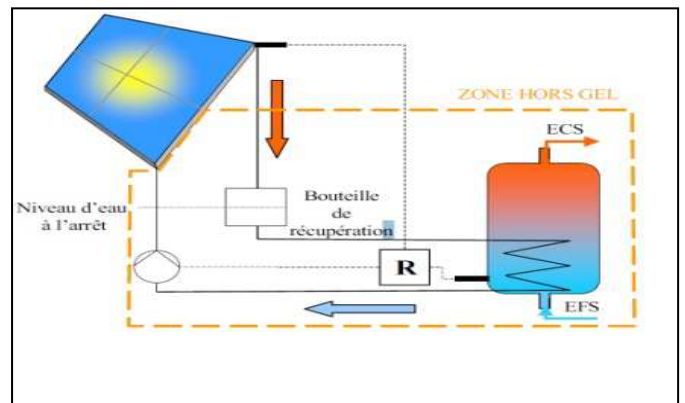


Fig.III.4: CESI à circulation forcée auto-vidangeable.

III. 5. Types de stockage

Stockage avec échangeur (système à deux fluides)

Le fluide primaire circule dans un échangeur placé à la base du réservoir. Il transmet ainsi de la chaleur au fluide secondaire par le biais l'échangeur [2] :

Stockage sans échangeur (système à un fluide)

Pour cette disposition le fluide récupère la chaleur de lui-même du capteur. L'échange se fait donc par mélange. L'inconvénient réside dans le fluide qui circule dans le capteur est continuellement renouvelé favorisant ainsi l'entartrage de l'absorbeur [40].

III. 6. La température de l'eau

Dans les installations de production d'eau chaude sanitaire une température de 60°C est la limite supérieure pour la distribution.

Réduire cette valeur a pour effet la diminution des pertes en ligne, de la vitesse d'entartrage et de corrosion.

En effet, la vitesse de corrosion serait multipliée par 3 quand la température de distribution passe de 50°C à 55°C ; par 20 de 50°C à 60°C [19].

La température de 50°C semble être l'idéale car il n'y a pas d'antagonisme entre diminution des pertes en et celle de la vitesse d'entartrage ou celle corrosion.

Cependant l'exigence sur la qualité de l'eau inclue une condition d'hygiène de l'eau conduisant à fixer la température de distribution au-dessus de 50°C.

En effet, les dépôts de tartre, la présence d'oxydes métallique (corrosion de l'acier galvanisé...) sont des facteurs de développement de bactérie d'une manière générale et en particulier de la légionelle responsable cher l'homme de la maladie communément appelée « légionellose »

III. 7. Production de froid

Un processus de production du froid signifie généralement une absorption de la chaleur, c'est-à-dire prélever de la chaleur sur un milieu à refroidir appelé source froide, et la transférer vers un milieu extérieur qui est réchauffé, appelé source chaude, alors la production de froid naturellement est une absorption de la chaleur. Elle requiert, dans le cas où on veut descendre en deçà d'un seuil, la mise en œuvre d'un phénomène endothermique s'effectuant à des températures plus basses que la température que doit atteindre le corps à refroidir.

La production de froid artificiel a commencé par quatre types de machines apparues dans l'ordre suivant : la machine à compression-évaporation de vapeur liquéfiable, la machine à détente d'air préalablement comprimé, la machine à absorption et enfin la machine à évaporation d'eau sous pression réduite qui n'existent plus.

Carré (1859) a exploité la découverte de l'ammoniac par J. Priestley (1774) et sa propriété de condensation par Faraday (1854) afin d'introduire cet élément comme fluide frigorigène dans la machine à absorption [26], [39], [9].

La production du froid peut être faite par plusieurs systèmes de production, on distingue :

- La production frigorifique à compression (compression mécanique).

- La production frigorifique à gaz froid (principe de Stirling).
- La production frigorifique à absorption.
- Production de froid thermoélectrique (élément Peltier).
- Générateur de froid à Vortex.

III. 7. 1. Production de froid par absorption

Le cycle à absorption fonctionne de la même manière que le cycle à compression. Seul le compresseur mécanique est remplacé par un compresseur thermochimique.

Les refroidisseurs à absorption font partie de la famille thermodynamique des machines trithermes, c'est à dire qui utilise trois niveaux de températures pour fonctionner. Le premier niveau de température correspond à la température froide, le second à la température ambiante et le dernier à la température de la source chaude. Les refroidisseurs à absorption utilisent directement la chaleur comme source première d'énergie pour produire du froid contrairement au refroidisseur de liquide à compression qui utilise une énergie mécanique.

En effet, les coefficients de performance des machines à absorption à simple effet (fonctionnant avec une température de source chaude de 130°C) sont compris entre 0.6 et 0.75. Les rejets de chaleur au condenseur sont de l'ordre de 2.5 fois la puissance frigorifique (ils sont de l'ordre de 1.3 fois la puissance frigorifique qu'un refroidisseur à compression).

La principale contrainte des machines à absorption réside dans l'obligation de respecter une température de 30°C à l'entrée du condenseur.

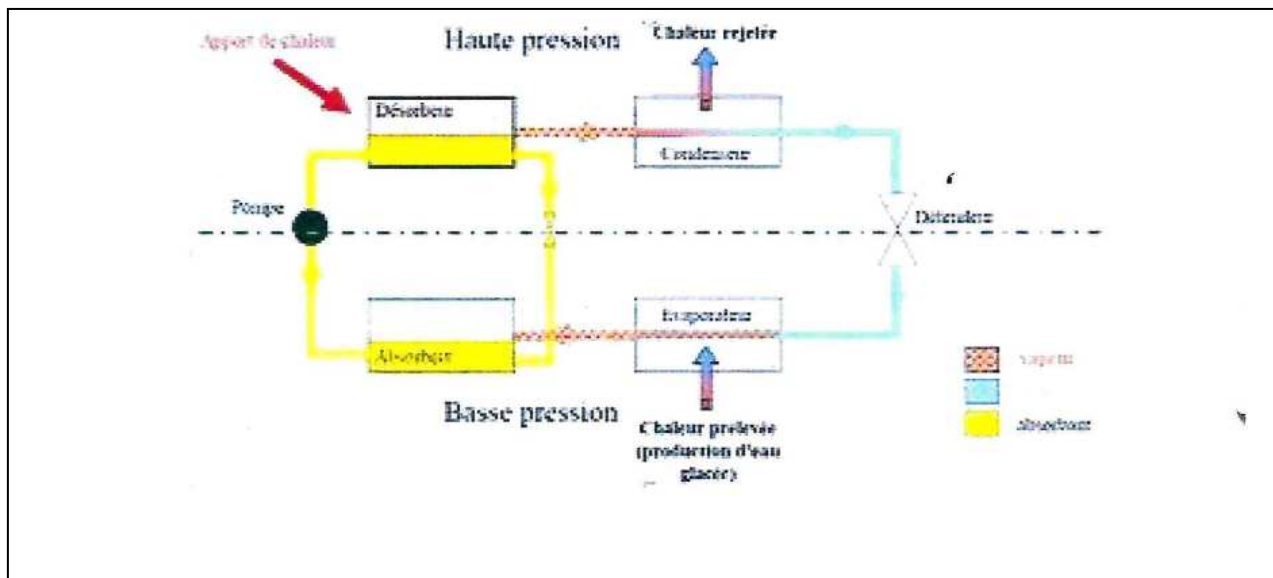


Fig.III.5: Cycle de production de froid par absorption.

III.8. Principe de fonctionnement

- Une solution composée d'un couple liquide réfrigérant et liquide absorbant est portée à ébullition à l'intérieur du l'adsorbeur grâce à l'apport calorifique de panneaux solaires thermiques. La pression augmente et le réfrigérant s'évapore en se séparant de l'absorbant.

