

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Mécanique
PROJET DE FIN D'ÉTUDES
En vue de l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en
Génie Mécanique

Thème

*Dimensionnement et expérimentation d'un
système hybride (chauffe-eau solaire / gaz)
destiné à une habitation*

Proposé et Dirigé par :
Mr. M. BENBRAIKA
Mme. F.SAHNOUNE

Réalisé par :
GHEMARI.Nacer

Promotion : Juin 2014

*Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach
16200 Alger (Algérie)*

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu Le tout puissant pour la santé, la volonté, le courage et la patience qu'il m'a donné durant ces années d'études.

Je tiens à remercier M. Ben Braika Mohamed pour son encadrement, ses conseils et son aide à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à remercier Dr. Sahnoune fatiha pour son encadrement, sa compréhension, ses conseils, ses observations son aide et sa disponibilité durant la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à remercier les membres de jury, les enseignants du département génie mécanique et tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont participé à ma formation, m'ont beaucoup appris et sans lesquels je ne serais pas ce que je suis.

Je tiens enfin à remercier tous mes amis ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

-Je dédie ce travail :

*-à ma mère qui m'a soutenu durant toutes ces années
d'études et qui a été toujours présente pour me pousser à
faire plus d'effort pour un avenir meilleur*

-à ma grande mère

-à ma sœur et mes frères ;

-à tous les membres de ma grande famille GHEMARI,

*-à mes professeurs, mes amis et à tous ceux qui m'ont assisté et
soutenu dans mes études.*

ملخص :

- إن التركيبة الفردية لتسخين الماء بواسطة الطاقة الشمسية تتوجب استعمال ملحق طاقوي يسمح بالعمل المستمر في جميع الفصول وكذلك يسمح بمواجهة العجز الطاقوي الشمسي , نقدم في هذه المذكرة تصميم لتركيبة شمسية مع نظام مساعد غازي .
- أنجز عملنا الى حد كبير في مركز التنمية للطاقات المتجددة , وبهذا الحدث لقد تم القيام بمجموعة من القياسات ممثلة في شكل منحنيات وجداول.
- النتائج التجريبية تثبت فائدة وفعالية النظام الطاقوي الغازي المساعد لتحسين المرود وموثوقية تركيبة التسخين الشمسي للماء .

الكلمات الدرنة : س د ية : الطاقة الشمسية , نظام هجين , تحديد الابعاد , اللاقط الشمسي .

Résumé :

Une installation individuelle de chauffage d'eau par énergie solaire nécessite l'emploi d'une énergie annexe permettant un fonctionnement continu en toute saison et ainsi de faire face à un déficit énergétique solaire. Nous présentons, dans ce mémoire, le dimensionnement d'une installation solaire avec un appoint à gaz. Notre travail a été en grande partie réalisé au centre de développement des énergies renouvelables. A cet effet, une campagne de mesures sur l'installation solaire du CDER est effectuée et présentée sous forme de tableaux et courbes.

Les résultats expérimentaux montrent l'utilité et l'efficacité de l'appoint à gaz pour améliorer le rendement et la fiabilité de l'installation du chauffe-eau solaire.

Mots clé : *Energie solaire, système hybride, dimensionnement, capteur solaire.*

Abstract :

An installation of individual water heating by solar energy requires the use of an annex energy allowing continuous operation in any season and so faces a solar energy deficit. We present in this memorandum, the design of a solar system with an extra gas, Our work was largely completed at the center of development of renewable energy, to this end, To this end, a companion measures on solar installation of CDER is performed and presented in tables and curves..

The experimental results show the utility and effectiveness of the extra gas to improve the performance and reliability of the installation of solar water heaters.

Keywords: *Solar energy, hybrid system, Dimensioning, Solar collector.*

Sommaire :

Introduction générale	1
------------------------------------	---

❖ Chapitre I : Le gisement solaire

I.1. Introduction.....	3
I.2. Le rayonnement solaire	3
I.2.1. Généralités sur le Soleil	3
I.2.2 La constante solaire I_0	3
I.2.3. Les coordonnées géographiques terrestres.....	4
✓ Latitude φ	4
✓ Longitude λ	4
✓ Méridien.....	4
I.2.4. Déclinaison d	5
I.2.5 .Angle horaire.....	6
I.3. La position du soleil.....	6
I.3.1. Hauteur angulaire du soleil h	7
I.3.2. Azimut du soleil a	7
I.3.3.Définition.....	8
I. 3.3.1. Durée d'insolation.....	8
I. 3.3.2 Insolation potentielle (théorique).....	8
I. 3.3.3 Fraction d'insolation.....	8
I.4. Eclairage d'un récepteur plan.....	8
I.4.1. Rayonnement global G	9
I.4.2. Rayonnement diffus D	9
I.4.3. Instrument de mesure d'éclairage.....	10
I.4.3.1. Mesures effectuées par un Pyranomètre.....	10
I.4.3.2. Pyréliomètre et rayonnement Direct.....	11
II .5.Potentiel solaire en Algérie.....	11
I.5. Conclusion.....	13

❖ Chapitre II : Les composants de l'installation

II.1.Introduction.....	14
II.2.Principe des capteurs solaires thermiques.....	14
II.3.Les différents types des capteurs thermiques.....	14
II.3.1.Capteurs non vitrés	15
II.3.2.Capteurs plans sous pression atmosphérique (plan standard).....	15
II.3.2.1.Composition d'un capteur plan standard.....	16
II.3.2.2.Fonctionnement d'un capteur plan standard.....	22
II.3.3.Capteurs sous vide.....	22
II.3.3.1.Capteurs tubulaires sous vide.....	23

II.3.3.2. Capteurs plans sous vide.....	24
II.4. Autres types de capteurs plans sous pression atmosphérique.....	24
II.4.1. Capteurs plans sous atmosphère modifiée.....	24
II.4.2. Capteurs stockeurs.....	24
II.4.3. Capteurs hybrides.....	25
II.4.4. Capteur à concentration solaire (parabolique).....	25
II.5. Bilan thermique global du capteur plan en régimes permanent et transitoire	26
II.6. Rendement instantané d'un capteur.....	27
II.6.1. Effet de la température d'entrée du fluide caloporteur.....	28
II.6.2. Effet de la température de l'absorbeur	28
II.6.3. Courbes caractéristiques et domaines d'application.....	29
II.7. Installation du capteur.....	30
II.7.1. Placement en toiture inclinée.....	30
II.7.2. Placement en toiture plate.....	30
II.7.3. Placement au sol.....	31
II.7.4. Façade.....	31
II.8. Le réservoir.....	32
II.9. Les canalisations.....	32
II.10. Les échangeurs de chaleur.....	33
II.11.1. Les chaudières domestique.....	33
II.11.2. Principe de fonctionnement d'une chaudière.....	33
II.11.3. Type des chaudières domestiques	34
II.11.3.1. Les chaudières haut rendement.....	34
II.11.3.2. Les chaudières basses températures.....	34
II.11.3.3. Chaudière à condensation.....	35
II.12. Conclusion.....	35

❖ Chapitre III : Types des chauffe-eaux solaires et les appoints à gaz

III.1. Introduction.....	36
III.2. Production d'eau chaude par énergie solaire.....	36
III.3. Les différentes types de circulation du fluide caloporteur.....	36
III.4. Les types d'un système solaire thermique.....	37
III.4.1. Le chauffe-eau solaire fonctionnant en thermosiphon.....	37
III.4.2. Le chauffe-eau solaire à éléments séparés.....	39
III.4.3. Les chauffe-eaux solaires monobloc.....	40
III.4.4. Les chauffe-eaux solaires auto-stockeurs.....	40
III.5. Les appoints à gaz.....	41
III.5.1. Le système d'appoint.....	41
III.5.2. Exigences.....	42
III.6. L'emplacement de l'appoint.....	42
III.6.1. Appoint intégré.....	42
III.6.2. Appoint séparé.....	43
III.6.3. Appoint instantané.....	43

III.7.Régulation circulateur-capteur.....	44
III.8. Rappel thermique.....	45
III.8.1. Champ de température.....	45
III.8.2. Flux de chaleur.....	45
III.8.3. Les différents modes de transfert de chaleur	45
III.8.3.1.La conduction.....	45
III.8.3.2.La convection.....	47
III.8.3.3.Le rayonnement.....	47
III.8.3.4.Loi du rayonnement thermique.....	48
III.9.Conclusion.....	48

❖ Chapitre IV : Dimensionnement d'un chauffe solaire/gaz

IV.1 Introduction.....	49
IV.2 Évaluation des performances d'une installation solaire.....	49
IV.2.1. La production énergétique instantanée d'un capteur solaire.....	49
IV.2.2. Interaction entre système, état du système et production.....	50
IV.3.Bilan du CESI.....	50
IV.3.1. Calcul de la production solaire.....	51
IV.3.2.Température de l'eau.....	51
IV.3.3.Besoin en ECS (kWh).....	52
IV.3.4.Les pertes liées à l'appoint intégré P_{ai}	52
IV.3.5. Le taux de couverture solaire.....	53
IV.4. Recueil des données nécessaires.....	53
IV.4.1. Données nécessaires concernant les besoins en eau chaude.....	53
IV.4.2. Les données météorologiques nécessaires.....	53
IV.4.3. Données sur les caractéristiques des composants	54
IV.5. Choix du schéma de principe de l'installation.....	54
IV.6. Dimensionnement de l'installation.....	55
IV.6.1. Dimensionnement des capteurs solaires.....	55
IV.6.2. Dimensionnement du stock.....	55
IV.6.3. Dimensionnement de l'isolant thermique du ballon.....	57
IV.6.4. Dimensionnement des canalisations.....	59
IV.6.5. Dimensionnement des vannes et robinets.....	60
IV.6.6. Dimensionnement de l'échangeur.....	60
IV.6.7. Dimensionnement de l'appoint à gaz.....	60
IV.7. Application de la méthode de calcul.....	61
IV.7.1.Paramètre de calcul.....	62
IV.7.2.Résultats de calculs pour l'installation solaire.....	67
IV.7.3.Interprétation des résultats de dimensionnement	69
IV.7.4.Résultats de calculs pour l'appoint.....	69
IV.7.5.Interprétation des résultats de dimensionnement	69
IV.8. Conclusion.....	70

❖ Chapitre V : Réalisation d'un dispositif expérimental d'un chauffe eau solaire avec un appoint à gaz

V.1.Introduction.....	71
V.2.Caractéristiques pondérales et dimensionnelles du chauffe-eau solaire étudié.....	72
V.2.1.Capteur plan.....	72
V.2.2.Réservoir et stockage.....	73
V.2.3.Circuit hydraulique.....	73
V.3.Réalisation d'un schéma expérimental de l'installation à l'aide de logiciel Solid Works.....	73
V.3.1.Capteur plan.....	73
V.3.2.Stockage.....	74
V.3.3.Chaudière.....	75
V.3.4.Chauffe-eau solaire avec l'appoint à gaz.....	75
V.3.5.Mise en plan du capteur.....	76
V.4.Les mesures effectuées par la boucle d'essai.....	77
V.4.1.Le rayonnement solaire.....	78
V.4.2.Température de sortie du capteur.....	78
V.4.3.Température ambiante.....	78
V.4.4.Les différentes mesures effectuées au CDER.....	78
V.5.Interprétation	81
V.5.1.Site de BOUZAREAH.....	81
V.6.Conclusion.....	84

❖ Chapitre VI : Etude économique

VI.1.Introduction.....	85
VI.2. L'évaluation financière et économique des projets.....	85
VI.3. Calcul de prix du KWh solaire.....	86
VI.3.1. Coût d'investissement de l'installation solaire.....	86
VI.3.2. Coût des énergies conventionnelles.....	86
➤ Coût de KWh produit à partir du gaz naturel.....	86
➤ Coût de KWh produit à partir du gaz butane.....	87
VI.4. Impact environnemental.....	88
VI.5.Conclusion.....	88

Conclusion générale	89
----------------------------------	----

Bibliographie	91
----------------------------	----

Annexes	92
----------------------	----

A.1.L'effet de serre.....	93
---------------------------	----

A.2.Les temps solaires.....	93
-----------------------------	----

Liste des figures :

Figure I.1: Schéma descriptive pour les angles latitude et longitude de la terre.....	4
Figure. I.2 : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné.....	5
Figure. I.3 : Variation annuelle de la déclinaison solaire.....	5
Figure I.4: Hauteur et azimut du soleil.....	6
Figure. I.5 : Représentation de la déclinaison et de l'azimut.....	7
Figure I.6 : Inclinaison et orientation d'une surface réceptrice.....	9
Figure I.7 : Mesure du rayonnement Global.....	10
Figure I.8 : Une incidence normale de Pyrhéliomètre utilisé pour mesurer la composante du rayonnement solaire direct.....	11
Figure I.9: Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au moins de juillet.....	12
Figure I.10: Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au moins de décembre.....	13
Figure II.1: Toiture constituée d'un absorbeur sélectif en acier inoxydable.....	15
Figure II.2 : capteur plan.....	15
Figure II.3 : Coupe d'un capteur plan standard.....	16
Figure II.4: Absorptivité et émissivité de divers types de revêtements.....	17
Figure II.5 : Diverses formes d'absorbeurs.....	18
Figure II.6 : Principaux types de réseau de tuyauteries dans les absorbeurs.....	18
Figure II.8 : Capteurs plans de types spéciaux.....	19
Figure II.9 : Bénéfice d'un vitrage anti reflets.....	20
Figure II.10 : Positionnement de la sonde de température.....	21
Figure II.16 : Flux d'énergie dans un capteur solaire.....	22
Figure II.17: Principe de l'isolation par le vide.....	23
Figure II.18 : Capteur plan sous vide.....	24
Figure II.19: Capteurs stockeurs.....	25
Figure II.20: Capteur a concentration solaire.....	26
Figure II.21 : Variation du rendement instantané en fonction de la température d'entrée du fluide caloporteur.....	28
Figure II.22: Effet de la température du l'absorbeur sur le rendement du capteur.....	29
Figure II.23 : Courbes caractéristiques de différents types de capteurs.....	29
Figure II.24: placement en toiture inclinée.....	30
Figure II.24 : placement des capteurs en toiture plate.....	31

Figure II.20: placement des capteurs sur façade.....	32
Figure II.21 : Ballon de stockage solaire standard.....	32
Figure II.22 : échangeur de chaleur.....	33
Figure II.23 : Fonctionnement d'une chaudière.....	34
Figure II.24 : Chaudière à haut rendement.....	34
Figure II.25: une chaudière à basse température.....	35
Figure II.26 : une chaudière à condensation.....	35
Figure III.1: boucle solaire fermée	37
Figure III.2 : boucle solaire ouverte.....	37
Figure III.4 : chauffe-eau solaire fonctionnant en thermosiphon.....	39
Figure III.5 : chauffe-eau solaire à élément séparées.....	40
Figure III.5: Schémas descriptif montrant le principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur.....	41
Figure III. 6 : chauffe-eau solaire avec appoint intégré.....	43
Figure III.7 : chauffe-eau solaire avec appoint séparé.....	43
Figure III.8: chauffe-eau solaire avec un appoint instantané.....	44
Figure III.8 : Transfert de chaleur par conduction.....	46
Figure IV.1: Schéma de principe d'un CESI.....	51
Figure IV.2: Schémas de principe reconnus par SOLO.....	55
Figure IV.3: Répartition des températures autour de l'isolation de réservoir.....	58
Figure IV.4: Distribution de la température extérieure mensuelle moyenne.....	67
Figure IV.5 : Bilan de consommation des appoints du mois janvier au mois de mars.....	69
Figure V.1: Schéma du chauffe-eau solaire expérimental étudié au CDER.....	71
Figure V.2: Vue éclaté du capteur plan jacques Giordano.....	74
Figure V.3: capteur plan.....	74
Figure V.4: Ballon de stockage de volume 300L.....	74
Figure V.5: Chaudière domestique.....	75
Figure V.6: chauffe eau solaire avec appoint à gaz.....	75
Figure V.7: Vue de dessus du capteur.....	76
Figure V.8: Détail de l'absorbeur – Version verticale.....	77
Figure V.9: Schéma du chauffe-eau solaire expérimental étudié.....	78
Figure V.10: Mesure de la température a l'entrée du capteur.....	79
Figure V.11: Mesure de la température a la sortie du capteur.....	79

Figure V.12: Mesure de la température a l'entrée du ballon de stockage/capteur.....80

Figure V.13: Mesure de la température a la sortie du ballon/capteur.....80

Figure V.14: Mesure de la température a la sortie du ballon de stockage/puisage.....81

Figure V.9: L'évolution de la température ambiante en fonction du temps.....82

Figure V.10: L'évolution de l'éclairement globale en fonction du temps.....82

Figure V.11: L'évolution de la température à l'entrée du capteur.....82

Figure V.12: L'évolution de la température à la sortie du capteur.....82

Figure V.13: L'évolution de la température à l'entrée du cuve.....83

Figure V.14: L'évolution de la température à la sortie du cuve.....83

Figure V.15: L'écart de la température entre la sortie et l'entrée du capteur.....83

Figure V.16: L'écart de la température entre la sortie et l'entrée du cuve.....83

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques du soleil.....	3
Tableau I.2 : représentative du potentiel solaire.....	12
Table III.1: Variation de la masse volumique de l'eau en fonction de la température.....	38
Tableau III.2 : Conductivité des matériaux.....	46
Tableau IV.1: variation de la puissance utile en fonction de T_{fm}	50
Tableau IV.1: Variation mensuelle de la température ambiante et d'eau froide.....	67
Tableau IV.2: Résultats de la simulation avec le logiciel SOLO.....	68
Tableau IV.2: Résultats globaux de la simulation.....	68
Tableau V.1: Caractéristique de l'isolation du capteur plan JACQUES GIORDAN.....	71
Tableau VI.1: Coût unitaire du gaz naturel et montant à payer pour le logement	82
Tableau VI.2: Les différents coûts du KWh en fonction de l'énergie utilisée.....	83
Tableau VI.3: Emissions unitaires de CO ₂ issues de la combustion de différentes énergies fossiles.....	84

Nomenclature

M : Masse.....	kg
ρ : Masse volumique.....	kg/m^3
Q_{ai} : Appoint intégré	kWh
P_{ai} : Pertes liées à l'appoint intégré.....	KWh
A_s : Apport solaire.....	kWh
P_s : Pertes solaires.....	kWh
Q : Production d'eau chaude sanitaire.....	kWh
B_{ec} : Besoin en ECS.....	KWh
$Q_{\text{appoint_hiver}}$: Fourniture de l'appoint mesurée en hiver (de octobre à mai)	kWh,
$Q_{\text{appoint_été}}$: Fourniture de l'appoint mesurée en été.....	kWh
RJE(i) : rayonnement journalier extraterrestre sur le site pour le mois i	kWh/m^2
Q_{AV} : flux thermiques perdu par la face avant.....	W
Q_{AR} : flux thermiques perdu par la face arrière.....	W
P_u : puissance utile	W
P : puissance du soleil.....	W
C^* : flux solaire reçu à la limite de l'atmosphère terrestre	W/m^2
G^* : le rayonnement global du ciel clair.....	W/m^2
G : le rayonnement global reçu par une surface horizontale.....	W/m^2
D : le rayonnement diffus reçu par une surface horizontale.....	W/m^2
Q_a : puissance incidente du rayonnement absorbé par unité de surface.....	W/m^2
Q_p : pertes thermiques du capteur.....	W/m^2 .
Q_u : puissance utile récupérée par le fluide caloporteur.....	W/m^2

Q_t : puissance stockée sous forme de chaleur dans les différents éléments du capteur en régime transitoire..... W/m²

I : flux de rayonnement disponible sur le plan des capteurs..... W/m²

U_{AV} : coefficient de déperditions thermiques par la face avant..... W/m². K

U_{AR} : coefficient de déperditions thermiques par la face arrière W/m². K

K : coefficient caractéristique des pertes du capteur..... W/m². °C

k_{iso} : conductivité de l'isolant..... W/m.K

T_m : température moyenne de l'absorbeur..... °C

T_a : température ambiante moyenne °C

T_{fe} : température d'entrée du fluide dans les capteurs..... °C

T_{fm} : température moyenne du fluide dans les capteurs..... °C

T_{so} : Température superficielle du soleil °C

$HI(i)$: nombre d'heures moyen d'ensoleillement journalier pour le mois i h

$DJ(i)$: durée moyenne du jour sur le site pour le mois i h

$V_{appoint}$: volume de la partie appoint du ballon de stockage d'ECS L

V : Production d'eau chaude sanitaire..... m³

V_b : volume du ballon..... m³

S_b : surface extérieure du ballon..... m²

S : surface des capteurs m²

e_{iso} : épaisseur de l'isolant..... m

r_e : le rayon extérieur de l'enveloppe..... m

r_i : le rayon intérieur de l'enveloppe..... m

D : diamètre..... M

Cr : constante de refroidissement du ballon équivalent.

H : représentant la fraction de fonctionnement en hiver.

E : représentant la fraction de fonctionnement en été.

LETTRES GRECQUES :

τ_s : le coefficient de transmission de la couverture transparente

α_s : coefficient d'absorption de l'absorbeur.

β_c : coefficient caractéristique des gains du capteur.

