

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ HADJ LAKHDAR - BATNA –

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

Mémoire de Magister

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

Mr : SAIDI ALI

Thème :

**ETUDE ET DIMENSIONNEMENT D'UN CHAUFFE EAU SOLAIRE
POUR LA PRODUCTION D'E.C.S DESTINÉE À LA MOSQUÉE
1ER NOVEMBRE DE LA VILLE DE BATNA**

Jury

RAHAL SAMIR

Professeur

UHL Batna

Président BEN

MOUSSA HOCINE

Professeur

UHL Batna

Rapporteur

BOUGRIOU CHERIF

Professeur

UHL Batna

Examineur

BRIMA ABDELHAFID

Professeur

UMK Biskra

Examineur

Remerciements

Tout d'abord, Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance et ma profonde gratitude à Monsieur **BEN MOUSSA HOCINE** Professeur à l'université **HADJ LAKHDAR - BATNA**, pour ses invitations incessantes de regagner les rangs de l'université, de m'avoir proposé le thème de ce travail, et d'avoir accepté sans hésitation de diriger ce travail.

Mes vifs remerciements vont à Monsieur **RAHAL SAMIR**, Professeur à l'université **HADJ LAKHDAR - BATNA**, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur **BRIMA ABDELHAFIDH** maître de conférences à l'université Mohamed Kheïther- Biskra d'avoir accepté de faire partie de ce jury.

Je remercie également Monsieur **BOUGRIOU CHERIF**, Professeur à l'université **HADJ LAKHDAR - BATNA**, pour sa participation au jury, je lui suis reconnaissant pour son aide et ses encouragements durant ma formation.

Je ne peux oublier d'adresser mes remerciements les plus distingués à Monsieur **DERRADJI SALAH**, Je lui suis reconnaissant de l'aide chaleureuse qu'il n'a pas cessé de m'apporter, de ses félicitations et de ses encouragements, qui m'ont permis de continuer l'affrontement de ce chemin inattendu.

Mes remerciements les plus sincères à tous les enseignants, qui ont fait part de ce parcours, et, à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

À:

Ma mère

Ma femme

Mes filles

Sommaire

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	01
Chapitre I : GISEMENT SOLAIRE	
INTRODUCTION	04
I-1 LE SOLEIL	04
I-2 LE RAYONNEMENT SOLAIRE	07
I-2-1 Composantes du rayonnement solaire	10
I-2-2 Mesure du rayonnement solaire	12
I-2-3 Potentiel d'énergie solaire en Algérie	13
I-3 REPERAGE DU RAYONNEMENT SOLAIRE SUR UN PLAN QUELCONQUE	
A- Coordonnées géographiques	15
B- Coordonnées équatoriales	16
C- Coordonnées horizontales	17
D- Temps	19
I-4 CORRECTION DE L'ECLAIREMENT INCIDENT SUR UN PLAN QUELCONQUE ..	21

Chapitre II : INSTALLATIONS SOLAIRES THERMIQ

INTRODUCTION	22
<i>II-1 INSTALLATIONS SOLAIRES THERMIQUES</i>	22
<i>II-1-1 Classification des installations solaires thermiques</i>	22
<i>II-1-2 Composition des installations solaires thermiques</i>	23
<i>A- Capteur Thermique</i>	23
<i>A-1 Capteurs solaires plans vitrés à eau</i>	24
<i>B- Ballon de stockage</i>	36
<i>C- Echangeur de chaleur</i>	38
<i>D- Groupe Hydraulique</i>	34
<i>II-1-3 Régulation</i>	41
<i>II-2 BILAN ENERGETIQUE D'UN CAPTEUR PLAN</i>	44
<i>II-3 RENDEMENT DU CAPTEUR PLAN</i>	46
<i>II-4 INFLUENCE DE L'ORIENTATION, DE L'INCLINAISON ET DE L'OMBRAGE SUR LA QUANTITE D'ENERGIE CAPTEE</i>	49

Chapitre III : DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION

<i>INTRODUCTION</i>	55
<i>III -1 SITUATION DU PROJET ET CRITÈRES DE POSITIONNEMENT DES CAPTEURS</i>	55
<i>III -2 VALEURS CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION</i>	58
<i>III -3 METHODE DE CALCUL</i>	59
<i>III -3-1 Calcul des valeurs caractéristiques de l'installation</i>	59
<i>III -3-2 Calcul de l'énergie thermique nécessaire (B_j)</i>	61
<i>III -3-3 Calcul de l'énergie utile</i>	62
<i>III -3 -4 Calcul de la température moyenne de l'eau dans le ballon Solaire</i>	67
<i>III -3 -5 Calcul du taux de couverture</i>	67
<i>III -3 -6 Calcul du rendement du capteur</i>	68
<i>III -3-7 Nombre de capteurs à installer et type de raccordement</i>	68

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

Nomenclature

Nomenclature

Symbole	Description	Unité
a_1	Coefficient Linéaire de Transfert Thermique	W/m ² .K
a_2	Coefficient Quadratique de Transfert Thermique	W/m ² .K ²
B_j	Energie Nécessaire pour chauffer l'ECSS	kWh/jour
b	Espacement entre deux Rangées de Capteurs	m
C_p	Chaleur spécifique du fluide	J/Kg.K
C	Consommation Journalière en E. C. S.S	litres/jour
D	Rayonnement Diffus	W/m ²
E	Eclairage Energétique	W/m ²
E_M	Energie Globale Incidente sur un plan	Wh/jour.m ²
E_{MC}	Energie Globale Incidente sur un plan	Wh/jour.m ²
E_P	Energie Produite par Unité de Capteurs	Wh/jour.m ²
E_r	Energie Globale Reçue	Wh/jour.m ²
E_U	Energie Utile	kWh/jour
E_T	Energie Totale Journalière Reçue	kWh/jour
e	Coefficient Energétique	--
I	Rayonnement Direct	W/m ²
I_G	Rayonnement Global	W/m ²
$I_{Réf}$	Rayonnement Réfléchi	W/m ²

K	Coefficient de déperditions thermiques	W /m ² . °C
\dot{m}	Débit Massique du Fluide Caloporteur	Kg/S
P	Puisage Journalier	litres/jour.m ²
Q_a	Puissance Solaire Absorbée	W/m ²
Q_p	Puissance Perdue par le Capteur	W/m ²
Q_u	Puissance Utile d'un Capteur	W/m ²
R	Ratio de Stockage	litres/m ²
S	Surface du Capteur	m ²
T_a	Température Moyenne du fluide dans le capteur	°C
T_m	Température Moyenne du fluide dans le capteur	°C
t_e	Température de l'Eau d'Alimentation	°C
t_r	Température de l'Eau du Réseau	°C
t_d	Température de distribution d'ECSS	°C
T_R	Temps de Réserve	jours
t_s	Température de l'Eau Solaire	°C
V	Volume de Stockage	litre

Lettres grecques

Symbole	Description	Unité
δ	Déclinaison du Soleil	(°)
ω	Angle Horaire du Soleil	(°)
α_s	Hauteur Angulaire du Soleil	(°)
γ_s	Azimut du Soleil	(°)
θ	Angle d'Incidence du Rayonnement Solaire	(°)
β	Angle d'Inclinaison d'un plan / à un Plan Horizontal	(°)
ρ	Coefficient de Réflexion du Vitrage	-
α_v	Coefficient d'Absorption du Vitrage	-
τ_v	Coefficient de Transmission du Vitrage	-
η	Rendement du Capteur	%
η_0	Rendement Maximal du Capteur	%
β	Facteur Optique du Capteur	-
τ	Taux de Couverture	%
λ	Longueur d'onde	$\mu\text{ m}$

Listes des figures et tableaux

Liste des Figures

Figure N° I-1 :	<i>Répartition du spectre Electromagnétique émis par le soleil</i>	9
Figure N° I-2 :	<i>Atténuations du rayonnement solaire</i>	11
Figure N° I-3 :	<i>Sun Tracker du centre des EnRen Ghardaia</i>	13
Figure N° I-4 :	<i>Nouvelle carte solaire des irradiations globales pour des surfaces horizontales</i>	14
Figure N° I-5 :	<i>Méridiens et Equateurs définissant les longitudes et les latitudes des lieux.</i>	16
Figure N° I-6 :	<i>Différents angles utilisés pour le repérage du soleil</i>	18
Figure N° I-7 :	<i>Angle d'incidence du rayonnement solaire sur une surface inclinée et orientée plein sud</i>	18
Figure N° II.1 :	<i>Classification des installations de production d'eau chaude sanitaire solaire</i>	22
Figure N° II.2 :	<i>Principe de fonctionnement d'un capteur solaire à concentration</i>	24
Figure N° II.3 :	<i>Composants d'un capteur solaire plan vitré</i>	25
Figure N° II.4 :	<i>Interaction du rayonnement solaire avec un vitrage</i>	27
Figure N° II.5 :	<i>Caractéristiques typiques d'un vitrage</i>	27
Figure N° II.6 :	<i>Espacement entre les rangées des capteurs</i>	30
Figure N° II.7 :	<i>Raccordements en Parallèle</i>	32
Figure N° II.8 :	<i>Raccordement classique</i>	33
Figure N° II.9 :	<i>Raccordements en boucle de Tickelman</i>	34
Figure N° II.10 :	<i>Raccordements en Séries-Parallèles</i>	35
Figure N° II.11 :	<i>Ballon eau chaude solaire. Implantation des piquages spécifiques</i>	36

Figure N° II.12 : Constituants d'un Echangeur à plaques	39
Figure N° II.13 : Différents composants du circuit hydraulique (Primaire)	40
Figure N° II.14 : Schéma de principe de régulation d'une Installation solaire avec échangeur externe, avec deux Régulateurs	42
Figure N° II.15 : Schéma de principe de régulation d'une Installation solaire avec échangeur externe, avec un Régulateur et une sonde crépusculaire	43
Figure N° II.16 : Représentation Schématique d'un capteur plan vitré	44
Figure N° II.17 : Courbes de Rendement	48
- Méthode Française	
- Méthode européenne	
Figure N° II.18 : Rendements de différents capteurs en fonction de la différence de température entre le capteur et l'ambiante	49
Figure N° II.19 : Degré de liberté pour l'orientation des capteurs	50
Figure N° II.20 : Angles d'incidence du rayonnement solaire sur un plan incliné à 60° ...	51
a- Solstice d'été	
b- Solstice d'hiver	
Figure N° II.21 : Courbes des courses du soleil pour la latitude de la ville de Batna	53
Figure N° II.22 : Angles formés par un obstacle	53
Figure N° III.1 : Vue aérienne de la Maidha	47
Figure N° III.2 : Orientation de la Maidha	49
Figure N° III.3 : Vue projetée de la disposition des capteurs sur la terrasse de la Maidha ..	71
Figure N° III.4 : Vue projetée de la fixation des capteurs sur la terrasse de la Maidha	72
Figure N° III.5 : Schéma de raccordement des capteurs selon le principe de la boucle de Tickelmann	73
Figure N° III.6 : Schéma de principe de l'installation	74

Liste des Tableaux

<i>Tableau N°I-1 : L'éclairement énergétique du rayonnement solaire hors de l'atmosphère dans les divers domaines de longueur d'onde.</i>	<i>10</i>
<i>Tableau N° I-2 : Potentiel d'Energie Solaire En Algérie</i>	<i>13</i>
<i>Tableau N°II-1 : différents traitements de surface</i>	<i>29</i>
<i>Tableau N°II-2 : Valeurs caractéristiques de quelques revêtements d'absorbeur</i>	<i>29</i>
<i>Tableau N°II-3 : Dilatation des matériaux en mm par mètre</i>	<i>35</i>
<i>Tableau N°II-4 : Valeurs donnant l'inclinaison et l'orientation</i>	<i>52</i>
<i>Tableau N°III-1 : Angle optimum pour le mois considéré pour le rayonnement considéré ...</i>	<i>49</i>
<i>Tableau N°III-2 : Valeurs de L'énergie (en Wh/m²) pour capteurs plans sur un plan SUD pour une inclinaison de 60° pour la ville de Batna</i>	<i>52</i>
<i>Tableau N°III-3 : Fraction d'Insolation pour le jour moyen du mois et pour un ensoleillement moyen</i>	<i>50</i>
<i>Tableau N° III-4 : Température Mensuelle Moyenne mesurée sur site</i>	<i>53</i>
<i>Tableau N° III-5 : Coefficient de correction pour une orientation différente du Sud</i>	<i>55</i>
<i>Tableau N° III-6 : Caractéristiques définissant les différentes installations en fonction du Ratio.</i>	<i>58</i>
<i>Tableau N° III-7 : Caractéristiques de l'installation avec différentes Surfaces.</i>	<i>60</i>

Introduction Générale

Introduction Générale

La chaleur, générée par le soleil est à l'origine de tous les phénomènes qui se passent sur terre : les variations atmosphériques, les courants ascendants et descendants, l'ascension des nuages, la chute de pluies et même des météores, les courants d'eau qui sillonnent tous les continents, dont une partie est domestiquée par les hommes pour leurs usages. Certains scientifiques affirment que même les tremblements de terre et les éruptions volcaniques ont pour cause la chaleur du soleil.

Cette chaleur vitale, disponible en quantités quasi illimitées nous provient d'une étoile appelée soleil. Crainte et redoutée, adorée et vénérée, elle a longtemps séduit les hommes et a fait l'objet d'observations et d'études par toutes les civilisations.

Deux techniques ont été développées par l'homme afin d'utiliser l'énergie provenant du soleil. La première consiste à chauffer un liquide ou un gaz pour l'utiliser à d'autres fins telles que le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la climatisation et la production de l'électricité, tandis que la seconde vise à produire de l'électricité par l'intermédiaire des semi-conducteurs et autres équipements de plus en plus développés.

Les deux chocs pétroliers de 1973 et 1979 ont largement contribué au développement actif qu'a connu le solaire thermique au détriment du pétrole dont les prix deviennent inabornables. C'est aussi grâce aux préoccupations environnementales et à l'augmentation du prix des énergies fossiles que les technologies du solaire thermique ont été relancées.

L'eau chauffée à l'énergie solaire est parmi les applications les plus répandues, car la consommation de l'ECS touche plusieurs secteurs tel que l'habitat, les cités universitaires, les mosquées, les casernes, les hôpitaux...etc.

L'Algérie a mis en place un programme appelé ALSOL qui vise à promouvoir le chauffe-eau solaire, à amorcer le marché, à encourager la création de nouveaux opérateurs industriels, ainsi qu'à développer des réseaux d'installateurs et d'établissements de services énergétiques.

A terme, le secteur industriel vise, la fabrication locale du chauffe-eau solaire, et, la mise en place d'un marché durable du solaire thermique en Algérie. Ce programme est le premier programme pilote de ce genre en Algérie. Il prévoit un soutien financier direct à hauteur de 45 % du coût du chauffe-eau solaire individuel installé et 35% pour une installation de chauffage solaire collective à travers le Fonds National pour la Maîtrise de l'Energie (FNME)[4].

Mais de grandes questions demeurent:

- Est ce que ce programme est connu au moins par les spécialistes ?
- Que dire alors du grand public ?
- Quelle serait la contribution de ce secteur à la création de milliers d'emplois dans notre pays ?

L'énergie solaire thermique, est une inconnue en Algérie car le consommateur (grand public) habitué à voir et même à toucher, n'est pas récepteur des résultats obtenus lors d'organisation des journées d'études par différentes universités et organismes spécialisés.

Il existe d'autres barrières à l'émergence d'un marché des chauffe-eau solaires à savoir :

- Le bas prix des énergies conventionnelles
- Un investissement initial élevé
- L'absence de réglementations obligeant des administrations ou établissements du tertiaire à recourir au chauffage solaire pour une partie de leur besoin en eau chaude sanitaire

De ce fait, le sujet de l'énergie solaire thermique mérite d'être clarifié, avec beaucoup de pédagogie et de savoir-faire surtout en matière de marketing. Il doit être évoqué par les médias de grande diffusion et bien expliqué aux acteurs et décideurs aussi bien économiques que politiques.

Dans l'espoir que notre travail qui consiste en la production de l'Eau Chaude Sanitaire Solaire pour la mosquée 1^{er} Novembre de Batna voit le jour, nous espérons par là répondre aux directives du gouvernement qui ne cessent d'orienter les universités algériennes à porter leurs savoirs au profit de l'économie nationale.

Par le flux important qui fréquente la mosquée, et qui est constitué de toutes les catégories de la population, la promotion sera de grande ampleur et l'exploit sera remarquable, une fois l'installation concrétisée.

Visible des quatre coins de la ville de Batna par ses minarets, la mosquée 1^{er} Novembre est considérée actuellement comme la plus grande en Algérie avec une capacité dépassant les 19 000 fidèles. D'après les médias 30 000 fidèles ont accompli la première prière qui s'est déroulée pendant la journée de son inauguration.

La mosquée est située au cœur de la ville. Elle comprend deux salles de prières, une pour les femmes et une pour les hommes. La salle de prière consacrée aux hommes se situe au centre de la mosquée, au rez-de-chaussée, est s'étend sur une surface de 6 000 m². Celle consacrée aux femmes s'étale sur 2 500 m² à l'étage supérieur. Les deux salles de prière sont de forme rectangulaire, et

contiennent 110 fenêtres. 8 grandes portes y donnent accès des quatre côtés. L'esplanade de la mosquée ainsi que la salle de prière, réunis, peuvent contenir jusqu'à 25 000 fidèles.

Notre travail a été scindé en trois chapitres. Le premier chapitre est basé sur la compréhension des phénomènes du soleil, à savoir : sa constitution, la composition du rayonnement solaire ainsi que sa répartition et les procédures à suivre pour déterminer les coordonnées géographiques d'un lieu et le repérage de l'incidence du rayonnement sur une surface quelconque d'un lieu bien déterminé.

Le deuxième chapitre est consacré à la description et l'étude d'une installation solaire thermique à base de capteur plan vitré, ainsi que du choix de l'orientation et de l'inclinaison de ce dernier pour une meilleure fiabilité de l'installation.

Le troisième et dernier chapitre a consisté à argumenter le choix et les caractéristiques les plus satisfaisants pour les besoins prévus.

Chapitre I

Gisement Solaire

INTRODUCTION

Parmi les énergies renouvelables exploitées de nos jours, on peut citer l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la géothermie, et bien entendu l'énergie solaire. Cette dernière semble la plus indiquée pour notre pays car nous bénéficions d'une moyenne de 2650 à 3500 heures d'ensoleillement par an. Ces chiffres varient en allant du Sahara vers les régions côtières. Les hauts plateaux, régions intermédiaire jouit de 3000 heures d'ensoleillement. Batna figure dans cette zone. Ce qui semble rentable quant à une installation solaire.

I-1 LE SOLEIL

Le soleil est né il y a environ 4.6 milliards d'années, au bord de notre galaxie, la Voie Lactée (à environ 300 000 années lumière du centre).

Semblable à un réacteur nucléaire, le Soleil tire son énergie de la fusion du noyau d'hydrogène qui donne naissance à un noyau d'hélium. Cette réaction produit une énergie incommensurable (à tel point que la petite fraction que nous en recevons chaque jour sur Terre à plus de 150 millions de kilomètres suffirait à subvenir aux besoins en énergie de l'ensemble de l'humanité pendant environ 30 ans).

L'énergie émise par le Soleil l'est d'abord sous la forme de rayonnements électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère. Ce rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière (C) ; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère.

La théorie « corpusculaire » de Max Planck prévoit que tout rayonnement de fréquence (f) peut être considéré comme un flux de photons dont l'énergie élémentaire est directement proportionnelle à cette fréquence. De ce fait, ce sont les rayonnements de courte longueur d'onde (ou de haute fréquence) qui sont les plus énergétiques.

Notre œil perçoit une partie seulement du rayonnement solaire, celle située dans le domaine dit visible, de longueurs d'onde comprises entre 0,40 et 0,70 μm (certains auteurs placent la limite du visible à 0,77 μm pour que les contributions énergétiques du visible et du proche infrarouge soient égales). Le Soleil émet cependant dans une large gamme de longueurs d'onde, allant (dans le sens des petites vers les grandes longueurs d'onde) des rayons gamma (longueurs d'onde inférieures à 10-12 m) aux grandes ondes radioélectriques (de longueur d'onde atteignant 1 000 mètres), en passant par les

rayons (X), le rayonnement ultraviolet, le rayonnement visible, le rayonnement infrarouge et le rayonnement hyperfréquence.

La Terre ne reçoit pas uniquement du Soleil un rayonnement électromagnétique. Elle reçoit aussi en permanence un flux de neutrinos de basse énergie, qui quittent sans s'attarder le cœur du Soleil, puis le Soleil.

Le neutrino fut découvert par **W. Pauli** en 1930 et ainsi baptisé par **E. Fermi** en 1933. Mais ce n'est qu'en 1956 que l'on détectât trois catégories dans l'espèce des neutrinos. La dernière catégorie ne fut identifiée qu'en 2000.

En 1998 fut établi que les neutrinos avaient une masse - jusqu'alors supposée nulle.

Cette masse, bien qu'infime (inférieure au millionième de celle de l'électron), ouvrait aux physiciens une fenêtre vers de nouveaux horizons, de nouveaux cieux, bref, une physique nouvelle, et enfin, peut-être une explication à l'asymétrie entre la matière et l'anti-matière dans l'Univers [24].

Il est à noter que des neutrinos caractérisés par une énergie trop élevée ont été détectés par IceCube (un détecteur de particules géant enfoui dans les glaces du Pôle Sud) au cours des années 2010 à 2012. C'est ce qui a été révélé le 15 mai 2013 par les physiciens du détecteur IceCube qui rassemble plus de 250 physiciens ingénieurs et techniciens de 12 pays, au cours du Particle Astrophysics Symposium organisé à Madison (Wisconsin, États-Unis) [3]. Ces neutrinos proviennent d'une autre galaxie d'après ces physiciens. Il est très difficile de piéger ces neutrinos, qui permettraient pourtant aux astrophysiciens de mieux comprendre ce qui se passe réellement dans le cœur du Soleil.

La Terre reçoit également en permanence de l'atmosphère solaire du plasma qui constitue le vent solaire (flux de protons, de neutrons, d'hélium et d'électrons éjectés à une vitesse de 300 à 900 km.s⁻¹ des couches extérieures de la couronne solaire).

Ces éjections de matière coronale s'accompagnent d'ondes de choc qui se propagent dans le vent solaire. Lors des plus fortes éruptions solaires, des particules accélérées (protons) peuvent atteindre la terre et produire de grandes perturbations sur l'environnement terrestre. Ces périodes sont connues sous le nom « d'événements à protons ». Pendant ces périodes de très forte activité solaire, le Soleil émet davantage de rayons (X) et d'ultraviolets.

a- Constitution du soleil

Le soleil n'est pas une sphère homogène, il est constitué de trois zones principales :

- ***Zone Intérieure*** : formée de trois couches où la température est de plusieurs millions de degrés et la pression est d'un milliard d'atmosphères, c'est l'endroit de la création de l'énergie par des réactions thermonucléaires. Toute l'énergie produite est transférée aux couches extérieures.

- ***Photosphère*** : Origine des rayonnements qui gagnent la surface de la terre, elle est d'environ 300 km d'épaisseur, avec une température de quelques milliers de degrés. Cette température décroît en fonction de l'épaisseur jusqu'à atteindre une température dite de surface qui est de 4500 K environ, sachant que le soleil est considéré comme un corps noir dont la température d'émission est de 5800 K.

- ***Chromosphère*** (Couronne solaire) : Zone à faible densité, non stable et non homogène, on y trouve des taches (régions froides) et des facules (régions plus chaudes).

b- La constante solaire

L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère, sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre-Soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée **la constante solaire**.

La constante solaire a été estimée à $1\,367\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ par **Claus Fröhlich** et **Christoph Wehrli** du Centre radiométrique mondial de Davos (Suisse), essentiellement d'après des résultats de mesures faites entre 1969 et 1980 (Fröhlich, 1978) : sept séries de mesures effectuées par des radiomètres installés sur des fusées ou des ballons stratosphériques et une série de mesures effectuées par un radiomètre embarqué sur un satellite. Cette valeur de la constante solaire a été adoptée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation (CIMO) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) en octobre 1981.