- Les vapeurs du réfrigérant sont dirigées vers le condenseur où elles cédant leur chaleur par refroidissement au contact de l'air ambiant.
- Les condensats du réfrigérant sont détendus pour accéder à la zone basse pression de l'installation.
- Le réfrigérant à l'état liquide est dirigé dans l'évaporateur où il se vaporise instantanément en prélevant les calories du local à refroidir.
- Conjointement, la solution absorbante "pauvre en réfrigérant" est soutirée du adsorbeur via une vanne de détente pour alimenter l'absorbeur. La vapeur du réfrigérant mis en contact avec cette solution sont alors absorbées.
- Le couple réfrigérant-absorbant ainsi régénéré est ramené vers le adsorbeur par une pompe. Le cycle peut alors recommencer.

III.9. Etude thermique de la cuve de stockage

III.9.1. Géométrie et modèle physique

La géométrie considérée est un parallélépipède de hauteur H et de longueur L , contenant un milieu poreux. Les axes x et y sont respectivement orientés suivant les directions horizontale et verticale. Les parois verticales et horizontales sont considérés comme adiabatiques et imperméables, avec un orifice imposé sur la paroi supérieure qui est considéré comme entrée de l'eau chaude et une sortie dans la paroi inférieure. On impose une température T_0 uniforme, et un champ de vitesse u_0 uniforme. L'écoulement est développé à la sortie ($((\partial u)/(\partial x)) = \partial v/\partial x = \partial T/\partial x = 0$).

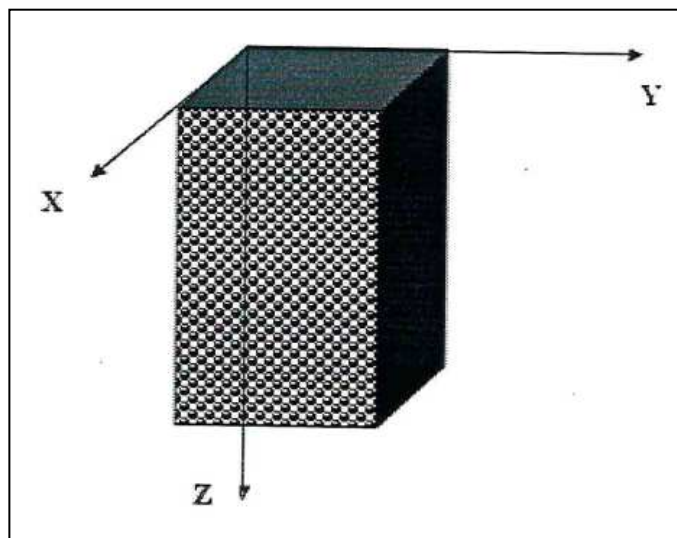


Fig.III.6: Géométrie de la cuve stockage

III.9.2. Convection en milieu poreux

Lorsque le fluide est contenu dans une matrice solide, on est en présence d'un milieu poreux donc on parle de la convection forcée dans un milieu poreux, pour lequel nous posons les hypothèses supplémentaires suivant :

III.10. Hypothèses simplificatrices

Le traitement du problème physique nécessite l'utilisation du principe de conservation de masse, de quantité de mouvement et de l'énergie. Ces équations régissent le phénomène physique étudié.

Pour simplifier le modèle mathématique, on considère les hypothèses les plus couramment utilisées dans ce type de problème. Nous supposons alors que :

- Le fluide est newtonien et incompressible.
- La matrice poreuse est isotrope, perméable et homogène.
- L'écoulement est supposé laminaire.
- il n'y a pas de réaction chimique.
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.
- Les interactions entre le transfert de chaleur et de masse (effets de Serre et du four) sont négligeables.

III.11. Equation générale de conservation

➤ Conservation de masse

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \tag{III.2}$$

➤ Conservation de la quantité de mouvement

$$\rho \frac{1}{\alpha^2} (\vec{\nabla} \cdot \vec{\Delta}) V = -\vec{\nabla} \rho - \frac{\mu}{K} V + \rho \cdot \vec{g} + \mu_e \nabla^2 \vec{V} \tag{III.3}$$

Avec, (μ/K) V: terme de Darcy.

➤ Conservation de l'énergie

$$(\rho C_p) \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} \cdot (\lambda_e \vec{\nabla} T) \tag{III.4}$$

Après La production des équation des suivant les coordonnées cartésiennes (x,z) on obtient :

➤ Conservation de la masse

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{III.5}$$

➤ Conservation de la quantité de mouvement

Suivant x :

$$\rho \frac{1}{\alpha^2} (u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\mu}{K} u + \mu_e (\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \tag{III.6}$$

Suivant y :

$$\rho \frac{1}{\alpha^2} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\mu}{k} v + \mu_e \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (III.7)$$

Suivant z :

$$\rho \frac{1}{\alpha^2} \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\mu}{k} w + \mu_e \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (III.8)$$

➤ Conservation de l'énergie

$$\rho \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\lambda_e}{c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (III.9)$$

III.12. Conditions aux limites

Toutes les équations développées pour décrire cet écoulement sont des équations aux dérivées partielles. Les conditions aux limites sont données à la limite du domaine d'étude.

Pour notre cas, on pose les conditions suivantes :

- L'entrée : les profils de la vitesse et des autres quantités sont donnés (la correction de pression est nulle).
- La sortie : on suppose un régime établi (écoulement développé) pour tous les variables dépendantes, alors $\frac{d\varphi}{dx} = 0$ et $\frac{d\varphi}{dy} = 0$ (pas d'évolution par rapport à x et y)
- Parois rigides : pour ces parois le champ de vitesse est nul.

Les conditions aux limites sont donnés par :

$$\text{A l'entré : } z = 0 \quad \text{et} \quad y = \frac{l}{2} \quad x = \frac{l}{2} \quad u = u_0 \quad v = v_0 \quad w = 0 \quad T = T_0$$

$$\text{A la sortie : } z = H \quad \text{et} \quad y = \frac{l}{2} \quad \text{et} \quad x = \frac{l}{2} \quad \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

III.13. Equations adimensionnelles

Grandeurs physiques

$$x^* = \frac{x}{H} \quad y^* = \frac{y}{H} \quad z^* = \frac{z}{H} \quad u^* = \frac{u}{u_0} \quad v^* = \frac{v}{u_0}$$

$$T^* = \frac{T - T_0}{\Delta T_0} \quad \Delta T_0 = \frac{Hq}{\lambda_{eau}} \quad P^* = \frac{P}{\rho u_0^2} \quad \mu^* = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \lambda_e^* = \frac{\lambda_e}{\lambda_{e0}}$$

➤ Conservation de masse

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} = 0 \quad (III.10)$$

Suivant x :

$$\frac{1}{\alpha^2} \left(u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial u^*}{\partial z^*} \right) = - \frac{\partial P^*}{\partial x^*} - \frac{\mu^*}{Re D_a} u^* + \frac{\mu^*}{Re} \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial z^{*2}} \right) \quad (III.11)$$

Suivant y :

$$\frac{1}{\alpha^2} \left(u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial v^*}{\partial z^*} \right) = - \frac{\partial P^*}{\partial y} - \frac{\mu^*}{R_g D_a} v^* + \frac{\mu^*}{R_g} \left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial z^{*2}} \right) \quad (\text{III.12})$$

Suivant z :

$$\frac{1}{\alpha^2} \left(u^* \frac{\partial w^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial w^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial w^*}{\partial z^*} \right) = - \frac{\partial P^*}{\partial z} - \frac{\mu^*}{R_g D_a} w^* + \frac{\mu^*}{R_g} \left(\frac{\partial^2 w^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 w^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 w^*}{\partial z^{*2}} \right) \quad (\text{III.13})$$

➤ Conservation de l'énergie

$$u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial T^*}{\partial z^*} = \frac{\lambda_g^*}{R_g P_r} \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^{*2}} \right) \quad (\text{III.14})$$

Avec :

$$R_g = \frac{\rho u_0 H}{\mu_0} D_a = \frac{H^2}{K} P_r = \frac{\mu_0 c p}{\lambda}$$

II.14. Conclusion

Les moyens sacrés pour une exploitation parfaite de l'énergie solaire restent insuffisants malgré l'assiduité continue des chercheurs; pour cela, il faut s'intéresse aux compétences pécule pou l'emploie au maximum de ce trésor.