η : rendement instantané.....%

η_{hiver} : Rendement moyen de chauffage gaz ou fioul.....%

$\eta_{\text{été}}$: Rendement de chaudière d'été.%

τ : Le taux de couverture solaire.%

INTRODUCTION GENERALE

Face aux risques mal maîtrisés de l'énergie nucléaire et aux effets néfastes causés par la combustion des hydrocarbures, sans oublier l'épuisement des énergies fossiles, il y a une prise de conscience engagée en faveur des énergies renouvelables. L'énergie solaire est l'une des plus facilement exploitables; elle est en outre inépuisable. Comme la plupart des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins énergétiques.

Parmi toutes les utilisations possibles de l'énergie solaire, le chauffage de l'eau à usage domestique est l'une des plus économiques et des plus simples. C'est aussi l'une des plus répandues.

La production d'eau chaude sanitaire grâce à l'énergie solaire est maintenant bien au point. L'installation est en général dimensionnée pour fournir 40 à 60 % des besoins. Les vraies économies commencent avec un dimensionnement optimal de l'installation solaire. Il n'est pas judicieux de sur-dimensionner l'équipement pour viser une forte contribution solaire à la mauvaise saison. Cela pourrait avoir pour effet néfaste; en été, que le chauffe-eau solaire produise plus que les besoins des usagers.

L'eau chaude sanitaire constitue un volet important dans la recherche de confort des personnes. Cependant son obtention demande une quantité d'énergie considérable. Nous adopterons donc la solution d'un système hybride (chauffe-eau solaire /gaz) compte tenu des avantages économiques et environnementaux plutôt que les systèmes à accumulation ou thermodynamique.

Ce projet vise à dimensionner un chauffe-eau solaire avec un appoint à gaz pour usage domestique répondant au besoin quotidien en eau chaude sanitaire à une famille algérienne moyenne. Pour ce faire, nous avons présenté notre mémoire de fin d'études en six chapitres :

- Le premier chapitre est consacré pour le gisement solaire,
- Au deuxième chapitre nous étudierons les différents composants de l'installation,
- Dans le troisième chapitre nous décrivons les différents types des chauffe-eaux solaires et les appoints à gaz,
- Dans le quatrième chapitre nous entamons le dimensionnement des installations de production d'eau chaude solaires, et le calcul prévisionnel des performances énergétiques en utilisant les logiciels SOLO et Transol développés par CSTB France,

- le cinquième est consacré aux résultats, interprétation et présentation des courbes de mesures expérimentales,

- Dans le dernier chapitre nous ferons une étude économique et une étude sur l'impact environnemental des énergies conventionnelles.

Et à la fin, nous terminons par une conclusion générale.

CHAPITRE I

I.1. Introduction :

L'établissement du bilan énergétique d'une installation solaire suppose tout d'abord la connaissance de l'énergie solaire qu'elle reçoit.

Pour pouvoir déterminer la quantité de l'énergie solaire reçue par une surface d'un matériau, il faut connaître le flux solaire incident à travers l'atmosphère terrestre.

I.2. Le rayonnement solaire :**I.2.1. Généralités sur le Soleil : [1]**

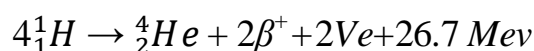
Le soleil est situé au centre d'un système dit « système solaire » dont la terre fait partie avec d'autres planètes. Le Soleil a une forme sphérique qui est constitué d'hydrogène (71%), d'hélium (27%), et d'autres éléments, plus lourds (2%). Au centre du Soleil, la température atteint environ 16 millions de degrés Celsius.

• Caractéristiques du soleil : [1]

Caractéristique	Valeur
Masse	$1,989 \cdot 10^{30} \text{Kg}$
Diamètre	$1,392 \cdot 10^9 \text{m}$
Masse volumique moyenne	1410Kg /m^3
Puissance rayonnée	$3,83 \cdot 10^{26} \text{W}$
Température superficielle	5770

• L'énergie solaire : [1]

L'énergie solaire provient de la fusion d'hydrogène en hélium au sein du noyau de notre étoile. Deux cycles ont été imaginés par les astrophysiciens pour décrire les étapes conduisant à cette fusion (le cycle proton-proton fournit 90% de l'énergie solaire et le cycle du carbone fournit les 10% restants), on peut résumer ces deux cycles par l'équation globale suivante (en émettant le rayonnement γ)

**I.2.2 La constante solaire I_0 [1]**

Une surface plane d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire et située à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée fonction de la distance soleil-Terre. Cette distance variant quelque peu au cours de l'année, compte tenu de la légère

excentricité de l'orbite terrestre, il en est de même de la puissance reçue par la surface en question. On constate que le flux solaire varie peu au cours du temps. Aussi appelle-t-on constante solaire, noté C^* , la valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite de l'atmosphère terrestre ; on a :

$$C^* = 1353 \text{ W/m}^2$$

I.2.3. Les coordonnées géographiques terrestres [2]

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent de repérer un point sur la terre.

- **Latitude φ :**

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la Terre au point considéré. Sa valeur est positive dans l'hémisphère nord, et est négative dans l'hémisphère sud.

- **Longitude λ :**

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. Sa valeur est positive à l'ouest et est négative à l'est de la méridienne origine.

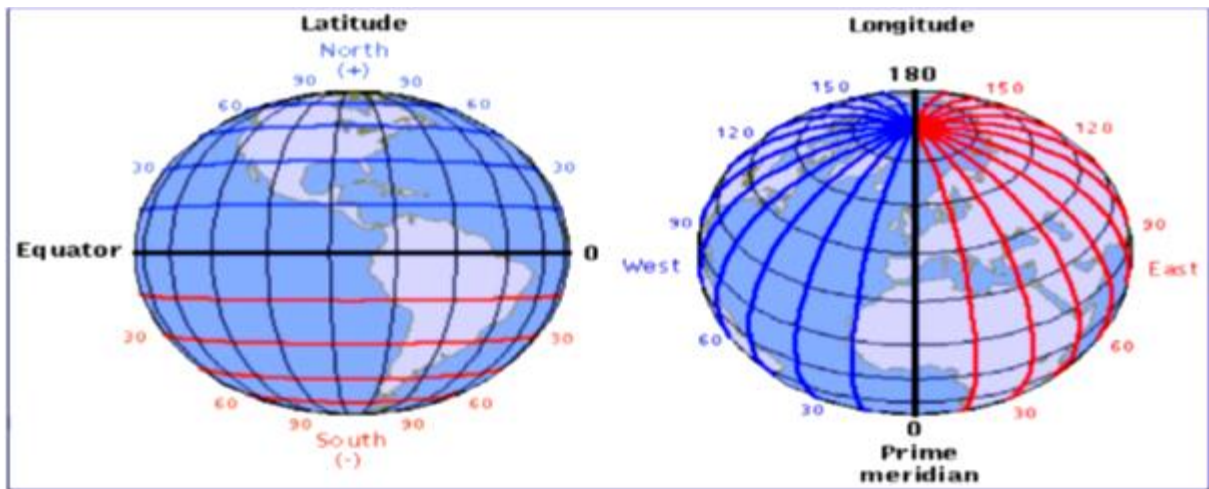


Figure I.1: Schéma descriptif pour les angles latitude et longitude de la terre

- **Méridien :**

Grand cercle de la Terre passant par les pôles. Tous les points d'un même méridien ont évidemment la même longitude ; le méridien pris pour origine (0°) des longitudes est celui

de Greenwich. Le plan méridien en un lieu est déterminé par ce lieu et par l'axe des pôles; sa trace au sol est parfois dénommée : méridienne. Le temps solaire vrai est identique, à un instant donné, pour tous les points d'un même méridien.

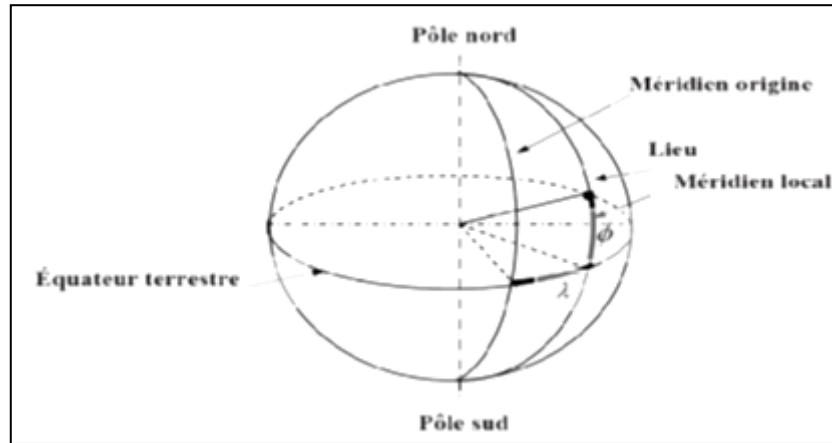


Figure I.2 : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné

I.2.4. Déclinaison δ [3]

C'est l'angle formé par le vecteur Soleil-Terre avec le plan équatorial. Elle est due à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestre par rapport au plan écliptique, ce qui est traduit par les différentes saisons. Elle varie au cours de l'année entre -23,45° et +23,45°. Elle est nulle aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre), et maximale aux solstices d'été (22 juin) et d'hiver (22 décembre).

La variation journalière de la déclinaison est d'environ de 0,5°. Elle est calculée par une équation simple approximative :

$$\delta = 23,45 \sin \left[\left(\frac{360}{365} \right) \cdot (284+n) \right] \tag{I.1}$$

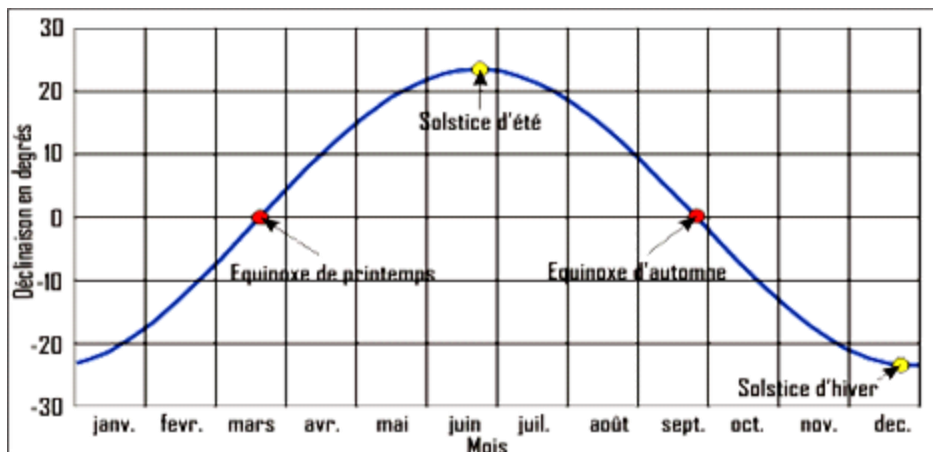


Figure I.3 : Variation annuelle de la déclinaison solaire

I.2.5 .Angle horaire [3]

L'angle horaire ω étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai TSV [8]. L'angle horaire est donné par l'équation suivante:

$$\omega = 0.261799 \cdot (t - 12) \quad (I.3)$$

avec t est le temps. Pour calculer l'angle horaire, Capderou a utilisé la formule suivante dans l'Atlas Solaire de l'Algérie [4]:

$$\omega = 15 \cdot (TSV - 12) \quad (I.4)$$

Si $\omega = 0$, TSV = 12h.00

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

I.3. La position du soleil

Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l'énergie, la projection de cette énergie dépend de l'orientation de la surface réceptrice. Pour récupérer le maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est primordiale.

A chaque instant, un observateur peut établir la position du soleil en mesurant sa hauteur "h" et son azimut "a". (Figure I.1).

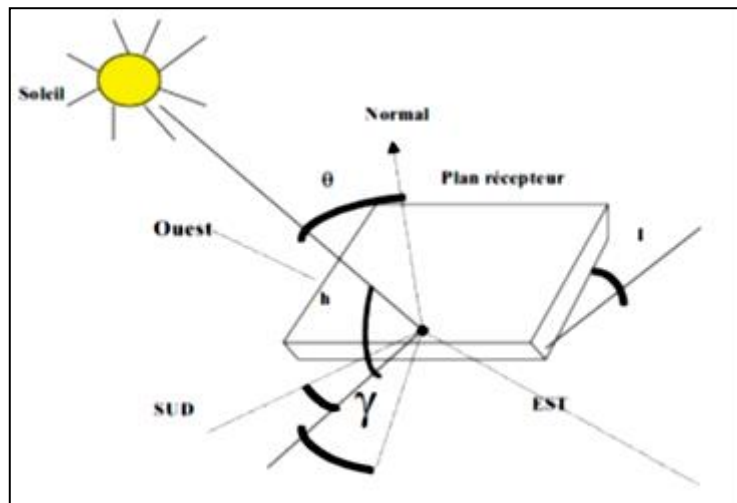


Figure I.4: Hauteur et azimut du soleil

I.3.1. Hauteur angulaire du soleil h [3]

C'est l'angle formé par le plan horizontal du lieu d'observation avec la direction du soleil. Cette hauteur durant le jour peut varier de 0° (soleil à l'horizon) à 90° (soleil au zénith). On le compte positivement de 0° à 90° vers le Zénith et négativement de 0° à 90° vers le Nadir. La hauteur angulaire du soleil h est alors donnée par la formule :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \tag{I.5}$$

Où :

φ : Latitude du lieu

δ : La déclinaison du soleil

ω : L'angle horaire du soleil

I.3.2. Azimut du soleil a [3]

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. La connaissance de l'azimut est importante pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale. L'azimut nul correspond à la direction sud dans l'hémisphère nord et la direction nord dans l'hémisphère sud. L'orientation Est correspond à l'azimut $a = -90^\circ$, et l'orientation Ouest à $a = +90^\circ$.

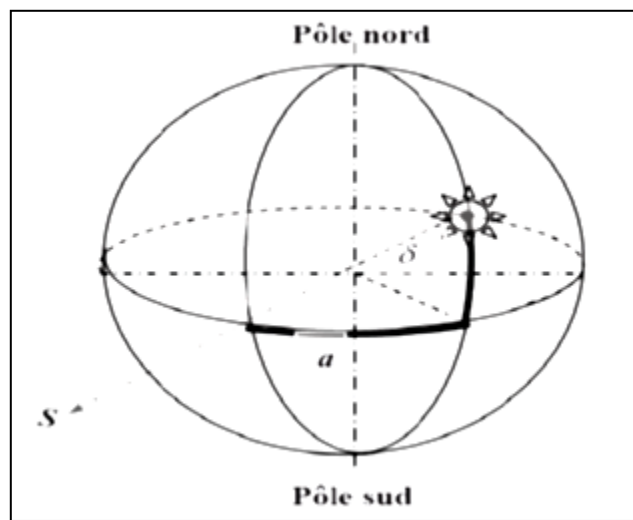


Figure I.5 : Représentation de la déclinaison et de l'azimut.

L'azimut « a » est défini par la relation suivante :

$$\cos a = \frac{\sin \varphi \cos \delta \cos \omega - \cos \varphi \sin \delta}{\cos h} \tag{I.8}$$

I.3.3.Définition :**I. 3.3.1. Durée d'insolation :**

L'insolation ou la durée d'ensoleillement est un paramètre temporel caractérisant le rayonnement solaire. Elle représente pour une journée la somme des intervalles de temps auxquels l'intensité du rayonnement solaire a dépassé un seuil de 100W/m². Il est représenté par (SS).

I. 3.3.2 Insolation potentielle (théorique) :

L'insolation potentielle ou théorique (SS₀) est la valeur de l'insolation pour le jour considéré en l'absence d'atmosphère, elle ne dépend que de la position géographique du lieu.

$$SS_0(n) = \frac{2}{15} \arccos(-\operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\delta) \quad (\text{I.9})$$

I. 3.3.3 Fraction d'insolation :

La fraction d'insolation σ , est un paramètre très représentatif des conditions climatiques de nébulosité du ciel. La nébulosité est le rapport entre la surface du ciel couverte par les nuages et la surface totale du ciel au dessus du territoire correspondant.

Cette notion n'étant que descriptive, on la relie à la fraction d'insolation qui est une grandeur mesurable dès qu'on connaît les durées d'insolation enregistrées par les héliographes qui sont déduits par le rapport suivant :

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0} = \frac{\text{durée d'insolation}}{\text{durée maximal d'insolation}} \quad (\text{I.10})$$

I.4. Eclairement d'un récepteur plan : [3]

Le coefficient d'incidence $\cos\gamma$ est l'angle formé par le rayonnement solaire incident avec la perpendiculaire issue de la surface considérée. Ce coefficient est défini d'une part par la hauteur du soleil et son azimut et d'autre part par l'orientation (points cardinaux) et l'inclinaison i du plan récepteur. Ainsi, chaque plan récepteur peut être défini par un couple de valeurs, soit (O, i). L'orientation est négative vers l'Est et est positive vers l'Ouest. Quant à l'inclinaison, elle est égale à 0° pour un plan horizontal et 90° pour un plan vertical. Si le coefficient d'incidence est négatif, la surface du plan considéré ne reçoit pas de rayon solaire direct.

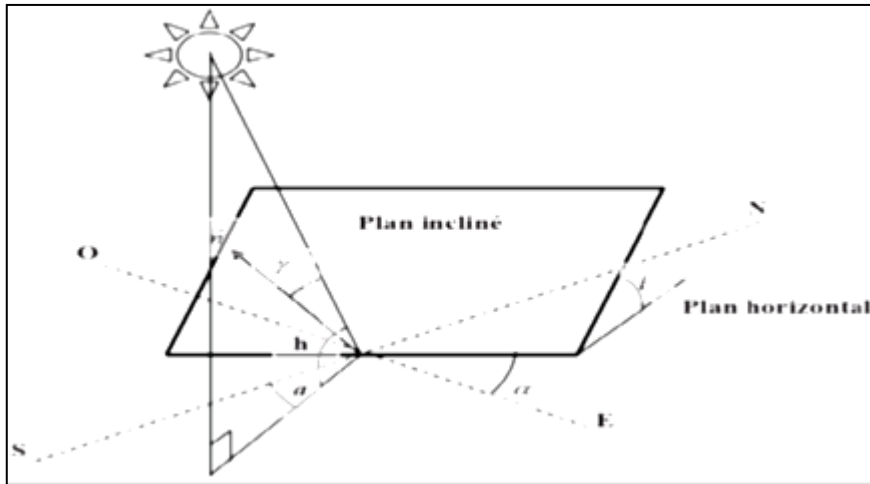


Figure I.6 : Inclinaison et orientation d'une surface réceptrice

L'inclinaison sur l'horizontale est désignée par l'angle i compris entre 0° et 90° et par le plan azimutal « a » compris entre -180° et 0° vers l'Est et entre 0° et 180° vers l'Ouest. L'éclairement lumineux (W/m^2) est maximal lorsque le rayonnement est perpendiculaire au plan ($\gamma = 0$). L'angle d'incidence augmente jusqu'à être le rayonnement à incidence rasante ($\gamma = 90$).

L'éclairement perpendiculaire à un plan, peut être calculé par la formule:

$$S = I_{DN} \cos \gamma \tag{I-17}$$

I.4.1. Rayonnement global: G

Eclairement énergétique solaire reçu par une surface horizontale.

On estime le rayonnement global G reçu par une surface horizontale comme suit : [4]

$$G = (0,58 \sigma + 0,41). G^* \tag{I-18}$$

Avec G^* est le rayonnement global du ciel clair, il est mesuré par un pyranomètre et est donné dans des abaques.

I.4.2. Rayonnement diffus : D

Eclairement énergétique solaire dirigé vers le sol reçu par une surface horizontale, provenant de toute l'hémisphère à partir de l'angle solide limité au disque solaire.

$$D = (- 0,35 \sigma + 0,53). G \tag{I-19}$$

On estime le rayonnement direct I reçu par une surface horizontale comme suit :

$$I = G - D \tag{I-20}$$

➤ Estimation des différents rayonnements sur une surface inclinée :

On estime le rayonnement diffus $D(\beta, \gamma)$ reçu par une surface inclinée d'un angle β et orientée par rapport au sud d'un angle γ comme suit :

$$D(\beta, \gamma) = D \cos^2(\beta/2) + a G \sin^2(\beta/2) \quad (I-21)$$

a : albédo [9]

On estime le rayonnement direct $I(\beta, \gamma)$ reçu par une surface inclinée comme suit :

$$I(\beta, \gamma) = \lambda(\beta, \gamma) \cdot I \quad (I.22)$$

$\lambda(\beta, \gamma)$ est donnée sous forme d'abaques, il est calculé pour $6 \geq T_L \geq 2$ et $\varphi \leq 60^\circ$.

On estime le rayonnement global $G(\beta, \gamma)$ reçu par une surface inclinée comme suit :

$$G(\beta, \gamma) = \lambda(\beta, \gamma) \cdot I + D \cos^2 \beta/2 + a G \sin^2 \beta/2 \quad [3] \quad (I.23)$$

I.4.3. Instrument de mesure d'éclairement :

I.4.3.1. Mesures effectuées par un Pyranomètre : [1]

- Mesure de l'éclairement énergétique global.
- Mesure de l'éclairement énergétique diffus par adjonction d'un dispositif d'occultation du disque solaire.

➤ Principe :

L'élément sensible (thermopile) du Pyranomètre est une série de thermocouples exposés au rayonnement solaire, dont les soudures froides sont maintenues à la température de l'air par conduction et qui délivre une différence de potentiel proportionnelle au flux incident.