Les mesures récentes faites à l'aide de radiomètres embarqués sur satellite (Nimbus 7, NOAA 9 et NOAA 10, expérience Erbe) ont permis de bien mettre en évidence les faibles variations de la constante solaire liées à la rotation du soleil sur lui-même et au cycle d'activité de onze ans du soleil. Parallèlement, les physiciens ont amélioré la connaissance du spectre solaire hors de l'atmosphère :

Les mesures ont été effectuées au sommet de montagnes, puis à partir d'avions volant à plus de 10 000 mètres d'altitude (Nasa).

La méthode de *Langley* est utilisée pour obtenir par extrapolation hors atmosphère l'éclairement énergétique en fonction de la longueur d'onde.

Dans le domaine des très courtes longueurs d'onde, des mesures sont à présent effectuées au-dessus de l'atmosphère terrestre (le CNRS y participe activement sur Spacelab).

Rappeler que c'est le physicien français *Claude Pouillet* qui, le premier, tenta de déterminer la constante solaire en 1837. Cette « constante », qui n'en est pas une au sens où on l'entend en physique, était probablement légèrement plus faible pendant le petit âge glaciaire ; on estime aussi qu'elle valait environ 75 % de sa valeur actuelle peu après la formation de la terre, il y a 4 milliards d'années.

I-2 LE RAYONNEMENT SOLAIRE

a- gisement solaire

Le gisement solaire est l'ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée [13].

Il est utilisé pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes à satisfaire.

La connaissance du gisement solaire d'une région est plus ou moins précise :

- Selon la densité des stations pour lesquelles on a des données ;
- Selon le nombre d'années de mesures disponibles.
- Selon le pas de temps des données (mois, jour, heure)
- Selon la nature des données : durée d'ensoleillement, composante directe et diffuse et globale du rayonnement solaire, albédo du sol.

Donc, afin de concevoir, de dimensionner et de réaliser un système énergétique fonctionnant à l'aide du flux solaire, il est indispensable de connaître les caractéristiques du rayonnement solaire du site où l'installation est envisagée ainsi que les aspects météorologiques qui peuvent influencer ces caractéristiques.

b- composition du rayonnement solaire

Le Soleil existe depuis plusieurs milliards d'années. Les rayons solaires arrivent en permanence sur terre et chauffent la surface de notre planète. Sans cet apport d'énergie, la terre serait glaciale. Quel est donc la nature de ce rayonnement solaire indispensable à notre planète ? L'énergie solaire arrive sur terre sous forme d'un rayonnement électromagnétique dont la lumière visible fait partie. Un rayonnement électromagnétique se décompose en ondes radio et millimétriques, en émissions dans l'infrarouge, le visible et l'ultraviolet et, au-delà, en rayons (X) et gamma. Un corps froid comme la terre émet principalement des ondes radio, millimétriques et infrarouges. Un corps chaud comme le soleil émet sur tout le spectre. Il nous envoie un flux d'énergie dominé par la partie visible du spectre. Une partie de ce rayonnement est absorbée par l'atmosphère. Les rayonnements ultraviolets et (X) sont principalement absorbés au-dessus de 100 km en altitude, tandis que les rayonnements visible et infrarouge sont en partie réfléchis par l'atmosphère et les nuages. La surface de la terre, qui n'est pas très chaude, 15°C en moyenne, réémet une partie de l'énergie solaire qui peut être absorbée par l'atmosphère (gaz à effet de serre) et les nuages. L'énergie solaire reçue par la terre n'est pas constante dans le temps. Le cycle solaire, d'une périodicité de 11 ans, est observé depuis des siècles à travers la variation du nombre de taches à la surface du soleil. Le flux d'énergie émis par le soleil ne varie cependant que d'un millième environ au cours d'un tel cycle [28].

c- Répartition spectrale du rayonnement solaire

On a vu précédemment que ce sont les photons associés aux courtes longueurs d'onde qui sont les plus énergétiques. Cependant, les photons ne sont pas émis en même quantité par le soleil quelle que soit la longueur d'onde. Si l'on mesure l'énergie associée à chaque gamme de longueurs d'onde dans le rayonnement solaire, on observe que celle-ci est très faible pour des longueurs d'onde inférieures à 0,2 μm et pour des longueurs d'onde supérieures à 4 μm , mais aussi qu'elle passe par un maximum autour de 0,5 μm , correspondant au jaune (qui est bien la couleur dominante de l'astre solaire).

La densité spectrale d'éclairement énergétique du rayonnement solaire hors de l'atmosphère est représentée sur la figure 1 (elle est exprimée en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$).

La répartition de cet éclairement énergétique dans les divers domaines de longueur d'onde est résumée dans le tableau 1. On peut noter que le rayonnement ultraviolet (UV) représente, tous types confondus, plus de 8 % du total en termes d'énergie.

Il est intéressant de noter que, du point de vue de l'émission de rayonnement, le soleil et la surface terrestre se comportent de façon similaire à un corps noir (mais pas aux mêmes longueurs d'onde).

Le corps noir a été défini de façon théorique afin de faciliter la description des phénomènes liés au rayonnement. Il présente des propriétés remarquables, entre autres :

- Absorber totalement tout le rayonnement qu'il reçoit ;
- Emettre un rayonnement dont l'énergie totale est proportionnelle à la surface du corps noir et à la puissance quatrième de sa température absolue ;
- Emettre une énergie maximale pour une longueur d'onde inversement proportionnelle à sa température absolue.

Cette dernière particularité explique que la surface terrestre (et l'atmosphère), compte tenu de leurs températures beaucoup plus basses que celle du soleil, émettent essentiellement dans l'infrarouge, entre 4 et 80 μm . La valeur 4 μm marque ainsi une frontière assez nette entre le rayonnement solaire et le rayonnement émis par l'atmosphère et la surface terrestre. La terre et son atmosphère jouent ainsi le rôle de transformateurs de l'énergie solaire, qu'elles reçoivent principalement sous forme de rayonnement de courtes longueurs d'onde et qu'elles réémettent vers l'espace essentiellement sous forme de rayonnement infrarouge.

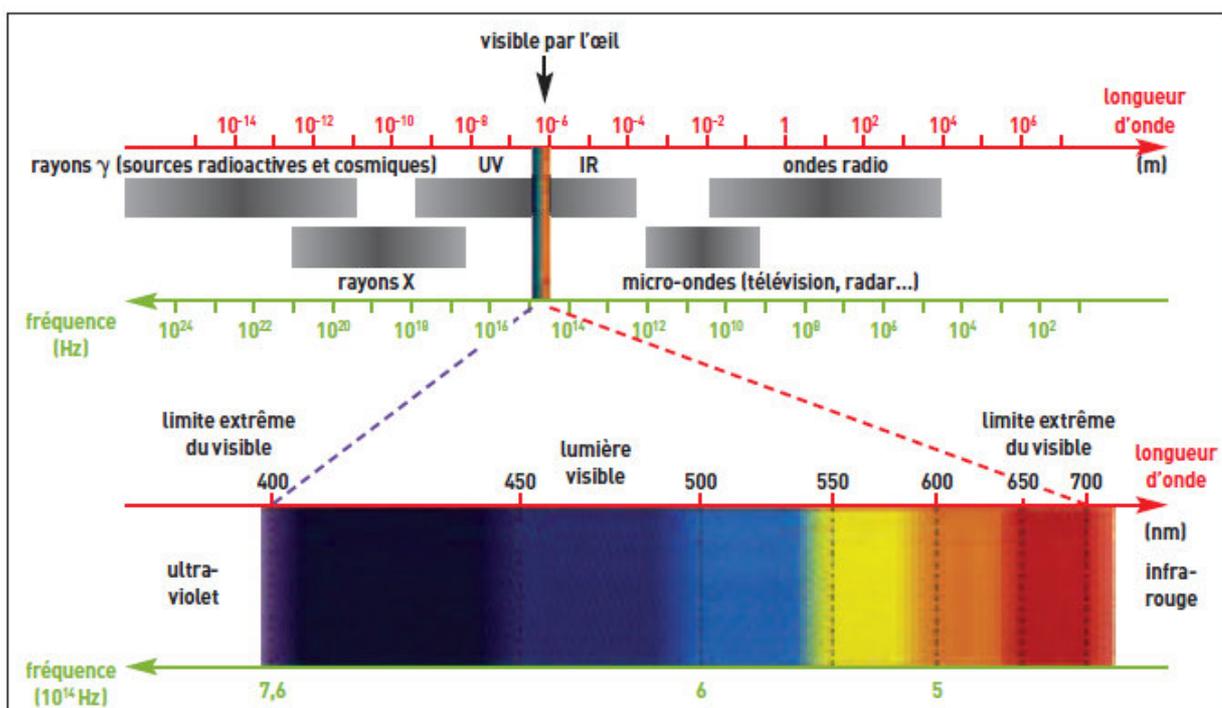


Figure N° I-1 : Répartition du spectre Electromagnétique émis par le soleil

(Source : CEA.fr 2009)

Région spectrale	Longueur d'onde (μm)	Eclairement énergétique W/m ²	Pourcentage %
Infrarouge	> 0.7	695	50.8
Visible	0.40 à 0.70	559	40.9
UV-A	0.32 à 0.40	86	6.3
UV-B	0.28 à 0.32	21	1.5
UV-C	< 0.28	6	0.4

Tableau N°I-1 L'éclairement énergétique du rayonnement solaire hors de l'atmosphère dans les divers domaines de longueur d'onde. [15]

I-2-1 Composantes du rayonnement solaire :

a- Atténuation du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire émis par le soleil subit des atténuations avant d'être reçu par la surface terrestre. Ces atténuations sont dues aux phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de l'atmosphère.

- Phénomène d'absorption :

Une partie du rayonnement est absorbé par les composants gazeux de l'atmosphère. Cette absorption est dite sélective, car elle s'opère pour des valeurs de longueur d'onde bien précises. Elle est due essentiellement à la vapeur d'eau, à l'ozone, au dioxyde de carbone et, à un degré moindre, à l'oxygène.

- Phénomène de diffusion :

Par son interaction avec des fines particules ou des molécules suspendues dans l'atmosphère, le rayonnement solaire est renvoyé dans toutes les directions sans changement de longueur d'onde.

Le phénomène de diffusion dépend fortement de la taille des particules considérées. L'influence des molécules est plus intense pour les courtes longueurs d'onde (bleu) que pour les grandes (rouge), en raison de la loi de diffusion de **Rayleigh** en λ^{-4} , (où λ est la longueur d'onde). C'est la raison pour laquelle la voûte céleste apparaît en général bleue et le Soleil couchant rougeâtre (les rayonnements violet et bleu ayant été diffusés).

Les molécules diffusent la lumière dans toutes les directions ; cependant, deux directions sont privilégiées : la diffusion avant et la diffusion arrière. Pour les particules les plus grosses (cas des gouttelettes de nuages), la diffusion se fait majoritairement en avant.

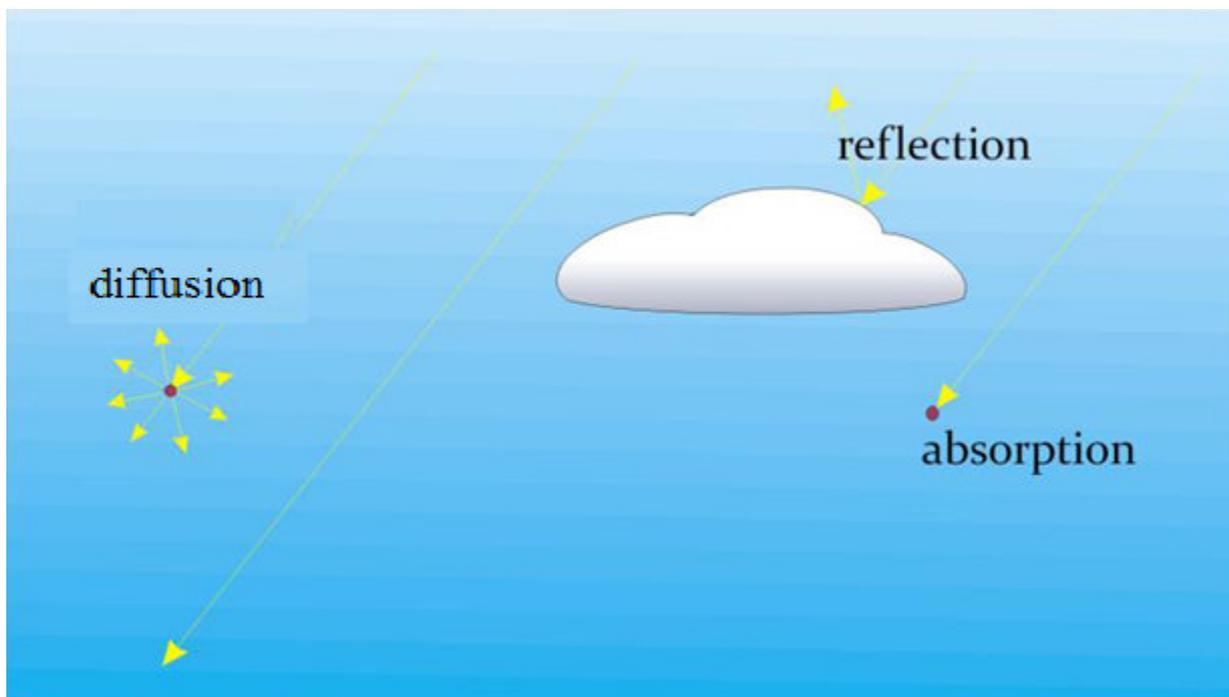


Figure N° I-2 Atténuations du rayonnement solaire

(Source :enerMENA Chapitre2 : Solar radiation)

b- L'Irradiation solaire au niveau du sol terrestre

Le rayonnement solaire atteignant le sol est constitué principalement, appelé rayonnement global est la somme de deux composantes :

- ***Rayonnement Direct :***

La fraction du rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre sans modification de sa direction est appelée rayonnement direct I_d .

- ***Rayonnement Réfléchi (Albédo) :***

C'est un rayonnement qui est réfléchi par la surface terrestre, c'est-à-dire renvoyé dans une direction privilégiée (réflexion dite spéculaire) ou de manière diffuse. Le sol réfléchit plutôt le rayonnement de manière diffuse et anisotrope.

I-2-2 Mesure du rayonnement solaire :

Sont utilisés pour la mesure du rayonnement solaire au niveau du sol des radiomètres, des pyranomètres et des pyréliomètres.

Une station radiométrique de haute précision paraît efficace pour la mesure des paramètres d'un rayonnement solaire, comme c'est le cas de la station installée à l'unité de Recherches en Energies Renouvelables de Ghardaïa. Celle-ci utilise un système de poursuite tridimensionnel (Sun-Tracker), et comporte deux parties :

Une partie fixe constituée d'un pyranomètre, pour la mesure du rayonnement global reçu sur un plan horizontal, d'un thermohygromètre pour la mesure de la température et de l'humidité, et d'un solarimètre.

Une partie mobile, capable de suivre la trajectoire du soleil depuis le coucher jusqu'au lever, grâce à un système robotique. Cette partie est pourvue d'un pyréliomètre qui est pointé vers le disque solaire, pour la mesure du rayonnement solaire direct intégré sur toutes les longueurs d'ondes (entre 0.2 et 0.4 micromètre) reçues sur un plan normal, et d'un pyranomètre pour la mesure de l'éclairement diffus sur un plan horizontal muni d'une boule sphérique pour cacher le flux radiatif venant directement du disque solaire. La somme de ces deux mesures (diffus + direct), donne le rayonnement global.

Tous ces appareils sont reliés à une acquisition. Celle-ci est reliée par une interface, à un micro-ordinateur dans lequel est installé un logiciel d'exploitation de données (datalogger). Ces données sont ainsi analysées et exploitées dans le but de les utiliser dans beaucoup d'applications énergétiques notamment pour les systèmes à conversion thermique et photovoltaïque [9].

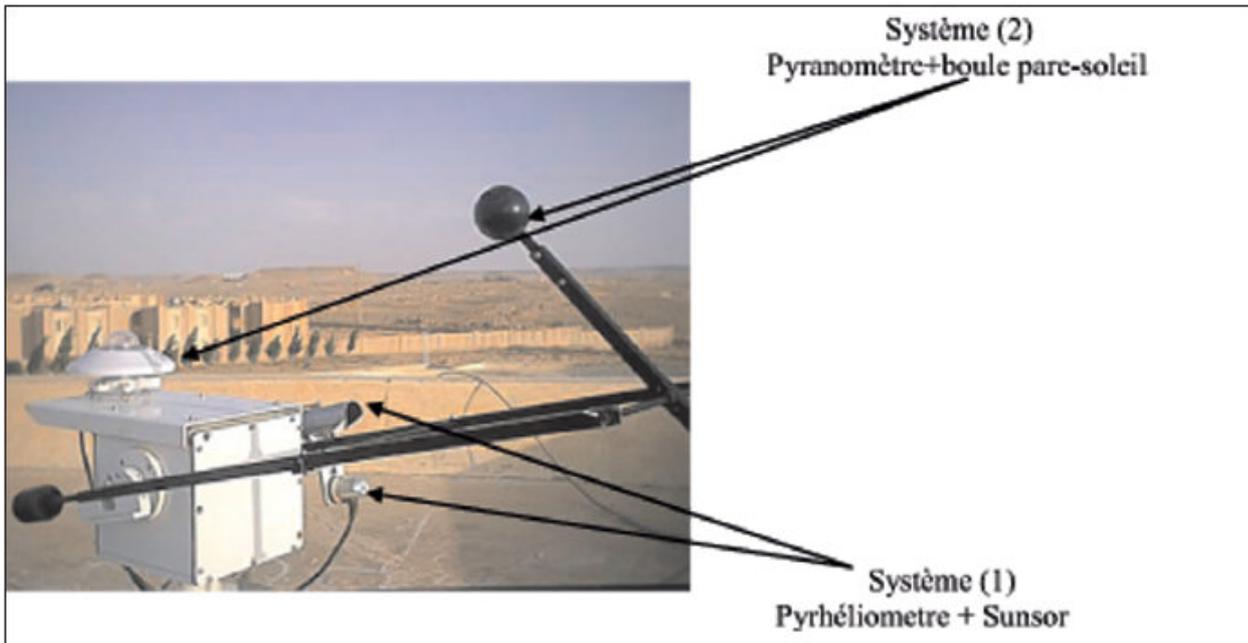


Figure N° I-2 Sun Tracker du centre des EnRen Ghardaia

(Source : Bulletin des ER.11-06-2011)

I-2-3 Potentiel d'énergie solaire en Algérie

Avec un gisement solaire dépassant les 5 Milliards de GWh/An, l'Algérie jouit de l'un des gisements solaires les plus élevés au monde, la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre 3900 heures au niveau des hauts plateaux et au Sahara.

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie	4 %	10 %	86 %
Durée moyenne d'insolation (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau N° I-2 Potentiel d'Énergie Solaire En Algérie
(Source : Ministère de l'Énergie et des Mines)

Moyenne annuelle de l'irradiation Globale reçue sur une surface horizontale, Période 1992-2002

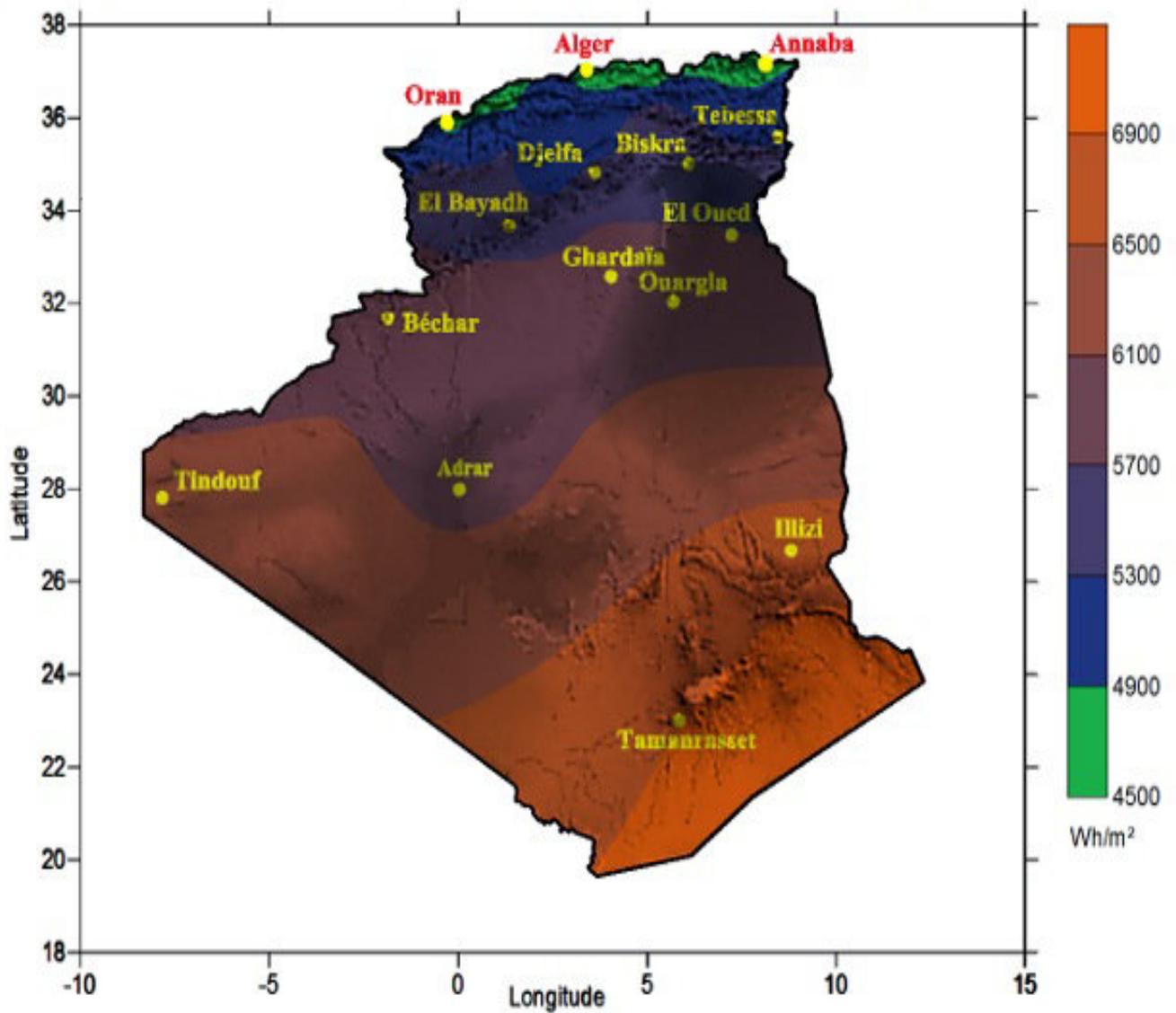


Figure N° I-4 : Nouvelle carte solaire des irradiances globales pour des surfaces horizontales
Source : (Portail Algérien des Energies Renouvelables)

I-3 REPERAGE DU RAYONNEMENT SOLAIRE SUR UN PLAN QUELCONQUE

Tout point de la surface terrestre est repéré par ses coordonnées géographiques et par les angles formés par la trajectoire du soleil (coordonnées équatoriales et coordonnées horizontales) pour un temps bien déterminé.

A - Coordonnées géographiques

a- La latitude du lieu (φ) en ($^{\circ}$) :

C'est l'angle que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu avec le plan équatorial, elle est comptée de 0° (Equateur) vers $+90^{\circ}$ (pôle Nord) pour l'hémisphère nord et de 0° à -90° (pôle Sud) pour l'hémisphère sud.

b- La Longitude du lieu (λ) en ($^{\circ}$):

C'est l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine 0° (plan passant par l'observatoire de Greenwich). Par convention les méridiens situés à l'est du méridien d'origine prennent le signe (-) tandis que ceux situés à son Ouest prennent le signe (+). La longitude d'un lieu est située entre $+180^{\circ}$ et -180° .

c- Altitude du lieu (m):

C'est la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique, le géoïde, figurant le niveau moyen de la mer.