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Introduction

Il y a plusieurs logiciels pour les calculs numériques ou la simulation, comme FLUENT TRANSYSI6, SIMSOL, FORTRAN, MATLAB, MATEMATICA, etc. On utilise dans notre travail le logiciel SIMSOL, pour un simple calcul.

SIMSOL est un outil de prédiction des performances thermiques des installations de production d'eau chaude solaire collective développé en collaboration par le CSTB et l'Ademe. Il est actuellement utilisé uniquement en France.

L'outil est basé sur de la simulation dynamique (calculs au pas de temps d'une heure, par la méthode des volumes finis) et évolue dans l'environnement de simulation TRNSYS.

Six configurations d'installations solaires collectives ont été définies :

- Echangeur primaire externe et appoint centralisé séparé.
- Echangeur primaire externe et appoint centralisé intégré.
- Echangeur primaire externe et appoint centralisé séparé et instantané.
- Variante pour la décharge du stock solaire.
- Échangeur primaire interne et appoint centralisé séparé.
- Pas d'échangeur de chaleur primaire et appoint centralisé séparé.

Nous choisissons, pour cette simulation la sixième configuration et le capteur solaire plan (de $2m^2$ et d'inclinaison de 48.5°). Lieu de la simulation pris en France de latitude 48.5° . Cette simulation présente la variation de la température (de sortie du capteur solaire plan, de ballon solaire et du local) pendant une journée, la période d'hiver et une année et nous présentons un bilan environnemental pendant une année.

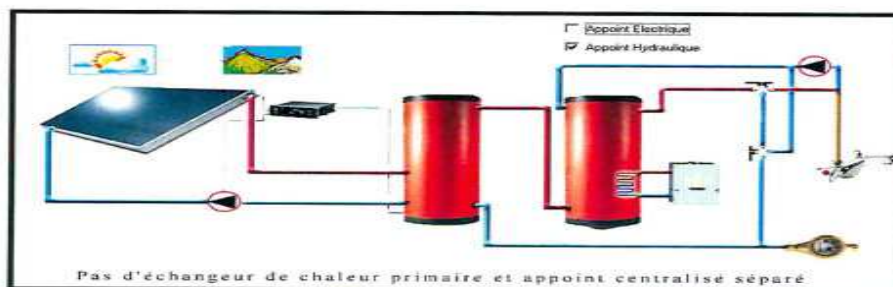


Fig. IV. 1: Schéma d'installation de production d'eau chaude sanitaire.

IV. 2. Simulation pour une journée (du 1^{er} Avril, de 0 à 24h)

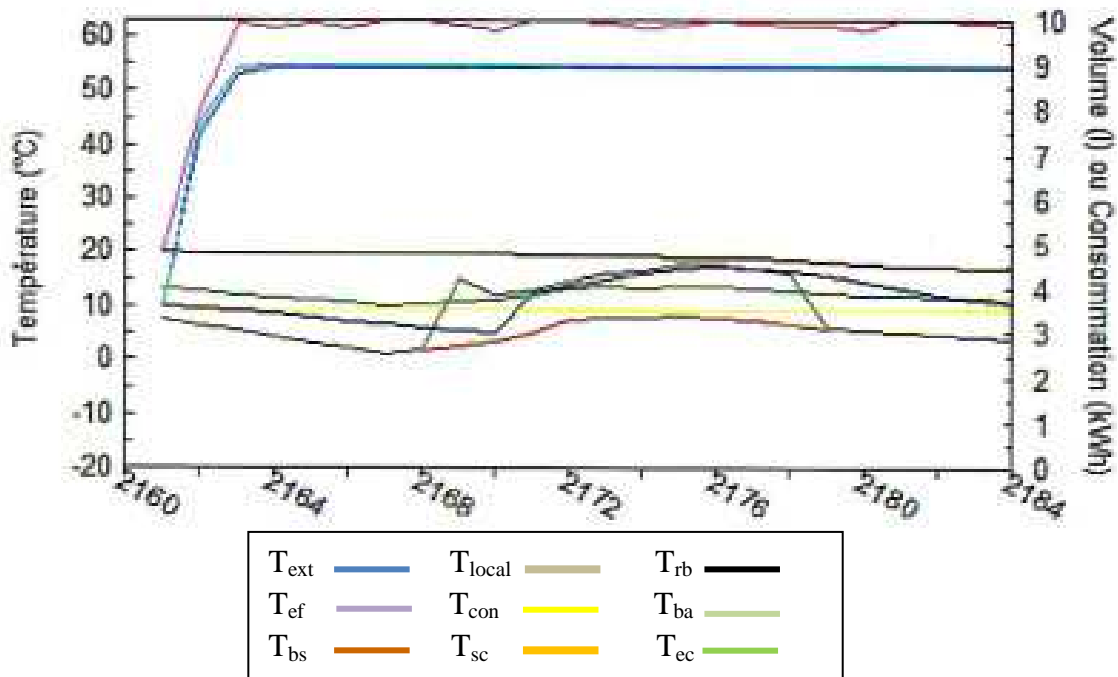


Fig.IV.2: Profil de différentes températures journalières en fonction du temps.

Avec :

- T_{sc} : Température de sortie du capteur (°C).
- T_{cc} : Température d'entrée du capteur (°C).
- T_{bs} : Température de sortie du ballon solaire (°C).
- T_{ba} : Température de sortie du ballon d'appoint (°C).
- T_{conso} : Température de l'eau au soutirage (°C).
- T_{rb} : Température de retour de la boucle de distribution (°C).
- T_{ef} : Température de l'eau froide (°C).
- T_{local} : Température de local chaufferie (°C).
- T_{ext} : Température de milieu extérieur (°C).

On observe que la température atteint le maximum entre 9h et 17h. Qui nous explique qu'on aura un bon rendement thermique le long de la journée d'ensoleillement.

IV.2.1. Le capteur solaire plan

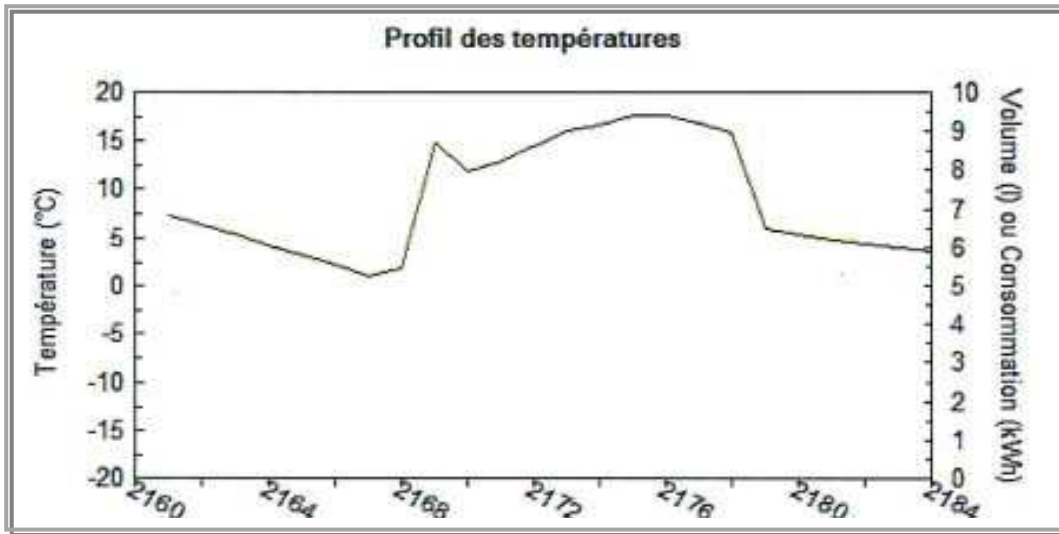


Fig.IV.3: Variation de la température de sortie du capteur en fonction du temps.