Un pare-soleil constitué par une bande circulaire centrée sur la thermopile et parallèle au plan équatorial, occulte le Pyranomètre du rayonnement solaire direct pour permettre la mesure du rayonnement solaire diffus.

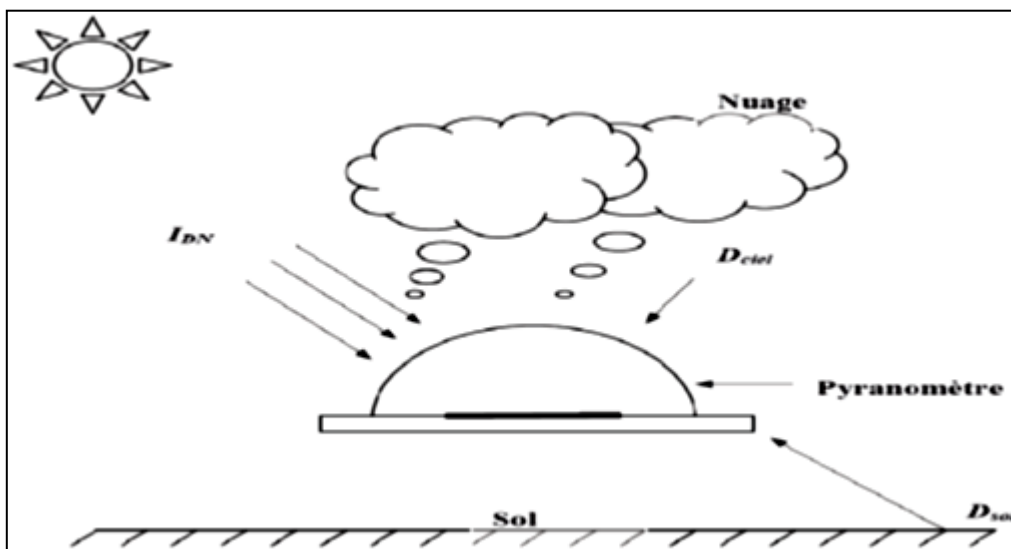


Figure I.7 : Mesure du rayonnement Global

I.4.3.2. Pyrhéliomètre et rayonnement Direct : [3]

- **Définition du rayonnement solaire Direct : I_{DN}**
- C'est l'éclairement énergétique solaire contenu dans l'angle solide limité au disque solaire et parvenant sur une surface perpendiculaire à l'axe de cet angle solide.
- **Mesure effectuée par un Pyrhéliomètre :**

Mesure de l'éclairement énergétique direct. Rayonnement solaire provenant de l'angle solide limité au disque solaire parvenant sur une surface unité perpendiculaire à l'axe de cet angle solide.

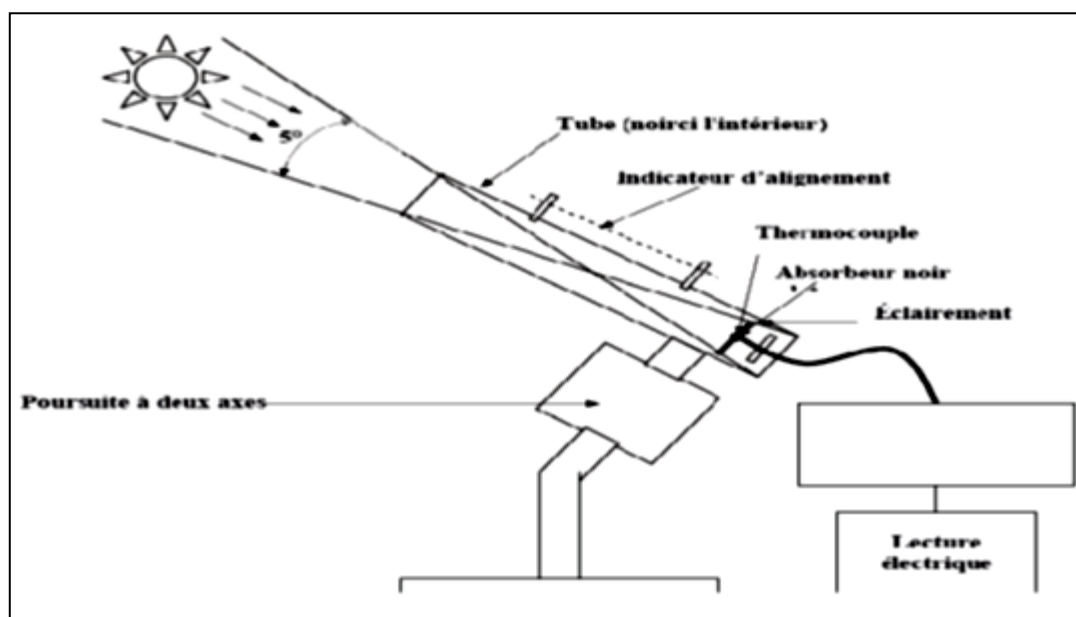


Figure I.8 : Une incidence normale de Pyrhéliomètre utilisé pour mesurer la composante du rayonnement solaire direct.

II .5.Potentiel solaire en Algérie [5] :

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'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 les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh/m}^2/\text{an}$ au Nord et $2650\text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au Sud du pays. Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh.

Tableau I.2 : représentative du potentiel solaire en Algérie

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

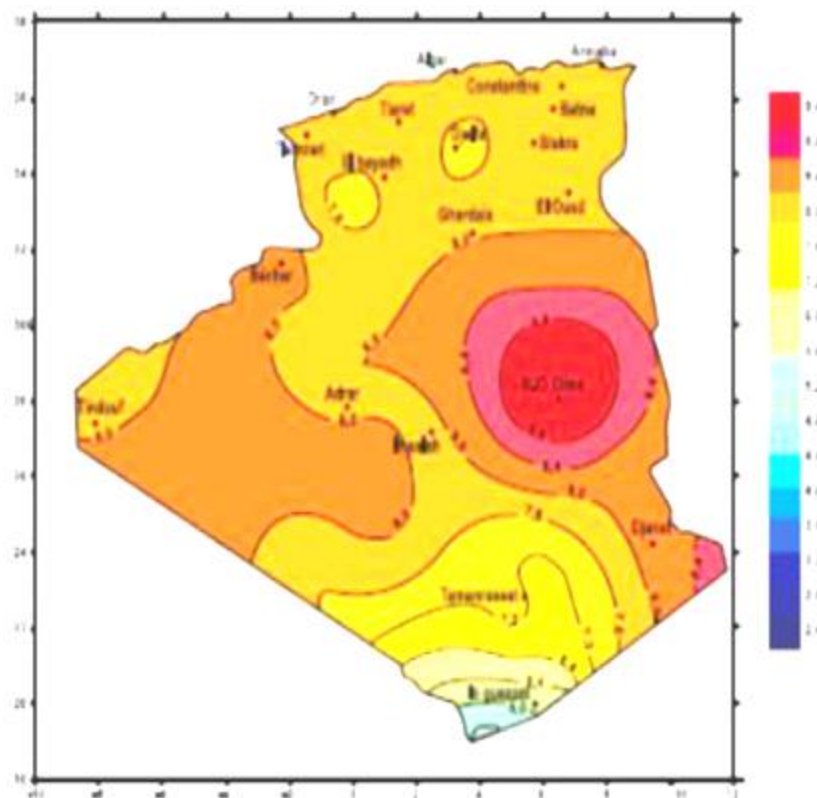


Figure I.9 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal au moins de Juillet

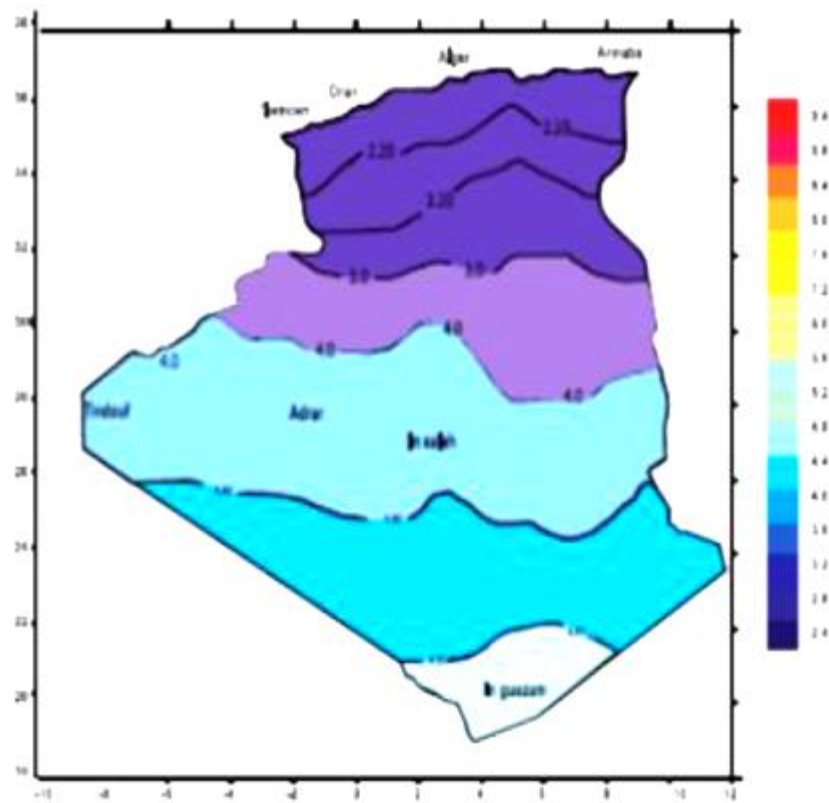


Figure I.10 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal au mois de décembre

I.6. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions importantes sur le gisement solaire comme les coordonnées terrestres et horaires, les temps de base et le mouvement de la Terre autour du soleil. Aussi, les différents types de rayonnements (direct, diffus et global) et les expressions mathématiques de chaque rayonnement selon la variation d'inclinaison et d'orientation. Une exploitation rigoureuse du gisement solaire permet l'orientation optimale des capteurs solaires.

CHAPITRE II

II.1.Introduction

Un chauffe -eau solaire est un système qui permet la production d'eau chaude par conversion de l'énergie solaire. Il peut être utilisé à des fins domestiques (vaisselle, lessive, toilette...) pour des consommations réduites, ou pour des usages collectifs ou commerciaux tel que les hôpitaux, les hôtels ... ; pour des consommations importantes.

Les capteurs solaires transforment le rayonnement solaire en chaleur grâce à un absorbeur (un corps à revêtement chromé caractérisé par des propriétés d'absorption très élevées et d'émissivité très basse). L'absorbeur transfère la chaleur à un fluide caloporteur (généralement de l'eau glycolée) circulant au travers de chacun des capteurs. Un dispositif de régulation électronique commande le fonctionnement du système (circulateurs et appoints) selon les conditions d'ensoleillement et la demande en eau chaude.

Lorsque la différence de température entre la sonde capteur (S1) et la sonde en fond de ballon (S2) dépasse quelques degrés (température du capteur supérieur à la température du ballon), les circulateurs s'enclenchent. Le fluide caloporteur, circulant dans le circuit primaire, achemine alors l'énergie solaire depuis les capteurs vers le ballon de stockage à travers un échangeur. Le ballon de stockage accumule la chaleur produite.

II.2.Principe des capteurs solaires thermiques [6]

Le capteur solaire a pour fonction de transformer la plus grande quantité possible de rayonnement solaire incident en énergie thermique et de la transférer au fluide caloporteur du circuit primaire.

II.3.Les différents types des capteurs thermiques [6]

Il existe différents types de capteurs présentant des coûts et des caractéristiques spécifiques. Les quatre types de capteurs solaires le plus couramment utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire domestique sont :

- les capteurs plans non vitrés,
- les capteurs plans standard,
- les capteurs tubulaires sous vide,
- les capteurs plans sous vide.

Il existe un certain nombre d'autres types de capteurs représentant une part relativement minoritaire du marché, ils ne seront pas tous décrits ci-dessous.

Les capteurs solaires sont généralement fournis sous forme d'éléments monoblocs pré-assemblés en atelier. Cette solution garantit une qualité uniforme des capteurs et facilite leur installation.

II.3.1. Capteurs non vitrés [6]

Ce type de capteur est composé du seul absorbeur. D'une part on trouve les absorbeurs en matériaux synthétiques utilisés pour le chauffage des piscines extérieures. D'autre part, ceux en acier inoxydable traité sélectivement pour le préchauffage de l'eau chaude sanitaire. Les performances de ces capteurs sont limitées étant donné l'absence de vitrage en face avant et d'isolation thermique en faces arrière et latérales. Il en découle de plus grandes pertes de chaleur de l'absorbeur vers l'environnement qui sont compensées par un prix réduit du capteur.



Figure II.1: Toiture constituée d'un absorbeur sélectif en acier inoxydable

II.3.2. Capteurs plans sous pression atmosphérique (plan standard) [6]

Le capteur plan vitré sous pression atmosphérique est le capteur le plus utilisé actuellement pour la production d'eau chaude sanitaire. Simple et solide, il présente également un bon rapport performance/prix. Son utilisation est recommandée pour la production de chaleur jusqu'à 80°C.



Figure II.2 : capteur plan

II.3.2.1.Composition d'un capteur plan standard [6]

Les capteurs plans (Figure II.3) comportent un absorbeur métallique plan d'un seul tenant logé dans un bâti fourni d'origine. Le capteur est convenablement isolé thermiquement sur ses faces latérales et inférieures. La face supérieure est munie d'une couverture transparente. Deux tuyaux de raccordement sont prévus pour l'entrée et la sortie du fluide caloporteur.

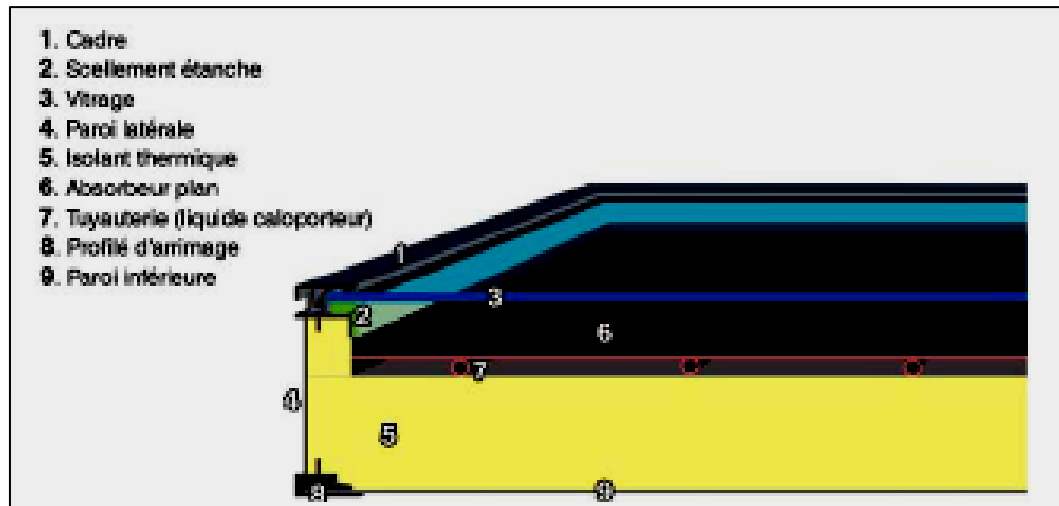


Figure II.3 : Coupe d'un capteur plan standard

Sans vitrage les collecteurs pèsent en moyenne 8 à 12 kg/m², avec vitrage de 15 à 20 kg/m². Ils sont proposés en différentes tailles allant de 1.5 à plus de 10 m². La taille d'un module moyen est d'environ 2 m², pour un poids d'environ 40 kg.

II.3.2.1.1.Absorbeur

L'élément central d'un capteur plan est l'absorbeur. Il est composé d'une plaque métallique bonne conductrice de chaleur (Cuivre, aluminium ; en une feuille ou découpé en ailettes), pourvue d'un revêtement absorbant mince et lié intimement à la tuyauterie convoyant le circuit caloporteur (généralement en cuivre). Le rayonnement solaire atteignant l'absorbeur est principalement transformé en chaleur et partiellement réfléchi. Le rayonnement solaire absorbé génère de la chaleur qui est ensuite transmise par conduction au fluide caloporteur. Le fluide transporte alors cette chaleur vers le ballon de stockage.

Il existe également des absorbeurs sans réseau de tuyauterie. Ils sont alors composés de deux plaques profilées (généralement en acier inoxydable, avec relief de type « coussin » ou autre) soudées l'une à l'autre, permettant la circulation du fluide entre les plaques.

L'absorbeur a pour fonction de capter un maximum de chaleur. Pour cette raison, sa surface doit présenter le coefficient d'absorption du rayonnement solaire le plus élevé possible et le

coefficient d'émission de chaleur le plus faible possible. Ceci est obtenu via le dépôt d'une couche absorbante sélective sur la face supérieure de l'absorbeur. Par rapport aux simples peintures noires laquées, cette couche présente une structure moléculaire particulière qui optimise la captation du rayonnement solaire tout en minimisant la réémission de chaleur.

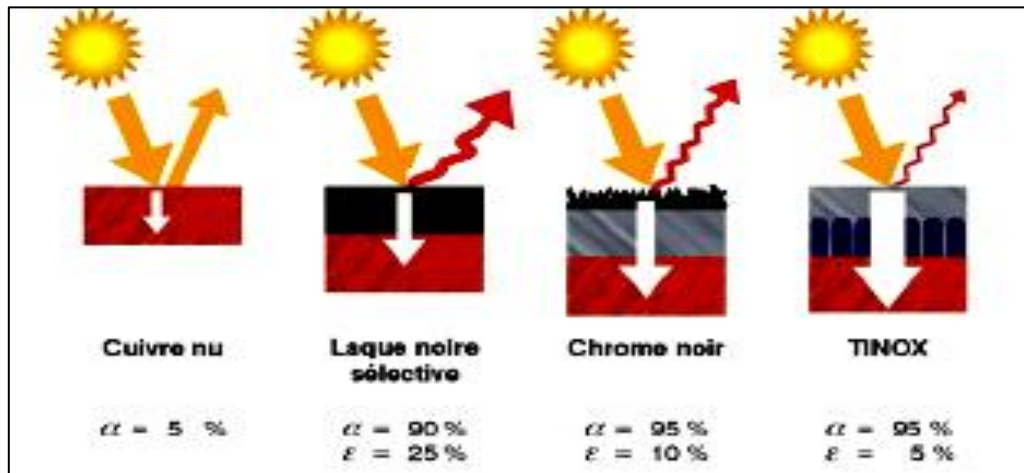


Figure II.4: Absorptivité et émissivité de divers types de revêtements

Jusqu'il y a peu, la couche sélective des absorbeurs était essentiellement composée d'oxyde de chrome ou de nickel noir. Depuis quelques années, de nouveaux revêtements sélectifs (Figure II.4) sont apparus sur le marché soit mis en œuvre sous vide, soit déposés par «sputtering » (TINOX, ...). Le rendement de captation énergétique de ces nouveaux revêtements est plus élevé que celui des oxydes de chrome et de nickel tant à haute température que pour un rayonnement solaire réduit. Un deuxième gain est obtenu au niveau des procédés de production qui nécessitent nettement moins d'énergie et sont nettement moins polluants que par le passé.

• **Différentes formes d'absorbeur**

On distingue différentes formes d'absorbeur (Figure II.5), dont :

- a) les absorbeurs à plaques ou ailettes de cuivre et tuyauteries de cuivre soudées (les plus courants),
- b) les absorbeurs à plaques ou ailettes de cuivre et tuyauteries enchâssées,
- c) les absorbeurs à plaques ou ailettes d'aluminium et tuyauteries de cuivre enchâssées (type Sun trip),
- d) les absorbeurs à plaques d'aluminium profilées soudées,
- e) les absorbeurs à plaques d'acier inoxydable profilées soudées (type Energie Solaire SA)

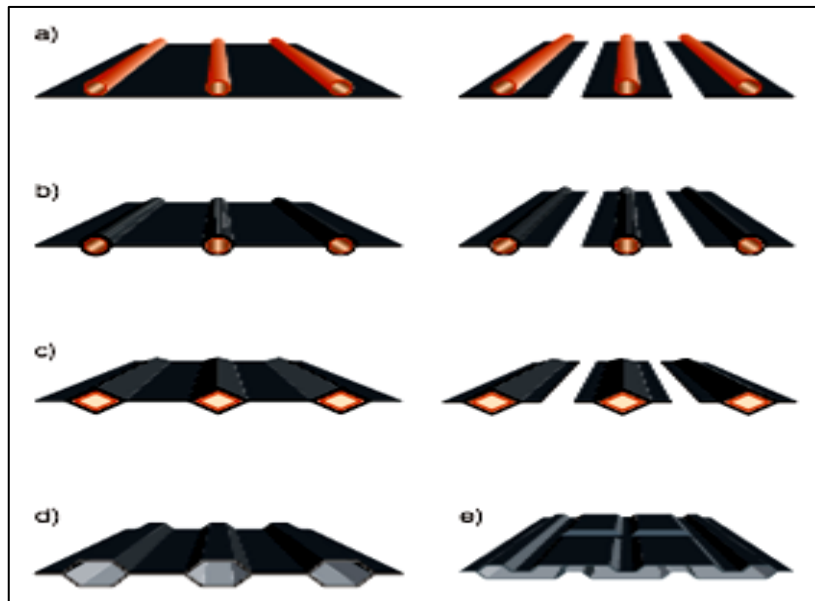


Figure II.5 : Diverses formes d'absorbeurs

Le cuivre est un excellent matériau pour la plaque de l'absorbeur étant donné son excellente conductivité. Il permet également une bonne liaison avec le réseau de tuyauterie caloportrice par soudure cuivre-cuivre ce qui garantit un bon transfert de chaleur au fluide caloporteur. On distingue également les absorbeurs par les différentes formes de réseau de tuyauteries primaires auxquels ils sont liés (Figure II.6) :

- a) les absorbeurs à conduites en serpentin,
- b) les absorbeurs à conduites parallèles unidirectionnelles,
- c) les absorbeurs à conduites parallèles aller-retour.