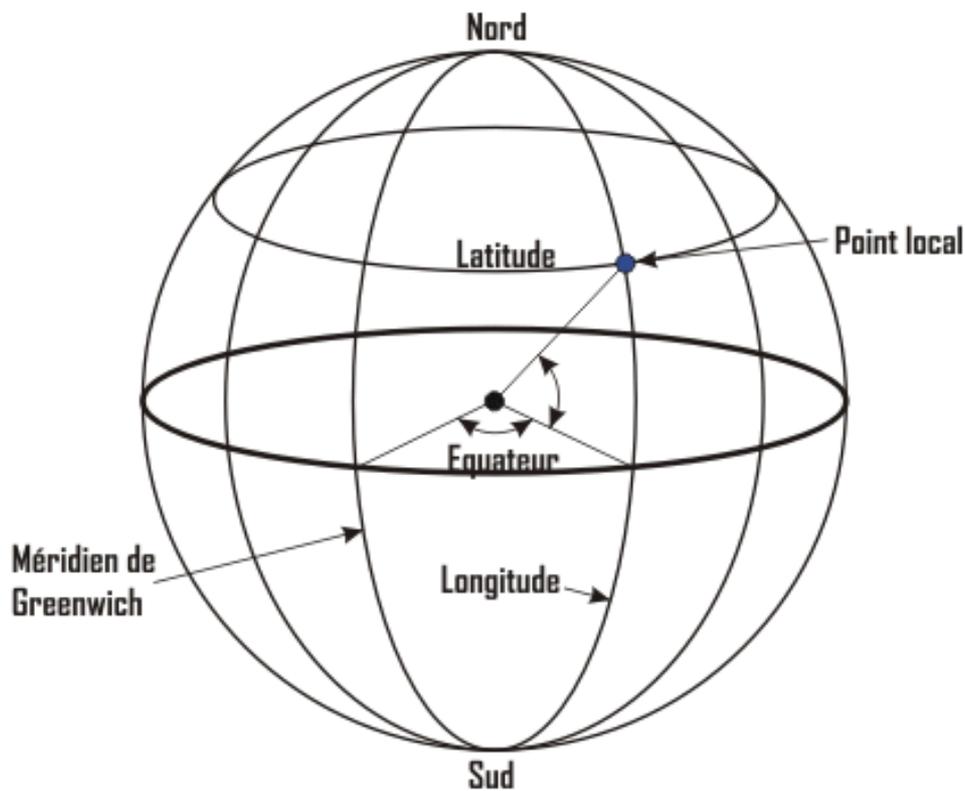


Figure N°I-5 : Méridiens et Equateurs définissant les longitudes et les latitudes des lieux.

B- Coordonnées équatoriales

a- Déclinaison du soleil (δ) en ($^{\circ}$) :

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre.

La déclinaison du soleil varie, tout au long de l'année, entre -23.45° et $+23.45^{\circ}$ (ces valeurs correspondent aux solstices d'hiver et d'été). Son calcul est donné par l'équation de **Cooper** [21]:

$$\delta = 23.45 * \sin \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (I-1)$$

n : Numéro d'ordre du jour dans l'année

$$1 \leq n \leq 365$$

b- Angle Horaire du soleil (ω) en ($^\circ$) :

C'est le déplacement horaire du Soleil de l'est à l'ouest dû à la rotation de la Terre. ω est égale à 0° lorsque le Soleil passe au plan méridien du lieu (il est midi solaire vrai à ce moment). Cet angle est compté positivement de midi solaire vrai jusqu'au coucher du Soleil et négativement, du lever du Soleil jusqu'au midi vrai.

c- Coordonnées horizontales

a- Hauteur angulaire du Soleil (α_s) en ($^\circ$) :

C'est un angle entre la direction du Soleil et sa projection sur le plan horizontal. Elle est donnée par la relation suivante [18] :

$$\sin \alpha_s = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (I-2)$$

φ : Latitude du lieu

δ : Déclinaison du soleil

ω : Angle horaire du soleil

Pour un soleil à l'horizon (lever et coucher du soleil) $\sin \alpha_s = 0$

Les heures de lever et du coucher du soleil seront calculées par la relation :

$$\cos \omega_0 = - \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (I-3)$$

ω_0 : angle horaire du soleil à son lever ou à son coucher.

b- Azimut du Soleil (γ_s) en ($^\circ$)

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. Il est compté positivement vers l'ouest et négativement vers l'est à partir de la valeur 0° qui correspond au plein sud.

c- Distance zénithale (θ_z) en ($^\circ$)

C'est l'angle complémentaire de l'azimut du soleil, il est formé par la direction du soleil et la verticale du lieu (zénith)

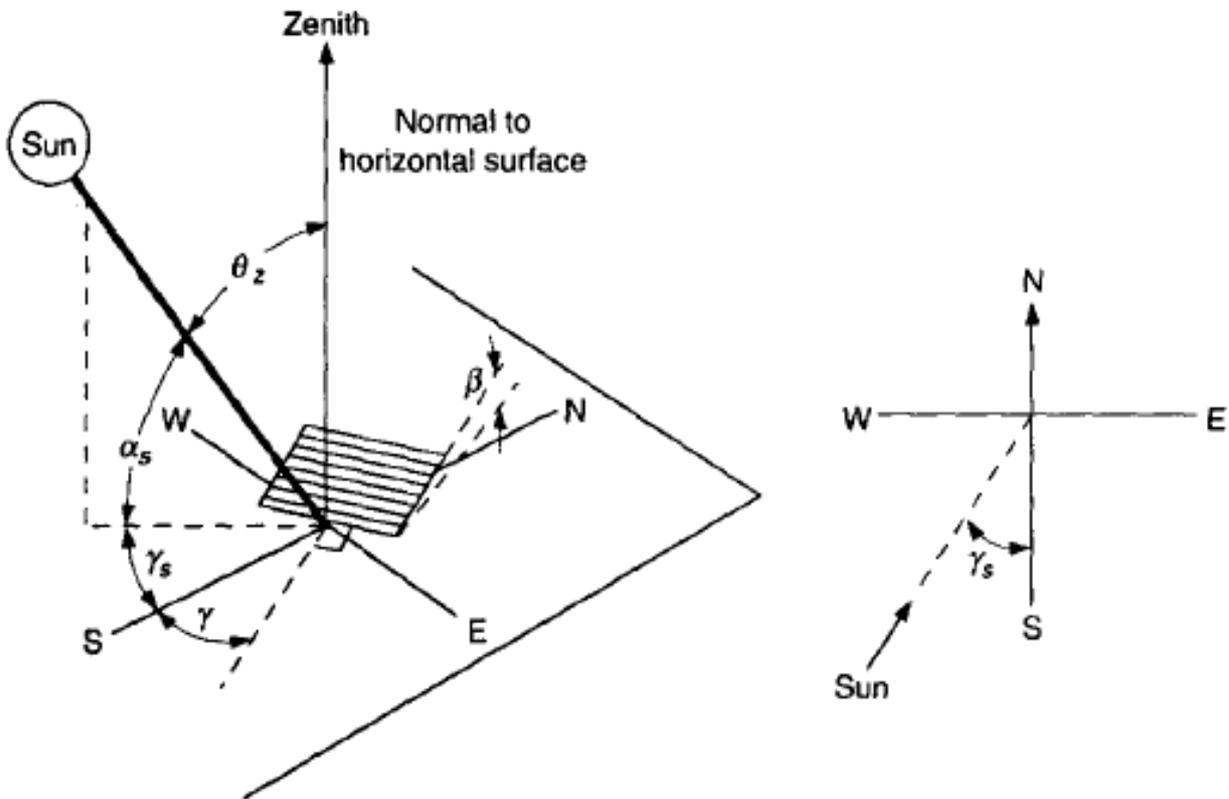
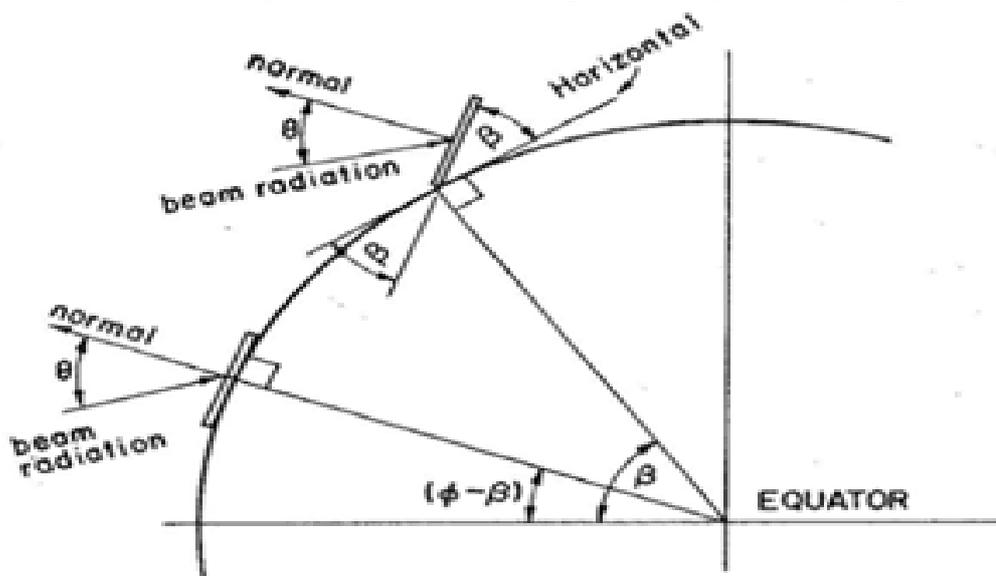


Figure N°I-6 Différents angles utilisés pour le repérage du soleil [21]



Figures N°I-7 : Angle d'incidence du rayonnement solaire sur une surface inclinée et orientée plein sud [21]

D - Temps

a- Temps solaire moyen et temps universel :

La succession des jours et des nuits et la distinction du temps solaire vrai sont déterminées par la rotation régulière de la terre sur elle-même, autour des axes des pôles et sa révolution autour du soleil. Une rotation complète de la terre sur elle-même (360°) correspond à 24 heures, ce conduit à une définition du temps, car chaque heure correspond à un écart angulaire de 15°.

Le temps solaire moyen d'un lieu bien déterminé peut se calculer par la formule suivante [18] :

$$t_0 = 12h - \frac{\lambda}{15} \quad (I-4)$$

λ : Longitude du lieu

Le temps universel (**TU**), correspond à t_0 du méridien d'origine (Greenwich).

b- Temps solaire Vrai (TSV)

Il est donné par la relation suivante :

$$TSV = TSM + Et \quad (I-5)$$

TSM : Temps solaire moyen

Et : Equation du temps

c- Equation du temps :

L'écart entre le temps solaire vrai (TSV), déterminé par la position réelle du soleil et le temps solaire moyen (TSM) du méridien du lieu désigne le terme équation du temps. Elle est donnée par **Spincer** (1971) est exprimée en minutes [21].

$$Et = 229.2 (0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B) \quad (\text{Minutes}) \quad (I-6)$$

$$\text{Où } B = (n-1) \frac{360}{365}$$

avec n : nombre du jour $1 \leq n \leq 365$

d- Nombre du jour de l'année

Le numéro du jour de l'année varie de 1 à 365 (366 pour une année bissextile). Son calcul consiste à ajouter le numéro du jour dans le mois au numéro caractéristique de chaque mois.

Mois	Janv.	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
n	j	31+j	59+j	90+j	120+j	151+j	181+j	212+J	243+j	273+j	304+j	334+j

Tableau N° I-3 nombre du jour au cours d'une année

e- Relation entre le temps solaire vrai et l'angle horaire du soleil :

L'équation suivante montre la relation entre le TSV et l'angle horaire du soleil (ω) d'un lieu de longitude (λ) donnée.

$$\omega = 15 (TSV - 12) \quad \text{en } (^\circ) \quad (I-7)$$

TSV : en heures

On peut calculer L'angle horaire du soleil par l'équation :

$$\omega = 15(TU + \frac{\lambda}{15} + \Delta t - 12) \quad (I-8)$$

λ : en degré (positif pour les longitudes Est et négatif pour les longitudes Ouest)

TU et Δt : en heures (et dixièmes d'heures).

1-4 CORRECTION DE L'ECLAIREMENT INCIDENT SUR UN PLAN QUELCONQUE

L'étude d'une installation solaire nécessite la connaissance de la puissance solaire reçue par unité de surface quelconque.

Soient γ et β , respectivement l'azimut et l'angle d'inclinaison d'une surface donnée et qui reçoit un faisceau de rayons solaires. L'éclairement lumineux (W/m^2) de ce plan est maximal pour une position perpendiculaire aux rayons, puis diminue lorsque l'angle d'incidence (θ) augmente, pour devenir nul à incidence rasante.

L'éclairement lumineux \dot{B} varie donc en fonction de l'angle d'incidence des rayons solaires, il est donné par la relation :

$$\dot{B} = \dot{I} * \text{Cos } \theta \quad (I-9)$$

L'angle d'incidence θ est fonction de la direction du soleil (α_s et γ_s) en plus des angles (γ et β).

Cette relation permet d'établir des corrections sur le rayonnement incident pour une inclinaison et une orientation donnée [21].

$$\begin{aligned} \text{Cos } \theta = & \text{Sin } \delta. \text{Sin } \varphi. \text{Cos } \beta \\ & - \text{Sin } \delta. \text{Cos } \varphi. \text{Sin } \beta. \text{Cos } \gamma \\ & + \text{Cos } \delta. \text{Cos } \varphi. \text{Cos } \beta. \text{Cos } \omega \\ & + \text{Cos } \delta. \text{Sin } \varphi. \text{Sin } \beta. \text{Cos } \gamma. \text{Cos } \omega \\ & + \text{Cos } \delta. \text{Sin } \beta. \text{Sin } \gamma. \text{Sin } \omega \end{aligned}$$

$$\text{et } \text{Cos } \theta = \text{Cos } \theta_z. \text{Cos } \beta + \text{Sin } \theta_z. \text{Sin } \beta \text{Cos } (\gamma_s - \gamma). \quad (I-10)$$

Chapitre II

Installations Thermiques solaires

INTRODUCTION

Généralement on rattache l'utilisation du solaire à la production de l'électricité, car les installations thermiques à partir de cette source ne cessent de prendre une place à ne pas négliger. Cependant, favorisée par sa répartition annuelle, son niveau de température ainsi que la disponibilité des équipements nécessaires à la réalisation d'installations, la production d'Eau Chaude Sanitaire constitue l'une des applications les plus courantes parmi ces installations thermiques.

II-1 INSTALLATIONS SOLAIRES THERMIQUES

II-1-1 Classification des installations solaires thermiques

Les installations solaires thermiques sont classées suivant leurs destinations, parmi ces classifications, on peut citer celle donnée par **Vijay Dwivedi**, de l'université de StrathClyde, qui s'intéresse à la production d'eau chaude sanitaire solaire.

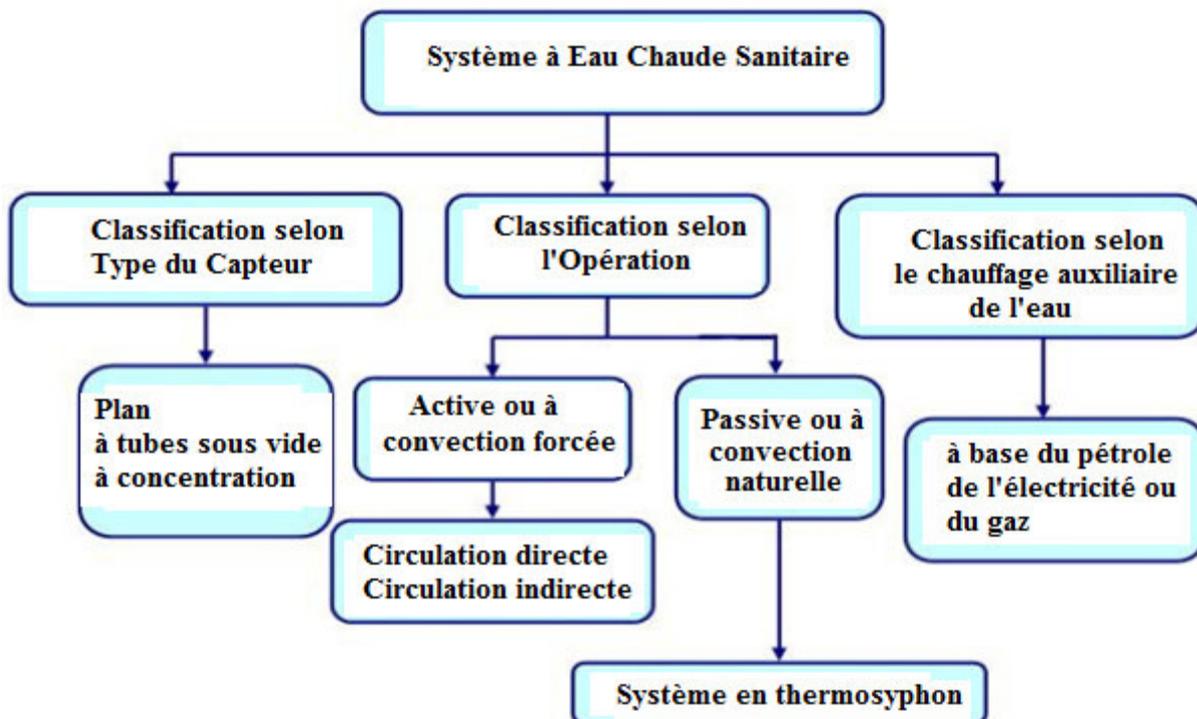


Figure N°II.1 : Classification des installations de production d'eau chaude sanitaire solaire

II-1-2 Composition des installations solaires thermiques

L'élément central d'une installation thermique solaire est le capteur, ce dernier dessert, généralement à l'aide d'un dispositif hydraulique, des ballons de stockage, indispensables vu la non régularité du rayonnement solaire.

Des échangeurs de chaleur à l'intérieur des ballons ou à leur extérieur sont à prévoir et ce, selon la quantité de chaleur produite par l'installation.

Les principaux composants d'une installation solaire thermique sont :

A - Capteur Thermique

Les capteurs solaires constituent le lien entre l'énergie solaire incidente et le consommateur. Leur principale mission est de convertir le rayonnement solaire en chaleur avec un rendement élevé et à fournir cette chaleur aux consommateurs aussi efficacement que possible.

Le capteur solaire de base est le capteur plan. Cependant il existe également d'autres capteurs bien que leur importance au chauffage proprement dit soit plus restreinte. Il s'agit d'une part des bassins solaires qui ont une relation avec le dessalement de l'eau, et d'autre part des capteurs à concentration, utilisés particulièrement comme générateurs solaires de puissance.

On peut classer les capteurs solaires selon la température qu'ils permettent d'obtenir, principal critère physique pour exprimer les performances d'un capteur.

Classification des capteurs solaires thermiques

Il existe deux grandes familles de capteurs solaires thermiques.

a- Capteurs solaires plans :

Selon l'utilisation on peut classer ces capteurs en :

- capteurs solaires non vitrés :

Utilisés pour des basses températures, ils sont destinés généralement au chauffage des piscines de plein air. Un revêtement sélectif est à ajouter s'il s'agit de piscines couvertes.

- capteurs solaires vitrés

Souvent utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire ou pour le chauffage d'appoint.

Ils sont recommandés pour des températures moyennes de service allant de 30°C jusqu'à 80°C

b- capteurs solaires à tubes sous vide

Par l'élimination de l'air, et grâce aux propriétés isolantes du vide, les pertes thermiques par convection dans les capteurs solaires sous vide sont nettement moindres. Ces capteurs sont destinés à travailler pour des hautes températures, généralement supérieur à 70°C. Leurs domaines d'application sont surtout : le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire ainsi que la préparation d'eau chaude pour des utilisations industrielles.

c- Capteurs solaires à concentration

Les rayonnements solaires arrivent sur des réflecteurs qui sont généralement des miroirs, ces derniers les renvoient sur une surface absorbante qui les convertit en chaleur. Cette chaleur sera ensuite cédée à un fluide caloporteur.

Généralement, les capteurs à concentration sont utilisés pour des applications à haute température.

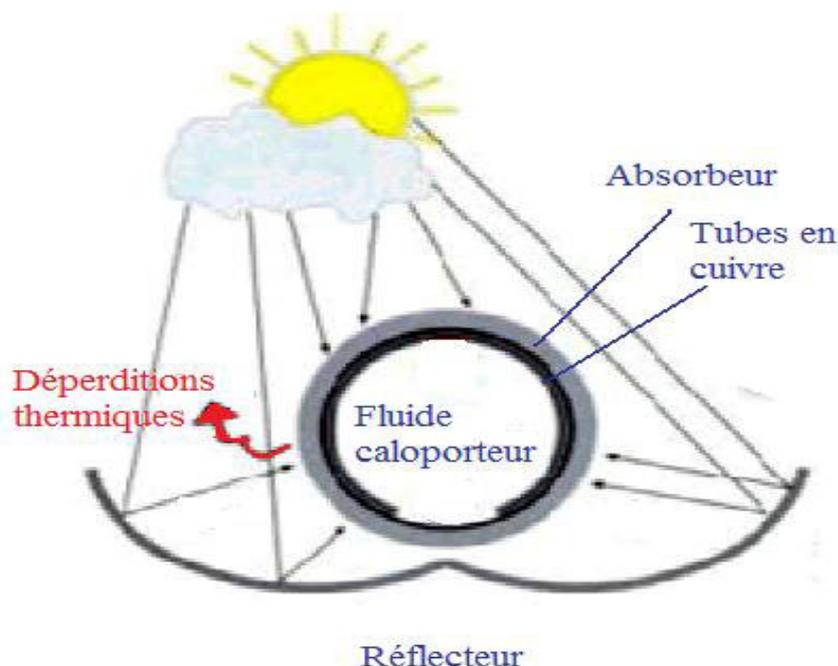


Figure N°II.2 : Principe de fonctionnement d'un capteur solaire à concentration

(Source : cours sur le solaire thermique INES éducation)

A -1 Capteurs solaires plans vitrés à eau

On va s'intéresser dans ce travail uniquement au capteur plan vitré, car il est le plus répandu pour les applications thermiques qui visent à produire de l'eau chaude sanitaire.

Il est à noter qu'une surface calculée doit atteindre un taux de couverture solaire de 60 à 70% pour la production d'eau chaude sanitaire solaire. Au-delà de ces valeurs, le gain de productivité apporté est minime par rapport à l'investissement.

a- Principe de fonctionnement

Le rayonnement solaire atteint l'absorbeur en pénétrant à travers une couverture qui réfléchit une petite fraction de ce rayonnement. La grande partie du rayonnement fait chauffer l'absorbeur qui transmet cette chaleur à un fluide circulant à travers ses tubes.

Toute la chaleur captée ne peut être transmise au fluide caloporteur, vu l'existence des pertes au niveau du capteur. Une isolation thermique judicieuse est nécessaire pour que l'énergie captée par l'absorbeur puisse être utilisée avec un minimum de pertes.