- ✓ 2160h : représente 0h.
- ✓ 2184h : représente 24h.

Cette figure est représentée la variation de la température de sortie de capteur solaire plan en fonction des heures de la journée. Elle atteint le maximum entre 9h et 17h.

IV.2.2. Le ballon solaire

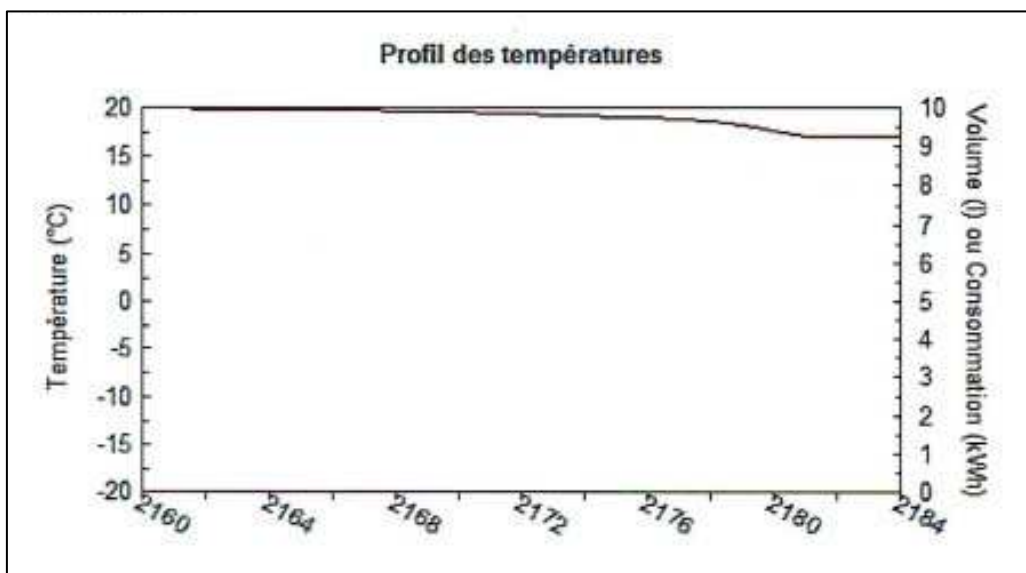


Fig.IV.4: Variation de la température du ballon solaire en fonction du temps

- ✓ 2160h : représente 0h.
- ✓ 2184h : représente 24h.

Cette figure est représentée la variation de la température de ballon solaire en fonction des heures de la journée. Elle varie entre 15 et 20 °C, à cause de chauffage et de stockage.

IV.2.3. Local

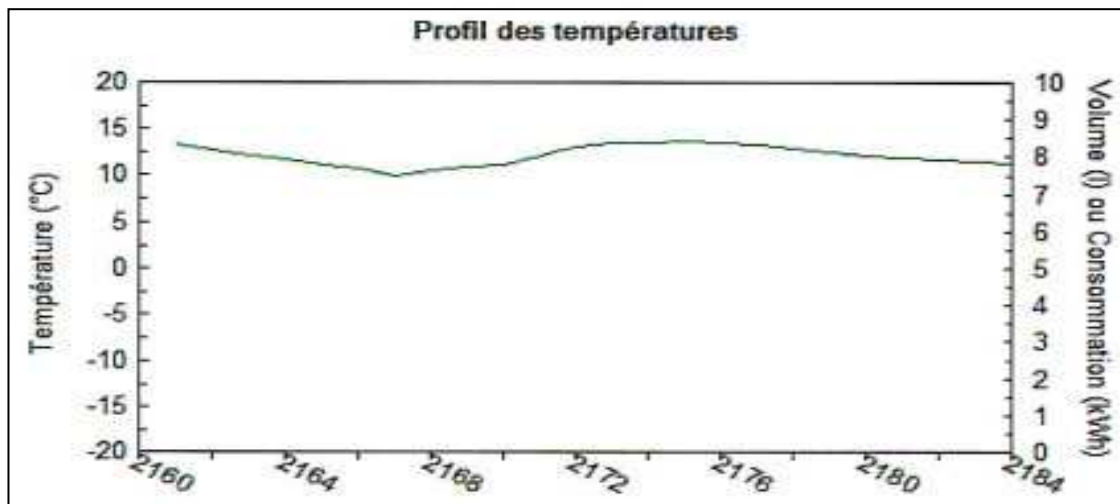
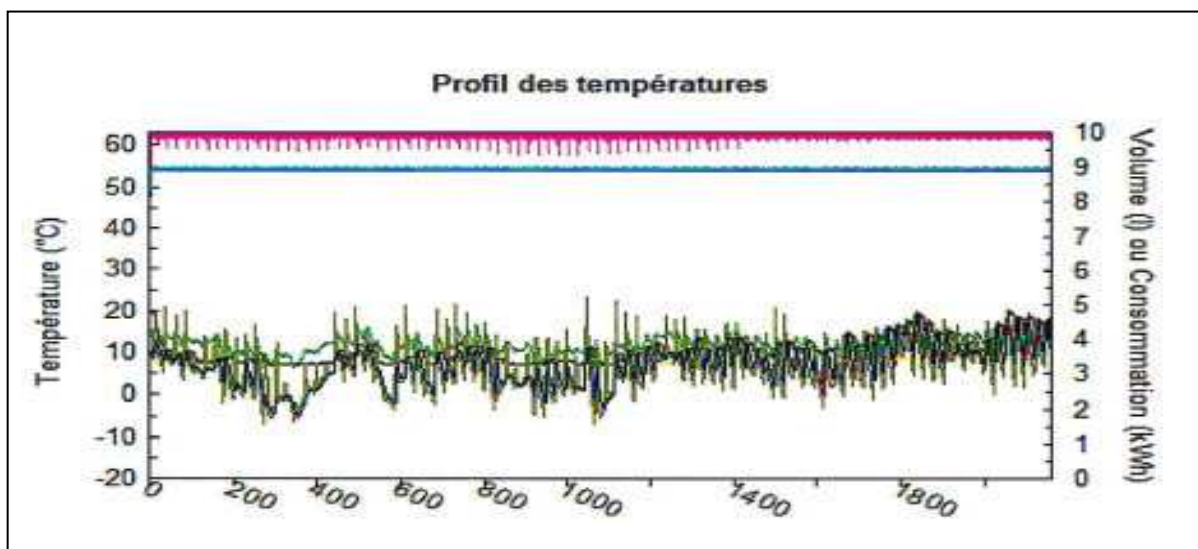


Fig.IV.5: Variation de température journalière du local en fonction du temps.

- ✓ 2160h : représente 0h
- ✓ 2184h : représente 24h

Cette figure représente la variation de la température de local en fonction des heures de la journée, Elle varie entre 10 et 15 °C.

IV.3. Simulation de la période d’hiver (de 1^{er} jour de janvier au dernier jour de Mars)



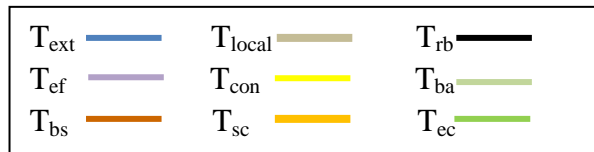


Fig.IV.6. Profil de différentes températures en fonction du temps pendant les mois d’hiver

- ✓ 0h : représente 0h de 1^{er} jour de Janvier.
- ✓ 2200h : représente 24h de dernier jour de Mars.

Cette figure est représentée la variation de différentes températures en fonction des heures des mois d’hiver.