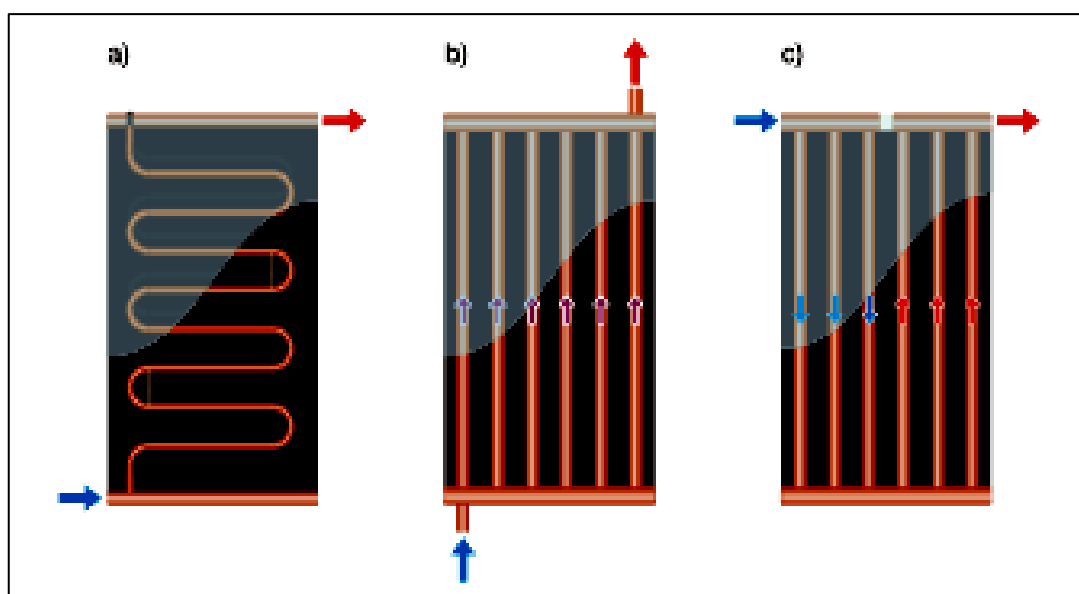


Figure II.6 : Principaux types de réseau de tuyauteries dans les absorbeurs

II.3.2.1.2. Isolation thermique

Afin de limiter autant que possible les déperditions thermiques de l'absorbeur vers l'environnement, la face postérieure et les quatre côtés des capteurs solaires sont isolés. Les isolants minéraux (laine de verre, laine de roche) sont les plus adaptés étant donné les températures maximales que peut atteindre l'absorbeur (150 à 200°C à l'arrêt – état de « stagnation »). Il est important de s'assurer que les liants utilisés dans ces isolants soient imputrescibles et restent stables à ces températures.

Toute évaporation du liant entraîne une condensation sur la face vitrée et une diminution du coefficient de transmission lumineuse du vitrage (détectable à l'œil nu).

Des plaques de polyuréthane libre de HCFC sont également utilisées. Ces matériaux doivent être protégés des températures supérieures à 60°C, et sont généralement séparés des absorbeurs par une couche d'isolant minéral (isolation en deux couches).

Les épaisseurs d'isolant utilisées sont de l'ordre de 50 à 70 mm en face postérieure, et de 20 à 30 mm pour les faces latérales.

Quelques produits rares sur le marché actuellement, présentent une isolation sur la face antérieure (Figure II.7). Il s'agit soit d'un film anti-convection tendu entre l'absorbeur et le vitrage, soit d'un isolant transparent.

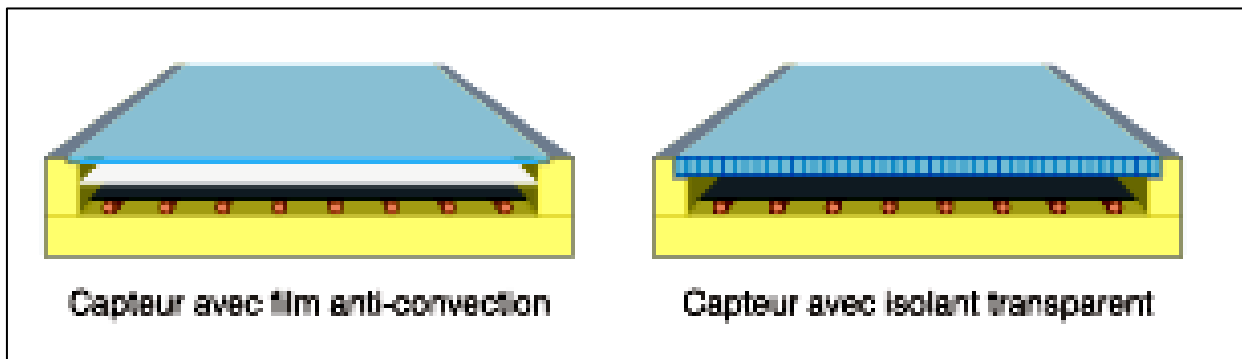


Figure II.7 : Capteurs plans de types spéciaux

II.3.2.1.3. Couverture transparente

L'absorbeur et l'isolation thermique sont placés dans un bâti fermé dont la face avant est fermée par une couverture transparente. L'ensemble bâti-vitrage doit permettre l'établissement d'un « effet de serre » assurant la montée en température du capteur.

Le matériau de couverture le plus utilisé est le verre. Il s'agit de verre de sécurité de 3 à 4 mm d'épaisseur, présentant un bon coefficient de transmission du rayonnement solaire (nécessité d'une faible teneur en fer du verre). Les matériaux organiques transparents (polycarbonates, ...) sont rarement utilisés pour des raisons de performance et de stabilité

dans le temps. Le recours au double vitrage a lui aussi été abandonné étant donné son coût.

La couverture transparente doit assurer les fonctions suivantes :

- transmettre un maximum de rayonnement solaire tout au long de la durée de vie des capteurs (composition stable dans le temps),
- minimiser la fraction de rayonnement réfléchi,
- former écran au refroidissement dû au vent et à la convection interne,
- faire écran à l'humidité,
- résister aux sollicitations mécaniques (manipulations, chocs thermiques, ...) et aux températures élevées.

Les verres de couverture utilisés actuellement présentent de plus en plus souvent un traitement de surfaces visant à :

- minimiser les réflexions du rayonnement solaire sur la face extérieure (face d'aspect mat), -
- favoriser la réflexion du rayonnement thermique sur la face intérieure (face d'aspect brillant).

Par rapport au verre solaire standard, un verre antireflet permet d'augmenter le taux de transmission d'énergie solaire de 5 %.

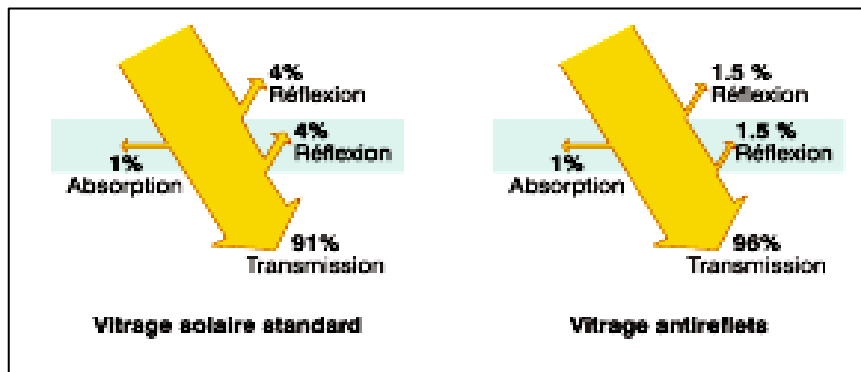


Figure II.8 : Bénéfice d'un vitrage anti reflets

II.3.2.1.4. Bâti (Coffre)

Le bâti a pour fonction de protéger les différents composants du capteur des agressions des conditions extérieures et de faciliter la pose et l'arrimage du capteur au support. Il est habituellement réalisé en aluminium, acier galvanisé ou matière synthétique. Afin de faciliter l'installation des capteurs, le bâti doit :

- résister aux chocs et contraintes mécaniques (manutention lors de l'installation, vent, ...),
- résister à l'usure du temps (UV, corrosion, ...),
- résister aux températures élevées,
- être relativement léger.

II.3.2.1.5. Fluide caloporteur

Le fluide caloporteur a pour fonction de transporter la chaleur des capteurs solaires vers le ballon de stockage. L'eau a pour cela de très bonnes propriétés :

- une capacité calorifique élevée,
- une conductivité thermique élevée,
- une faible viscosité.

Elle est de plus non inflammable, non toxique et bon marché. Mais le domaine d'utilisation des capteurs solaires s'étend à une plage de température très large : de -15°C à plus de 250°C . Or, sous pression atmosphérique, l'eau gèle sous 0°C et se vaporise aux alentours de 100°C . L'addition de propylène glycol (à hauteur de 40%) permet de repousser la résistance au gel de l'eau jusqu'à -23°C , et d'élever sa température d'ébullition à 150°C , voire plus en fonction de la pression régnant dans le circuit primaire.

II.3.2.1.6. Joints

Les joints unissant la couverture transparente au bâti doivent empêcher toute entrée d'eau, de poussière et d'insectes à l'intérieur du capteur. Ils sont généralement constitués d'EPDM ou d'un caoutchouc à base de silicone. La face arrière du capteur est généralement scellée aux parois latérales par un joint de silicone.

II.3.2.1.7. Sonde de température

La plupart des capteurs plans sont équipés de série d'une sonde de température, élément fondamental du système de régulation du chauffe-eau solaire. Selon le modèle, cette sonde est soit plongée dans la tuyauterie de sortie du fluide caloporteur (connexion vissée au moyen d'un connecteur en « T »), soit fixée à l'absorbeur. La température mesurée doit refléter le plus fidèlement possible la température de l'absorbeur à la sortie du capteur solaire.

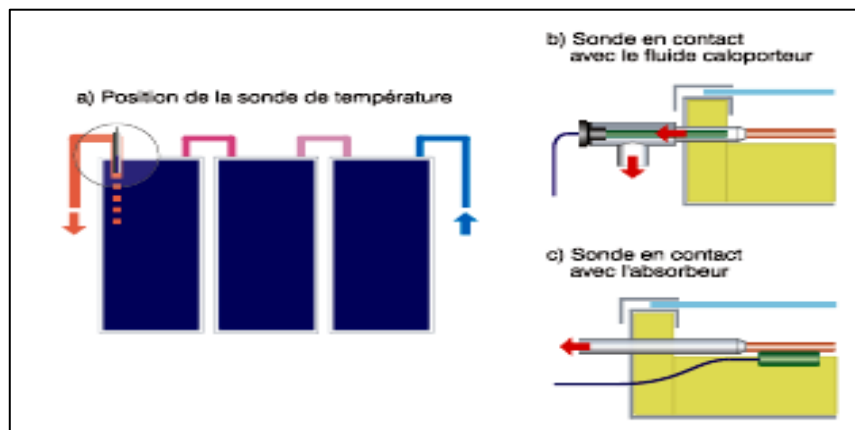


Figure II.9 : Positionnement de la sonde de température

II.3.2.2. Fonctionnement d'un capteur plan standard [6]

Le rayonnement solaire (E_0) atteint la couverture transparente. Une partie du rayonnement (E_1) est réfléchi par le vitrage (réflexion au niveau des deux faces) vers l'environnement. Le rayonnement ensuite atteint la couche sélective de l'absorbeur où une nouvelle fraction (E_2) est réfléchi vers l'extérieur du capteur. Le reste du rayonnement est transformé en chaleur au niveau de l'absorbeur. L'absorbeur transmet alors cette chaleur par conduction vers le fluide caloporteur (chaleur utile) mais aussi par rayonnement et convection à son environnement (pertes).

Une bonne isolation de la face postérieure et des côtés du capteur (laine minérale ou polyuréthane sans HCFC) permet de minimiser les déperditions thermiques (Q_1).

De même, la couverture transparente en face antérieure a pour but de limiter les pertes thermiques (Q_2) par rayonnement et convection depuis l'absorbeur.

Du rayonnement initial (E_0), il ne reste donc toutes pertes déduites (E_1 , E_2 , Q_1 , Q_2) que la chaleur utile (Q_3).

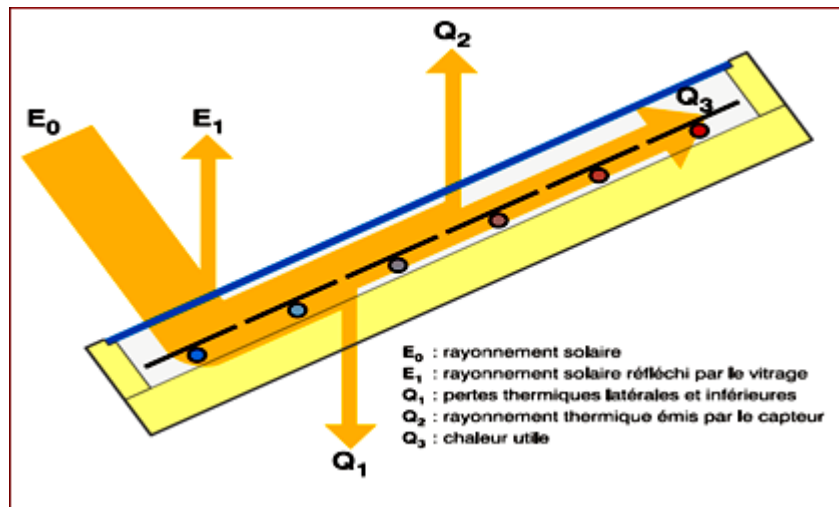


Figure II.10 : Flux d'énergie dans un capteur solaire

II.3.3. Capteurs sous vide [6]

Le fonctionnement des capteurs sous vide est semblable à celui des capteurs plans atmosphériques. Le rayonnement solaire arrivant sur le capteur traverse la couverture vitrée et atteint l'absorbeur à la surface duquel il se transforme en chaleur. Cette chaleur est alors transférée par conduction de l'absorbeur métallique au collecteur d'évacuation de chaleur et ensuite au fluide caloporteur. La principale différence est que dans le cas des capteurs sous vide la diminution des pertes thermiques de l'absorbeur vers l'environnement est obtenue par

la réalisation d'un vide d'air partiel autour de l'absorbeur et non pas par l'adjonction de matériaux isolants.

Les absorbeurs des capteurs sous vides présentent les mêmes caractéristiques et doivent répondre aux mêmes exigences que ceux des capteurs plans sous pression atmosphérique.

II.3.3.1. Capteurs tubulaires sous vide [6]

Dans les capteurs tubulaires, la diminution des pertes thermiques s'obtient en logeant chaque ailette de l'absorbeur dans un tube cylindrique transparent, dans lequel on réalise ensuite un vide d'air partiel (de manière semblable à ce qui se fait pour les bouteilles « thermos »). Afin de vaincre totalement les pertes de chaleur dues à la convection, il faut réaliser un vide d'air à hauteur de 10^{-2} bar. Un vide plus poussé (10^{-6} bar) permet de vaincre les pertes par conduction. Il n'est pas possible par contre d'éliminer les pertes par rayonnement au moyen d'un vide d'air, étant donné que le transfert de chaleur par rayonnement ne nécessite pas la présence d'aucune matière. Elles peuvent être réduites, tout comme dans le cas des capteurs plans, par l'application d'une couche superficielle sélective (coefficient d'émission ϵ plus petit). Les pertes de chaleur vers l'environnement du capteur sont de cette manière fortement diminuées. Même par des températures d'absorbeur dépassant 120°C , la face extérieure du tube de verre reste froide. Dans la plupart des tubes sous vide, l'air est évacué jusqu'à une pression de 10^{-5} bar (la marque Thermo LUX va même jusqu'à 10^{-8} bar).

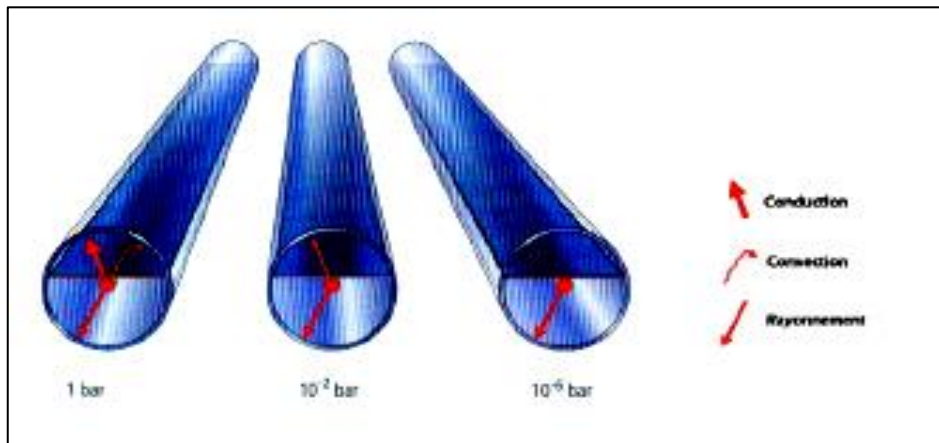


Figure II.11: Principe de l'isolation par le vide

Les tubes en verre d'un capteur sous vide (généralement constitués de verre épais, borosilicate ou autre) présentent une résistance mécanique élevée leur permettant de reprendre la force due à la très faible pression régnant dans le tube (par rapport à la pression atmosphérique). Ils doivent de plus satisfaire aux mêmes exigences que les couvertures transparentes des capteurs plans atmosphériques.

II.3.3.2. Capteurs plans sous vide [6]

Il n'existe que quelques capteurs plans sous vide sur le marché actuellement. Le mode de construction de ces capteurs est semblable à celui des capteurs plans standard. La différence principale se situe au niveau de l'isolation thermique qui n'est pas réalisée au moyen de laine minérale ou de mousse de polyuréthane mais par un vide d'air partiel (pression d'air réduite à entre 10^{-1} et 10^{-3} bar). Cette faible pression limite les pertes thermiques par convection. De plus, au sein de ce capteur l'air est remplacé par du Krypton sous une pression de 50 mbar (pression atmosphérique = 1000 mbar) afin de réduire les pertes par conduction.

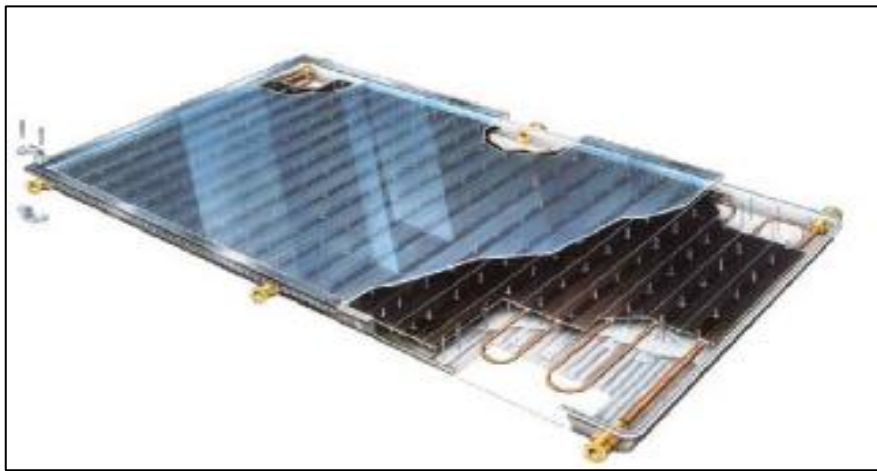


Figure II.12 : Capteur plan sous vide

II.4. Autres types de capteurs plans sous pression atmosphérique [6]

II.4.1. Capteurs plans sous atmosphère modifiée

Il existe sur le marché un certain nombre de capteurs plans où l'air intérieur sous pression atmosphérique est remplacé soit par un gaz rare, soit par de l'air à plus faible pression (capteur sous vide d'air partiel). Ce remplacement a pour but de limiter un peu plus les pertes thermiques par convection de l'absorbeur vers l'environnement (fraction de Q_2 à la Figure II.10). Ces capteurs ont un fonctionnement similaire à celui des capteurs plans atmosphériques décrits ci-dessus.

II.4.2. Capteurs stockeurs

Un capteur stockeur regroupe dans un même bâti un capteur et un ballon de stockage placé horizontalement. Cette configuration permet d'épargner échangeur de chaleur, tuyauterie du circuit primaire, pompe de circulation et régulation. La post-chauffe de l'eau chaude est assurée par un chauffe-eau à gaz modulant placé en aval du capteur stockeur. Ce type de

Le système peut constituer une alternative intéressante au capteur plan standard de par son rapport performance/prix.