Comme tout corps qui s'échauffe, l'absorbeur émet un rayonnement (en grande partie dans les infrarouges) d'une part absorbé par le vitrage, et d'autre part réfléchi par le film placé sur l'isolant.

b- Composants d'un capteur solaire plans vitré

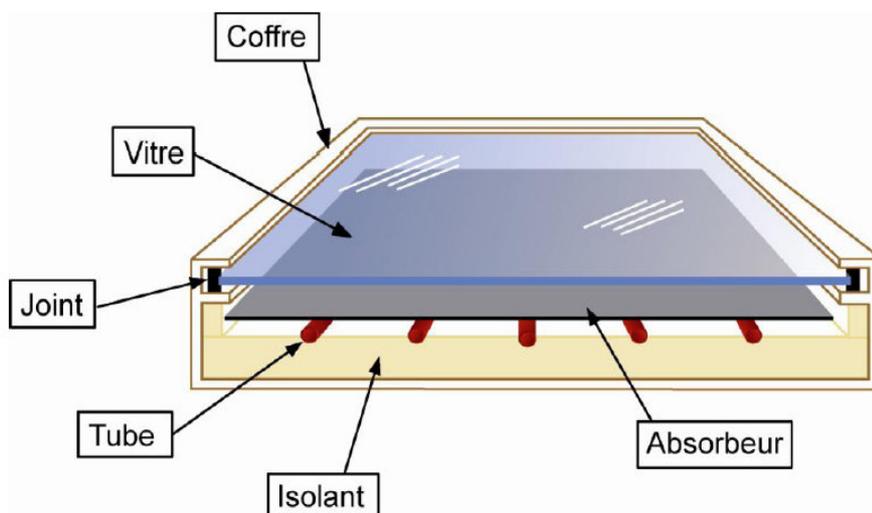


Figure N°II.3 : Composants d'un capteur plan vitré

(Source : eau chaude sanitaire solaire 2013 FFB)

➡ *Couverture Transparente*

La couverture transparente collecte la chaleur émise par l'absorbeur, comme dans une serre, et accroît l'échauffement du fluide. C'est la raison pour laquelle un choix du matériau aux caractéristiques appropriées pour une application donnée est nécessaire afin de renforcer les fonctions essentielles dudit vitrage, à savoir :

- Recevoir le maximum du rayonnement incident sans réflexion ni diffusion importante.
- Transmettre la plupart du rayonnement reçu.
- S'opposer aux déperditions thermiques par conduction et rayonnement.

Ainsi, le choix du vitrage s'établira selon les caractéristiques suivantes **[1]** :

- l'émissivité
- La transmission
- La réflexion
- L'absorptivité
- L'indice de réfraction

La particularité de ce composant est sa transparence au rayonnement solaire, de courtes longueurs d'onde (le visible et le proche de l'infrarouge), et son opacité aux rayonnements de grandes longueurs d'onde (infrarouge éloigné). Une telle caractéristique s'avère très avantageuse pour accentuer le phénomène "effet de serre" utile dans certaines applications solaires, notamment, les séchoirs solaires, les serres agricoles (de types chapelles, tunnels, etc.) et dans bien d'autres applications **[1]**.

Notre intérêt s'est porté sur le matériau verre ainsi que sur les techniques utilisées pour améliorer ses performances thermo-optiques.

Le verre antireflet permet à la lumière de mieux pénétrer en rayonnement direct ou en biais. Un traitement spécifique permet d'augmenter la transmission lumineuse de 91 à 96%, faisant ainsi grimper le rendement thermique d'environ 6 à 10%. On a donc un taux de couverture solaire important même en hiver grâce à une meilleure exploitation des rayonnements obliques **[8]**.

Donc il est possible d'obtenir des verres à haute transmission énergétique en éliminant la plupart des oxydes de fer lui donnant sa couleur verte.

- Interaction du rayonnement solaire avec un vitrage

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t$$

$$1 = \rho + \alpha + \tau$$

$$1 = 0.05 + 0.00 + 0.95$$

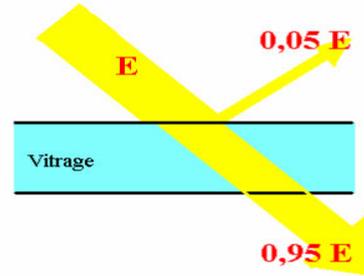


Figure N°II.4 .

*Interaction du rayonnement solaire avec un vitrage
(Source : Chap5. transfert de chaleur par rayonnement)*

On constate que le rayonnement réfléchi est fonction de l'angle d'incidence de (E) sur la surface vitrée. Plus l'angle est proche de 90°, moins est la partie réfléchie.

- Caractéristiques typiques d'un vitrage

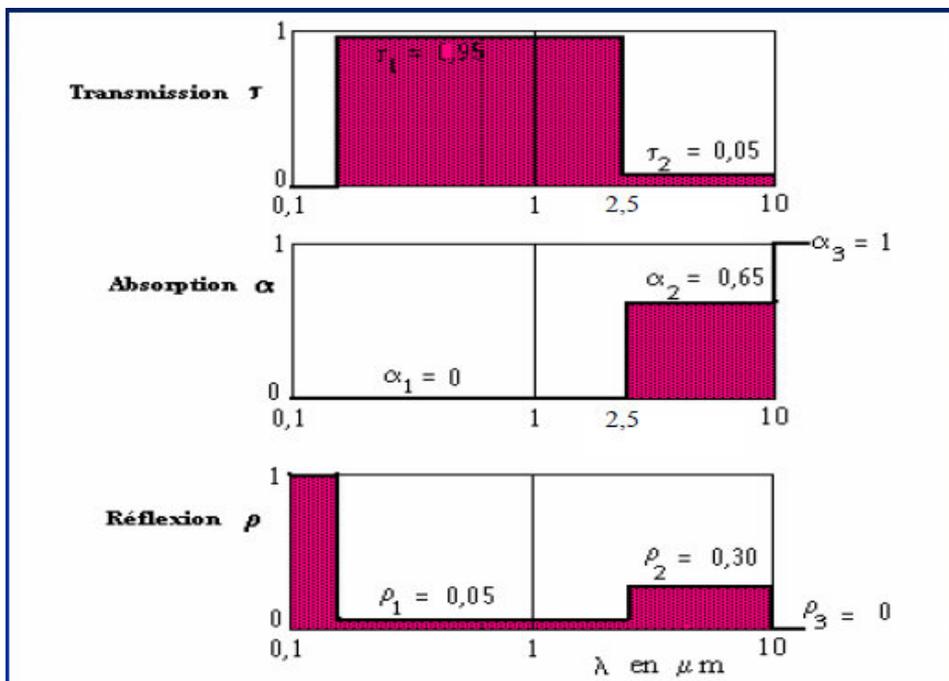


Figure N°II.5 *Caractéristiques typiques d'un vitrage
(Source : Chap5. transfert de chaleur par rayonnement)*

La figure ci dessus nous donne un aperçu sur les trois paramètres typiques qui définissent la qualité d'un vitrage par rapport aux longueurs d'onde du rayonnement solaire

🔴 *L'Absorbeur*

L'absorbeur est l'élément essentiel d'un capteur plan, il s'échauffe par les irradiations solaires qui traversent le vitrage et l'atteignent en les convertissant en chaleur. Cette dernière sera cédée au fluide caloporteur qui circule dans les canaux de l'absorbeur et qui sera transportée jusqu'au ballon de stockage ou directement vers la consommation.

La transmission de la chaleur de l'absorbeur vers le fluide caloporteur se fait plus efficacement et plus uniformément sur la surface entière. C'est pourquoi les canaux contenant le fluide caloporteur ne doivent pas être espacés. En pratique, on choisit un intervalle de 100 à 120 mm entre les tubes [11].

Afin de limiter l'inertie de mise en régime, l'absorbeur devra être le plus léger possible et construit avec un bon matériau conducteur et avec une bonne tenue mécanique, généralement des feuilles minces en cuivre de 0.2 mm d'épaisseur, recouvertes par un traitement spécial de surface (surface sélective) pour capter au maximum le rayonnement solaire et en réémettre le moins possible.

La sélectivité de l'absorbeur est très importante, elle est améliorée au moyen de traitements de surface qui ajoutent au support des caractéristiques pour que le rayonnement solaire soit très bien absorbé et que le rayonnement infrarouge émis (dû à l'échauffement) soit limité.

Le traitement de surface peut être obtenu par des procédés électrochimiques ou électro-physiques.

Comme tout corps qui s'échauffe, l'absorbeur émet un rayonnement (en grande partie dans les infrarouges), d'une part absorbé par le vitrage, et d'autre part réfléchi par le film placé sur l'isolant.

Deux coefficients déterminent les caractéristiques des absorbeurs :

- Coefficient d'absorption (0 à 1, optimum : 1)
- Coefficient d'émission (0 à 1, optimum : 0)

La peinture noire mate permet d'obtenir un coefficient d'absorption compris entre 0,9 et 0,95. Mais le degré d'émission est très élevé (de l'ordre de 0,85). Tandis que l'oxyde de chrome (black chrome), composé d'oxyde de chrome déposé sur une sous - couche de nickel, a un coefficient d'absorption de 0,95 et un coefficient d'émission variant entre 0,12 et 0,18.

Un revêtement, de plus en plus utilisé, avec un coefficient d'absorption supérieur à 0,95 et un coefficient d'émission inférieur à 0,05. Il consiste à déposer différents métaux tel que le titane sur la surface absorbante en présence du vide.

Revêtement	Coefficient d'absorption	Coefficient d'émission
Peinture noire	0,9 – 0,95	> 0,85
Black chrome	0,95	0,12 à 0,18
Dépôt sous vide	> 0,95	<0,05

Tableau N°II-1 : différents traitements de surface [23]

Sans exception, tous les revêtements sélectifs courants d'absorbeurs ont des coefficients d'absorption de 0.95 minimum et leurs coefficients d'émissions sont entre 0.05 et 0.12, voire de l'ordre de 0.03 pour les revêtements très minces, tels que les couches de « TINOX » ou d' « Interpane ».

Les valeurs caractéristiques des revêtements d'absorbeur les plus utilisés sont données par le tableau suivant :

Produit	α	ε	Revêtement	Procédé	Absorbeur
SunStrip	0.95± 0.02	0.15± 0.02	Nickel sur aluminium extrudé	Electrochimique	Aluminium
Chrome Noir	0.95± 0.02	0.15± 0.02			

Tableau N° II-2 Valeurs caractéristiques de quelques revêtements d'absorbeur [11]

➤ *L'isolation Thermique*

Pour limiter et non éliminer les déperditions thermiques des cotés qui entourent le capteur (excepté la face vitrée) et pour que le fluide caloporteur reçoit un maximum de l'énergie du capteur, une bonne isolation s'avère indispensable. Plusieurs matières isolantes existent sur le marché, on rencontre fréquemment la laine de roche, la laine de verre, la mousse polyuréthane

➤ *Le Coffre*

Le Coffre est une enveloppe qui enferme l'absorbeur et protège l'isolant thermique de la surface arrière et des surfaces latérales contre toutes les intempéries ainsi que les détériorations mécaniques.

Il est conseillé d'utiliser des matériaux de haute qualité pour la conception du coffre. On rencontre souvent de l'aluminium, car l'utilisation de la tôle en acier galvanisée n'a pas donnée satisfaction vu que la couche du zinc présente des risques de rouille, ce qui influe sur la durée de vie du capteur.

c- Espacement entre les rangées des capteurs

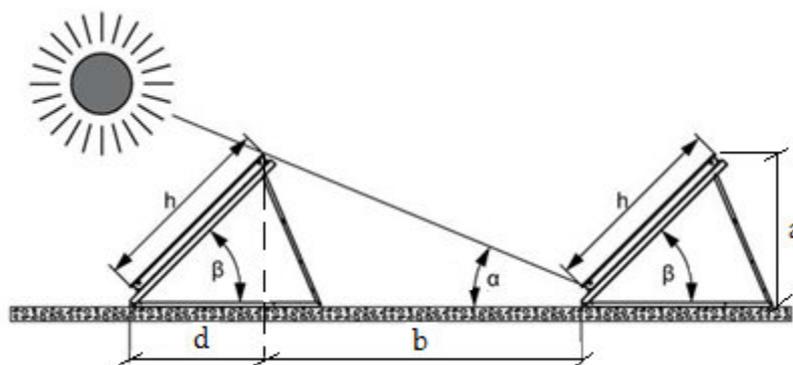


Figure N°II.6

Espacement entre les rangées des capteurs

En cas de montage en plusieurs rangées sur un plan horizontal, et afin d'éviter la projection des ombres, un espacement entre les rangées est nécessaire. Cet espacement dépend de l'inclinaison des capteurs et de l'angle d'élévation minimal de l'année.

La distance entre deux rangées est donnée par la relation suivante :

$$b = a/\operatorname{tg} \alpha \quad II-1$$

Ou par la relation :

$$d + b = \frac{\operatorname{Sin} 180^\circ - (\beta + \alpha)}{\operatorname{Sin} \alpha} \quad II-2$$

b : Distance entre deux rangées

d : Distance projetée du capteur

a : Hauteur du capteur

α : Angle de la hauteur du soleil

β : Angle d'inclinaison du capteur

d- Raccordement des capteurs

Le raccordement des capteurs doit être fait de manière à faire circuler, dans chacun d'eux, la même quantité d'eau par unité de temps. Si cette condition n'est pas respectée, une partie du champ présentera un débit trop important pour augmenter significativement la température. Et l'autre partie aura un débit trop faible (pouvant même être nul). Ce type de dysfonctionnement provoquera des surchauffes locales néfastes au mélange antigel, dont le rendement utile sera de toute façon nul [7].

Il existe plusieurs types de raccordement, et ce, selon la taille de l'installation. On trouve généralement les configurations suivantes :

d-1 Raccordement en parallèle

Ce type de réseau permet une alimentation en parallèle de chaque échangeur en maintenant en pression le réseau d'alimentation. Son inconvénient : lorsque plusieurs échangeurs sont en fonctionnement, le débit le plus important va alimenter le circuit du capteur N°1 (qui comprend le moins de pertes de charge) et va décroître progressivement pour les autres capteurs. Ce type de boucle ne convient donc que pour alimenter un nombre réduit d'échangeurs (< 10) tout en conservant des caractéristiques de débits corrects.

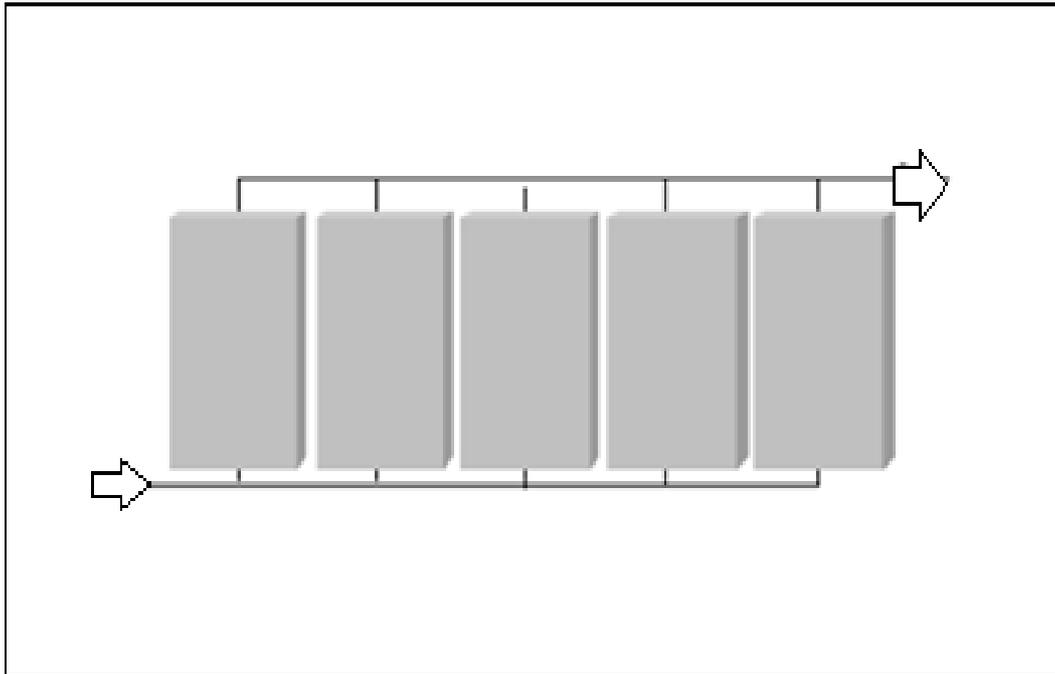


Figure N°II.7 Raccordements en Parallèle

(Source : ECSSolaire2.ADEME)

d-2 Raccordement en Série

Pour que tous les capteurs voient circuler la même quantité d'eau par unité de temps, une solution est de les relier en série les uns après les autres.

Ce type de montage présente deux inconvénients dès lors qu'il y a plus de deux panneaux : les pertes de charges sont importantes, et le dernier capteur en bout de ligne aura un mauvais rendement car il chauffe de l'eau déjà réchauffée par les capteurs précédents.

d-3 Raccordement Classique

Appelé mécaniquement montage en série, mais hydrauliquement il s'agit d'un montage en parallèle. Il présente le très grand avantage d'être simple à réaliser et de minimiser la distance entre les panneaux.

Ce montage fonctionne très bien dès lors que le diamètre des collecteurs (aller et retour) est au moins trois fois supérieur à celui des échangeurs. L'inconvénient de ce raccordement est le nombre de capteurs qui est limité à quatre.

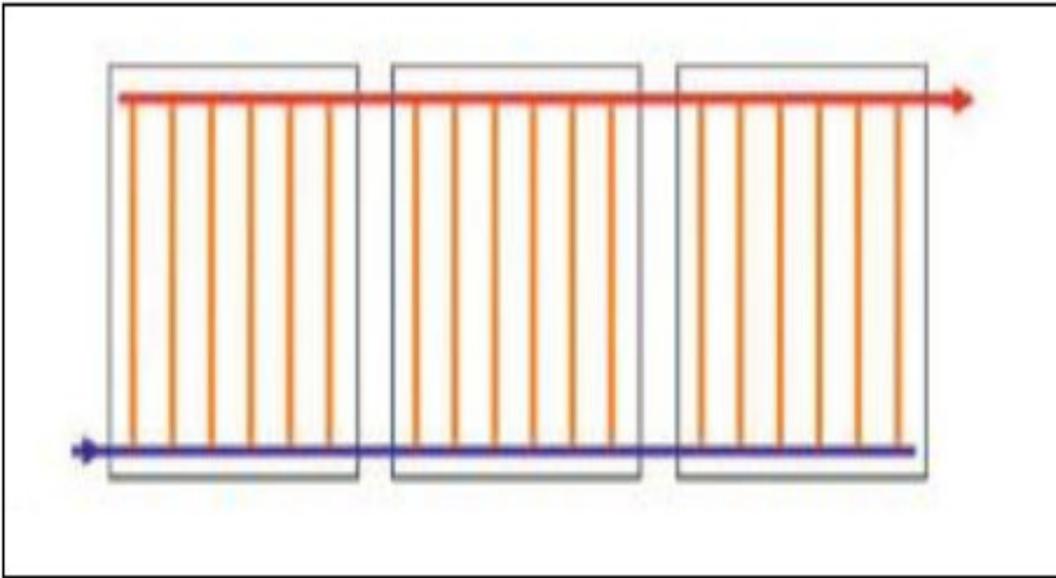


Figure N°II.8 Raccordement classique

d-4 Raccordement en Boucle de Tickelman

Dès que l'on dépasse deux capteurs, il est nécessaire de les placer en parallèle et, puisque l'eau emprunte toujours le plus court chemin, de faire en sorte que tous les chemins soient équivalents. C'est ce que l'on appelle le principe de (ou la boucle) de Tickelman.

Le montage en boucle de Tickelman, permet une égale répartition du fluide et des pertes de charges dans les capteurs, quelque soit le capteur emprunté par le liquide caloporteur, l'eau parcourt la même distance à la même vitesse. Ce montage simplifie largement le problème d'équilibrage de certains circuits hydrauliques complexes qui n'est pas toujours simple et demande du temps, à la condition cependant que les différents échangeurs présentent à peu près les mêmes pertes de charge.

Ce type de réseau est très adapté aux boucles comprenant un grand nombre d'échangeur à alimenter. En revanche sa mise en place peut demander dans certaines configurations des longueurs de tuyauterie de 30 % supérieures à des boucles simples.

Généralement dans un souci de simplicité et d'efficacité, on sépare les panneaux en plusieurs groupes (batteries] de quatre capteurs au plus [7].

Afin d'empêcher la création des zones mortes au niveau du circuit capteur, ce qui permet un rendement optimal. Le débit doit être uniforme à travers chacun de ses panneaux, en veillant à ce que le rapport suivant soit le plus faible possible (compris entre 1,6 et 3,3):

$$\text{Perte de charge dans les collecteurs} / \text{Perte de charge dans les capteurs}$$

(Diamètre interne des collecteurs / Diamètre interne des circuits hydrauliques des capteurs)

d-5 Raccordement en Série –Parallèle

Afin de remédier à l'inconvénient du nombre de capteurs associés en montage classique, et pour garder le rapport entre le diamètre interne des collecteurs et celui des capteurs, on recourt au montage série-parallèle qui permet de raccorder un grand nombre de capteurs.

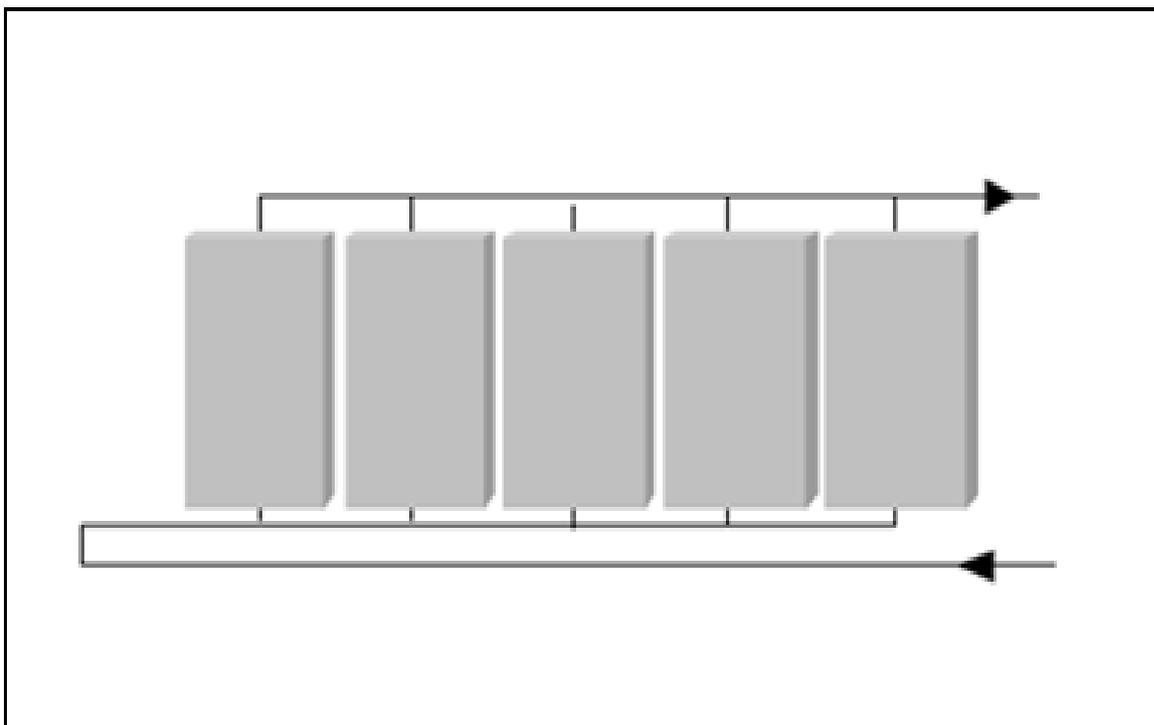
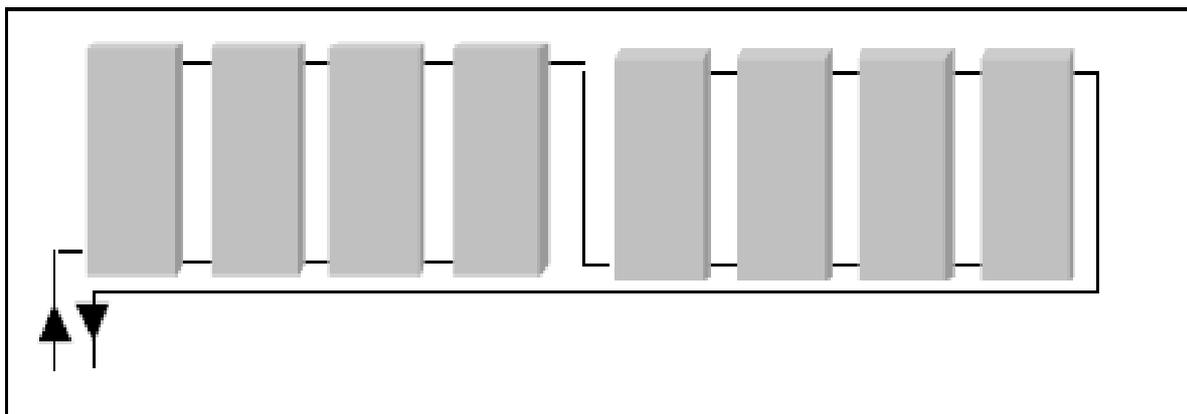


Figure N°II.9 Raccordements en boucle de Tickelman

(Source : eau chaude sanitaire solaire 2 ADEME 2008 FFB)



*Figure N°II.10 Raccordements en Séries-Parallèles
(Source : eau chaude sanitaire solaire 2 ADEME 2008 FFB)*

e- Dilatation de la tuyauterie

Lors du passage d'un fluide chaud dans une canalisation, celle-ci présente une dilatation. Cette dilatation est fonction du matériau utilisé, et afin d'éviter l'arrachement de ces conduites aux niveaux des soudures ou une détérioration des capteurs, Il est nécessaire de prendre en considération ce phénomène.