IV.3.1. Le capture solaire plan

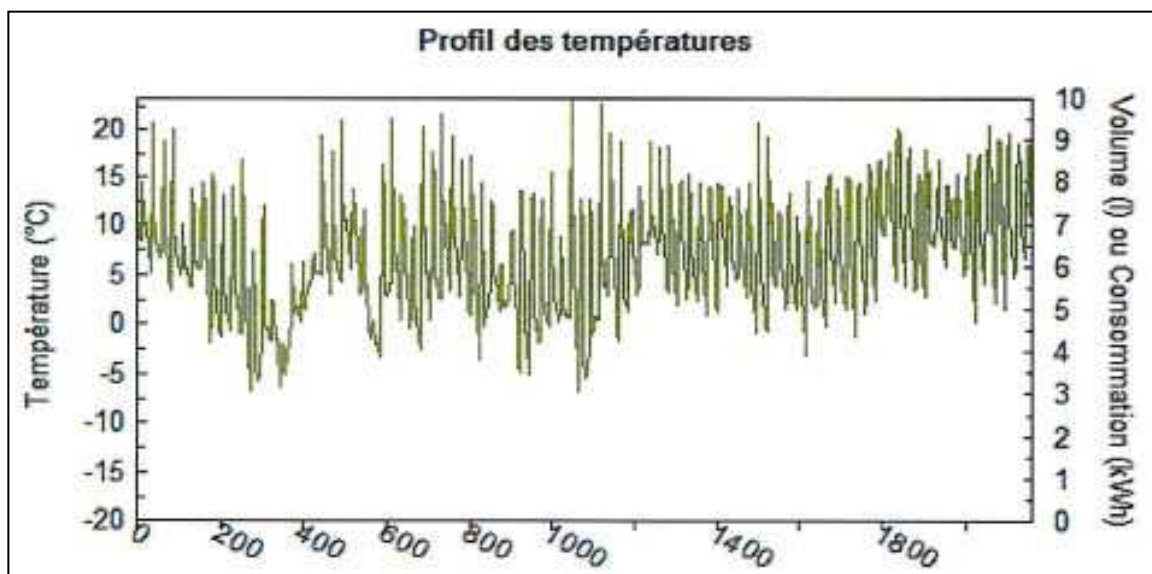


Fig.IV.7 : Variation de la Température de sortie du capteur pendant l’hiver

- ✓ 0h : représente 0h de 1^{er} jour de Janvier.
- ✓ 2200h : représente 24h de dernier jour de Mars.

Cette figure est représentée la variation de température de sortie de capteur solaire plan en fonction des heures des mois d’hiver, telle que, elle varie selon la variation de l’ensoleillement pendant le jour d’hiver. Une température élevée par un grand ensoleillement.

IV.3.2. Le ballon salaire

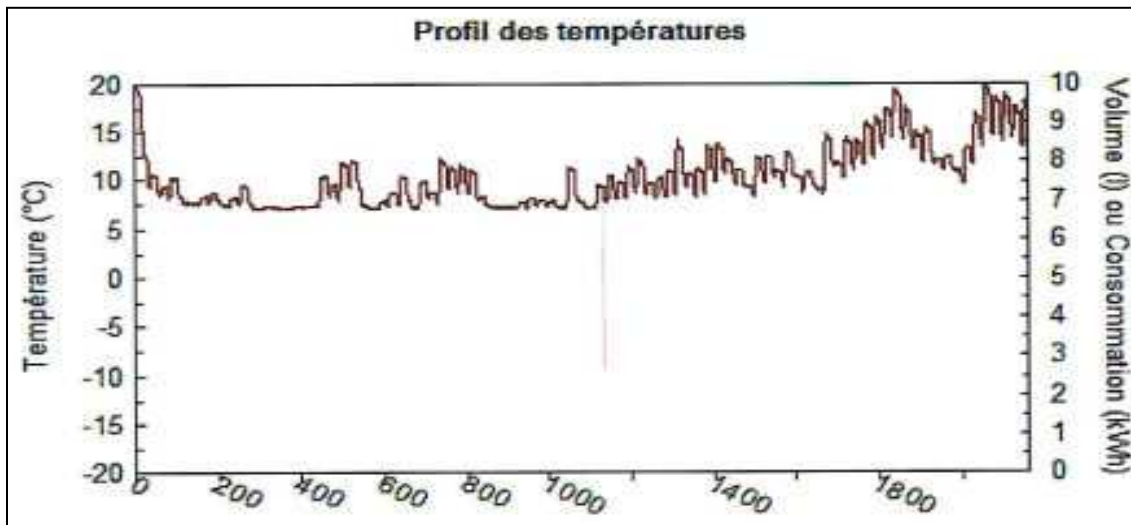


Fig.IV.8 : Variation de la Température en fonction du temps de ballon solaire pendant.

- ✓ 0h : représente 0h de 1^{er} jour de Janvier.
- ✓ 2200h : représente 24hde dernier jour de Mars.

Cette figure est représentée la variation de la température de ballon solaire en fonction des heures des moins d’hiver. Elle varie entre 7 et 20 °C, pour augmenter la température pendant l’hiver, il faut de couplé ce ballon solaire avec un système d’appoint.

IV.3.3. Local

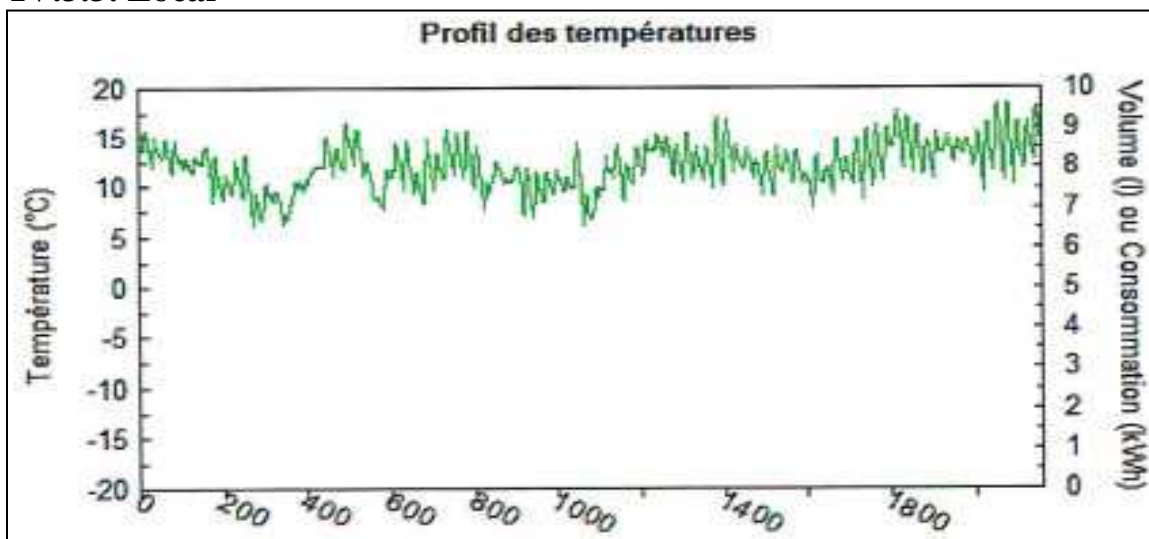


Fig. IV. 9 : Variation de la température local pendant les mois d’hiver

- ✓ 0h : représente 0h de 1^{er} jour de janvier.
- ✓ 2200h : représente 24h de dernier jour de Mars.

Cette figure est représentée la variation de température de local en fonction des heures des mois d'hiver. Elle varie entre 5 et 20 °C.