Figure II.13: Capteurs stockeurs

II.4.3. Capteurs hybrides

Les collecteurs hybrides sont une combinaison de capteurs thermiques plans et de cellules photovoltaïques qui transforment le rayonnement lumineux en électricité. La chaleur résultante est utilisée pour produire de l'eau chaude sanitaire. Les cellules photovoltaïques sont isolées électriquement des surfaces absorbantes thermiques reliées entre elles par des conduites où circule un liquide assurant l'évacuation de chaleur. Le rendement électrique obtenu est du même ordre que celui des cellules photovoltaïques classiques. Le rendement thermique se situe au niveau de celui de capteurs plans vitrés équipés d'absorbeurs non sélectifs. Ces capteurs sont encore en phase de développement. Il est encore trop tôt pour savoir si un tel produit percera un jour sur le marché. Plusieurs fabricants proposent actuellement des absorbeurs thermiques et des cellules photovoltaïques séparés l'un de l'autre mais logés dans le même bâti.

II.4.4. Capteur à concentration solaire (parabolique)

Il existe d'autres types de capteur, appelés capteurs à concentration. Ils sont plus complexes et onéreux. Il s'agit de réflecteurs qui renvoient et concentrent l'énergie solaire sur un tuyau, une surface où circule un fluide caloporteur. Cette concentration entraîne une augmentation de l'intensité, et les températures obtenues sur le récepteur peuvent atteindre plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de degrés Celsius. Pour être efficace, les concentrateurs doivent se déplacer pour suivre la course apparente du soleil. De telles installations servent notamment en Arabie saoudite pour la désalinisation de l'eau de mer par évaporation. Mais, elles sont le

plus souvent sollicitées pour produire de l'électricité via un cycle thermodynamique, qui sert à convertir l'énergie thermique en électrique. Au Burkina Fasso il est utilisé pour la production du pain dans certaines régions.



Figure II.14: Capteur à concentration solaire

II.5. Bilan thermique global du capteur plan en régimes permanent et transitoire [7]

Les équations qui caractérisent le fonctionnement d'un capteur solaire en régimes permanent et transitoire sont données respectivement par [28] :

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

$$Q_a = Q_u + Q_p + Q_t \quad (\text{II.2})$$

Où :

Q_a : puissance incidente du rayonnement absorbé par unité de surface.

Q_p : pertes thermiques.

Q_u : puissance utile récupérée par le fluide caloporteur.

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

Pour évaluer l'énergie absorbée par le capteur, il faut théoriquement distinguer dans l'énergie incidente, les parts du rayonnement direct et du rayonnement diffus, en les affectant de coefficients de transmission et d'absorption appropriés. Toutefois, dans la pratique, on

considère la composante normale au plan du capteur, du rayonnement solaire global incident.

Dans ces conditions, la puissance absorbée, en Watts, est donnée par l'expression [8] :

$$Q_a = \tau_s \cdot \alpha_s \cdot E_0 \cdot S \quad (\text{II.3})$$

Dans laquelle :

- S : la surface d'entrée du capteur en m² ;

- τ_c et α_p : les valeurs moyennes des coefficients de transmission de la couverture transparente et d'absorption de l'absorbeur sur l'ensemble du spectre solaire.

- E_0 : l'éclairement énergétique global en W/m² (de surface d'entrée), mesuré dans le plan du capteur.

Compte tenu de l'épaisseur relativement faible d'un capteur plan, on peut, en première approximation, négliger les pertes par les parois latérales et ne considérer que les pertes par les faces avant et arrière. La puissance correspondante est alors :

$$Q_p = Q_{AV} + Q_{AR} \quad (\text{II.4})$$

Ramenées à l'unité de surface de l'absorbeur, toutes les pertes, qui sont des flux thermiques du capteur vers l'extérieur, peuvent être exprimées en fonction de la différence de température qui les provoque, par :

$$Q_{AV} = U_{AV} \cdot S \cdot (T_m - T_a) \quad (\text{II.5})$$

et

$$Q_{AR} = U_{AR} \cdot S \cdot (T_m - T_a) \quad (\text{II.6})$$

Soit :

$$Q_A = U \cdot A \cdot (T_m - T_a) \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$U = U_{AV} + U_{AR} \quad (\text{II.8})$$

U_{AV} : coefficient de déperditions thermiques par la face avant (W/m². K) ;

U_{AR} : coefficient de déperditions thermiques par la face arrière (W/m². K) ;

T_m : température moyenne de l'absorbeur ;

T_a : température ambiante moyenne.

II.6. Rendement instantané d'un capteur [9]

La vitalité d'une installation solaire dépend de ses performances, de sa longévité et de son prix. Les performances d'un capteur sont fonction des paramètres propres au capteur qui sont:

dimension, débit, température maximum d'utilisation, nature du matériau, rendement. Ce dernier paramètre joue un rôle primordial compte tenu, entre autres, du niveau de température à atteindre et des variations du rayonnement solaire en un point. Le rendement instantané du capteur en régime permanent est défini par la relation suivante [1] :

$$\eta = \frac{Q_u}{E_0} = \frac{Q_a - Q_p}{E_0} = (\tau_c \cdot \alpha_p) - \frac{Q_p}{E_0} \quad (II.9)$$

E_0 : l'éclairement solaire reçu par le capteur.

τ_c : coefficient de transmission solaire de la couverture transparente.

α_p : coefficient d'absorption solaire de la plaque constituant la surface absorbante.

II.6.1.Effet de la température d'entrée du fluide caloporteur [10]

D'après la figure II.15, on voit que la diminution de la température d'entrée du fluide caloporteur fait augmenter le rendement instantané du capteur. En effet, la température d'entrée du fluide de travail agit directement sur l'énergie utile récupérée par le fluide caloporteur qui est en relation proportionnelle avec la différence de température du fluide entre la sortie et l'entrée. Donc, plus la température d'entrée du fluide caloporteur diminue, plus l'énergie utile récupérée par le fluide caloporteur augmente, d'où l'augmentation du rendement instantané et inversement

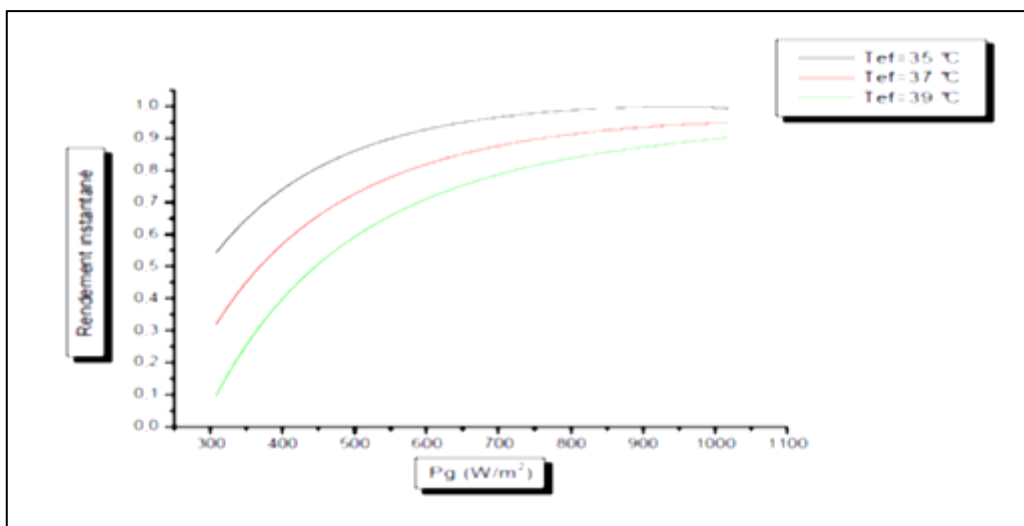


Figure II.15 : Variation du rendement instantané en fonction de la température d'entrée du fluide caloporteur

II.6.2.Effet de la température de l'absorbeur [10]

La figure II.16 montre l'évolution du rendement instantané en fonction de la température de

l'absorbeur. On remarque qu'il existe une fonction croissante entre le rendement instantané et la température de l'absorbeur. Ceci s'explique par le fait que plus la température de l'absorbeur augmente, plus la chaleur transmise au fluide de travail est importante d'où l'augmentation du rendement instantané du capteur.

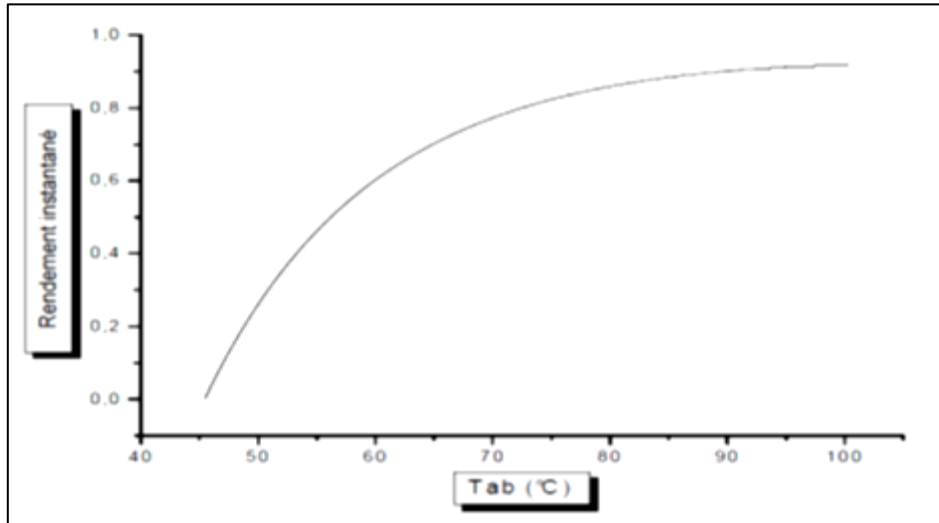


Figure II.16: Effet de la température de l'absorbeur sur le rendement du capteur

II.6.3. Courbes caractéristiques et domaines d'application [6]

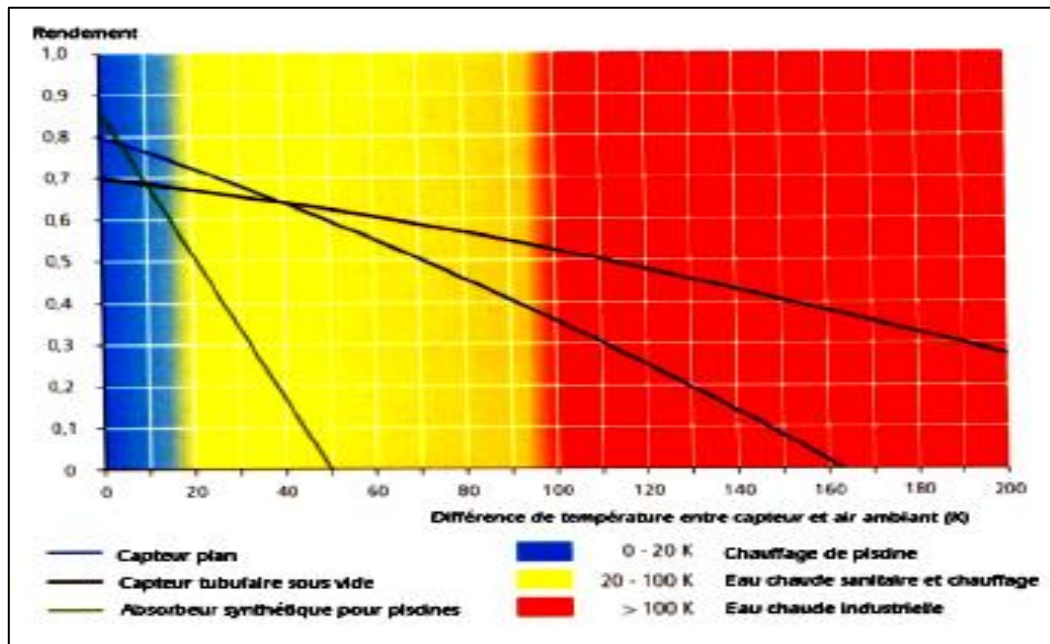


Figure II.17 : Courbes caractéristiques de différents types de capteurs

La Figure (II.17) présente les courbes de rendement caractéristiques des différents types de capteurs (absorbeur pour piscine, capteur plan, capteur tubulaire sous vide) sous un rayonnement solaire global correspondant à celui de nos régions. Pour une différence de température nulle entre le capteur et l'air environnant, chacun des types de capteur présente son rendement le plus élevé (η), le rendement optique. Pour leur température maximale de fonctionnement (température de stagnation), le rendement est pratiquement nul.

II.7.Installation du capteur [11]

II.7.1.Placement en toiture inclinée

Si l'orientation est favorable, le placement en toiture inclinée est souvent idéal : Placement en hauteur qui permet de limiter l'effet d'ombre de l'environnement ; inclinaison déjà présente qui permet de se passer du système de support ; intégration constructive esthétique ; pertes thermiques à l'arrière du panneau limitées (dans le cas de capteurs intégrés dans la toiture).

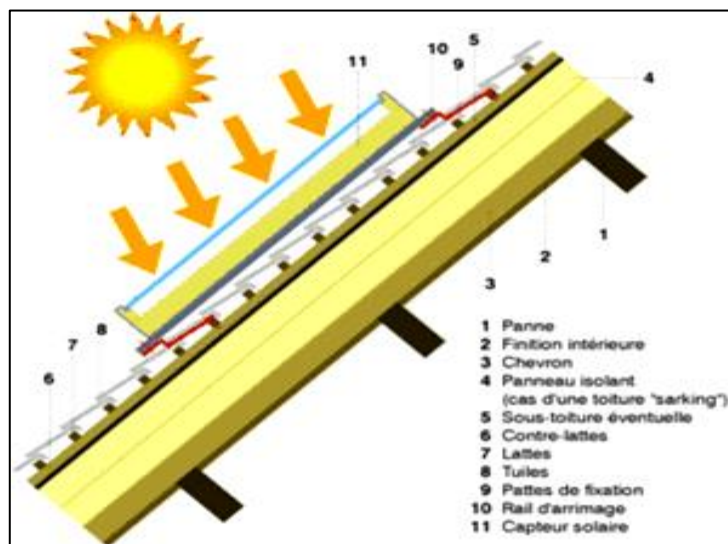


Figure II.18:placement en toiture inclinée [6]

II.7.2.Placement en toiture plate

Dans ce cas, les capteurs sont placés sur des supports métalliques, ce qui permet d'optimiser leur inclinaison et leur orientation. L'ombrage généré par les panneaux entre eux déterminera l'espacement nécessaire entre deux rangées de capteurs. La résistance de la toiture doit être particulièrement étudiée, car le lestage nécessaire à la stabilité des capteurs augmente considérablement la surcharge (80 à 100 kg par m² de capteur). De plus, lorsque les couches superficielles de la toiture ne présentent pas une résistance suffisante, il faudra parfois ancrer

le support directement sur la structure de la toiture (chevrons,...). Des distances de sécurité par rapport au bord de la toiture sont aussi imposées.

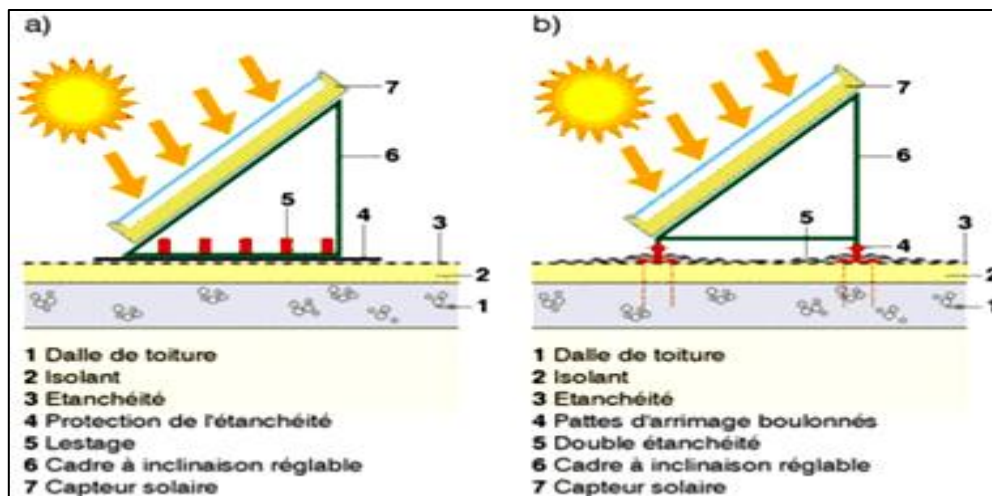


Figure II.19 : placement des capteurs en toiture plate [6]

II.7.3.Placement au sol

Lorsque la toiture présente une inclinaison trop importante, une mauvaise orientation ou encore une surface trop réduite, on pourra opter pour une installation au sol.

Dans ce cas, on veillera à :

Minimiser la distance entre les capteurs et le stockage afin de réduire au maximum les pertes thermiques par les tuyauteries. Placer les capteurs dans un endroit protégé pour éviter tout risque de vandalisme (attention à l'ombrage).

II.7.4.Façade

La pose des capteurs sur façade est aussi possible (l'intégration comme bardage l'est aussi) mais présente souvent des désavantages : Ombrage généré par le bâtiment ; exposition réduite (30% de moins par rapport à l'optimum (peine sud)) ; orientation et inclinaison peu favorables (l'effet peut être limité si on utilise un support ou des tubes sous vide réorientés) ; surfaces souvent limitées ; etc.

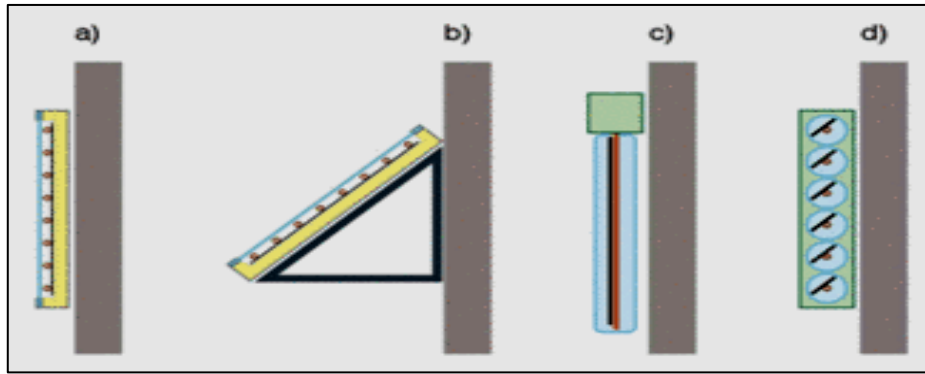


Figure II.20: placement des capteurs sur façade

II.8. Le réservoir [12]

Le réservoir devra être à mesure de subvenir aux besoins journaliers de l'habitation tant en terme de température d'utilisation désirée qu'en terme de quantité souhaitée. Il est à noter cependant que la température de stockage est différente de celle d'utilisation du fait des pertes occasionnées selon le type de montage. Il devra en outre résister à la pression du liquide qui souvent ne dépasse pas 2 bars,

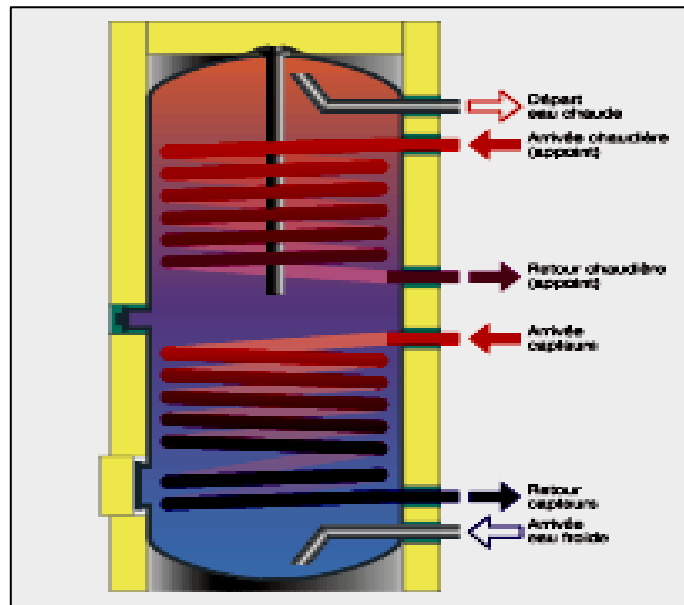


Figure II.21 : Ballon de stockage solaire standard [6]

II.9. Les canalisations [12]

Pour la circulation de l'eau entre l'insolateur, le réservoir et le point d'utilisation, on a les canalisations qui sont siège de pertes de chaleur. Pour vaincre cette déperdition thermique, on a besoin d'un bon calorifugeage du circuit de canalisation. Cette dernière tient compte du type de circulation (naturelle par thermosiphon ou forcée par une pompe), de la longueur de circuit et des températures désirées.

II.10. Les échangeurs de chaleur [13]

L'échangeur de chaleur est un dispositif dans lequel se réalise un transfert thermique entre deux milieux dû à une différence de température entre les milieux. Le principe de son fonctionnement consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique. De manière générale, les deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi qui est le plus souvent métallique ce qui favorise les échanges de chaleur. On a en général un fluide chaud qui cède de la chaleur à un fluide froid.