Ecart de température	1K	100K	200K
Cuivre	0.017	1.7	3.4
Fer Noir	0.012	1.2	2.4
Acier inoxydable	0.014	1.4	2.8
Aluminium	0.024	2.4	4.8

Tableau N°II-3 : Dilatation des matériaux en mm par mètre

B- Ballon de stockage

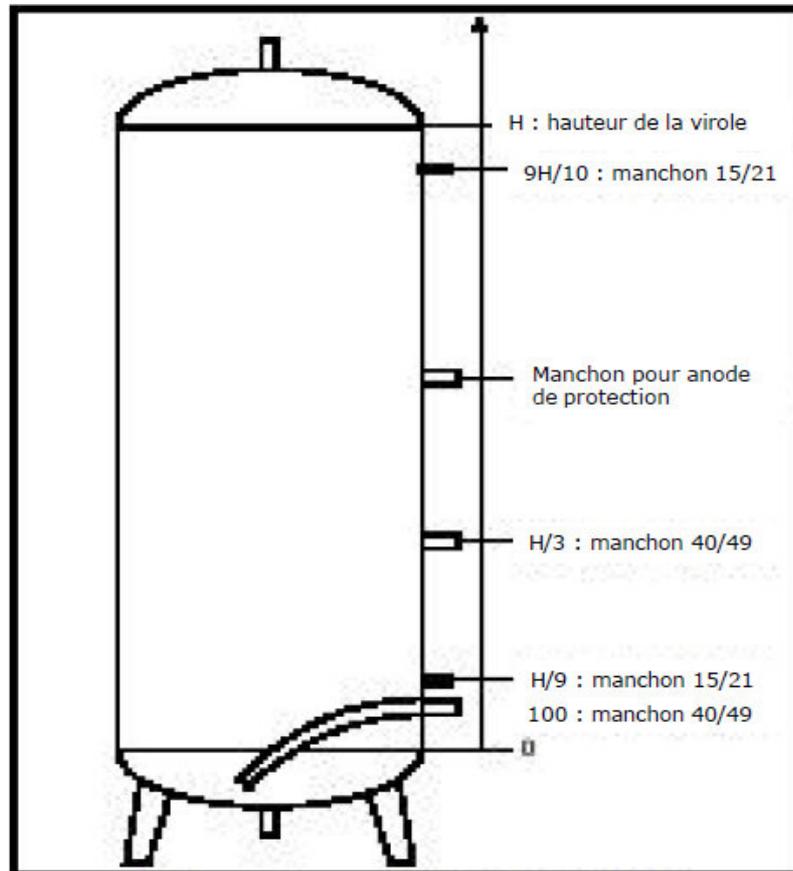


Figure N°II.11

Ballon eau chaude solaire
Implantation des piquages
Source : TICSOL

spécifiques

L'utilisation des ballons de stockage de l'énergie permet de pallier le caractère discontinu de l'énergie solaire, sa capacité de stockage dépend essentiellement des objectifs de l'installation et de la surface des capteurs installés.

Le transfert de chaleur des capteurs vers le ballon s'effectue de deux façons différentes :

- a- par circulation forcée avec une pompe commandée par un dispositif de régulation,
- b- par circulation naturelle ou thermosiphon.

Malgré l'avantage des installations fonctionnant par thermosiphon, et qui réside dans la non nécessité de prévoir une régulation, ni pompes de mise en circulation du fluide caloporteur, leur utilisation pour des installations les capteurs de grandes dimensions est mal adaptée.

Il est recommandé d'utiliser pour l'ECS des ballons de stockage qui résistent à la corrosion. Celle-ci est provoquée par l'oxygène contenu dans l'eau.

Il est préférable d'utiliser des ballons en acier inoxydable pour leur teneur élevée en nickel et en chrome. Les ballons galvanisés sont à proscrire, car le zinc manque de stabilité à des températures élevées, de même les ballons en plastique sont à éviter, car la résistance du plastique à des températures élevées et à des changements de températures est souvent insuffisante.

Pour favoriser la stratification au sein des ballons de stockage, on a intérêt à :

- Choisir un rapport hauteur/diamètre du ballon suffisant (>2)
- Eviter le brassage de l'eau dans le ballon qui « casserait » la stratification,
- Envoyer vers le capteur de l'eau provenant de la partie basse du ballon.

- Isolation du Ballon

Pour améliorer l'efficacité du système et prolonger l'autonomie du stock, l'isolation des ballons de stockage (sur les côtés, en haut et en bas) doit être renforcée.

En pratique, et dans le cas d'une isolation de ballon effectuée sur site, l'épaisseur de l'isolation sera équivalente à :

- 2,5 m².K/W pour les ballons de moins de 400 litres, soit un équivalent de 10 cm de laine minérale,
- 3 m².K/W pour les ballons de plus de 400 litres et moins de 2000 litres, soit un équivalent de 12 cm de laine minérale,
- 3,5 m².K/W pour les ballons de plus de 2000 litres, soit un équivalent de 14 cm de laine minérale.

C - Echangeur de chaleur

Un échangeur de chaleur est un appareil destiné à transmettre la chaleur d'un fluide à un autre. On distingue deux circuits différents, un circuit dit primaire (circuit solaire dans notre cas), et un circuit secondaire (eau sanitaire).

Pour des volumes de stockage dépassant les 500 litres, l'installation doit être dotée d'un échangeur séparé (Extérieur du ballon) [20].

L'échangeur immergé est généralement utilisé pour des surfaces de capteurs jusqu'à 30 m² [27], [2].

Les échangeurs de chaleur externes sont surtout utilisés dans les installations de grandes dimensions, dans lesquelles la surface d'échange obtenue avec des échangeurs de chaleur à faisceau de tubes est insuffisante [25].

- Avantages d'un échangeur de chaleur Externe

Le montage d'un échangeur de chaleur à l'extérieur du ballon de stockage permet :

- de faciliter l'entretien
- d'optimiser les performances de l'installation.
- le démarrage en deux étapes :
 - une première étape où la boucle primaire est mise en circulation avec homogénéisation des températures dans les capteurs solaires et dans les canalisations ;
 - une seconde étape où le circuit secondaire est mis en service avec transfert d'énergie de la boucle primaire à la boucle secondaire.

Le circulateur secondaire de type « sanitaire » est asservi à celui du primaire, afin d'éviter qu'il ne fonctionne pour rien.

Pour une utilisation extérieure du ballon, les échangeurs à plaques trouvent leur place dans la préparation de l'ECS, ils se distinguent par une compacité remarquable due en partie à leur coefficient K élevé, une grande facilité de nettoyage et la possibilité d'ajuster leur surface à la demande.

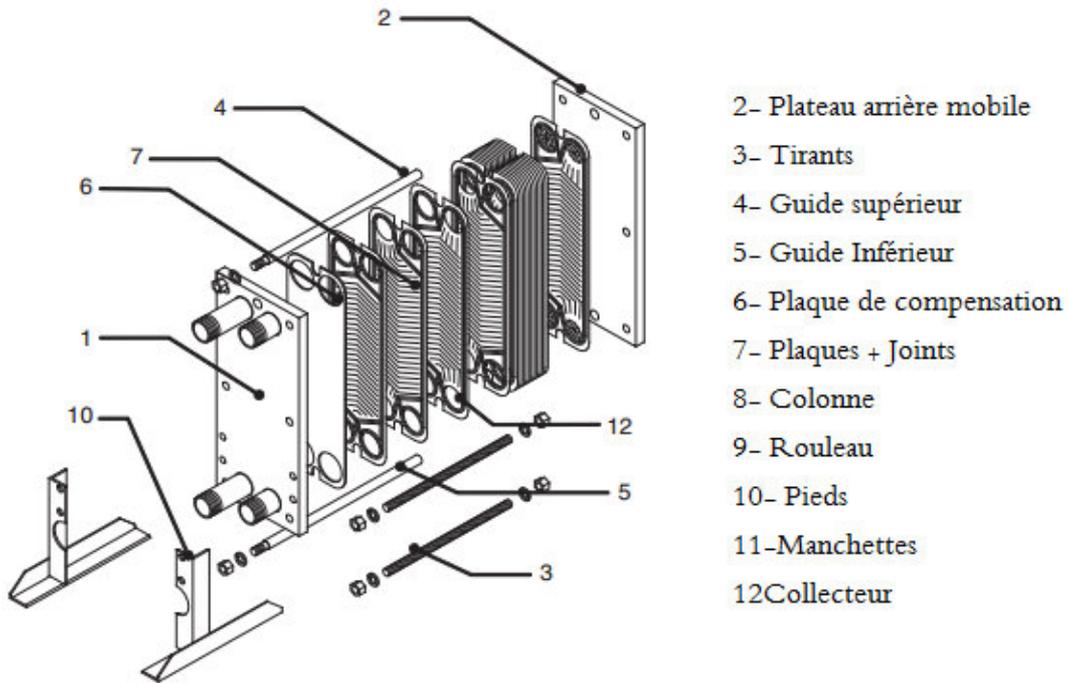


Figure N°II.12 Constituants d'un échangeur à plaques.

Source CIAT

Les échangeurs à plaques sont constitués par un empilage de plaques écartées les unes des autres par des entretoises pour former un ensemble de conduits plats. Un fluide circule dans les conduits pairs, l'autre dans les conduits impairs. Ces échangeurs permettent d'obtenir un ratio (surface d'échange / volume) très élevé.

Le dimensionnement de l'échangeur primaire peut être réalisé sur la base d'un ratio de 700 W/m² de capteur.

Son débit et sa perte de charge doivent être tels qu'ils favorisent l'échange thermique avec le secondaire et limitent les consommations électriques du circulateur.

Il est conseillé pour une plus grande efficacité que le transfert d'énergie soit réalisé au moyen d'un échangeur à plaques inox fonctionnant en contre-courant [11].

La quantité de puissance thermique totale échangée est exprimée par la relation :

$$\Phi = k \cdot \frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\text{Log} \frac{T_{ce} - T_{fs}}{T_{cs} - T_{fe}}} \cdot S \quad \text{II-3}$$

Généralement on a recours à la collaboration des fournisseurs pour dimensionner ce genre d'échangeur.

D - Groupe hydraulique du circuit solaire

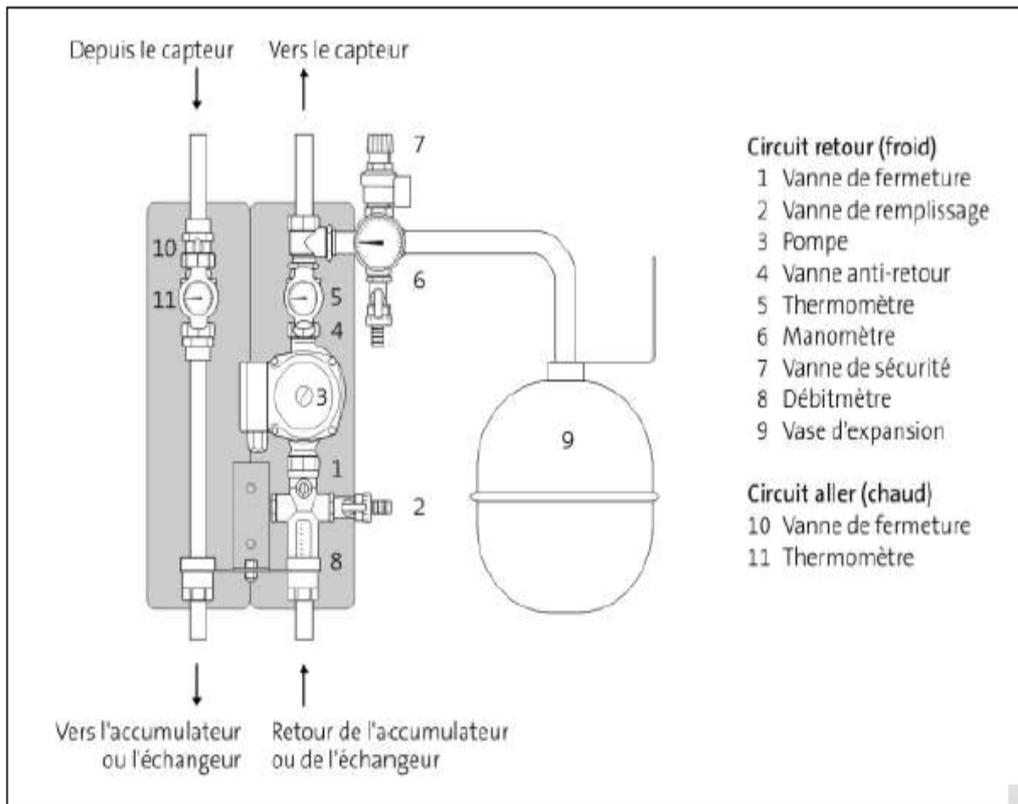


Figure N°II.13 Différents composants du circuit solaire (Primaire)

(Source : le solaire thermique 2011/2012)

Le circuit primaire est pris en charge en plus de la tuyauterie calorifugée véhiculant le fluide caloporteur, par un dispositif hydraulique qui comprend :

- Des jeux de vannes d'arrêt ou de vidanges
- Des clapets de retenue
- Des manomètres
- Des thermomètres
- Un débitmètre
- Des soupapes de sécurité
- Un vase d'expansion
- Un groupe de moto-circulateur

Si le tarage de la soupape de sécurité n'est pas effectué en usine, on prend la pression maximale de l'installation + 10%.

Le volume d'expansion est de 10% du volume total du circuit solaire pour une pression finale admissible de 2.3 bar.

Le circulateur est choisi selon le débit à véhiculer et les pertes de charges du circuit.

II-1-3 Régulation

La régulation veille sur le bon fonctionnement de l'installation en enclenchant les circulateurs lorsque les capteurs peuvent fournir de la chaleur et en les déclenchant dans le cas contraire.

Généralement des sondes sont placées l'une à la sortie des batteries de capteurs, l'autre dans le bas de l'accumulateur.

L'enclenchement du circulateur solaire aura lieu dès que la différence de température entre les capteurs et l'accumulateur est plus élevée que le seuil d'enclenchement réglé. Le circulateur est déclenché si cette différence de température descend en dessous du seuil de déclenchement réglé.

Les réglages suivants sont conseillés dans les installations de production d'eau chaude avec un chauffe-eau sanitaire:

- seuil d'enclenchement 6K;
- seuil de déclenchement 2K.

Pour la commande d'une installation avec un échangeur externe, nous avons intérêt à obtenir un démarrage en deux étapes. Une première étape où la boucle primaire est mise en circulation avec homogénéisation des températures dans les capteurs solaires et dans les canalisations et une seconde étape où le circuit secondaire est mis en service avec transfert d'énergie de la boucle primaire à la boucle secondaire. Deux méthodes permettent ces démarrages [2].

a - 1ère solution : ajout d'une sonde sur le circuit primaire :

Une sonde supplémentaire (T1) est ajoutée sur le circuit primaire.

Le régulateur R1 commande le circulateur du primaire, le régulateur R2 commande le circulateur du secondaire.

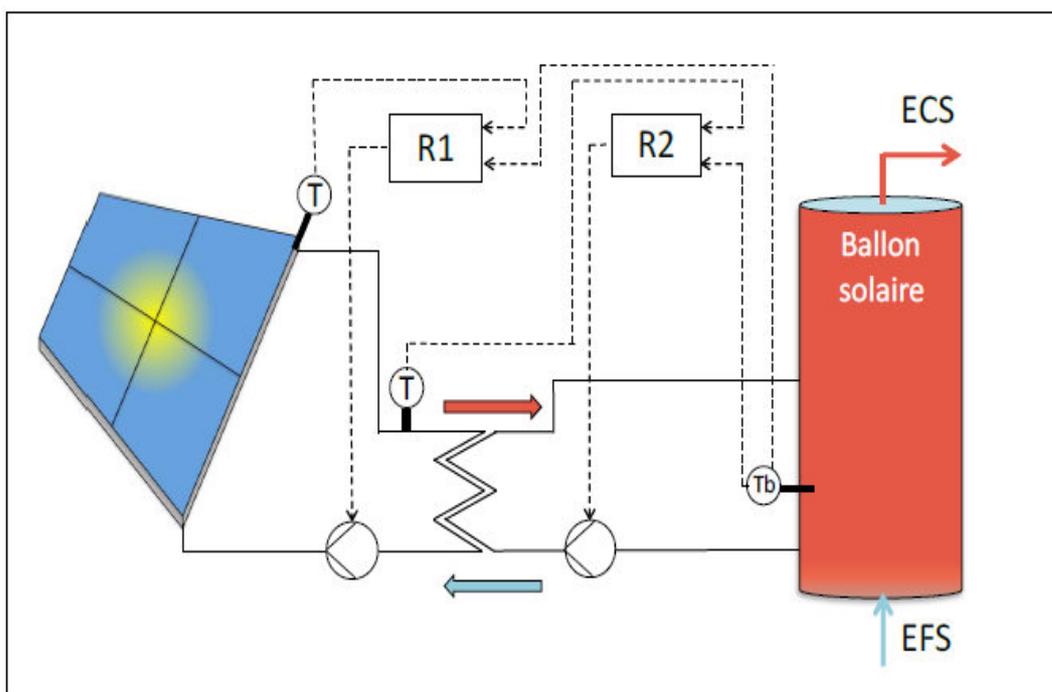


Figure N°II.14 Schéma de principe de régulation d'une installation solaire avec échangeur externe, avec deux régulateurs.

(Source : eau chaude sanitaire solaire 2013 FFB)

Fonctionnement de R1 :

Si $T_c > T_b + DD$ (DD compris entre 5 et 8 K)

Pour éviter des séquences courtes d'arrêt et de démarrage, la commande du régulateur devra être temporisée de manière à laisser l'homogénéisation des températures s'opérer dans le circuit primaire.

Fonctionnement de R2 :

Séquence de démarrage : si $T_1 > T_b + DD$

Séquence d'arrêt : si $T_c < T_b + DA$ (DA compris entre 2 et 4 K)

Le régulateur R2 doit être asservi à celui de R1 de manière à ce que le circulateur secondaire ne soit jamais en fonctionnement si le circuit primaire est arrêté.

b - 2eme solution : ajout d'une sonde crépusculaire

Fonctionnement de D :

La sonde crépusculaire (D) mesure l'intensité du rayonnement solaire.

Le circuit primaire est mis en circulation lorsque la valeur d'éclairement mesurée par le détecteur crépusculaire est supérieure à environ 1000 lux. Il est stoppé lorsque cette valeur est inférieure.

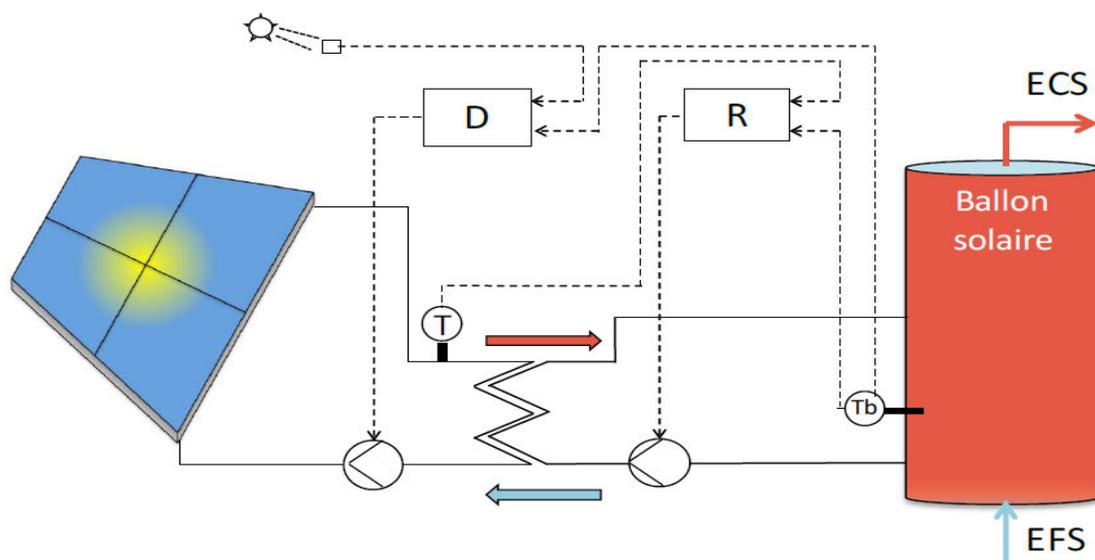


Figure N°II.15

Schéma de principe de régulation d'une installation solaire avec échangeur externe, avec un régulateur et une sonde crépusculaire.

(Source : eau chaude sanitaire solaire 2013 FFB)

Avantage : Ce dernier montage possède une grande fiabilité et un moindre coût de la régulation différentielle.

Inconvénient :

- Il nécessite un réglage précis de la valeur d'éclairement sous peine d'un déclenchement intempestif de la pompe au primaire (risque de surconsommation).

II-2- BILAN ENERGETIQUE D'UN CAPTEUR PLAN :

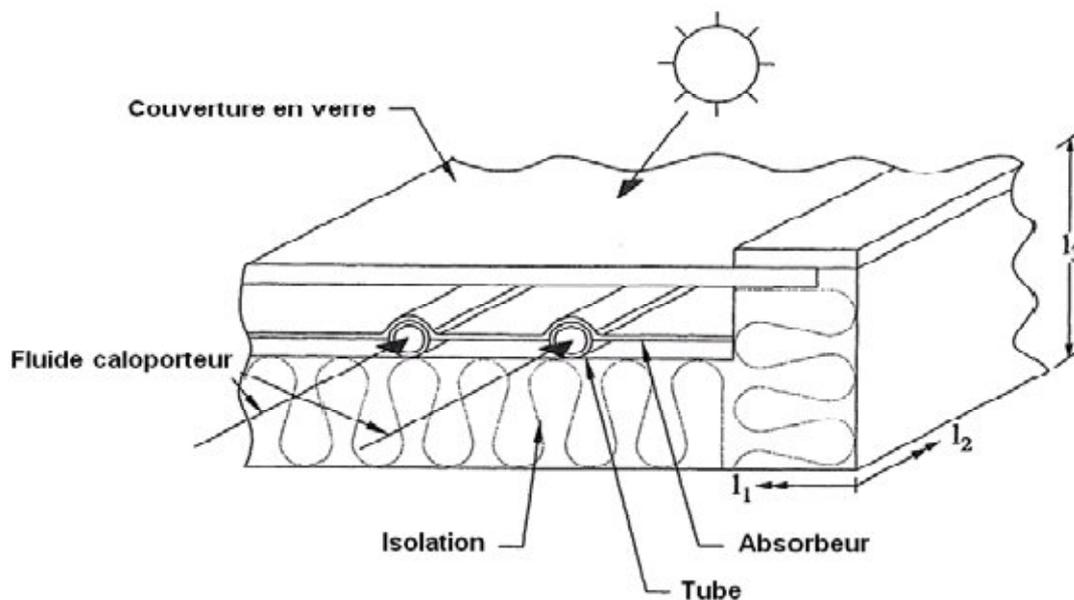


Figure N°II.16 : Représentation Schématique d'un capteur plan vitré [6]

On s'intéresse ici au bilan des installations de production de l'eau chaude sanitaire. Pour connaître la fraction solaire qui sera utile au fluide caloporteur, on a recours au calcul du bilan énergétique du capteur.