IV.4. Simulation pour une année

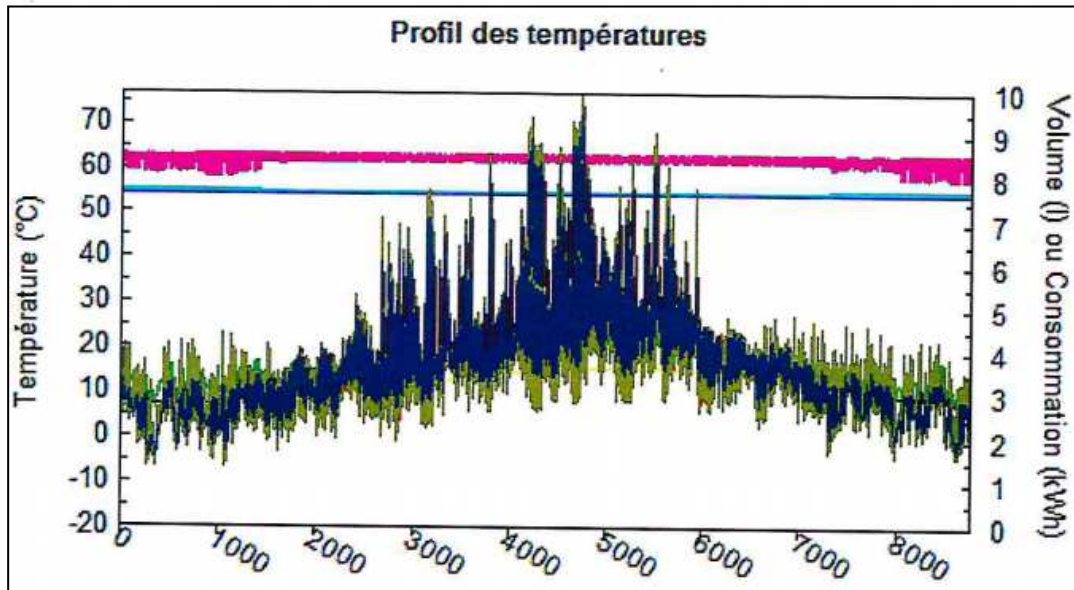


Fig. IV.10 : Profil annuel de différentes températures en fonction du temps

- ✓ 0h : représente 0h de 1^{er} jour de janvier
- ✓ 9900h : représente 24h de 31 Décembre.

Cette figure est représentée la variation de température en fonction des heures de toute l'année, de 0h de 1^{er} jour de janvier jusqu'à 24h de 31 Décembre.

IV.4.1. Le capteur solaire plan

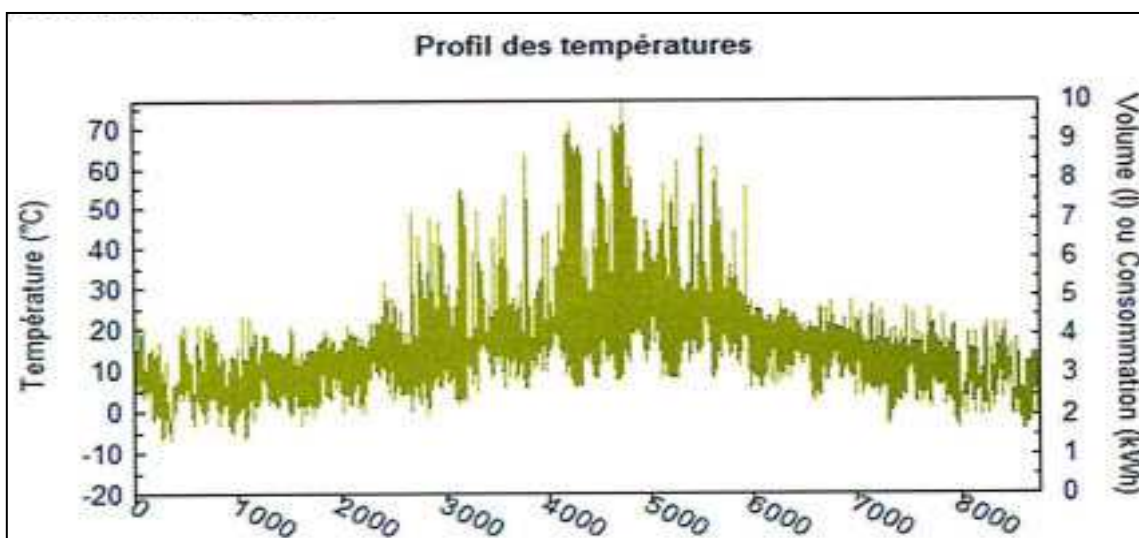


Fig.IV.11 : Variation annuelle de la température de sortie du capteur en fonction du temps

- ✓ 0h : représente, 0h de 1 Janvier.
- ✓ 9000h : représente, 24h de 31 Décembre.

Cette figure représente la variation de la température de sortie de capteur solaire plan en fonction des heures de toute l'année, elle atteint le maximum entre les milieux de printemps et automne, dans cette période l'ensoleillement est plus important.

IV.4.2. Le ballon solaire

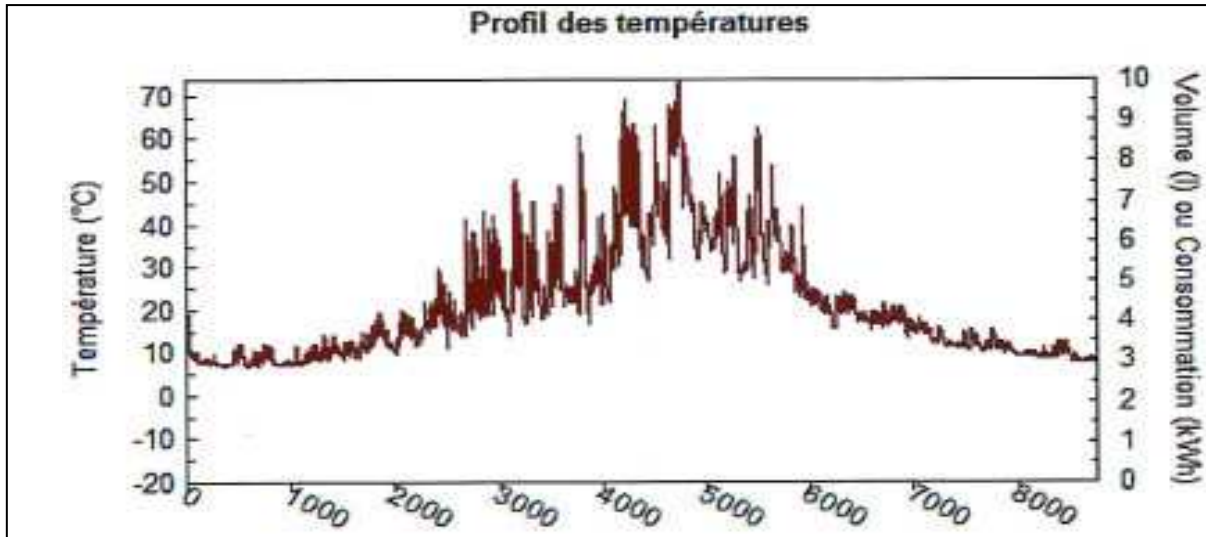


Fig. IV.12: Variation annuelle de la température du ballon solaire en fonction du temps.

- ✓ 0h : représente, 0h de 1 Janvier.
- ✓ 9000h : représente, 24h de 31 Décembre.

Cette figure représente la variation de la température du ballon solaire en fonction des heures de toute l'année, elle atteint le maximum entre les milieux de printemps et automne, dans cette période l'ensoleillement est plus important.

Dans la période de l'été les besoins d'eau chaude sanitaire et le chauffage est inférieure par rapport les autres de période, alors nous stockons plus que nous utilisons.