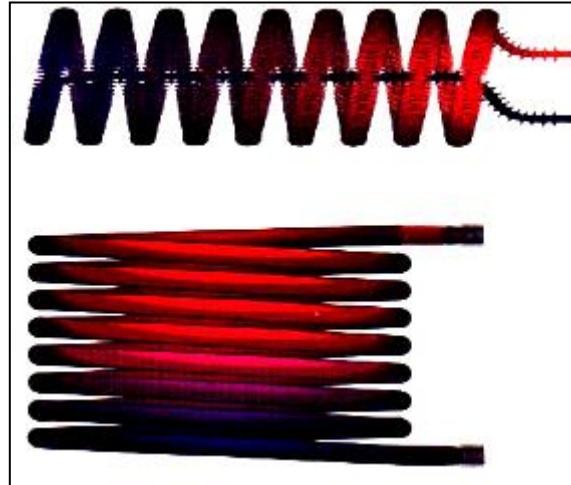


Figure II.22 : échangeur de chaleur [6]

II.11. Les chaudières domestiques [14]

La chaudière domestique est un dispositif permettant de chauffer l'eau, son rôle est essentiellement de transmettre de l'énergie apparaissant sous forme de chaleur à l'eau pour obtenir de l'eau surchauffée sous pression.

II.11.1. Principe de fonctionnement d'une chaudière [15]

Les principaux composants d'une chaudière sont illustrés dans la figure (II.23) Le combustible peut être toute substance qui est brûlée pour fournir de la chaleur ; de l'air est nécessaire à la combustion. La combustion est un mélange de combustible et de l'air brûlant pour produire de l'énergie calorifique. Le foyer est un espace clos à l'intérieur de la chaudière dans lequel se produit la combustion. Les gaz chauds qui en résultent entrent en contact avec la surface d'échange thermique avant d'être évacués à l'atmosphère par une cheminée. Le gaz évacué de la chaudière est appelé gaz de combustion. La chaleur fournie par la flamme de combustion et le gaz chaud chauffe l'eau d'alimentation et la transforme en eau chaude.

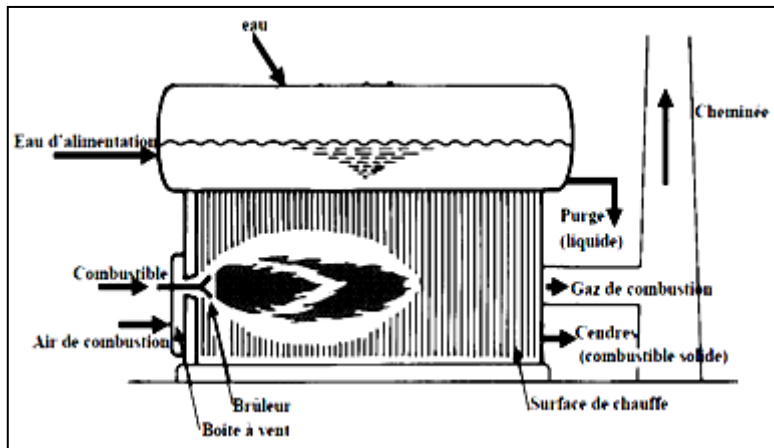


Figure II.23 : Fonctionnement d'une chaudière

II.11.2. Type des chaudières domestiques [16]

Les chaudières sont classées en trois catégories haut rendement, basse température et condensation. Les corps de chauffe sont en fonte avec éléments démontables, en cuivre pour les petites puissances.

I.11.2.1. Les chaudières haut rendement

Elles sont équipées d'un échangeur fumées/eau et fonctionnent avec des températures de retour d'eau assez hautes (pas de condensation). Leurs rendements sont de l'ordre de 86% sur PCI.



Figure II.24 : Chaudière à haut rendement

I.11.2.2. Les chaudières basses température

Fonctionnent avec des températures de retour d'eau de l'ordre de 40°C. Elles sont donc plus économiques et présentent un rendement autour de 97% sur PCI.



Figure II.25: une chaudière à basse température

I.11.2.3. Les chaudières à condensation

Elles sont prévues pour condenser en permanence la vapeur d'eau contenue dans les fumées. En théorie, il est possible d'atteindre un rendement de 111% sur PCI (la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau représente les 11% de PCI).

L'installation d'une chaudière à condensation est indiquée pour des installations de chauffage à basse température afin de profiter de la condensation tout au long de la saison.

Pour être efficace, il faut que la température de retour d'eau soit basse. Cela implique que la température de départ d'eau soit au maximum de 60°C avec des émetteurs basse température (chaleur douce). Pour cela il convient de réguler la température de départ plutôt que d'agir sur une vanne de mélange.



Figure II.26 : une chaudière à condensation

II.12. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les différents types des capteurs et ces différents composants, et le matériel de stockage nécessaire pour l'installation, ainsi que les différentes chaudières utilisées comme appoint à l'installation.

CHAPITRE III

III.1.Introduction [17]

L'application actuelle la plus répandue de l'énergie solaire, est la technologie des CES, qui peuvent être avantageusement utilisés pour les usages domestiques, où la durée d'ensoleillement est supérieure en moyenne à 2000 heures par an ou dans des zones montagneuses de régions tempérées où le ciel est particulièrement dégagé. Le chauffe-eau solaire est l'un des systèmes solaires thermiques qui peuvent être mis en application avec peu de moyen permettant d'obtenir des performances importantes pour la production de l'eau chaude sanitaire grâce au faible niveau de température demandé (entre 45°C et 60°C).

III.2. Production d'eau chaude par énergie solaire [18]

Une installation de production d'eau chaude sanitaire par l'énergie solaire comporte en général 4 sous-ensembles :

III.2.1. Un sous ensemble de captage

Le sous ensemble comprend les capteurs solaires, la boucle primaire ou solaire et un échangeur de chaleur.

III.2.2. Un sous ensemble de stockage

Il s'agit généralement d'un ou plusieurs ballon(s) d'eau, bien isolé(s) thermiquement. Le stockage permet de différer la demande de puisage par rapport au moment de la production solaire.

III.2.3. Un sous ensemble d'appoint

Pendant une bonne partie de l'année, un appoint de chaleur est nécessaire pour atteindre la température minimale de la boucle sanitaire (en général 60 °C). Cet appoint de chaleur peut être fourni par un moyen traditionnel de production de chaleur (chaudière, résistance électrique, pompe à chaleur,...).

III.2.4. Un sous ensemble de distribution

C'est la partie de l'installation qui distribue l'eau chaude sanitaire aux différents points de puisage.

III.3.Les boucles de l'installation [18]

III.3.1.Boucle solaire fermée (indirecte)

Si la boucle est fermée, le fluide qui chauffe dans les capteurs solaires et celui qui arrive aux points de puisages (douche, pasteurisateur...) sont distincts : l'eau de consommation est indirectement chauffée à travers un échangeur par le fluide caloporteur du circuit solaire

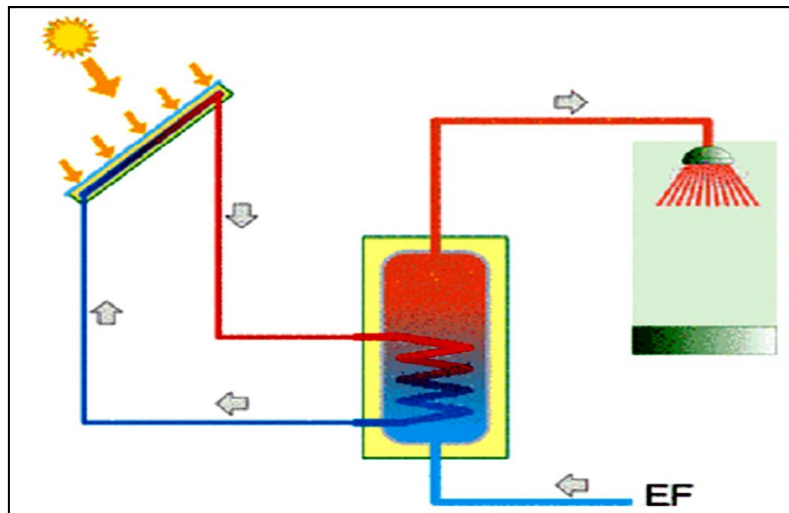


Figure III.1: boucle solaire fermée [6]

III.3.2. Boucle solaire ouverte (directe)

La boucle est dite ouverte, l'eau qui circule dans les capteurs est la même que celle qui est consommée aux points de puisage. Ce type de circuit est rarement utilisé en Europe, notamment à cause des problèmes liés au gel. On le trouve donc plus souvent dans les pays chauds, où les capteurs constituent le seul moyen de chauffage.

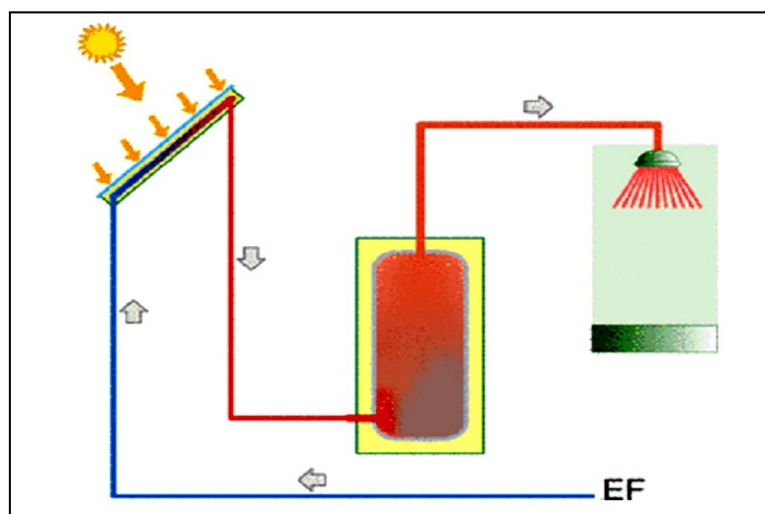


Figure III.2 : boucle solaire ouverte [6]

III.4. Les types d'un système solaire thermique

III.4.1. Le chauffe-eau solaire fonctionnant en thermosiphon [19]

C'est un système efficace qui permet d'assurer la production d'eau chaude sanitaire avec un faible coût d'installation.

La circulation naturelle par thermosiphon d'eau résulte de la différence entre la densité de l'eau contenue dans l'absorbeur et celle dans le ballon (figure III.1).

$$\Delta P(m) = g \cdot H \cdot (\rho_1 - \rho_2) \quad (I.1)$$

ΔP : pression motrice due au phénomène de thermosiphon (Pa)

Table III.1: Variation de la masse volumique de l'eau en fonction de la température

Température(C)	10	20	30	40	50	80
Masse volumique de l'eau (kg/m ³)	999.73	998.23	995.67	992.2	988.1	971.8

g : la gravité =9,81 (m/s²)

H : différence de hauteur entre le milieu du capteur et le milieu du ballon (m).

ρ_1, ρ_2 : Masse volumique de l'eau en fonction de sa température (Kg/m³).

La relation pression-débit $\Delta P(m)$ est fortement influencée naturellement, par la section et la longueur des canalisations, la rugosité des parois, la progressivité des changements de section, le rayon de courbure des coudes etc...

Les sections de passage et la hauteur doivent être dimensionnées assez largement pour obtenir le débit voulu. Il va sans dire que le circuit doit être agencé pour pouvoir éliminer lui-même les bulles et les poches d'air. Le tableau (III.1) donne la masse volumique de l'eau en fonction de la température. Le circuit d'eau du chauffe-eau solaire doit être réalisé sans contre pente et de façon à avoir une circulation d'eau sans pertes de charge importantes. Lorsque le ballon de stockage de l'ECS se situe séparément et au-dessus des capteurs, le chauffe-eau à convection naturelle ("thermosiphon") peut être installé. Comme dans le chauffe-eau solaire monobloc, c'est la variation de température obtenue par l'échauffement qui entraîne la mise en mouvement du liquide, alors transféré jusqu'au ballon. Le dimensionnement de ce type d'installation doit être effectué de manière à réduire au maximum les pertes de charges dans le circuit. La mise en circulation du fluide s'effectue en général pour des différences de température (capteur/ballon) de 15 °C. Les performances de ce procédé sont relativement réduites en hiver, à cause des fortes déperditions et du faible rendement.

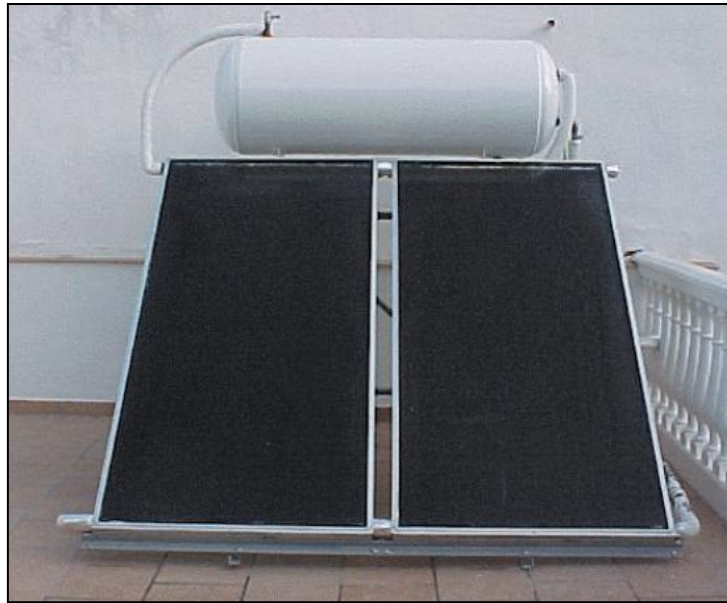


Figure III.3 : chauffe-eau solaire fonctionnant en thermosiphon

L'utilisation du thermosiphon correspond en général à des installations de taille modeste (chauffe-eau solaire individuel de quelques m²).

III.4.2. Le chauffe-eau solaire à éléments séparés [19]

Les chauffe-eaux solaires à éléments séparés ont l'avantage de s'adapter à la plupart des situations. Les capteurs peuvent s'intégrer dans l'architecture du bâtiment, le ballon peut se placer n'importe où dans l'habitation. L'énergie d'appoint peut être intégrée dans le ballon solaire tout comme en aval de celui-ci. Ces systèmes possèdent une régulation qui enclenche le circulateur dès que l'énergie solaire est disponible, ce qui permet des performances supérieures aux systèmes en thermosiphon. La taille de ces chauffe-eaux solaires va de quelques mètres carrés pour les installations individuelles à plusieurs centaines de m² pour la production d'eau chaude solaire collective, (Figure III.5). Le dimensionnement de l'installation dépend en grande partie des besoins de l'utilisateur. Il est inutile de surdimensionner la surface de capteurs si l'on utilise peu d'eau chaude, il y aura du gaspillage d'énergie pendant l'été. On compte en moyenne, pour une famille de 4 personnes, 3 à 5 m² de capteurs pour un volume de stockage de 200 à 300 litres.

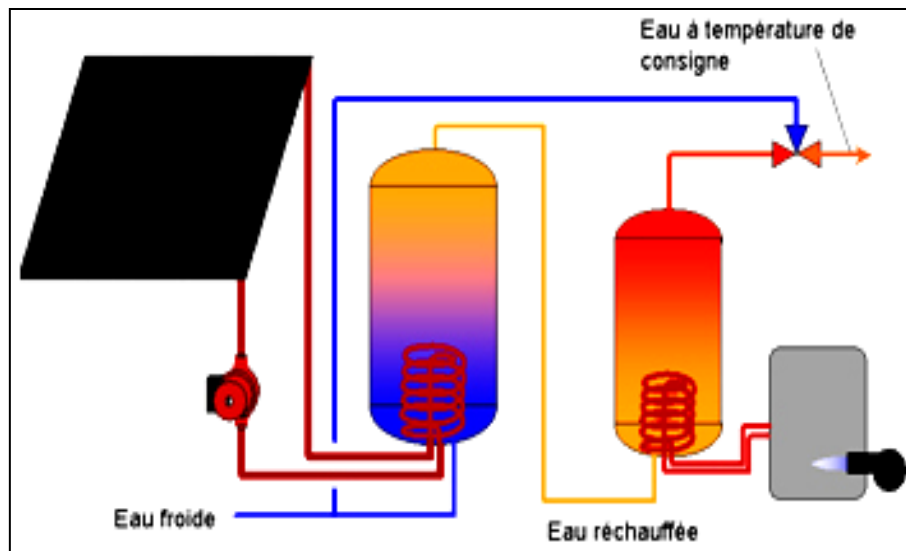


Figure III.4: chauffe-eau solaire à éléments séparés

III.4.3. Les chauffe-eaux solaires monobloc [19]

Ces systèmes sont des ensembles " capteur + ballon " simples et complets qui fonctionnent de manière autonome (figure I.3). Le fluide est chauffé lorsque l'ensoleillement est suffisant. La variation de température obtenue par cet échauffement entraîne la mise en mouvement du liquide, qui est transféré jusqu'au stock situé juste au-dessus du capteur. La position du ballon ne permet pas d'intégrer une source d'énergie d'appoint dans ce système (elle devra, si nécessaire, se trouver en aval du monobloc). La grande simplicité du système le rend fiable dans la durée, et diminue son coût d'investissement. Le coût de fonctionnement est nul. Leur utilisation est adaptée aux pays chauds, afin d'éviter les risques de gel. La dimension modeste du monobloc limite sa production à un usage modeste (chauffe-eau solaire individuel de quelques m²).

III.4.4. Les chauffe-eaux solaires auto-stockeurs [20]

Le principe de fonctionnement est très simple. Comme montré sur la figure III-5, un réservoir d'eau est placé dans un bac thermiquement isolé vers l'extérieur. Il reçoit le rayonnement sur sa face avant qui est recouverte d'un vitrage pour créer l'effet de serre et minimiser les pertes calorifiques par convection. Ce réservoir absorbe une partie du rayonnement solaire incident sur sa surface et la transmet, par conduction, à l'eau stockée. Après une exposition au soleil durant toute la journée et quand l'isolation thermique est suffisante et que les pertes convectives par la couverture transparente sont limitées (double vitrage), ce genre de dispositif permet de garder l'eau stockée assez chaude pour une exploitation durant le soir ou bien le

lendemain au matin. De part cette description sommaire du chauffe-eau solaire de type capteur-stockeur on remarque que ce type de dispositif est simple et ne nécessite pas de gros moyens pour sa réalisation même dans les régions pauvres et isolées.

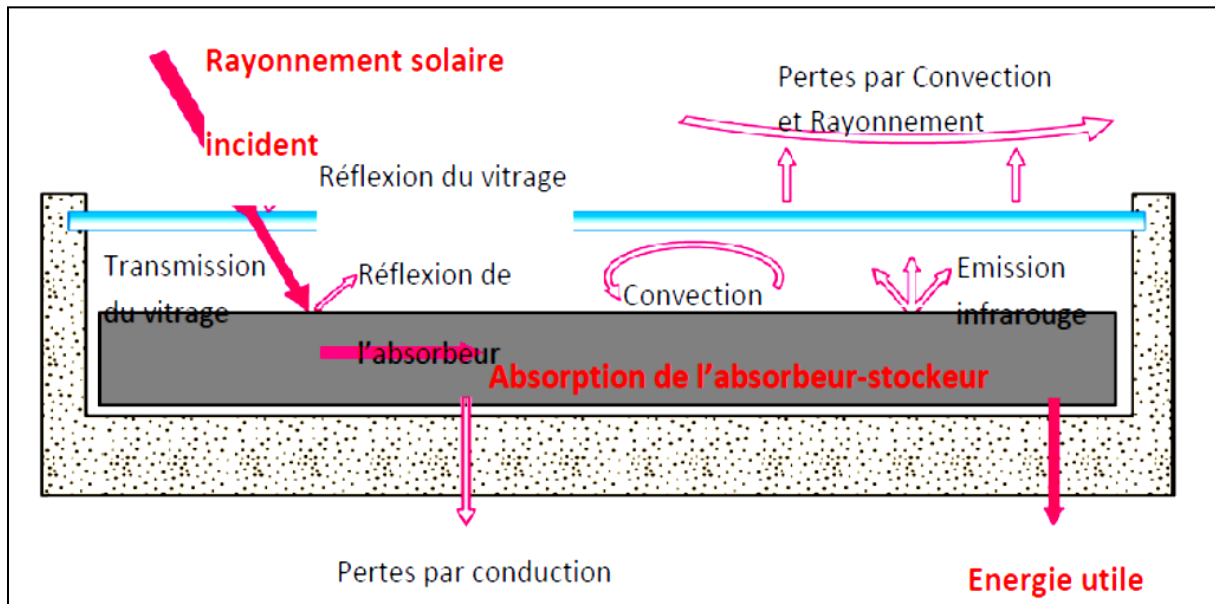


Figure III.5: Schémas descriptif montrant le principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur

Par rapport aux chauffe-eau solaires indirects, où la cuve de stockage représente une grande partie du prix de revient du système ; le capteur-stockeur présente les avantages suivants :

- Un prix de revient peu élevé ;
- Une technologie rustique ;
- Compact, relativement léger et son installation est facile ;
- Une robustesse adaptée aux conditions climatiques hostiles du désert.