En régime permanent de fonctionnement, le bilan énergétique global d'un capteur plan est donné par la relation [12]:

$$Q_u = Q_a - Q_p \quad \text{II-4}$$

Où :

- Q_u est la puissance utile ou puissance cédée au fluide caloporteur (W/m^2)
- Q_a est la puissance solaire absorbée (W/m^2)
- Q_p est la puissance correspondant aux pertes thermiques. (W/m^2)
 - La puissance utile est celle qui permet de réchauffer le débit de fluide caloporteur \dot{m} de la température d'entrée T entrée jusqu'à la température de sortie T sortie

$$Q_u = \dot{m} C_p (T \text{ sortie} - T \text{ entrée}) \quad \text{II-5}$$

La puissance utile Q_u que l'on peut récupérer d'un capteur solaire dépend de nombreux paramètres, à savoir des paramètres extérieurs :

- E : composante normale du flux solaire incidente sur le plan du capteur (W/m^2)
- T_m : est la température moyenne du capteur (approximée à la moyenne entre les températures d'entrée et de sortie de capteur) (en $^{\circ}C$).

$$T_m = (T \text{ sortie fluide} - T \text{ entrée fluide}) / 2 \quad \text{II-6}$$

- T_a : température ambiante (en $^{\circ}C$)

et des paramètres définissant le capteur :

- β : **le facteur optique du capteur**, qui est le rapport entre l'ensoleillement absorbé par l'absorbeur et l'ensoleillement incident sur le vitrage. Ce facteur optique est le produit du facteur de transmission du vitrage τ par le coefficient d'absorption de l'absorbeur α .

$$\beta = \tau \cdot \alpha \quad \text{II-7}$$

- K : le coefficient de déperditions thermiques ($W/^{\circ}C$)

La puissance absorbée est donnée par la relation

$$Q_a = \beta \cdot E \quad \text{II-8}$$

La puissance perdue est donnée par la relation

$$Q_p = K \cdot (T_m - T_a) \quad \text{II-9}$$

La relation –II-4, peut s'écrire comme suit :

$$Q_u = \beta \cdot E - K \cdot (T_m - T_a) \quad \text{II-10}$$

Q_u est donc égale à la partie de la puissance incidente traversant le vitrage et absorbée par l'absorbeur, diminuée des déperditions thermiques (proportionnelles à l'écart de température entre le capteur et l'ambiance).

II-3- RENDEMENT DU CAPTEUR PLAN

Le rendement du capteur η , est défini comme étant le rapport entre la puissance utile Q_u et la puissance incidente E , il est exprimé par la relation suivante [20]:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c \cdot E_n} \quad \text{II-11}$$

$$\eta = \beta - K \frac{T_m - T_a}{E_n} \quad \text{II-12}$$

La relation -12- est la base de la norme française.

Une nouvelle norme européenne (EN 12975-2) basée sur la relation décrite par Cooper et Dunkle (1981) propose une dépendance linéaire entre la température et le coefficient de perte totale [22], elle introduit un deuxième coefficient de pertes thermiques a_2 afin de mieux prendre en compte les pertes non linéaires (rayonnement), cette relation est donnée par :

$$K = a_1 + a_2 \frac{T_m - T_a}{E} \quad \text{II-13}$$

En remplaçant dans (12) et en introduisant un facteur de rendement F' , l'expression du rendement devient alors [11]:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{T_m - T_a}{E} - a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{E} \quad \% \quad \text{II-14}$$

Avec $\eta_0 = \tau \cdot \alpha \cdot F' \quad \% \quad \text{II-15}$

La relation (15), représente le rendement maximal du capteur correspond à un rendement sans déperditions (cas idéal).

E : Irradiation solaire reçue par le capteur (W/m^2)

T_m : Température moyenne du fluide ($^{\circ}\text{C}$)

T_a : Température ambiante (extérieure) ($^{\circ}\text{C}$)

F' : Facteur de rendement du capteur $\%$ (0.92 – 0.97)

τ : Facteur de transmission de couverture $\%$ (0.88 – 0.91)

α : Absorptivité de l'absorbeur $\%$ (0.90 – 0.96)

a_1 et a_2 : coefficients de transfert thermique ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$ et $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}^2$)

η_0 est compris typiquement entre 0.5 et 0.8

a_1 [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$] : coefficient linéaire de transfert thermique, généralement compris entre 1,2 et 4.

a_2 [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}^2$] : coefficient quadratique de transfert thermique, généralement compris entre 0,005 et 0,015.

Ces deux coefficients a_1 et a_2 de transfert thermique, dépendent de la qualité d'isolation des capteurs, ils décrivent les déperditions thermiques du capteur.

a- Comparaison entre les deux méthodes

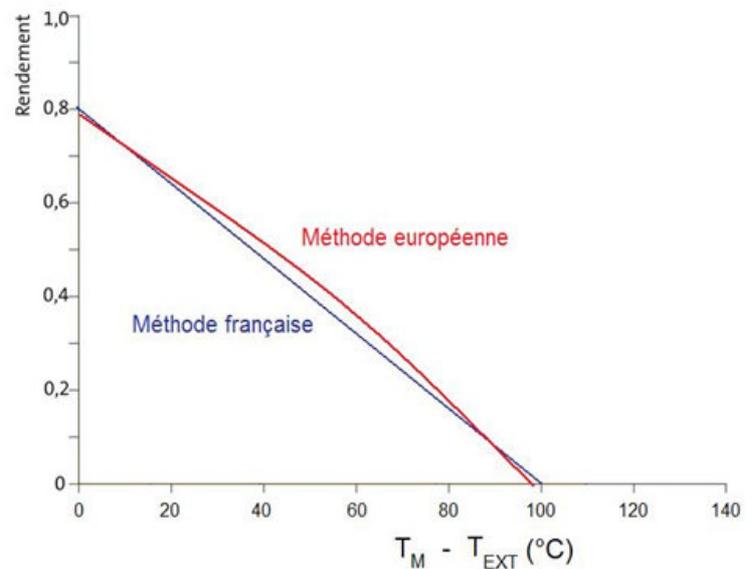
Figure N°II.17 :

Courbes de rendement [10]

- Méthode française

- Méthode européenne

(Source : cours sur le solaire
Thermique INES éducation)



On remarque que la courbe obtenue par l'application de la méthode française est une droite tandis que celle qui résulte de la méthode européenne est une parabole.

On remarque aussi que plus les coefficients de transfert thermique du capteur sont élevés, plus son rendement décroît quand la température augmente.

b- Le rendement et l'utilisation des capteurs

Les capteurs vont se différencier entre eux par la qualité de l'absorbeur (sa sélectivité) et du verre solaire (rendement optique), ainsi que par celle de l'isolation du capteur. L'ensemble de ces trois propriétés conféreront au capteur des plages de températures privilégiées et par là, les usages pour lesquels il sera mieux adapté.

Sur la figure ci-dessous, on voit que pour les régimes à température moyenne (delta de T° de 20° à 100 °C), recherchés pour des applications comme la production d'eau chaude sanitaire ou le chauffage à basse (delta de 60 °C) et moyenne température (delta de 100 °C), les déperditions commencent à prendre le pas sur le rendement optique. Dans ce cas, les capteurs devront posséder outre un bon absorbeur sélectif, une bonne isolation thermique. Pour ces plages, les capteurs à tubes sous vide et les capteurs plans vitrés sont concurrentiels.

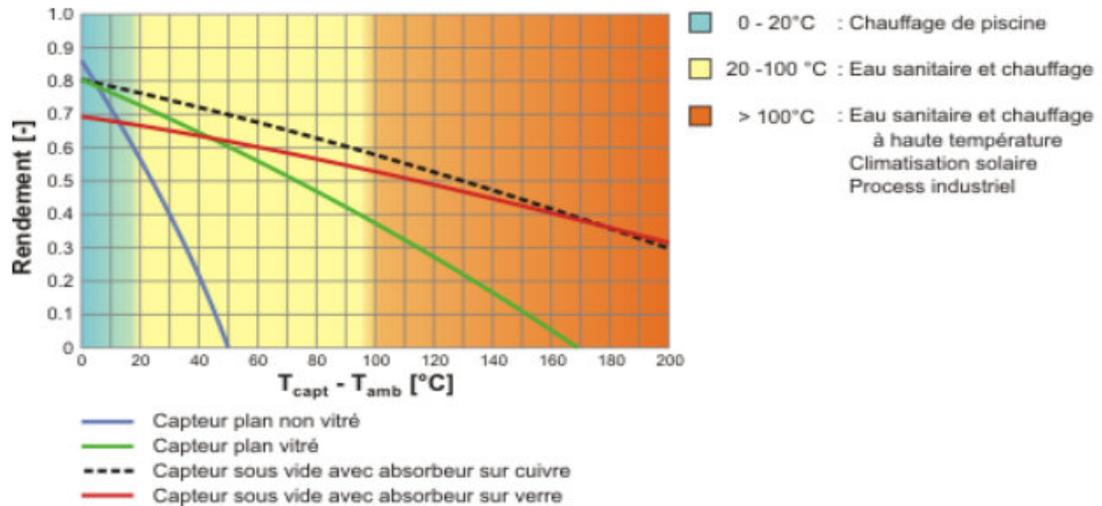


Figure N°II.18 : Rendements de différents capteurs en fonction de la différence de température entre le capteur et la température ambiante [30]

II-4- INFLUENCE DE L'ORIENTATION, DE L'INCLINAISON ET DE L'OMBRAJE SUR LA QUANTITE D'ENERGIE CAPTEE

L'énergie reçue par une batterie de capteurs dépend de trois facteurs essentiels. De leur orientation, de leur inclinaison et de la présence ou non de masques qui peuvent influencer sur la surface de captation par projection de leur ombre.

Généralement une inclinaison plus forte du capteur offre l'avantage d'une fourniture d'énergie lissée sur l'année, tandis qu'une inclinaison inférieure à 20° est à déconseiller pour éviter tout encrassement excessif des capteurs.

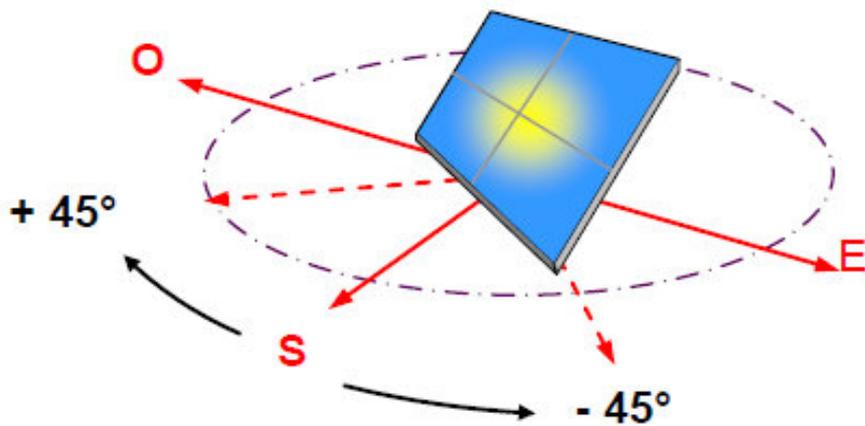
a- Influence de l'orientation (Angle azimutal)

L'angle azimutal est l'angle que fait le plan du capteur par rapport au Sud ; plan du capteur orienté plein Sud = angle azimutal de 0° .

Pour une utilisation optimale, les capteurs devront être orientés plein sud (dans l'hémisphère Nord). Des écarts importants sont tolérés car un écart de 10 degrés ne fait perdre que 2% de rendement. Donc il existe un degré de liberté assez large quant à l'implantation sans que les performances ne s'en

fassent trop ressentir mais la tolérance dépend de l'utilisation du capteur (ECS seule ou chauffage + ECS).

Cependant des contraintes architecturales peuvent nous imposer une orientation bien déterminée. Cette contrainte ne doit pas être prise en considération une fois que la rentabilité de l'installation n'est pas assurée.



*Figure N°II.19 Degré de liberté pour l'Orientation des capteurs
(Source : eau chaude sanitaire solaire 2013 FFB)*

b- Influence de l'inclinaison

Afin de bien exploiter le rayonnement solaire, la surface de captage devrait toujours être orientée autant que possible perpendiculairement à ce rayonnement. L'inclinaison peut varier entre 30° et 60° selon que l'on veut privilégier le rayonnement d'été (haut sur l'horizon) ou celui d'hiver (bas sur l'horizon).

On peut concevoir un système réglable en fonction des saisons mais un système fixe sera, en général, réglé pour l'hiver. Il peut sembler paradoxal de ne pas chercher à en tirer le maximum de l'abondance de soleil en été, mais c'est un peu l'inverse de ce qu'on a besoin.

Rester dans le positionnement pour l'hiver est une façon d'équilibrer le système sur l'année. Il est souvent nécessaire néanmoins de prévoir un dispositif de limitation de température pour l'été.

Comme la part du rayonnement diffus ne dépend que peu de l'orientation, une modification de l'inclinaison influencera surtout la contribution du rayonnement direct. Cela signifie que l'inclinaison aura moins d'importance dans une région présentant une part élevée de rayonnement diffus.

Pour une utilisation pour la production d'eau chaude sanitaire durant toute l'année, une inclinaison comprise entre 40 et 60° est recommandée, cela favorise les apports en hiver et les diminue en été (réduisant le phénomène de surchauffe).

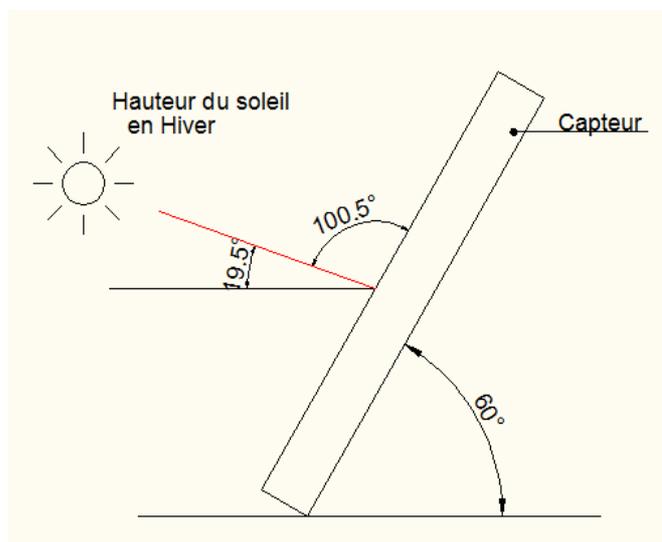
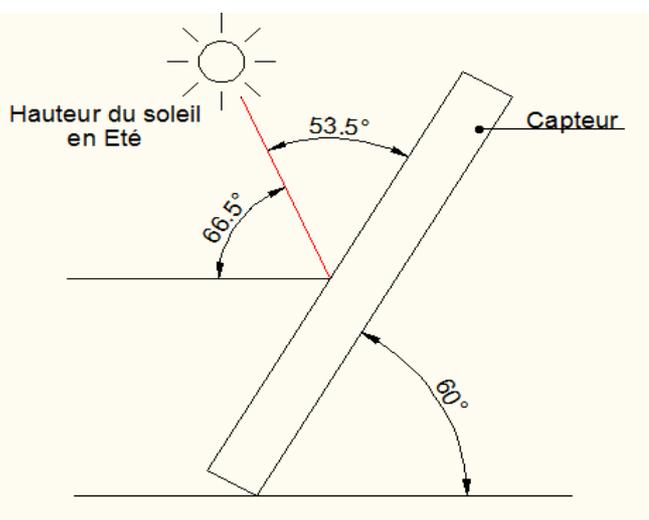


Figure N°II.20

Angles d'incidence du rayonnement solaire sur un plan incliné à 60°.

- a- Solstice d'été**
- b- Solstice d'hiver**

Le tableau suivant, donne un aperçu global sur les différentes orientations par rapport aux différentes inclinaisons en fonction de la destination de l'installation.

Orientation	Inclinaison	Usage : Préparation d'eau chaude	Usage : Préparation d'eau chaude et chauffage d'appoint	
Sud	0 - 20°	**	*	
Sud-ouest	20 - 30°	****	***	
Sud-est	30 - 50°	****	****	
	50 - 70°	***	****	
	75 - 90°	*	**	
Ouest	0 - 20°	**	*	
	Est	20 - 30°	***	**
		30 - 50°	***	**
	50 - 70°	**	*	
	75 - 90°	*	*	

Tableau N° II-4 Valeurs donnant l'inclinaison et l'orientation [14]

**** : Application optimale

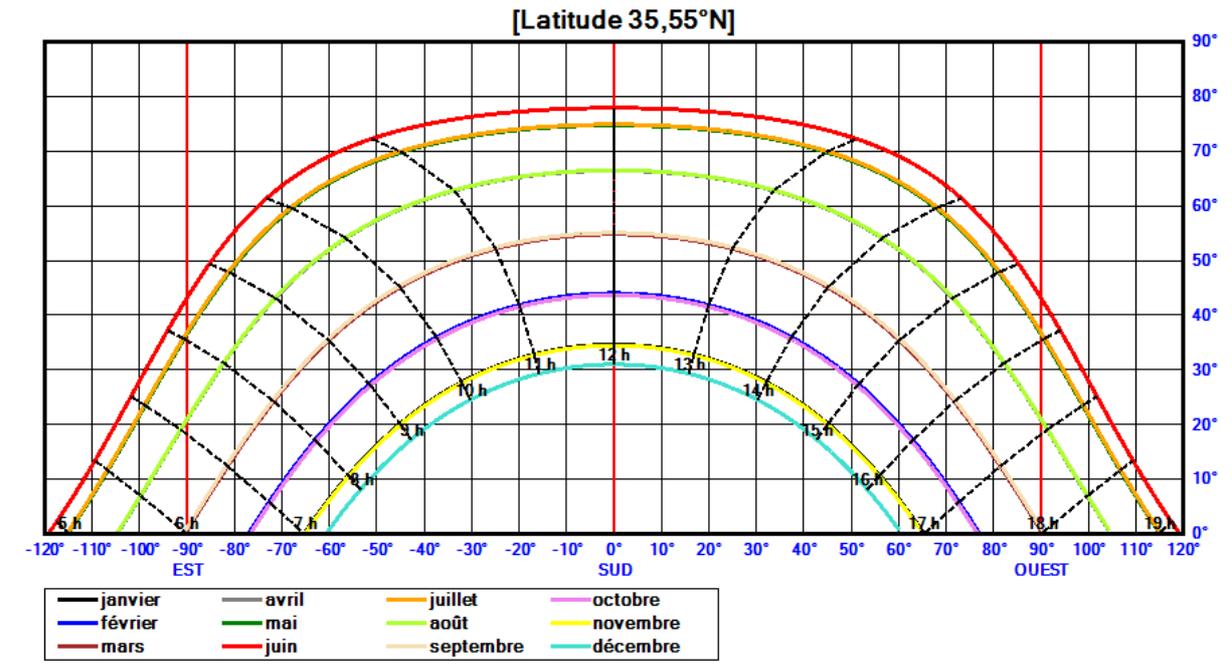
*** : Application appropriée

** : Application acceptable

* : Application inappropriée

c- Ombres portées par les masques

Afin de déterminer le facteur d'affaiblissement dû aux masques naturels ou constructions (périodes où le soleil est caché), on reporte sur les courbes des courses du soleil en fonction des saisons le diagramme donnant pour chaque azimut la hauteur de chaque masque. Des logiciels pour le traçage direct des masques sur le diagramme solaire sont disponibles.

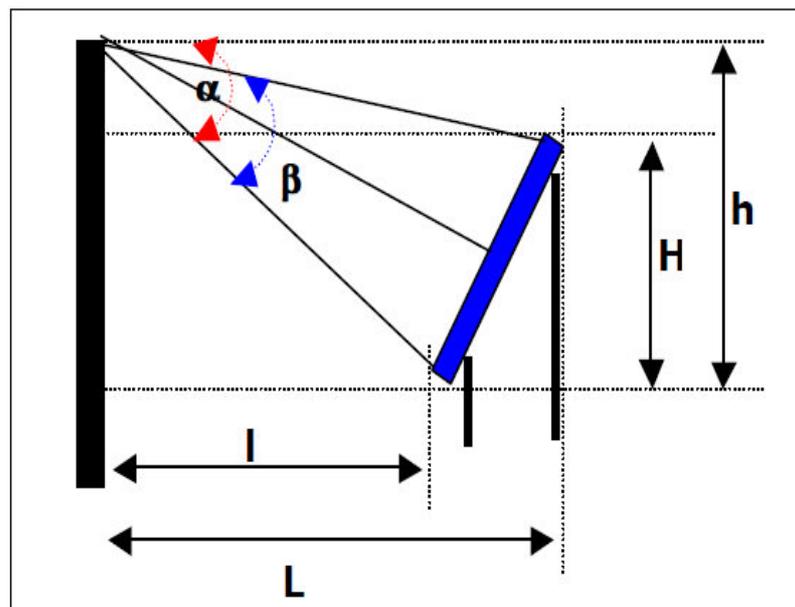


*Figure N°II.21 Courbes des Courses du Soleil pour la Latitude de la ville de Batna
(Tracé par le logiciel Diagsol)*

Il est possible de déterminer les angles que fait l'obstacle avec les deux extrémités du capteur ainsi qu'avec l'horizon par les relations suivantes :

$$\text{tg } \beta = [L \cdot h - l \cdot (h - H)] / [l \cdot L - h \cdot (h - H)]$$

$$\text{tg } \alpha = (2h - H) / (L + l)$$



*Figure N°II.22 Angles formés par un obstacle
(Source : ECSolaire2.ADEME)*

Chapitre III

Dimensionnement de l'installation

DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION

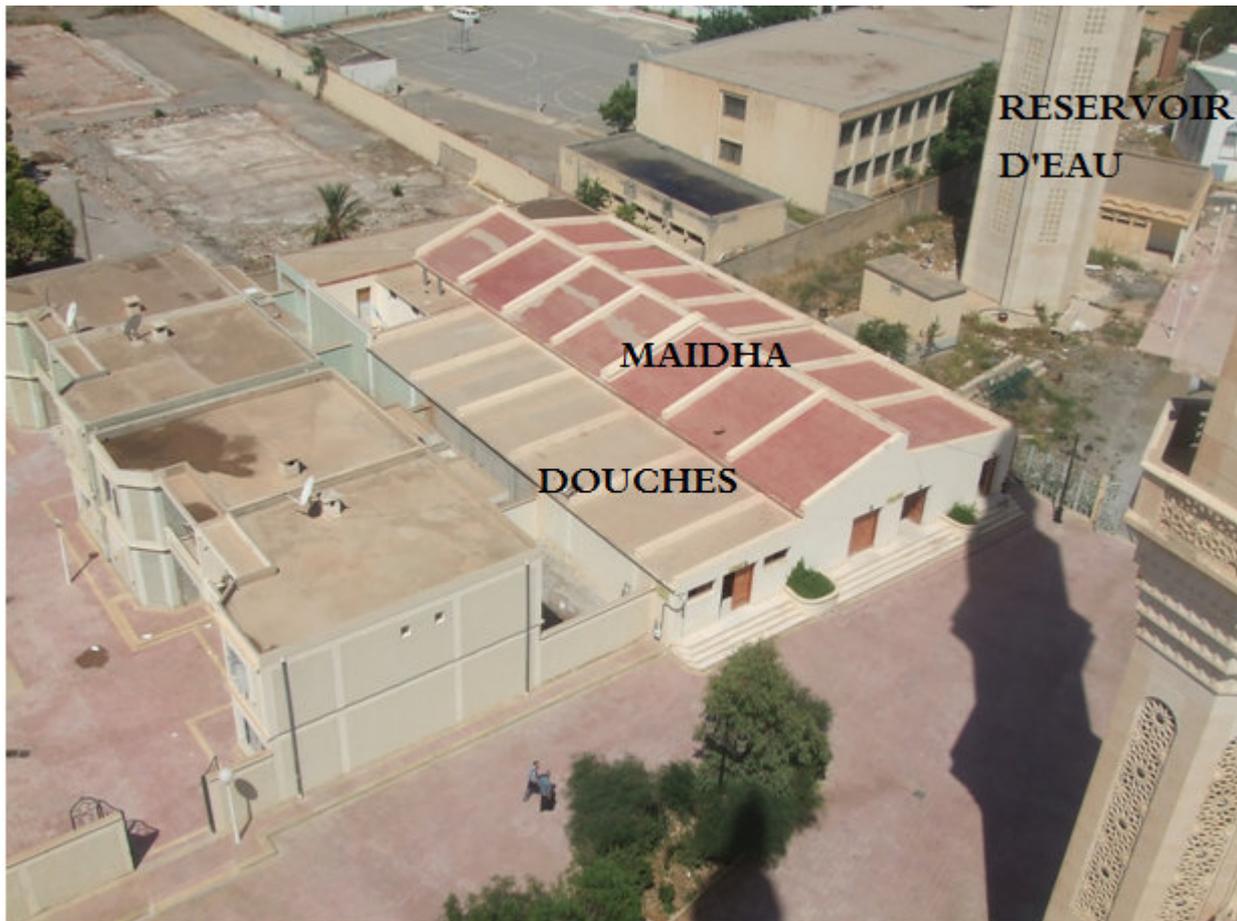


Figure N° III.1 : Vue aérienne de la Maidha (lieu d'ablutions rituelles)

INTRODUCTION

Le but d'une installation solaire thermique est de satisfaire des besoins en énergie bien déterminés.