IV.4.3. Local

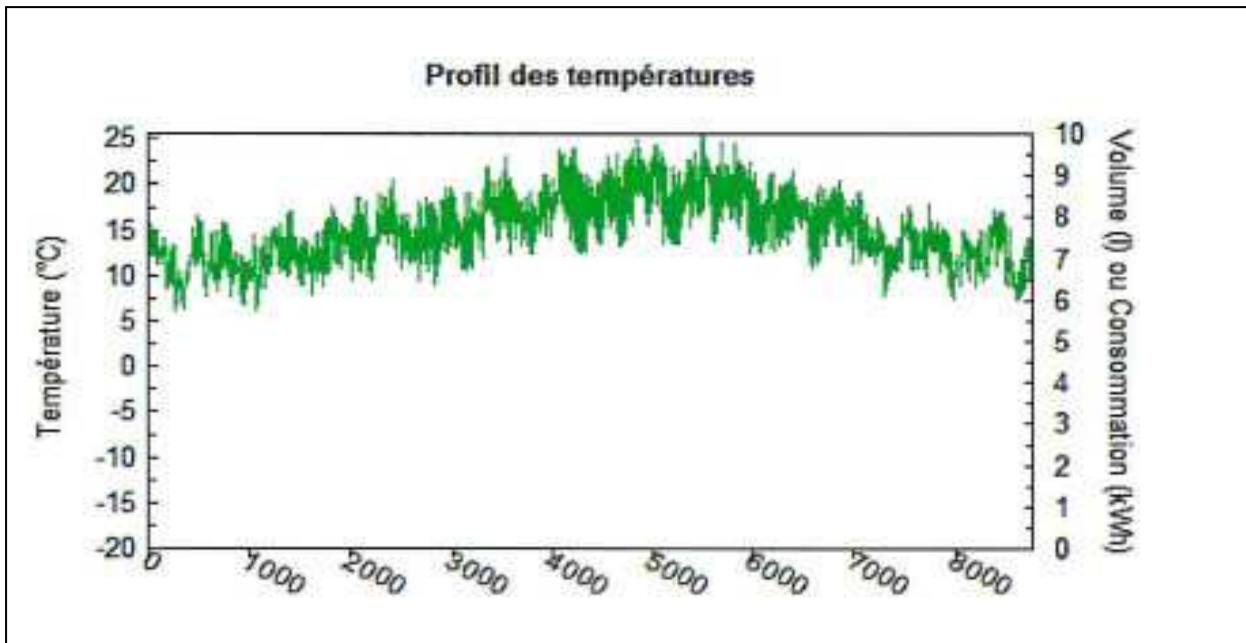


Fig. IV. 13 :: Variation de la température du local en fonction du temps pendant toute l’année

- ✓ 0h : représente 0h de 1^{er} jour de janvier.
- ✓ 9900h : représente 24h de dernier jour de Mars.

Cette figure est représentée la variation de température de local en fonction des heures de tout l’année. Elle varie entre 5 et 25 °C.

IV.4.4. Bilan environnemental

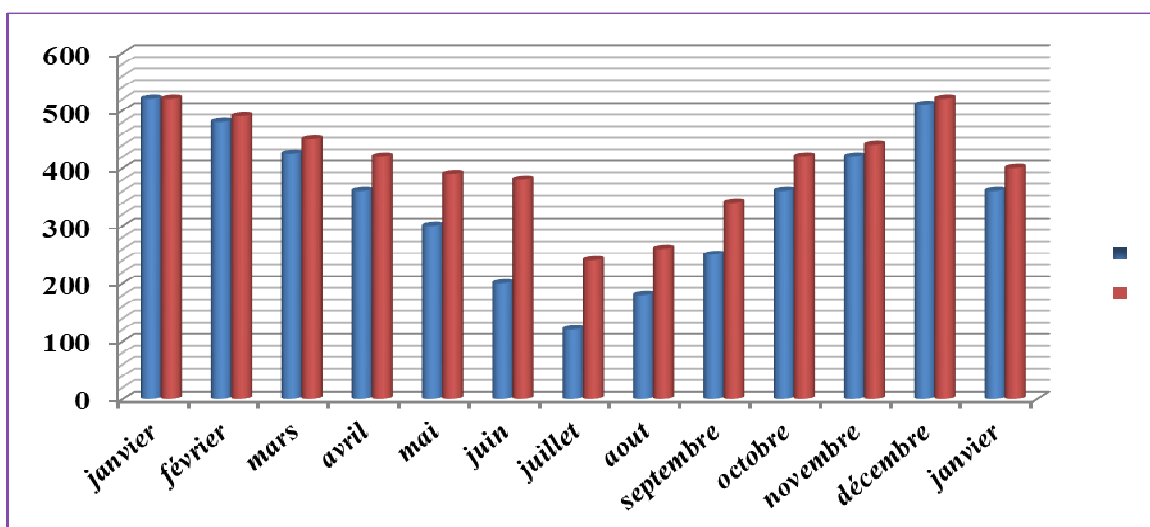


Fig.IV. 14 : Bilan environnemental annuel.

Le bilan environnementale montres que l'absence de l'installation solaire augmente l'émission de CO₂ par rapport à son présente qui fait diminuer les émissions de CO₂

IV.5. Interprétation

La variation de la température en fonction du temps (en heures), ce qui est remarquable de cette variation et que la température de la sortie du capteur augmente brusquement à 9h :00 de la journée, et elle atteint son maximum entre 12 :00 et 14 :00, puis nous remarquons une chute brutale de la température après 17 :00, ce qui s'explique par l'augmentation de l'irradiation solaire à 13h :00, tandis qu'à partir de 17h :00, l'ensoleillement devrait être faible, l'intensité de l'irradiation diminue pour atteindre le minimum.

Pendant la saison d'hiver et l'automne l'ensoleillement est très faible, ce qui fait diminuer la température de sortie de capteur.

Ce pendant l'ensoleillement devrait être plus important à l'été et le printemps.

Quand la température de sortie de capteur est grande, la température de ballon solaire est élevée, donc le chauffage des locaux est bon.

Remarque

Pour l'opération de stockage d'énergie dans la cuve (le milieu poreux), on a effectué la simulation en 3D par le code de calcul Fluent 6.26, mais on n'a pas terminé cette étude car elle prend beaucoup de temps, et nous sommes limités par le temps dans le cadre de la préparation du mémoire de MASTER.

IV.6. CONCLUSION

Les résultats obtenus à partir des mesures expérimentales restent loin d'être réels.

Pour cela, et pour arriver à une bonne optimisation de l'énergie solaire « dite gratuite », on a besoin d'être endurant à la recherche ainsi qu'à la modification des outils exploités à cette opération.

CONCLUSION GENERALE

Nous savons tous que les technologies, avec ses différentes technologies, est devenu dans un grand et très rapide développement, mais l'être humain avec sa nature curieuse cherche toujours à prédire l'avenir, et c'est ce qui nous a fait nous efforcer de comprendre l'avenir technologique.

L'énergie renouvelable est importante, mais ce n'est pas une solution uniquement dans les cas insuffisants, mais plutôt une réserve permanente et une alternative car elle s'est toujours développée en parallèle avec l'énergie fossile. Aujourd'hui, nous avons vu que ces énergies ont un intérêt large et croissant, et c'est ce qui a suscité des inquiétudes et des craintes en raison de l'attente de la fin des réserves d'énergie fossile fit pour tout le monde.

Le rayonnement solaire que reçoit le capteur solaire est également pris au niveau de la luminosité du soleil dans la zone étudiée et de son orientation par rapport au soleil.

Le rayonnement solaire est perpendiculaire aux panneaux solaire, afin d'améliorer tous les systèmes de collecte. Il est obligatoire d'utilise la technologie de suivi du soleil.

L'efficacité du capteur change en fonction de l'évolution de la température du capteur et de la température ambiante. Moins ce changement est important, plus l'efficacité est grande.

Les collecteurs solaires sont un type spécial d'échangeurs de chaleur, qui convertissent l'énergie solaire en énergie thermique dans un entrepôt de stockage afin d'être stockée ou utilisée directement.

Le choix du capteur solaire dépend des exigences de température, Si nous avons besoin de températures plus basses (pour le chauffage, par exemple) alors nous choisissons de condensateurs au cas où nous aurions besoin d'une température élevée (pour produire du froid ou l'électricité).