III.5. Les appoints à gaz [6]

III.5.1. Le système d'appoint

La répartition annuelle de l'ensoleillement ne permet pas raisonnablement d'envisager une couverture totale des besoins énergétiques liés à la production d'eau chaude sanitaire au moyen de l'énergie solaire seule. Les petits chauffe-eau solaires sont généralement dimensionnés de manière à couvrir 50% des besoins ; les grands chauffe-eau solaires, 20 à 40%. Le chauffe-eau solaire doit donc s'envisager comme une installation de préchauffage de l'eau sanitaire. Pour cette raison, une installation de production de chaleur classique est toujours nécessaire pour fournir l'appoint de chaleur.

III.5.2.Exigences

L'installation d'appoint de chaleur doit permettre de couvrir :

- les besoins en eau chaude sanitaire de pointe
- les besoins journaliers totaux durant les périodes de non ensoleillement.

Si un seul ballon de stockage, muni de deux échangeurs de chaleur (dit « bi-énergie » ou « bivalent »), est installé, l'appoint doit chauffer la partie supérieure du réservoir. Si un seul ballon de stockage muni du seul échangeur solaire (ballon « monovalent ») est installé, l'appoint doit chauffer de manière instantanée l'entièreté du flux prélevé au ballon solaire. Si deux ballons sont installés en série (un ballon de préchauffage solaire suivi d'un ballon d'appoint), l'appoint doit chauffer la partie supérieure, voire l'entièreté, du ballon aval. Dans tous les cas, la puissance de l'appoint doit être adaptée à la durée d'enclenchement permise et au volume d'eau à chauffer. Pour les calculs, on tiendra compte d'une température d'eau à chauffer de 10°C (cas extrême), même si dans la pratique l'énergie solaire amène toujours, au moins, un léger préchauffage.

III.6.L'emplacement de l'appoint

III.6.1.Appoint intégré

Comme expliqué ci-dessus, la partie inférieure d'un ballon bi-énergie est destinée au stockage de l'énergie solaire. La partie supérieure doit quant à elle être amenée à la température de consigne (60°C sont recommandés pour des raisons de prévention des proliférations bactériennes) par l'installation d'appoint.

Dans le cas d'un appoint par un échangeur de chaleur immergé en partie supérieure du ballon, l'échangeur est placé à hauteur du tiers supérieur. L'échangeur est alimenté par une chaudière à gaz, mazout, voire bois (ou toute autre installation de production de chaleur). L'appoint de chaleur est commandé de manière instantanée par la régulation de la chaudière en fonction de la température relevée dans la partie supérieure du ballon et de la consigne. Le volume d'eau correspondant au tiers supérieur du ballon de stockage est généralement largement suffisant pour couvrir les besoins quasi-instantanés en eau chaude sanitaire.

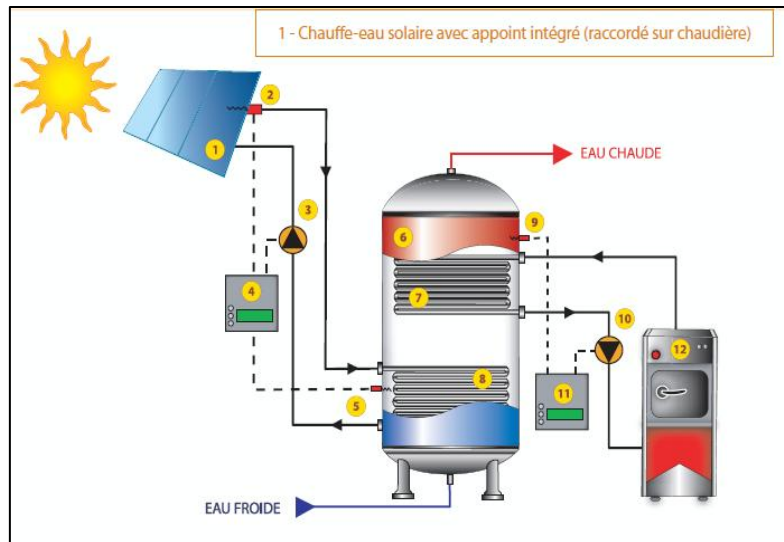


Figure III.6 : chauffe-eau solaire avec appoint intégré

III.6.2. Appoint séparé

Le cas d'un ballon d'appoint placé en aval d'un ballon de préchauffage solaire n'est pas très différent de celui d'un ballon biénergie classique. L'élément de chauffe (échangeur d'appoint ou résistance électrique) peut dans ce cas être placé en partie basse du ballon d'appoint.

Dans le cas d'un appoint via un échangeur, le volume du ballon d'appoint est dimensionné de manière à couvrir les besoins quasi-instantanés en eau ; dans le cas d'un appoint électrique de nuit, de manière à couvrir les besoins d'une journée entière.

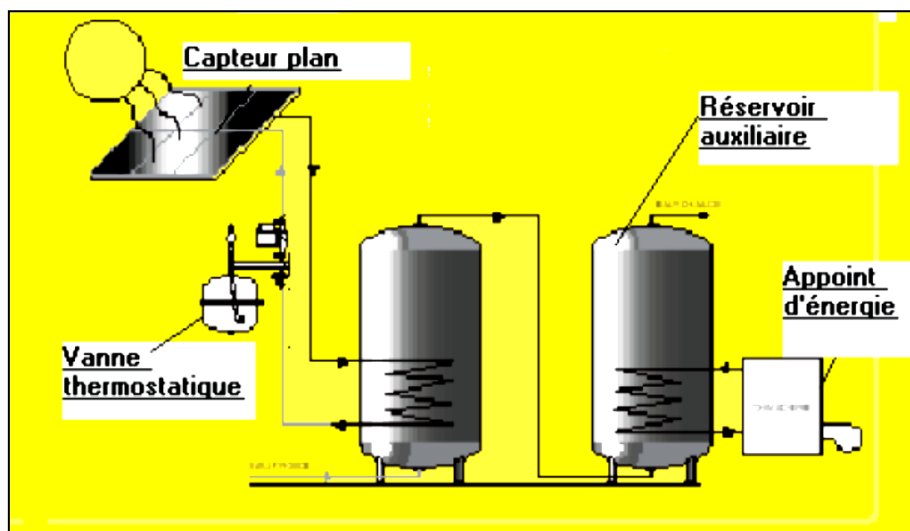


Figure III.7: chauffe-eau solaire avec appoint séparé

III.6.3.Appoint instantané

Les chauffe-eau solaires présentant un réservoir de stockage solaire mono énergie (ou monovalent) doivent assurer l'appoint de chaleur en aval de ce ballon de préchauffage. On

utilise habituellement à cet effet une chaudière apte à la production instantanée de l'eau chaude sanitaire ou un chauffe-eau à gaz à puissance modulante.

En règle générale, on préférera un chauffe-eau à une chaudière qui présente souvent des pertes à vide plus importantes en dehors de la saison de chauffe.

A priori, ce type de configuration paraît le plus économe en énergie car les pertes de stockage y sont les plus faibles. Dans la pratique, cela ne se vérifie que lorsque le rendement de l'appoint instantané est comparable à celui de l'appoint de l'installation biénergie.

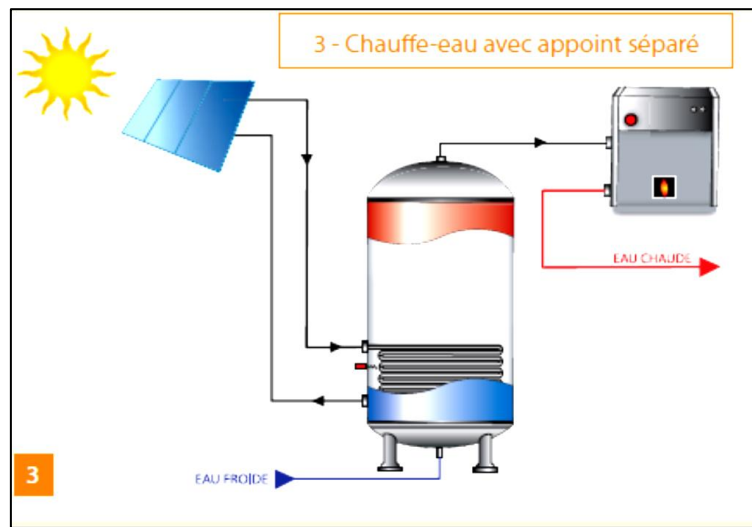


Figure III.8: chauffe-eau solaire avec un appoint instantané

III.7.Régulation circulateur-capteur [19]

La circulation d'eau entre les capteurs et le ballon est assurée par un circulateur commandé par un régulateur différentiel de température qui compare la température de l'eau dans les capteurs à celle de l'eau dans le ballon. Dès que la différence de température est positive, le circulateur est mis en marche afin d'assurer le transfert de chaleur. Cependant, afin d'éviter une circulation sans appoint d'énergie, on attend qu'il y ait une différence positive de 4 à 10 °C (différence de marche), de même l'arrêt du circulateur a lieu dès que l'écart de température positif est de 2°C à 3°C inférieur au différentiel de marche. Parmi les systèmes suscités, nous avons choisi d'étudier le système de chauffe-eau solaire à circulation naturelle (thermosiphon) pour les avantages suivants:

- C'est un système efficace qui permet d'assurer la production de l'eau chaude sanitaire avec un faible coût d'installation.
- Sa grande simplicité, et sa fiabilité.
- Sa bonne adaptation pour les installations de taille modeste (CES individuel¹⁵ de taille

quelques m²).

-Pas de perte de la température si ce n'est celui résultant du réglage volontaire du différentiel de régulation.

III.8. Rappel thermique [21]

III. 8.1.Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température: $T = F(x, y, z \text{ et } t)$.

La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température, nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit *permanent* ou *stationnaire*.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit *variable* ou *instationnaire*.

III. 8.2.Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures.

La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$Q_c = \frac{1}{S} \frac{dq}{dt} \quad (I.2)$$

Où S est l'aire de la surface en m²

On appelle un flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$Q = \frac{dq}{dt} \quad (I.3)$$

III. 8.3.Les différents modes de transfert de chaleur

III.8.3.1.La conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

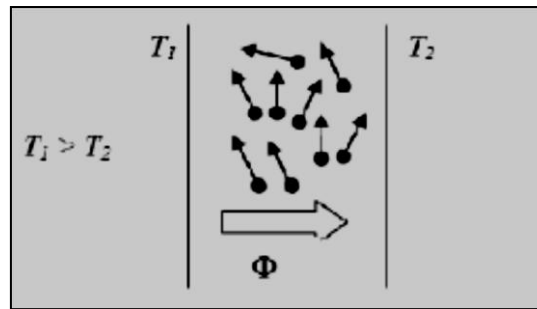


Figure III.9 : Transfert de chaleur par conduction

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$Q = -\lambda S \text{ grad } (T) \tag{I.4}$$

En forme algébrique :

$$Q = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \tag{I.5}$$

Avec :

Q: Le flux de chaleur transmis par conduction [w].

λ: La conductivité thermique du milieu [w/ m. °c].

x: La variable d'espace dans la direction du flux [m].

S: Aire de la section de passage du flux [m²].

Dans un milieu isotrope, la conductivité thermique λ représente une grandeur scalaire positive, caractéristique du milieu, fonction en général de T. Pour un milieu isotrope et homogène λ ne dépend pas de T. Dans de nombreux cas pratiques, lorsque les écarts de température ne sont pas trop élevés, on peut considérer, avec une précision suffisante, λ comme une constante pour un milieu donné.

On trouvera dans le tableau suivant les valeurs de la conductivité thermique λ de certains matériaux les plus courants :

Tableau III.2 : Conductivité des matériaux

Matériaux	Conductivité [W/m °C]
Argent	419
Cuivre	386
Aluminium	204
Verre	0,78
Laine de verre	0,036-0,047

Acier doux	45
Acier inox	14.9
Aire	0.026

III.8.3.2.La convection :

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$Q = h.S. (T_p - T_\infty) \quad (I.6)$$

Avec :

Q : Le flux de chaleur échangé par convection [W].

h : Le coefficient de convection [W/m²°C].

T_p : Température de la surface du solide [°C].

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide [°C].

S : Aire de la surface de contact fluide/solide [m²].

III.8.3.3.Le rayonnement [21]

Le rayonnement est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans l'espace). Contrairement aux deux autres modes d'échange qui sont la conduction et la convection, le rayonnement ne nécessite pas l'existence d'un support matériel. Il se propage dans l'espace, comme dans tout type de milieu. Si ce milieu est homogène, il se propage en ligne droite.

➤ L'émittance totale

C'est le flux total émis par unité de surface de la source. On considère globalement la puissance dQ émise par un élément de surface dS dans l'ensemble des directions où il peut rayonner (hémisphère limitée par le plan tangent à dS en son centre), et on divise ce flux par l'aire dS ; elle est exprimé par:

$$M = \frac{dQ}{dS} \quad (I.9)$$

➤ Le corps noir

C'est un corps idéal vis-à-vis du rayonnement qui, par définition, absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit quelque soit la fréquence et la direction. A l'équilibre thermique, il émet autant de

rayonnement qu'il en absorbe de sorte qu'un corps noir rayonne le maximum d'énergie de façon uniforme dans toutes les directions.

III.8.3.4.Loi du rayonnement thermique

➤ Loi de Stéphane Boltzmann

La loi de Stéphane Boltzmann nous permet de calculer l'émittance totale du rayonnement d'un corps noir dans l'espace en fonction de sa température absolue, elle est donnée par :

$$M_0 = \sigma T^4 \quad (I.10)$$

III.9.Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différents systèmes et caractéristiques des installations solaires pour la production d'eau chaude sanitaire, avec les différents types d'appoints ainsi que les différents modes de transfert thermique qui sont par conduction, convection, et rayonnement.

CHAPITRE IV

IV.1 INTRODUCTION

Le point de départ pour le dimensionnement d'une installation solaire de production d'eau chaude sanitaire (ECS) est le besoin en eau chaude solaire. Il est donc primordial d'estimer correctement ce besoin.

Autres facteurs tels que la situation géographique, la surface disponible pour l'installation solaire, l'orientation et l'inclinaison des capteurs, le budget, etc. joueront également un rôle important. Un bon dimensionnement doit conduire à produire un maximum d'énergie d'origine solaire entre 50 et 80 % des besoins d'eau chaude sanitaire, entraînant une économie financière, et évitant le rejet de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

IV.2 Évaluation des performances d'une installation solaire [23]

IV.2.1. La production énergétique instantanée d'un capteur solaire

La production énergétique instantanée d'un capteur solaire peut être définie par une équation caractéristique simple dans laquelle le capteur est caractérisé par sa surface et par deux coefficients caractéristiques. Cette équation admet différentes formes suivant la température de fluide qui sert de référence.

En Algérie, on utilise la température moyenne du fluide dans le capteur. Au niveau de la normalisation internationale, on utilise plutôt la température d'entrée du fluide.

On a ainsi les deux écritures :

$$P_u = S (\beta_c I - K (T_{fm} - T_e)) \quad (IV.1)$$

où :

$$P_u = S (F\tau\alpha I - FrUI (T_{fe} - T_e)) \quad (IV.2)$$

Avec :

P_u : puissance utile (W)

I : flux de rayonnement disponible sur le plan des capteurs (W/m²)

T_e : température ambiante (°C)

T_{fe} : température d'entrée du fluide dans les capteurs (°C)

T_{fm} : température moyenne du fluide dans les capteurs (°C)

S : surface des capteurs (m²)

$\beta_c, F\tau\alpha$: coefficient caractéristique des gains du capteur

$K, FrUI$: coefficient caractéristique des pertes du capteur (W/m². °C)

Le coefficient β_c est généralement compris entre 0,7 et 0,8 pour les capteurs plans, entre 0,5 et 0,8 pour les capteurs sous vide.

Le coefficient K est généralement compris entre 4 et 10 W/m²/°C pour les capteurs plans, entre 1,5 et 3 W/m²/°C pour les capteurs sous vide.

IV.2.2. Interaction entre système, état du système et production.

La présence d'un stock évite les surplus temporaires de production mais n'élimine pas toute influence des variations des apports solaires et de la consommation. En effet, dans l'équation fondamentale IV.1 et IV.2, les termes S.K. (T_{fm}-T_e) ou FrUl (T_{fe}-T_e) caractérisent les pertes thermiques et du capteur. Ils sont proportionnels à la différence de température entre le fluide interne et l'air ambiant.

Les performances d'un capteur dépendent donc fortement de la température du fluide dans le capteur. Considérons par exemple un capteur de 1 m² de caractéristiques (β_c = 0,759 ; K = 4.2W/m²/°C) soumis à un flux de rayonnement élevé I de 1 000W/m² et à une température extérieure de 25°C. La puissance instantanée fournie par ce capteur sera, en fonction de la valeur de T_{fm} :

La température du fluide dans le capteur	Puissance utile du capteur
T _{fm} = 25°C (T _{fe} = 17°C)	759 W
T _{fm} = 45°C (T _{fe} = 38°C)	675 W
T _{fm} = 65°C (T _{fe} = 49°C)	591 W

Or, en présence d'un stock, la température d'entrée T_{fe} est une inconnue du système. Si on a un stock à température uniforme T_S et pas d'échangeur, on a : T_{fe} = T_S - ε. (ε représente le refroidissement du fluide dans le circuit entre stock et capteur).

Même dans ce cas simple, T_{fe} varie en permanence car T_S varie en fonction des apports solaire et du puisage d'eau chaude. La stratification éventuelle du stock, la présence d'un échangeur, la régulation des pompes de circulation ont aussi une influence sur T_{fe} donc sur la puissance utile P_u à l'instant t qui dépend donc :

- Des caractéristiques des capteurs,
- Des autres paramètres du système : schéma, échangeur, stock, régulation,
- Du profil des apports solaires,
- Du profil de puisage.

IV.3.BILAN DU CESI [24]

Pour traiter de manière homogène les CESI avec et sans appoint intégré, on fait le bilan d'un CESI à appoint intégré en décomposant le ballon en deux, une partie solaire en bas et une

partie appoint en haut. La production solaire du CESI est l'énergie fournie par la partie solaire à la partie appoint. Dans le cas d'un CESI à appoint séparé, la production solaire est l'énergie fournie par le ballon solaire au système d'appoint.

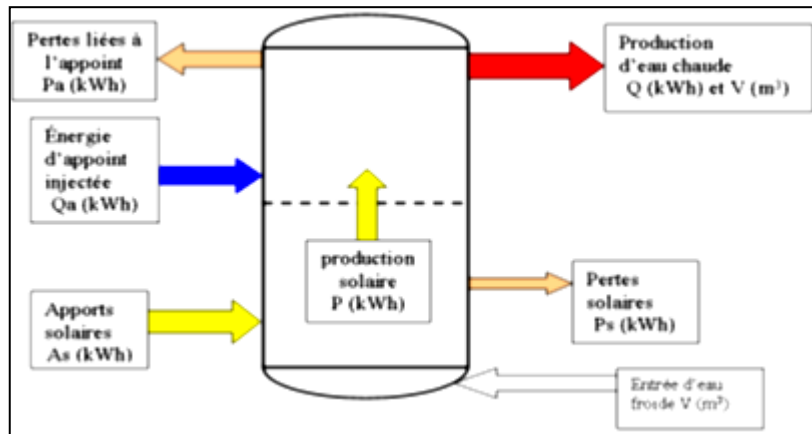


Figure IV.1: Schéma de principe d'un CESI.

Q_{ai} : Appoint intégré en kWh (mesuré si appoint intégré, 0 si appoint séparé) ;

P_{ai} : Pertes liées à l'appoint intégré (à estimer si appoint intégré, 0 si appoint séparé).

A_s : Apport solaire (kWh).

P_s : Pertes solaires (kWh).

Q : Production d'eau chaude sanitaire (kWh).

V : Production d'eau chaude sanitaire (m^3).

IV.3.1. Calcul de la production solaire

D'après le schéma de principe ci-dessus, on peut exprimer la production solaire P (kWh) par :

$$P = A_s - P_s = Q - Q_{ai} + P_{ai} \quad (IV.3)$$

Dans le cas d'un appoint séparé, on a directement :

$$P = Q \quad (IV.4)$$

Dans le cas d'un appoint intégré, on mesure directement Q et Q_{ai} . Il nous faut donc estimer les pertes liées à l'appoint intégré P_{ai} .

IV.3.2. Température de l'eau

L'échauffement de l'eau (en °C) suite au passage dans le CESI est défini par :

$$\Delta T = \frac{Q}{1.16.V} \quad (IV.5)$$

Où :

1.16 : est la capacité calorifique de l'eau ($\text{kWh}/\text{m}^3/\text{K}^{-1}$),

Dans le cas d'un appoint intégré, ΔT varie assez peu avec la saison (autour de 30-40 K) car Q représente l'ensemble de l'énergie consommée (solaire + appoint). Dans le cas d'un appoint séparé, ΔT est beaucoup plus faible en hiver qu'en été, car Q ne représente alors que l'énergie solaire.

La température de l'eau chaude (T_{ec}) fournie par l'installation globale de production d'Eau Chaude Sanitaire (CESI + appoint) est alors :

Si appoint intégré

$$T_{ec} = T_{ef} + \Delta T, \quad (\text{IV.6})$$

T_{ef} : La température de l'eau froide ($^{\circ}\text{C}$),

Si appoint séparé :

$$T_{ec} = \text{MAX} (60^{\circ}\text{C}, T_{ef} + \Delta T). \quad (\text{IV.7})$$

Dans le cas de l'appoint séparé, on fera l'hypothèse de travail d'une température de consigne pour l'appoint de 60°C si la production solaire est insuffisante et elle est supérieure dans le cas contraire.