Répondre à ces besoins nécessite en plus de la conception convenable des circuits hydrauliques, des hypothèses bien formulées pour l'établissement de cette conception, un calcul de la surface de captation pour une orientation et une inclinaison adéquates des capteurs. Cette surface de captation doit procurer un rendement acceptable.

III -1 SITUATION DU PROJET ET CRITÈRES DE POSITIONNEMENT DES CAPTEURS

a- Situation du projet

Le projet est situé à la ville de Batna. Ville du Nord Est algérien, de 1 058 mètres d'altitude, elle située à 35.5552780 35°33'19" de latitude Nord, et à 6.1786110 6°10'42" de longitude Est. Elle est construite dans une cuvette entourée de montagnes. Le climat de la ville de Batna est semi aride, caractérisé par un hiver froid, un été chaud et sec et une humidité relative moyenne voire faible, mais vu les changements des données de la dernière décennie le climat, qui jadis, était marqué par quatre saisons distinctes répondant chacune aux caractéristiques de l'hiver, de l'automne, du printemps, et de l'été, risque de basculer vers l'aridité absolue.

b- Choix de l'orientation des capteurs

Les capteurs seront installés sur la terrasse du bloc Maida. C'est la raison pour laquelle l'orientation des capteurs nous est imposée par cette contrainte architecturale qui est l'orientation du bâtiment lui-même, donc les capteurs seront orientés vers le sud-est avec un angle de (-34°) par rapport à l'azimut Zéro (plein sud).



Figure N° III.2 : Orientation de la Maidha

c- *Choix de l'inclinaison des capteurs*

1. Le choix de l'inclinaison des capteurs est basé sur les facteurs suivants :
 - Équilibrer les apports d'énergie solaire tout au long de l'année
 - Favoriser les apports en hiver
 - Diminuer les apports en été
 - Eviter la surchauffe des capteurs en été
2. Une inclinaison de 60° favorise l'utilisation du rayonnement solaire pour la production de l'eau chaude sanitaire en période hivernale. Ce choix est soutenu par les angles optimums donné par le tableau III-2.

d- *Angle Optimum d'Inclinaison du capteur*

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
61	53	40	23	10	0	6	18	34	49	60	64

Tableau N°III-1 : Angle optimum pour le mois considéré pour le rayonnement considéré [16]

L'angle optimum à choisir est celui qui peut satisfaire nos besoins calorifiques durant la période hivernale. Le rayonnement doit être presque perpendiculaire à la surface de captation. On remarque que pour les six mois allant du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mars, l'angle d'incidence optimum est de l'ordre de 60°.

e- Energie reçue par la surface des capteurs

Pour une surface orientée en plein sud avec un angle d'inclinaison de 60°, l'énergie incidente est donnée par le tableau suivant :

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
5186	5434	5574	5230	5252	5062	5412	5878	5964	5940	6030	5156

Tableau N°III-2 : Valeurs de L'énergie (rayonnement global (Direct + Diffus)) (en Wh/m²) pour capteurs plans sur un plan SUD pour une inclinaison de 60° pour la ville de Batna [16]

f- fraction d'insolation

La fraction d'insolation, est le rapport de la durée réelle d'insolation sur la durée théorique du jour.

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
0.56	0.53	0.54	0.55	0.67	0.74	0.82	0.79	0.70	0.65	0.69	0.59

Tableau N°III-3 : Fraction d'Insolation pour le jour moyen du mois et pour un ensoleillement moyen [16]

III -2 VALEURS CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

Les grandeurs d'entrée pour le dimensionnement des différents composants d'une installation destinée à la production d'eau chaude solaire sont :

a- Consommation journalière en eau chaude sanitaire

La consommation d'eau chaude sanitaire par personne varie considérablement, entre celle d'une installation individuelle, celle d'une installation collective et celle d'un autre établissement, elle varie aussi en fonction du standing.

b- Volume de stockage (en Litres)

Afin de convaincre le caractère discontinu de l'énergie solaire, un volume de stockage pour une période bien déterminée (**temps de stockage**) s'avère indispensable.

c- Surface de captation (en m²)

Elle permet de définir l'ordre de grandeur d'une installation.

- Ordre de grandeur de cette installation :

$$S < 10 \text{ m}^2$$

$$10 \text{ m}^2 < S < 100 \text{ m}^2$$

$$S > 100 \text{ m}^2$$

III -3 METHODE ET CALCUL DE L'INSTALLATION

Le calcul de l'installation est basé sur la méthode exposée dans l'ouvrage « CALCUL D'INSTALLATIONS SOLAIRES A EAU » de Michel CHATEAUMINOIS, Daniel MANDINEAU et Daniel ROUX [20].

Sur la base des trois valeurs caractéristiques précédentes, on définit alors :

- Ratio de stockage, qui représente le volume de stockage à un mètre carré de capteur

$$R = \frac{V}{S} \text{ en litres/m}^2 \text{ de capteurs} \quad \text{III-1}$$

- Temps de réserve

$$T_R = \frac{V}{C} \text{ en jours} \quad \text{III-2}$$

La taille de l'installation et le ratio de stockage permettent le choix de la courbe de bilan, tandis que le temps de réserve est utilisé en paramètre pour définir l'énergie produite, donnée par des courbes en fonction de l'énergie journalière reçue par la surface de captation.

Un premier dimensionnement consiste à choisir un temps de stockage ($T_R = 1$ ou 1.5 jour), et un ratio de stockage ($R = 50, 75$ ou 100 litres/m^2).

III -3-1 CALCUL DES VALEURS CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

a- Calcul de la Consommation journalière en eau chaude sanitaire

Dans l'absence de mesures effectuées, les besoins en ECS ne seront qu'estimés dans notre cas, car on n'a pas rencontré une méthode qui prend en charge le calcul des besoins en eau chaude sanitaire pour un cas semblable à notre projet. Une estimation a été faite en fonction du nombre de fidèles qui fréquentent la mosquée.

Généralement une partie des 19000 fidèles accomplissent leurs ablutions chez eux, en moyenne on peut estimer la consommation journalière en Eau Chaude Sanitaire que pour 10 000 fidèles par jour, à raison d'une consommation individuelle d'un litre, on aura donc une consommation journalière de :

$$C = 10\ 000 \text{ litres/jour}$$

b- Calcul du Volume de Stockage

De la relation (III-2), on tire le volume de stockage

$$V = C \cdot T_R$$

$$T_R = 1$$

$$C = 10\ 000 \text{ L/j}$$

$$V = 10\ 000 \text{ litres}$$

c- Calcul de la surface de captation

De la relation (III-1), on calcule la surface de captation

$$S = \frac{V}{R}$$

$$S = 200 \text{ m}^2$$

La disposition des capteurs sur la terrasse de la Maidha nous a amené à installer 112 capteurs, donc la surface de captation à prendre en considération est de (voir III-9):

$$S = 224 \text{ m}^2$$

III -3-2 Calcul de l'énergie thermique nécessaire (B_j)

L'énergie nécessaire pour satisfaire les besoins en eau chaude sanitaire de notre installation, peut être calculée par la relation suivante [20] :

$$B_j = 1,16 * 10^{-3} * C * (t_d - t_e) \text{ en kWh/jour} \quad \text{III-3}$$

t_d : Température de distribution (Température de départ vers utilisation)

t_e : Température de l'eau d'alimentation (venant du château d'eau)

C : Consommation moyenne journalière (en l/jour)

$1,16 * 10^{-3}$: Coefficient d'équivalence de la chaleur spécifique de l'eau (kWh/Kg/°C)

- Température d'utilisation

La température d'utilisation (distribution) de l'eau varie selon l'usage qui en est fait. Pour un lavabo la température est de 35°C [20].

- Température de l'eau du réseau

La quantité d'énergie nécessaire pour la production de l'eau chaude sanitaire dépend essentiellement de la température de l'eau froide (eau d'alimentation). Plus l'eau est froide, plus l'énergie pour la porter à une température donnée sera supérieure.

Dans le cas de la mosquée 1er Novembre, l'eau distribuée arrive d'un réservoir de stockage en élévation, cette eau est puisée dans une nappe souterraine par forage.

En l'absence des relevés de température, on a procédé à des mesures quotidiennes pour quelques mois de l'année 2013/2014.

La température mensuelle moyenne est donnée par le tableau suivant en °C:

Janvier 2014	Février 2014	Mars 2014	Avril 2014	Mai 2014	Juin 2014	Juillet 2014	Aout 2014	Sept. 2014	Oct.	Nov.	Déc. 2013
13.4	13.6	13.7	-	-	-	-	-	-	-	13.5	13.5

Tableau N°III-4 : Température mensuelle moyenne mesurée sur site.

D'après les mesures effectuées, la température d'arrivée de l'eau est de l'ordre de 13.5°C pour la période Octobre-Mars. Période durant laquelle le besoin en eau chaude est effectif.

NB : Par sa capacité importante et son exposition au rayonnement solaire durant toute la journée, le réservoir contribue au maintien de la température arrivant de la nappe qui est de 14°C (mesure effectuée sur site), et parfois à son élévation par les échanges thermiques provoqués au niveau de sa paroi extérieure.

L'énergie journalière nécessaire à produire sera :

$$B_j = 1,16 * 10^{-3} * 10000 * (35 - 13.5)$$

$B_j = 249.4 \text{ kWh/jour}$

III -3-3 Calcul de l'énergie utile

L'énergie utile, est l'énergie produite par la surface de captation calculée. Elle est donnée par la relation suivante :

$$E_U = S * E_P \quad \text{en kWh/jour} \quad \text{III-4}$$

S : Surface des capteurs (en m²)

E_P : Energie produite par unité de surface

L'énergie produite est tirée d'une abaque. Elle est fonction de l'énergie reçue et du temps de réserve.

a- Calcul de l'énergie reçue

L'énergie reçue réellement par mètre carré de la surface de captation pour un mois considéré, est l'énergie corrigée, incidente sur cette surface, elle-même corrigée par un coefficient appelé « coefficient énergétique », elle est donnée par la relation [20]:

$$E_r = E_{MC} \cdot e \quad \text{en Wh/jour.m}^2 \quad \text{III-5}$$

e: Coefficient énergétique

E_{MC} : Quantité d'énergie corrigée incidente sur la surface des capteurs. La quantité de l'énergie incidente E_M est donnée par le tableau III-2 pour une orientation plein azimut.

On remarque que la quantité de l'énergie incidente donnée par ce tableau sur un capteur orienté plein sud avec une inclinaison de 60°, subit des variations minimales pendant les douze mois de l'année.

- Correction de l'énergie incidente

Les valeurs du tableau III-2 sont propres à une orientation plein sud. La relation I-9 donnée au chapitre I, permet de remédier au problème de l'orientation.

L'énergie incidente corrigée est donnée par la relation :

$$E_{MC} = E_M * \text{Cos } \theta \quad \text{en Wh/jour.m}^2 \quad \text{III-6}$$

Le tableau suivant donne les coefficients d'orientation (Azimut) qui imposent une réduction de l'énergie récupérée en fonction de l'éloignement angulaire de l'azimut des capteurs par rapport au sud.

Sud	±10°	±20°	±30°	±40°	±45°
1	0.99	0.98	0.96	0.94	0.92

Tableau N° III-5 : Coefficient de correction pour une orientation différente du Sud [26]

L'Orientation des capteurs de notre projet est -34° , donc on choisit in coefficient de correction de 0.95.

Afin de ne pas favoriser la production en période estivale où la demande est minime, on prend l'Energie journalière maximale $E_M = 6030 \text{ Wh/m}^2$ Tirée du tableau N° III-2 pour le mois de **Novembre**.

L'énergie incidente corrigée est :

$$E_{MC} = 5728.5 \text{ Wh/jour.m}^2$$

- Calcul du coefficient énergétique :

C'est le rapport entre l'énergie effectivement reçue par un plan donné et celle prévue par le calcul pour la même période si le ciel est resté constamment clair.

Le coefficient énergétique par la relation suivante : [20]

$$e = 0.75 * \sigma + 0.25 \quad \text{III-7}$$

σ : coefficient d'ensoleillement ou fraction d'insolation

$\sigma = 0.69$ pour le mois de Novembre (tiré du tableau III-3)

$$e = 0,7675$$

De la relation III-5, on obtient l'énergie reçue par jour, et, par unité de surface

$$E_r = 5728,5 . 0,7675$$

$$E_r = 4396.62 \text{ Wh/jour.m}^2$$

b- Calcul de l'énergie totale journalière

C'est l'énergie reçue pour le mois considéré pendant une journée, elle est donnée par la relation [20]:

$$E_T = S * E_r \quad \text{en Wh/jour.} \quad \text{III-8}$$

$$E_T = 984.84 \quad \text{kWh/jour}$$

c- Calcul de l'énergie produite E_P par jour et par m^2

L'énergie produite est :

- Pour $E_r = 4396,62 \text{ Wh/jour.m}^2$

$$E_P = 1300 \quad \text{Wh /jour.m}^2$$

De la relation III-4, l'énergie utile E_U sera :

$$E_U = 224 * 1300 \quad \text{en kWh/jour}$$

$$E_U = 291.2 \quad \text{kWh /jour}$$

- Calcul des apports solaires du mois

Le calcul de l'énergie mensuelle utile est donné par la relation :

$$E = \text{Nbrc jours} \cdot E_U$$

III-9

$E = 9027.2 \text{ kWh}$

- caractéristiques définissant le choix de la surface de captation

Pour des besoins en énergie de $B = 249.4 \text{ kWh/jour}$, un volume de stockage de 10 000 Litres/jour, et un temps de stockage ($T_R = 1$), on a déterminé les caractéristiques nécessaires qui nous ont indiqué la surface à installer.

Ratio (R=V/S)	Surface (m ²)	Ep (Abaque) Wh/m ² .j	Eu en Wh/j	ts (°C)	τ (Eu/Bj)
33	303	900	272.7	37.01	1.094
50	200	1300	260	35.91	1.043
50	224	1300	291.2	38.60	1.1676
75	133	1600	213	31.89	0.855
112	89	1800	160.7	27.35	0.644
168	60	2200	131	24.79	0.525

Tableau N°III-6 : Caractéristiques définissant les différentes variantes de l'installation en fonction du Ratio.

III -3 -4 Calcul de la température moyenne de l'eau dans le ballon Solaire

$$t_s = t_f + \frac{10^3}{1.16} \cdot \frac{E_U}{C} \quad \text{III-10}$$

$$t_s = 38.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

III -3 -5 Calcul du taux de couverture

$$\tau = \frac{E_U}{B_j} \quad \text{III-11}$$

$$\tau = 116.76 \%$$

On peut aussi calculer le taux de couverture par la relation :

$$\tau = \frac{t_s - t_f}{t_d - t_f} \quad \text{III-12}$$

t_s : Température de l'eau du ballon (38,6 °C)

t_f : Température de l'eau du réseau (13,5 °C)

t_d : Température de l'eau de distribution (35 °C)

$$\tau = 1,1674$$

III-3-6 Calcul du rendement du capteur

L'équation adoptée dans notre modèle de calcul pour définir le comportement instantané du groupe de capteurs est (II-12) donné au chapitre II.

$$\eta = \beta - K \frac{T_m - T_a}{E_n} \quad \text{III-14}$$

Avec les valeurs numériques suivantes :

$$\beta = 0.82$$

$$K = 9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Le rendement des capteurs est donné par le tableau III-7

III-3-7 Nombre de capteurs à installer et type de raccordement

La surface d'un capteur plan est généralement de l'ordre de 2 m² (exemple : capteur **Chaffoteaux**, capteur **Thermokad** de Bejaia,...).

La surface de la toiture de la Maidha est composée de huit trames (figure III-1), et pour préserver une harmonie architecturale qui est un élément important de la réussite de l'intégration des éléments solaires dans une construction, les capteurs seront installés en quatre rangées. Chaque rangée est constituée de sept batteries de capteurs. Ces dernières sont composées de quatre capteurs chacune. Donc le nombre total de capteurs est de 112.

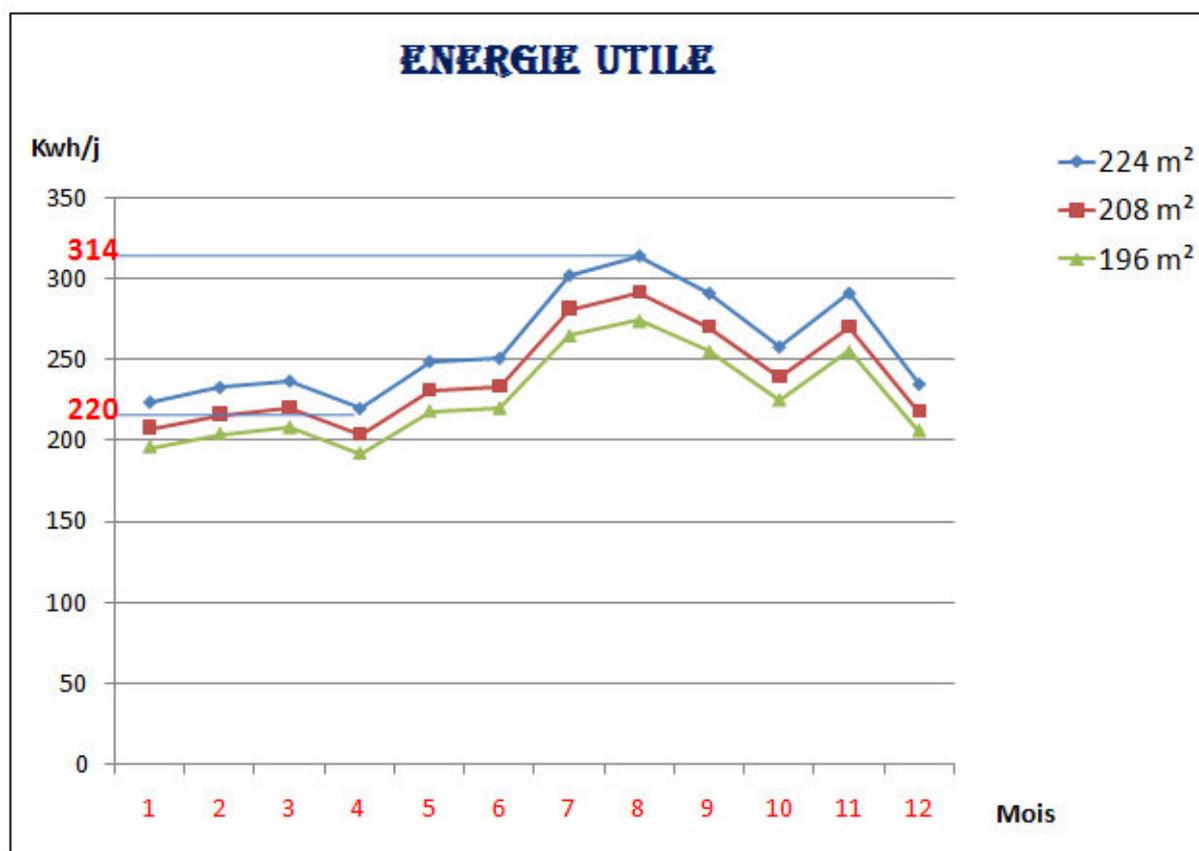
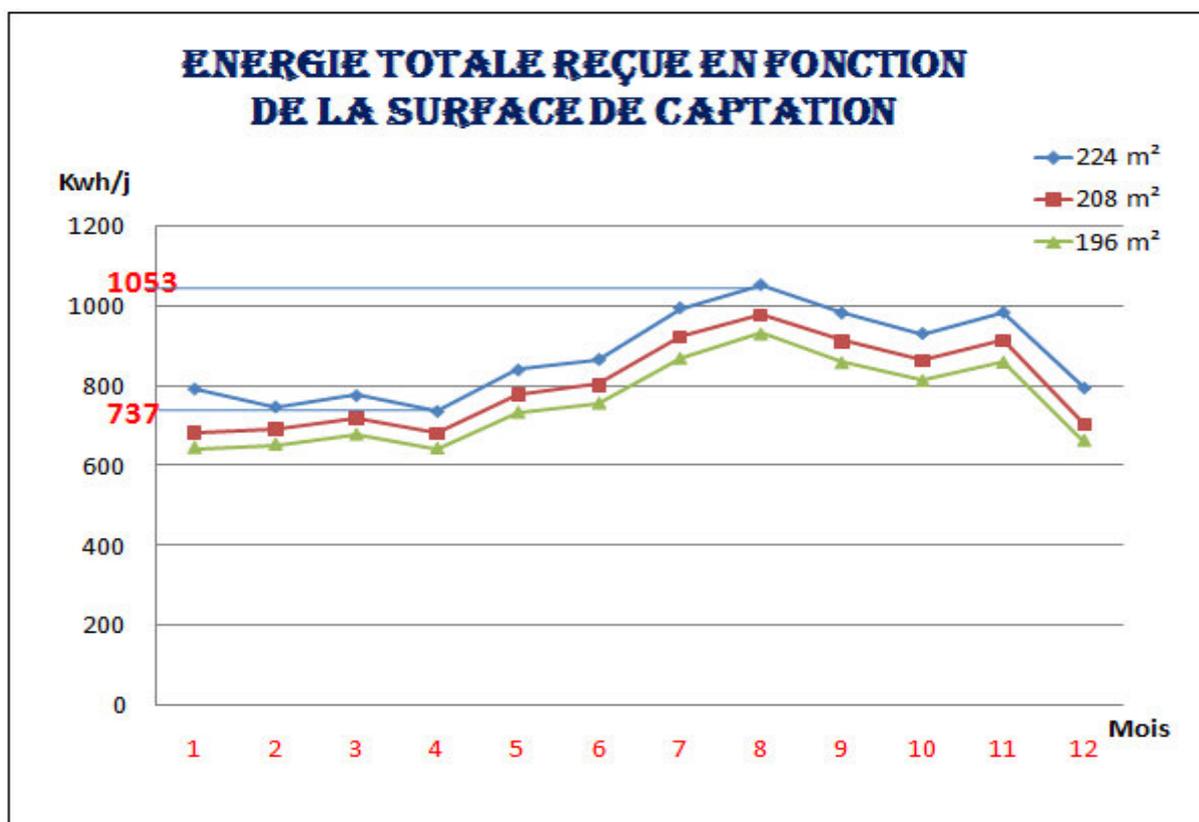
Deux rangées seront installées sur la surface inclinée, tandis que les deux autres rangées seront posées sur la terrasse plate du bloc douches.