Le stockage de l'énergie thermique repose sur un certain nombre de technologies qui stockent l'énergie thermique. Cette énergie stockée est utilisée dans l'équation de la demande énergétique entre l'extérieur et la nuit et est très bonne dans un environnement poreux, en particulier avec l'accumulation d'acier, elle permet de préserver longtemps le stock de guerre.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **A.BENKHLIFA**, Optimisation d'un capteur solaire plan, Revue des Energie Renouvelable : physique Energétique (1998) 13 à 18
- [2] **A, DEGIONANNI**. Techniques de l'ingénieur, conduction, BE 8200.(1981)
- [3] **A, SFEIR, G.GUARRACINO**. Ingénierie des systemes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981)
- [4] **Abdelhamine BENALLOU - Jacques BOUGARD** « GUIDE de l'énergie solaire, le solaire thermique au service développement durable.
- [5] **AUSTIN WHILLIER**, Thermal Resistance of the tube-plate bond in solar Heat collectors, Solar Energy, Volume 8, Issue 3, 1964 Pages 95 à 98.
- [6] **B.CHAOUACHI, S.GABSI**, Étude expérimental d'un chauffe-eau solaire à stockage intégré dans des conditions réelles, Revue des Énergies renouvelables, Volume 9 N°2. 2006 Pages 75 à 82.
- [7] **C.ZIDANI, F.BENYAROU, B.BENYOUCEF**, Simulation de la position apparente du soleil et estimation des énergies solaires incidentes sur un capteur plan pour la ville de Tlemcen en Algérie, Revue des Énergies renouvelables, Volume 6, 2003 Pages 69-76.
- [8] **CHOUGUI MOHAMED LAMINE**, Simulation et étude comparée de cycle de a absorption (LiBr / H₂O) a usage de froid unité de production de Détergent HENKEL, thèse magister, Constantine, 2010.
- [9] **D, K, Edwards**. Capteurs solaires, Edition SCM, paris. (1979).
- [10] **DE NEYER, P**. Énergie solaire thermique. Extrait du guide des énergies renouvelables, MR Wallonne (mars 2005).
- [11] Elit Solar, Capteur solaire VOLTAIR-HYBRIDE PVT, www.elit-solar.com.
- [12] EN 1991 Euro code 1: Actions sur les structures – Partie 1-2 : Actions générales – Actions sur structures exposées au feu. COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION (CEN), Juillet (2003)
- [13] EN 19993 Euro code 3 : Calcul des structures en acier – Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu. COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION (CEN), novembre (2005).
- [14] **Godefroy THIOMBIANO**, Contribution à l'étude du stockage de l'énergie solaire par chaleur sensible, thèse doctorat (1982).
- [15] **G. CASTANY**, Principe et méthode de l'hydrogéologie, Dunos, 1982.
- [16] **H.C.HOTTEL, B.B.WOERTS**, The performance of flate plate collectors, Am. Soc. Mech. Eng. 64. pp. 91-104 (1942).
- [17] **HANDBOOK OF POROUSEMDIA**, Second edition. Edited by kanbiz vg Fai. 2005 by Taylor & Francis Group. LLC.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [18] **Hussein Ibrahim, Adrian Ilinca, Jean Perron**, Energy Storage Systems –Characteristics and Comparisons, Renewable & Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 5, June 2008, Pages 1221-1250.
- [19] (International Congress on the Environment and Renewable Energies, 6-8 Novembre 2006 Mahdia Tunisie).
- [20] **J.P. Petit**. Techniques de l'ingénieur, notion de transferts thermiques par convection A 1540 (1979).
- [21] **J. BERNARD**. Énergie solaire calculs et optimisation, Ellipse Édition Marketing. (2004).
- [22] **J. BONAL, P.ROSSETTI**, les énergies alternatives, Omniscience (2007).
- [23] **Jaques BERNARD**, L'ÉNERGIE : Énergie Solaire-Piscine solaire, INSA Toulouse 2009.
- [24] **LIU Hui**, Stockage intersaisonnier d'énergie solaire pour l'habitat par absorption, Thèse doctorat, l'université de GRENOBLE (2010).
- [25] le rafraichissement solaire par machine à absorption.
- [26] **Maatouk KHOUKHI**, Étude théorique et expérimental d'un chauffe-eau solaire à thermosiphon de production nationale. Mémoire de post graduation spécialisée en Héliotechnique, CDER - Algérie, 1992.
- [27] **Mamadou KANOUTE**, système chauffe-eau-capteur solaire, projet de fin d'études, École : Polytechnique de Thiers (EPT) 1982.
- [28] **N. Keroumi, B. Ouradj, S. Slimi, A. Brihmat, N. Taibi, A. Tahri**, "Estimation du rayonnement solaire au site de Béchar par le modèle de Liu Jordan " 11th International Meeting on Energetical Physics ; Centre Universitaire de Béchar-Algérie ; 16 et 17 Janvier, 2003.
- [29] **N. Z. SUN AND J.F. THOVERT**, Mathematical modeling of ground water pollution Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- [30] **N, BELLEL**. Etude des transferts thermiques le long d'un tube cylindrique appliquée à deux géométries; thèse de doctorat, Université de Constantine. 2004.
- [31] **N, Hamani ; A, Moummi ; N, Moummi ; A, Saadi ; Z, Mokhtari**. Simulation de la température de sortie de l'eau dans un capteur solaire cylindro-parabolique dans le site de Biskra, Revue des Energies Renouvelables, Vol 10, n°2, p215-244. (2007).
- [32] **O.SOTEHI**, étude et analyse de l'influence de l'écart de température (Absorbeur-Vitre) sur l'efficacité d'un capteur solaire, Mémoire Magister : Thermique des Bâtiments et Réfrigération, CONSTANTINE (2007).
- [33] **Patrick LABAT**, Contribution à l'aide à la conception par l'analyse morphologie-application à des filières de conversion de l'énergie solaire, thèse doctorat, Toulouse (1997).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[34] **Paul DEMRA**, Plomberie et installation tuyauteries industrielles, note de cours, École 2007.

[35] **PEUSER, F.A. REMMERS, K.H. SCHNAUSS, M.** Installation solaires thermiques, Moniteur 2005.

[36] **QUOILIN SYLVAIN** : Centrales solaires à concentration, Université de Liège.

[37] **R. BERNARD - G. M. NGUY - M. SCHWARTZ**, Le rayonnement solaire conversion thermique et application, Technique & Documentation Lavoisier. 2^{ème} édition augmentée 1980

[38] **RAYMOND W. BLISS Jr**, The derivations of several "Plate efficiency factors" useful in the design of flat plate solar heat collectors Solar Energy, Volume 3, Issue 4, December 1959.

[39] **S.A. KLEIN**, alkylation of flat plate collectors los coefficients, Solar Energy, Volume 17, Issue 1, April 1975, Pages 79-80.

[40] **S.I. Abdel KHAIK**, Heat Removal factor for flat plate solar collectors with a serpentine tube solar Energy, Volume 18, Issue 1, 1976, Pages 59-64.

[41] **S. KHALFALLAOUI**, Étude d'un système solaire thermique, Effet de l'orientation des panneaux solaires.

[42] **Salif GAYE - Mamadou Syll KEBE**, Equipement de C.F.P DAKAR-MARINE d'un chauffe-eau solaire pour la production d'eau chaude sanitaire, mémoire de fin d'étude, ENSUT (UCAD), 1986.

[43] **SOTERIS A. KALOGIROU**, Solar thermal collectors and application, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 30, 2004, Pages 231-295.

[44] **Stéphanie HONGOIS**, Stockage de chaleur intersaisonnier par voie thermo-chimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle, Thèse doctorat, L'Institut National des Sciences appliquées de Lyon (2011).

[45] **S. A. Akram, Z. Ouchiha, N. Saïd et B. Belle**, Expérimentation d'une Boucle à Absorption NH₃-H₂O, Revu. Energy. Ren, CDER, 1999

[46] www.solairethermique.fr.

[47] **Y. MAIGNE, J-P-CHASSE, M. CLAVERIE, B. EQUER**- "les perspectives de l'énergie solaire en FRANCE". Commission «Energie et changement climatique» Groupe de travail «Energie solaire» Juillet 2008.

[47] **M. DOUCHA**. Une étude des transferts thermiques dans une cuve de stockage à double enveloppes d'un système solaire de production d'eau chaude à usage domestique. USTHB, Alger, Algérie, vol. 76 / 2012 – M / PH, 2012,