Les capteurs seront raccordés selon le principe de la boucle de Tickelman, où le collecteur distributeur aux capteurs est d'un diamètre plus important et il sera muni d'un élément de réglage à chaque rangée de capteurs, tout en tenant compte de la dilatation (emplacement de compensateurs de dilatation), et avec un dispositif pour purger l'installation facilement.

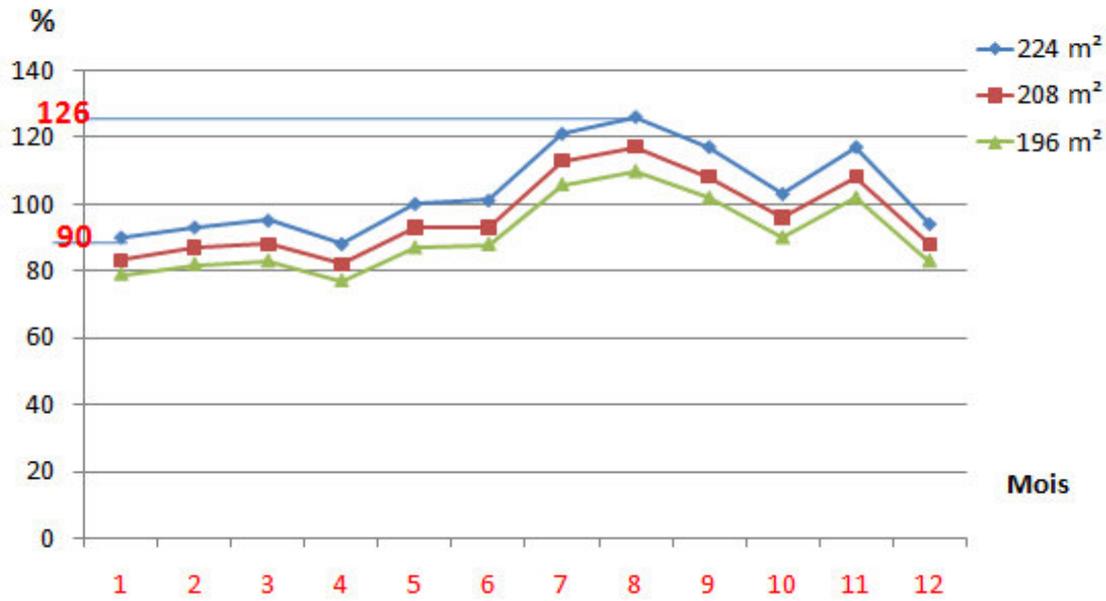
	<i>S</i>	<i>Janv</i>	<i>Févr</i>	<i>Mar</i>	<i>Avril</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juille</i>	<i>Aou</i>	<i>Sept</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Déc.</i>
<i>Energie Incidente (Wh/j.m²)</i>		5186	5434	5574	5230	5252	5062	5412	5878	5964	5940	6030	5156
<i>En.Incid. Corrigée (Wh/j.m²)</i>		4926. 7	5162. 3	5295. 3	4968. 5	4989. 4	4808. 9	5141.4	5584 .1	5665. 8	5643	5728. 5	4898. 2
<i>En.Reçue (Wh/j.m²)</i>		3301	3343	3468	3292	3755	3871	4447	4705	4391	4162	4397	3392
<i>En.Totale Reçue (kWh/j)</i>	224 208 196	793.4 0 686.5	748.7 4 695.7	776.9 3 721.4	737.3 3 684.6	841.0 1 780.9	867.1 4 805.2	996.20 925.04 871.67	1053 .8 978.	983.5 8 913.3	932.2 2 865.6	984.8 4 914.5	795.8 1 705.5
<i>En.Produite</i>		1000	1040	1060	980	1110	1120	1350	1400	1300	1150	1300	1050
<i>En.Utile (kWh/j)</i>	224 208 196	224 208 196	233 216 204	237 220 208	220 204 192	249 231 218	251 233 220	302 281 265	314 291 274	291 270 255	258 239 225	291 270 255	235 218 206
<i>Temp.Eau Froide</i>		13.4	13.5	13.5	14.0	14.0	14.5	15.0	15.0	13.5	13.5	13.5	13.5
<i>Temp.Ballon solaire (°C)</i>	224 208 196	32.7 31.3 30.3	33.6 32.1 31.1	34.0 32.5 31.4	32.9 31.6 30.6	35.4 33.9 32.8	36.1 34.6 33.4	41.1 39.2 37.8	42.0 40.1 38.7	38.6 36.8 35.5	35.7 34.1 32.9	38.6 36.8 35.5	33.8 32.3 31.2
<i>Taux de Couverture (%)</i>	224 208 196	90 83 79	93 87 82	95 88 83	88 82 77	100 93 87	101 93 88	121 113 106	126 117 110	117 108 102	103 96 90	117 108 102	94 88 83
<i>Temp. Ambiante</i>		7	8.5	12.8	17.4	24.5	31.4	36	35.2	28.3	22.5	14	8.9
<i>Temp. Moy.Capteur °C</i>		45 45 45	45 45 45	45 45 45	45 45 45	45 45 45	50 45 45	50 50 50	50 50 50	50 50 50	50 45 45	50 50 50	45 45 45
<i>Rendement (%)</i>	224 208 196	72 72 72	72 72 72	74 74 74	74 74 74	77 77 77	78 79 79	79 79 79	79 79 79	78 78 78	76 77 77	75 75 75	72 72 72

Tableau N° : III-7, Caractéristiques de l'installation avec différentes Surfaces.

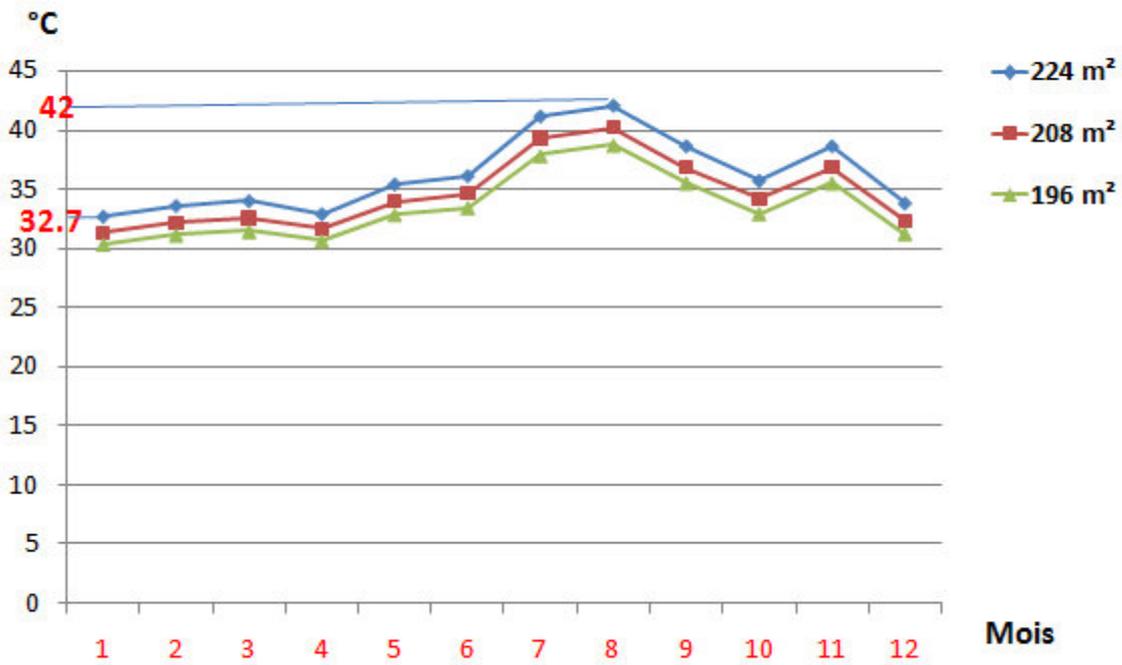
Le tableau III-7 est donné sous formes graphiques suivantes :



TAUX DE COUVERTURE



TEMPÉRATURE BALLON





D'après les graphes précédents, on remarque que pour une surface de 224 m², le taux de couverture théorique de l'installation peut dépasser les 100 % pour la période estivale et un taux de l'ordre de 90% pour la période hivernale, tandis que le rendement est presque identique, pour les trois configurations.

Pour la période estivale où on a un excès de température, le réseau secondaire de l'installation sera raccordé aux conduites alimentant les ballons d'eau chaude sanitaire des batteries de douches existantes par l'intermédiaire de vannes à trois voies.



Figure N° III-3: Vue projetée de la disposition des capteurs sur la terrasse de la Maidha



Figure N° III- 4 : Vue projetée de la fixation des capteurs sur la terrasse de la Maidha

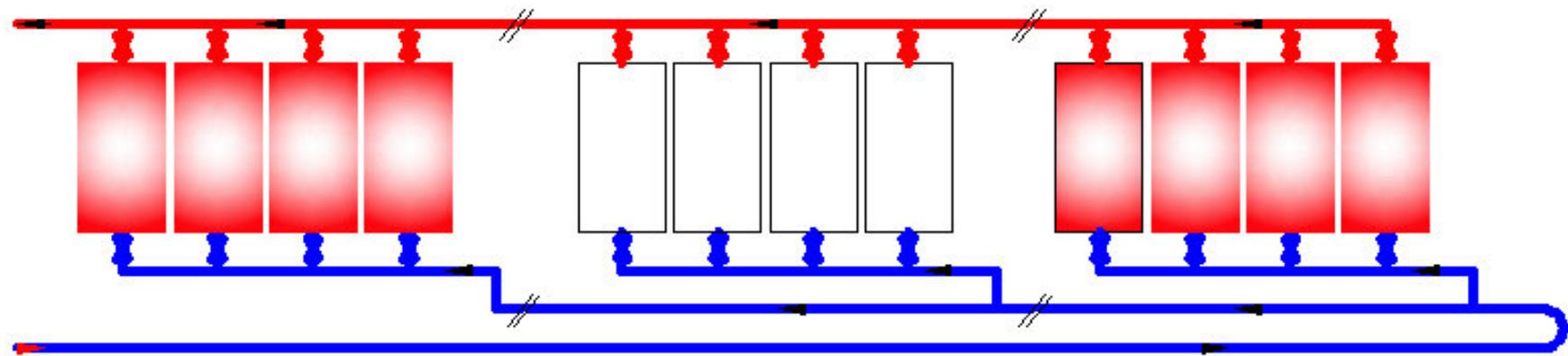


Figure N° III-5: Raccordement des capteurs en Boucle de Tichelman

Université de Batna
Département Mécanique
Projet: Production ECS.Solaire
Pour la Mosquée 1er Novembre - Batna

LEGENDE:

- 1- Ballon de captage
- 2- Echangeur de chaleur
- 3- Vase d'expansion
- 4- Circulateur Circuit Primaire
- 5- Circulateur Circuit Stockage
- 6- Ballon de stockage
- 7- Collecteur de départ vers l'échangeur
- 8- Collecteur eau froide du réseau
- 9- Collecteur de retour de l'échangeur
- 10- Collecteur de départ eau chaude sanitaire

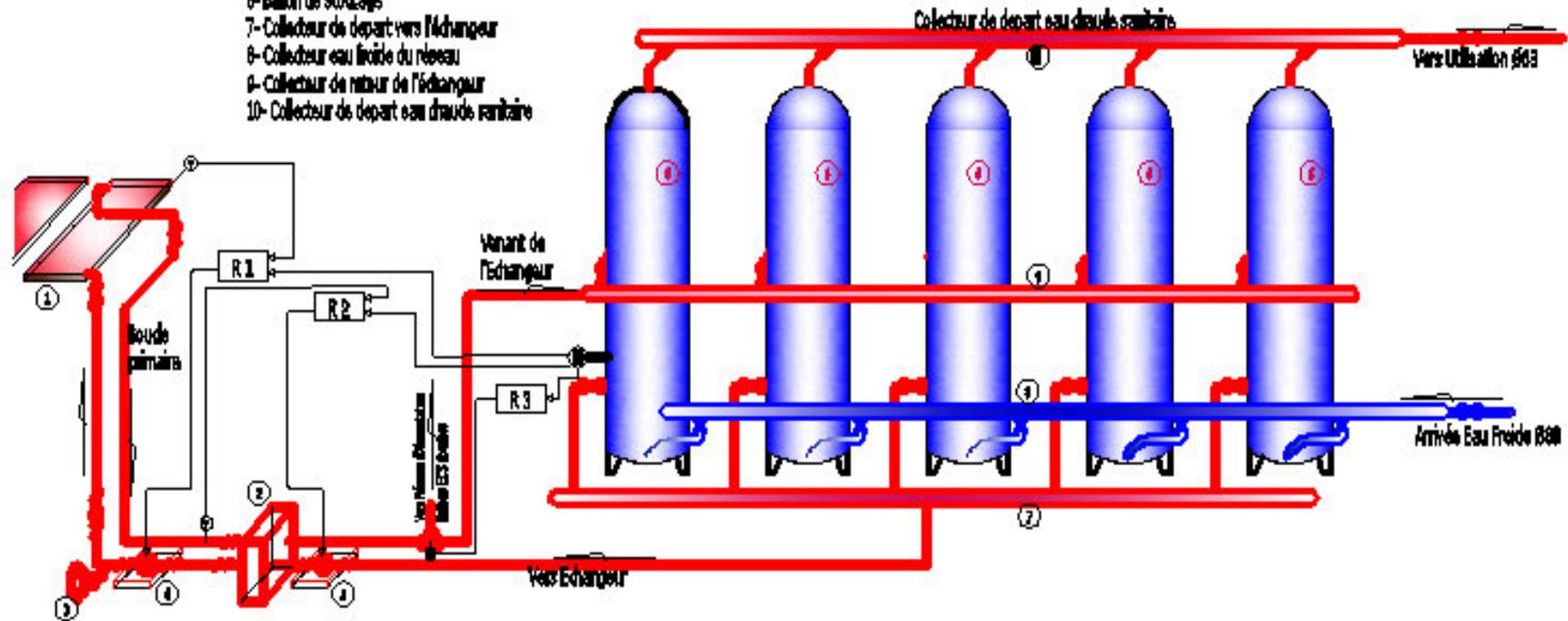


Figure N°III-6 : PRODUCTION D'EAU CHAUDE SANITAIRE SOLAIRE
SCHEMA DE PRINCIPE

Université de Batna
Département Mécanique
Projet: Production ECS.Solaire
Pour la Mosquée 1er Novembre - Batna

Conclusion

Conclusion

Le gaz naturel avec son bas prix est en train de conquérir nos foyers même dans des zones montagneuses. Ce luxe dans lequel nous vivons aura un impact néfaste sur les futures générations. Car il ne peut encourager le développement des énergies renouvelables dans notre pays. Donc il est temps, aujourd'hui de prendre conscience que les économies d'énergie sont liées à nos modes de vie, et elles deviennent de plus en plus urgentes.

Un grand travail reste à accomplir par les universités et autres organismes de recherche afin de mettre à la disposition des bureaux d'études d'engineering un recueil global, qui touche à toutes les villes d'Algérie, des données et des informations utiles, climatiques ou concernant les propriétés de l'eau d'alimentation, pour entamer des études concernant le solaire. Car durant notre travail, nous avons rencontré des problèmes majeurs quant à la collecte des données et informations nécessaires pour l'achèvement de cette étude.

Laisser les écoliers du primaire se laver les mains avec de l'eau glaciale, les résidents des cités universitaires prendre leurs douches en dehors des campus, les militaires et les occupants d'autres établissements souffrir de la non disponibilité de l'eau chaude alors que notre pays dispose d'un gisement solaire parmi les plus riches et que l'investissement dans le domaine des installations de la production de l'eau chaude solaire est bénéfique, parce qu'il représente aujourd'hui un enjeu majeur, à planifier et à exploiter dans l'immédiat. A noter que l'énergie solaire ne nécessite ni canalisations s'étendant sur des milliers de kilomètres, ni travaux d'excavations, ni plus tard des compteurs et des services administratifs annexes.

Ce travail de recherche dicté par cette situation inacceptable, présente une contribution au développement des applications de l'énergie solaire dans un domaine très répandu, qui est la production d'eau chaude sanitaire solaire, dans l'espoir d'étendre cette expérience sur les différents établissements publics, dans un premier temps, puis essayer de l'étendre aux installations individuelles plus en plus nombreuses et donc voraces en énergie.

Parmi plusieurs calculs effectués, nous avons choisi les paramètres nécessaires pour la réalisation de notre installation, tout en privilégiant ceux qui peuvent nous donner une meilleure satisfaction, quant au taux de couverture, comme au rendement que nous jugeons très satisfaisant. Les températures de distribution de l'eau chaude sanitaire obtenues, sont dans la plage d'utilisation admise.

Les figures projetées des capteurs sur la terrasse, reflètent la réalité de la disposition de ces capteurs, une fois le projet concrétisé.

Cependant, les résultats obtenus malgré leur apport bénéfique, nécessitent d'être validés et complétés par un organisme compétent avant d'être mis en œuvre, cette tâche qui nécessite une décision courageuse des responsables du secteur de l'énergie et des autorités locales, à leur tête l'association de la mosquée 1^{er} Novembre, ainsi que l'intervention de toute compétence concernée de près ou de loin à une telle réalisation. En premier la collaboration des industriels du solaire pour la mise en disponibilité des caractéristiques techniques des capteurs et de leur savoir faire.

En conclusion, nous estimons que l'objectif tracé a été atteint et les résultats obtenus. Il ne reste donc que la mise en œuvre et la concrétisation de ce projet.

Bibliographie

Bibliographie :

- 1-**SEMAI Hakim** ‘Le vitrage solaire’, Bulletin des Energies Renouvelables N°27-2013
- 2- **Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques** ‘Guide Eau Chaude Sanitaire Solaire’ –EDITION SEBTP SARL 2013
- 3 - **Patricia Courand** , Le Journal de la science mai 2013
- 4 - Programme ALSOL de promotion du chauffe-eau solaire en Algérie - Portail Algérien des ÉNERGIES RENOUVELABLES- juillet 2011
- 5 - **Yves JANNOT** ‘Thermique solaire’ 2011
- 6 - **Professeur Véronique Feldheim** ‘ENERGIE SOLAIRE’, Faculté Polytechnique de MONS 2010
- 7 - **P-Amet** ‘Installer un chauffage ou un chauffe-eau solaire’ Editions Eyrolles, 2010
- 8 - **Wagner & Co** ‘Solartechnik GmbH’ Wagner & Co, 2007
- 9 - **S. Benkaciali** ‘Le Gisement Solaire à Ghardaïa’, Bulletin des EnRen N°11 Juin 2007
- 10 - **Thomas Letz** ‘Cours sur le solaire thermique’ - INES Education - Novembre 2007
- 11 - **Dr Félix A.Peuser, Karl-Heinz Remmers, Martin Schauss** ‘Installations solaires thermiques, conception et mise en œuvre’ Editions Le Moniteur 2004
- 12 - **A D E M E**, ‘Eau Chaude Solaire - Manuel pour la conception, le dimensionnement et la réalisation des installations collectives’ - A D E M E Avril 2002
- 13- **A.Mefti** ‘Evaluation du potentiel énergétique solaire’, Bulletin des énergies renouvelables - N° 2 Décembre 2002
- 14 - Office fédéral de l’énergie OFEN ‘Dimensionnement d’installations à capteurs solaires’, Suisse Énergie 10 2001
- 15- **P. Bessemoulin et J. Oliviéri**, ‘Le Rayonnement Solaire et sa Composante Ultraviolette’, Physique Atmosphérique, La Météorologie, 8ème Série, N°31, Septembre 2000.
- 16 - Michel CAPDEROU ‘Atlas Solaire de l’Algérie’, OPU 1985
- 17 - **Philippe de la cotardiere** ‘Un soleil et Neuf planètes’, Editions Poche Nathan 1983
- 18 - **Ch.PERRIN de BRICHAMBAUT, Ch.VAUGE** ‘Le gisement solaire :Evaluation de la ressource énergétique ’ – Lavoisier TEC&DOC 1982.

- 19 - W.Palz** 'L'électricité Solaire' DUNOD 1981
- 20 - Michel CHATEAUMINOIS, Daniel MANDINEAU, Daniel ROUX**
'Calcul d'installations solaires à eau', PYC-EDITION 1980
- 21 - JOHN A.DUFFIE & WILLIAM A.BECKMAN** 'Solar engineering of Thermal Processes', second Edition, JOHN WILEY & SONS, INC., 1980.
- 22- A.Beckman et al. 1980) A.Beckman et al.** 'Solar engineering of Thermal Processes'
Madison, Wisconsin: JOHN WILEY & SONS, INC., 1980.
- 23 - Samuel BRAGARD** 'Le chauffe eau solaire', Energie 2030
- 24 -** Revue d'information scientifique Numéro5 CMS DocDB.cern.ch
- 25 - PENTA PROJECT,** 'Capteurs solaires - Cours de base'
- 26 - Herve Silve** 'l'énergie solaire', Herve.sile.pagesperso-orange.frMic
- 27 -** guide PACER 'Production d'eau chaude solaire, dimensionnement, montage, mise en service et entretien', Office Fédéral des Questions Conjoncturelles.
- 28 -** site internet <http://WWW.CNRS.FR> 'Le climat de la terre'
- 29 -** Site internet www.gisement-solaire.fr
- 30- Site internet** www.Energie.wallonie.be, 'Le capteur solaire à eau chaude', e énergie
-

Résumé :

Souvent on rattache l'énergie solaire à la production de l'électricité. La technique de chauffer l'eau par cette énergie ne cesse de se développer à grande échelle. En Algérie, le programme ALSOL de l'APRUE, visant à promouvoir le chauffe eau solaire, est un exploit une fois respecté.

Le choix de la mosquée 1^{er} Novembre de Batna n'était pas fortuit. En effet, sa situation stratégique et sa capacité d'accueil permettent de rapprocher la notion du chauffe eau solaire du grand public; ce que nous considérons comme un apport judicieux au programme ALSOL.

La surface de captation a été calculée d'une manière à satisfaire les besoins (même pour la période hivernale) avec des caractéristiques de l'installation très satisfaisantes.

Le projet a fait l'objet d'une étude technique d'engineering qui reflète la réalité de l'installation une fois réalisée.

Abstract:

We often connect solar energy to electricity production. The technique of heating water via this energy continues to grow on a large scale. In Algeria, the ALSOL program of APRUE, which aims at promoting the solar water heater, is a feat if respected.

The choice of the First November Mosque in Batna was not an accident. Indeed, its strategic location and its capacity help bring the concept of the solar water heater to the general public; what we regard as a sensible contribution to ALSOL program.

The capture area was calculated in a manner to meet the needs (even for winter period) with installation characteristics very satisfactory. The project has been a technical engineering study that reflects the reality of the facility once completed.

ملخص:

غالبا ما تربط الطاقة الشمسية بتوليد الكهرباء، إلا أن تقنية تسخين المياه بواسطة هذه الطاقة عرفت إستعمالا واسعا، ويعتبر البرنامج الطموح **ALSOL** المسطر من طرف هيئة ترقية وتطوير الطاقات (**APRUE**) ، والذي يهدف إلى تعميم إستعمال سخان الماء الشمسي في الجزائر من المكاسب الكبرى في حال النجاح في تطبيقه.

إن محاولتنا تقريب مفهوم السخان الشمسي من العامة، وذلك بإنتقائنا مسجد أول نوفمبر بباتنة، لموقعه الإستراتيجي، وكذا سعة إستيعابه لإنجاز هذه الدراسة، يعتبر تدعيما قويا لهذا المنحى، وهذا نظرا للغياب الشبه الكلي لمسخنات المياه في مثل هذه الأماكن.

في دراستنا هذه، حاولنا إيجاد مساحة اللواقط الشمسية اللازمة لتسخين المياه وذلك بمراعاة خصائص كل التجهيزات، والتي بإستطاعتها تلبية الطاقة اللازمة لتسخين المياه حتى في أعتى الظروف، مع التجسيد الفعلي للدراسة الهندسية للمشروع بمخططات حقيقية.