IV.3.3. Besoin en ECS (kWh) :

La consommation journalière de l'utilisateur en ECS en kWh (Q) et en m^3 (V) est directement mesurée dans le cas d'une installation à appoint intégré. Cette consommation correspond donc à son besoin en ECS (en négligeant les pertes de distribution) :

$$B_{ec} = Q \quad (\text{IV.8})$$

La consommation journalière de l'utilisateur en ECS en m^3 (V) est directement mesurée dans le cas d'une installation à appoint séparé. On en déduit la consommation d'ECS en kWh, correspondant au besoin de l'utilisateur (en négligeant les pertes de distribution) par :

$$B_{ec} = 1.16 \cdot V \cdot (T_{ec} - T_{ef}) \quad (\text{IV.9})$$

IV.3.4. Les pertes liées à l'appoint intégré P_{ai} :

Ces pertes sont principalement dues aux pertes du ballon. On peut les estimer par :

$$P_{ai} = \frac{C_r \cdot V_{\text{appoint}} \cdot (T_{ec} - T_{am}) \cdot N}{1000} \quad (\text{IV.10})$$

C_r : coefficient de pertes du ballon de stockage (Voir le dimensionnement de stock), donnent $0.28 \text{ Wh}/(\text{l.K.jour})$ pour un stockage de 300 litres.

V_{appoint} : volume de la partie appoint du ballon de stockage d'ECS en litres.

Pour les ballons verticaux :

$$V_{\text{appoint}} = 1/2 * V_{\text{ballon}}, \quad (\text{IV.11})$$

Pour les ballons horizontaux :

$$V_{\text{appoint}} = 2/3 * V_{\text{ballon}} \quad (\text{IV.12})$$

N : nombre de jour considérés,

IV.3.5. Le taux de couverture solaire [25]

C'est un pourcentage d'énergie solaire qui couvre les besoins de chauffage d'eau chaude sanitaire ou/et de chauffage des locaux. La couverture solaire par exemple de 60% d'un CESI (Chauffe Eau Solaire Individuel) désigne que l'installation solaire couvre 60% des besoins annuels d'eau chaude sanitaire de l'habitation.

Le taux de couverture solaire se définit donc comme la part des besoins annuels en énergie couverts par l'énergie solaire. La formule de calcul est:

$$\tau = \frac{\text{production solaire}}{\text{besoins}} \quad (\text{IV.13})$$

La couverture solaire dépend directement du lieu d'exposition et du dimensionnement de l'installation solaire, soit la surface de capteurs solaires et la capacité de ballon solaire.

IV.4. Recueil des données nécessaires [23]

IV.4.1. Données nécessaires concernant les besoins en eau chaude.

Ce sont :

- La température de consigne de l'eau chaude supposée constante sur l'année,
- La consommation journalière en moyenne mensuelle.

Une bonne connaissance des besoins en eau chaude est indispensable. En particulier, toute surévaluation des besoins risque de conduire à un surdimensionnement de l'installation gravement préjudiciable à sa productivité, et donc à sa rentabilité.

IV.4.2. Les données météorologiques nécessaires sont :

- La température moyenne mensuelle,
- Le rayonnement global journalier dans le plan horizontal en moyenne mensuelle,

- La température d'eau froide en moyenne mensuelle.

On peut calculer une valeur approchée de la température d'eau froide T_{ef} pour le mois i à partir des valeurs de la température extérieure par la formule suivante :

$$T_{ef}(i) = (T_e(i) + T_{em})/2 \quad (IV.14)$$

Dans laquelle $T_e(i)$ et T_{em} sont les températures extérieures mensuelle (mois i) et annuelle.

On peut calculer une valeur approchée du rayonnement global horizontal journalier (kWh/m^2) à partir du nombre d'heures d'ensoleillement journalier.

Pour le mois i , on a :

$$RGJ(i) = RJE(i) \times (0,19 + 0,62 \cdot HI(i)/DJ(i)) \quad (IV.15)$$

$RJE(i)$: rayonnement journalier extraterrestre sur le site pour le mois i (kWh/m^2),

$HI(i)$: nombre d'heures moyen d'ensoleillement journalier pour le mois i (h),

$DJ(i)$: durée moyenne du jour sur le site pour le mois i (h).

RJE et DJ ne dépendent que de la latitude et du mois. Ils sont calculables par des équations astronomiques simples ou peuvent être trouvés dans des tables.

IV.4.3. Données sur les caractéristiques des composants.

Ce sont :

- La surface unitaire et les coefficients B et K des capteurs solaires,
- Le volume et la constante de refroidissement des ballons de stockage.

IV.5. Choix du schéma de principe de l'installation

Ce choix doit se faire parmi les 5 schémas simples reconnus par SOLO [23]. L'éventail est suffisant car les schémas plus complexes sont rarement efficaces en pratique en raison de problèmes de régulation et de fiabilité. Tous ces schémas comportent un appoint en série sur la sortie du système solaire. Deux critères les différencient :

- la présence et la nature d'un échangeur éventuel entre capteur et stock,
- le moteur de la circulation du circuit capteur : thermosiphon ou pompe.

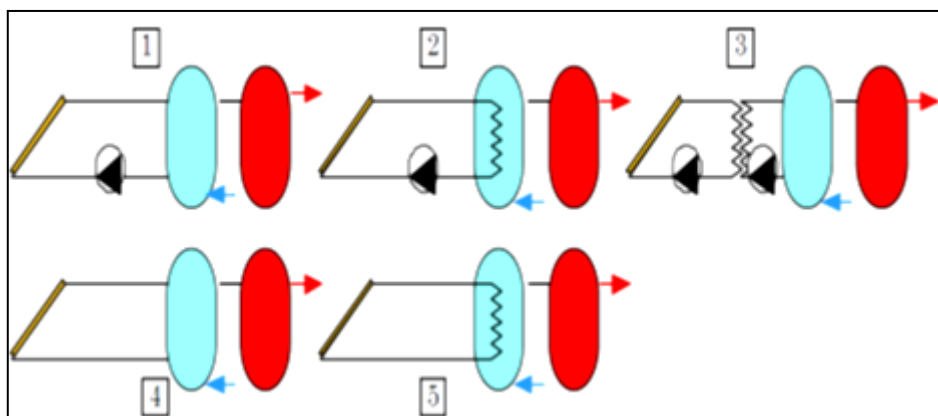


Figure IV.2: Schémas de principe reconnus par SOLO

Schéma 1 - Circuit capteurs-ballon : direct ; circulation : forcée

Schéma 2 - Circuit capteurs-ballon : échangeur interne; circulation : forcée, 1 pompe

Schéma 3 - Circuit capteurs-ballon : échangeur externe; circulation : forcée, 2 pompes

Schéma 4 - Circuit capteurs-ballon : direct ; circulation: thermosiphon

Schéma 5 - Circuit capteurs-ballon : échangeur interne; circulation : thermosiphon

IV.6. Dimensionnement de l'installation

IV.6.1. Dimensionnement des capteurs solaires

La surface des capteurs S_c est la variable essentielle car elle conditionne le coût et la production utile de l'installation. Le dimensionnement de S_c est fait sur la base du volume d'eau chaude consommé quotidiennement V_j . On définit S_c de façon à avoir un ratio V_j/S_c égal à 50 litres/m².

Exemple : pour une consommation de 200 litres/jour $\Rightarrow S_c = V_j/50 = 200/50$ soit 4 m²

- Définition de la plage de variation autorisée ($S_c - 50\%$, $S_c + 50\%$).

- **Choix de l'inclinaison**

Il dépend essentiellement de deux paramètres : la latitude et la saisonnalité des besoins.

Exemple à Alger l'inclinaison est égale à la latitude de lieu qui est 36.7°.

IV.6.2. Dimensionnement du stock

Le volume des ballons de stockage est déterminé en fonction de la consommation journalière :

$$V_{s0} = \max (V_{ja}, V_{jété}) \quad (IV.16)$$

Avec :

- V_{ja} : consommation moyenne journalière sur la période de fonctionnement.

- $V_{jété}$: consommation moyenne journalière sur la période mai-août.

On veillera à tenir compte, prioritairement de la consommation d'été, car le stockage a d'autres fonctions, de limiter les surplus temporaires de production qui sont plus probables en été.

La plage autorisée est définie de manière similaire à la plage autorisée pour le dimensionnement de la surface de capteurs :

$[V_{SMin}, V_{SMax}] = [V_{S0}-50\%, V_{S0}+50\%]$. Soit pour notre exemple : [100 l, 300 l].

- **Interprétation et exemple**

Supposons une consommation journalière d'eau chaude constante. On analyse l'influence du dimensionnement des capteurs en considérant 4 caractéristiques :

V_j : Consommation journalière (données des besoins : L/j)

S_c : Surface de capteurs (paramètre de dimensionnement : m²)

R : Rendement moyen du système (résultat du calcul -)

CS : Taux de couverture solaire (résultat du calcul : -)

De ces 4 caractéristiques, on peut tirer deux ratios simples qui caractérisent le dimensionnement de l'installation : V_j/S_c et R/CS.

En effet :

Supposons fixées, les données (météorologie et besoins) du problème :

- **Irradiation solaire**

$$I_1 = 365 \cdot I_{j1} \quad (IV.17)$$

I_1 : irradiation solaire annuelle par m² sur le plan des capteurs (kWh/m²/an)

I_{j1} : irradiation solaire moyenne journalière par m² (kWh/m²/j).

- **Besoins annuels d'une habitation en kWh**

Le besoin énergétique annuel B (kWh/an) s'écrivent en fonction de V_j et ΔT , sachant que la capacité calorifique massique de l'eau est de 1,16 Wh/L/°C :

$$B = 365 B_{ec} = 0,423 \cdot V_j \cdot \Delta T \quad (IV.18)$$

V_j : consommation journalière d'eau chaude (L/j)

ΔT : échauffement moyen de l'eau : $T_{ec} - T_{ef} = T_{ec} - T_e$ (°C)

T_{ec} : température de consigne d'eau chaude (°C)

T_{ef} : température moyenne d'eau froide, supposée égale à T_e (°C)

T_e : température extérieure moyenne du site (°C)

➤ **La production solaire et la productivité**

La production solaire annuelle E (kWh/an) et la productivité annuelle E_1 (kWh/m²/an) du système s'écrivent :

$$P_A = CS.B = S_c.R.I_1 \quad (IV.19)$$

$$P_{1A} = R.I_1 = B.CS/S_c \quad (IV.20)$$

La production solaire moyenne journalière P_{aj} (kWh/j) et la productivité moyenne journalière P_{1j} (kWh/m²/j) s'écrivent :

$$P_j = CS.B_{ec} = S_c.R.I_{1j} \quad (IV.21)$$

$$P_{1j} = R.I_{1j} = B_{ec}.CS/S_c \quad (IV.22)$$

$$P_j = 365.P_{1j} \quad (IV.23)$$

➤ **Ratio 2 qui caractérise le dimensionnement de l'installation**

$$R / CS = (B_{ec} / P_{1j}) / S_c \quad (IV.24)$$

Ou encore :

$$R / CS = (1, 16.V_j.\Delta T / P_{1j}) / S_c \quad (IV.25)$$

IV.6.3. Dimensionnement de l'isolant thermique du ballon

Les caractéristiques de l'isolant thermique du ballon doivent être telles que la constante de refroidissement du ballon équivalent soit inférieure ou égale à la valeur : $Cr \leq 4.2 V^{-0.45}$

Où V est le volume du ballon équivalent exprimé en litres.

La constante de refroidissement du ballon équivalent se calcule de la manière suivante :

$$CR = \frac{24}{V_b} \left(1.1 + \frac{0.05}{V_b} \right) \times h \times S_b \text{ avec } \frac{1}{h} = \frac{1}{10} + \frac{e_{iso}}{k_{iso}} \quad (IV.26)$$

avec :

V_b : volume du ballon (m³) ;

S_b : surface extérieure du ballon (m²)

e_{iso} : épaisseur de l'isolant (m) ;

k_{iso} : conductivité de l'isolant (W/m.K)

Pour la détermination de l'épaisseur de l'isolation, nous avons besoin de déterminer le flux de chaleur à travers celle-ci.

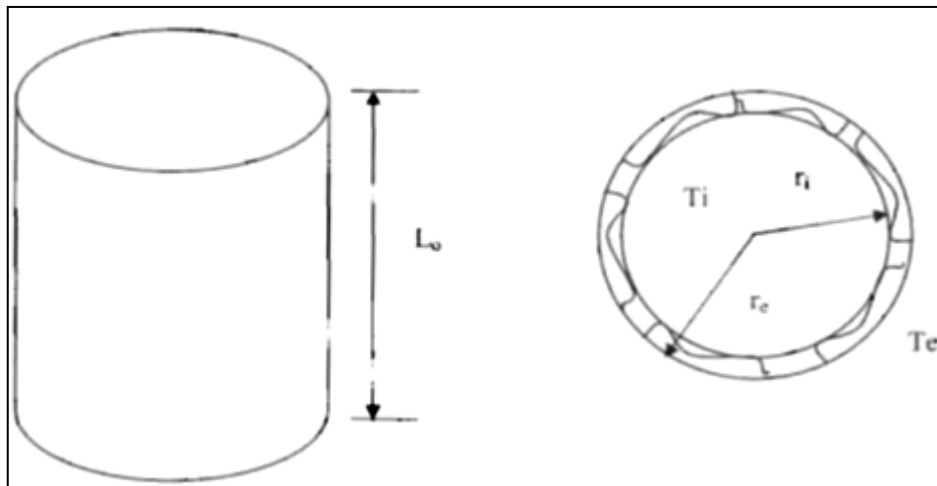


Figure IV.3: Répartition des températures autour de l'isolation de réservoir

L'essentiel des pertes thermiques se résume aux pertes nocturnes que nous aurons à déterminer, ainsi, nous allons déterminer ces pertes en premier lieu.

• Les pertes nocturnes q

Hypothèse de calcul :

-la température T_i dans le réservoir à 18h00 est $T_i = 60^\circ\text{C}$;

-la température T_i' dans le réservoir à 8h00 et $T_i' = 57^\circ\text{C}$;

-la masse d'eau M dans le réservoir est $M = 250 \text{ kg}$.

Calcul de Q :

On a :

$$Q = MC\Delta T \quad (\text{IV.27})$$

avec :

M : Masse d'eau ;

C : Chaleur massique de l'eau ;

ΔT : Variation de température entre 18h00 et 08h00.

$$Q = 250 \times 4180 \times 3$$

$$Q = 3135000 \text{ J soit } 87 \text{ W}$$

• L'épaisseur e de l'isolant

La quantité de chaleur à travers l'isolation est donnée par la relation :

$$Q = \frac{2\Pi \times \lambda \times L_0 \times (T_i - T_e)}{\log\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \quad (IV.28)$$

Posons :

$$r_e = r_i + e$$

r_e : le rayon extérieur de l'enveloppe

r_i : le rayon intérieur de l'enveloppe

(24) devient :

$$Q = \frac{2\Pi \times \lambda \times L_0 \times (T_i - T_e)}{\log\left(1 + \frac{e}{r_i}\right)} \quad (IV.29)$$

D'où

$$e = r_i \cdot \left(\exp\left(\frac{2\Pi \times \lambda \times L_0 \times (T_i - T_e)}{Q}\right) - 1 \right) \quad (IV.30)$$

En plus des hypothèses du 4.2 .1, nous supposons que $T_e = 20^\circ\text{C}$, $L_0 = 2 \text{ m}$ et que l'isolant est le polystyrène expansé thermo comprimé ($\lambda = 0,029 \text{ W/m. }^\circ\text{C}$).

On a:

$$V = \Pi \times r_i^2 \times L_0$$

$$\Rightarrow r_i = \sqrt{\frac{V}{\Pi \times L_0}}$$

$$\Rightarrow r_i = 251 \text{ mm}$$

En mettant, ces valeurs numériques dans (26), on obtient :

$$e = 49.7 \text{ mm} \approx 5 \text{ cm}$$

IV.6.4. Dimensionnement de la canalisation

Les canalisations sont dimensionnées, en fonction des paramètres suivants :

- Débits de fluide
- Sa densité et sa viscosité.

Calcul manuel par la formule approchée

$$D_i = 33,3 \times (Q'' / (\rho \times \pi)) \quad (IV.31)$$

Avec :

D_i = diamètre intérieur (mm)

Q'' = débit nominal (l/h)

ρ = masse volumique du fluide (kg/m³)

IV.6.5. Dimensionnement des vannes et robinets

Les vannes sont dimensionnées, en fonction :

- Des débits
- De la perte de charge
- Des caractéristiques des vannes de régulation.

IV.6.6. Dimensionnement de l'échangeur

La présence d'un échangeur entraîne une baisse du rendement global du système car elle provoque une augmentation de la température de l'eau dans les capteurs, et donc une augmentation des pertes thermiques des capteurs.

L'efficacité d'un échangeur ne dépend pas seulement de la température des fluides mais aussi des caractéristiques géométriques de l'échangeur et des débits calorifiques. Dans la pratique, l'efficacité des échangeurs est de l'ordre de 0,6 à 0,8.

On définit alors l'efficacité d'un échangeur par la relation suivante [21]:

$$\varepsilon_c = \frac{T_{2s} - T_{2e}}{T_{1e} - T_{2e}} \quad (\text{IV.32})$$

T_{2s} : la température de l'eau froide à la sortie de l'échangeur.

T_{2e} : la température de l'eau froide à l'entrée de l'échangeur.

T_{1e} : la température du fluide caloporteur à l'entrée de l'échangeur.

IV.6.7. Dimensionnement de l'appoint à gaz [24]

➤ Consommation de l'appoint du CESI

Dans le cas d'une installation solaire à appoint hydraulique au gaz séparé instantané avec veilleuse (considérée comme le cas le plus courant), la consommation de l'appoint du CESI pour produire B_{ec} (besoin en ECS) est donnée, en kWh, selon les Règles Th-C 93 de calcul annuel, par :

$$\text{Appoint} = H \times \frac{B_{ec} \times (1 - \tau_h)}{\eta_{gc}} + E \times \left(B_{ec} \times \frac{1 - \tau_e + 0.14 C_{ae}}{\eta_c} + 1200 C_{ae} \right) \quad (\text{IV.33})$$

H et E : représentant la fraction de fonctionnement en hiver ou été.

B : besoin en ECS en kWh,

η_{gc} : le rendement moyen annuel de génération de 0.75 (obtenu avec la formule des Règles Th-C 93),

η_c : est le rendement corrigé de la chaudière de 0.80-0.02=0.78 (selon les Règles Th-C 93).

$C_{ae} = 1$ si $\tau_e < 0.8$ et $C_{ae} = 5 \cdot (1 - \tau_e)$ sinon

Taux de couverture solaire (été) :

$$\tau_e = 2 \tau / (1 + \tau^2) \tag{IV.34}$$

où

τ : est le taux de couverture solaire (donnée par la formule vu plus haut).

Taux de couverture solaire (hiver) :

$$\tau_h = (t - E \cdot \tau_e) / H \tag{IV.35}$$

Dans le cas d'une installation à appoint hydraulique au gaz séparé instantané sans veilleuse, on aurait une relation de la forme :

$$\text{Appoint} = H \times \frac{B_{ec} \times (1 - \tau_h)}{\eta_{gc}} + E \times \left(B_{ec} \times \frac{1 - \tau_e + 0.28 C_{ae}}{\eta_c} \right) \tag{IV.36}$$

Dans le cas d'une installation solaire à appoint hydraulique intégré, le besoin en appoint B_{ec} en kWh est directement mesuré. Ce besoin en appoint B_a est fourni par la chaudière fonctionnant au ralenti en été et à plein régime en hiver. On estime alors la consommation de l'appoint hydraulique au gaz intégré, en kWh, par :

$$\text{Appoint} = \frac{Q_{\text{appoint_hiver}}}{\eta_{\text{hiver}}} + \frac{Q_{\text{appoint_été}}}{\eta_{\text{été}}} \tag{IV.37}$$

avec :

$Q_{\text{appoint_hiver}}$: Fourniture de l'appoint mesurée en hiver (de octobre à mai) en kWh,

$Q_{\text{appoint_été}}$: Fourniture de l'appoint mesurée en été (complément de l'hiver) en kWh,

η_{hiver} : Rendement moyen de chauffage gaz ou fioul de 0.75 (obtenu avec la formule des Règles Th-C 93),

$\eta_{\text{été}}$: Rendement de chaudière d'été de 0.25.

Pour les installations à appoint gaz séparé, on obtient un rendement moyen de l'appoint voisin de 60 % alors que pour les installations à appoint gaz intégré, ce rendement se situe plutôt entre 30 et 40 %. L'écart important entre les appoints séparés et intégrés vient des pertes de stockage supplémentaires engendrées par l'appoint intégré par rapport à l'appoint instantané.

IV.7. APPLICATION DE LA METHODE DE CALCUL

Nous allons utiliser le logiciel SOLO pour le calcul des performances de l'installation de production d'eau chaude solaire individuelle qui se trouve en Algérie. Cette installation permet de chauffer l'eau chaude sanitaire d'une habitation.

IV.7.1 PARAMETRE DE CALCUL

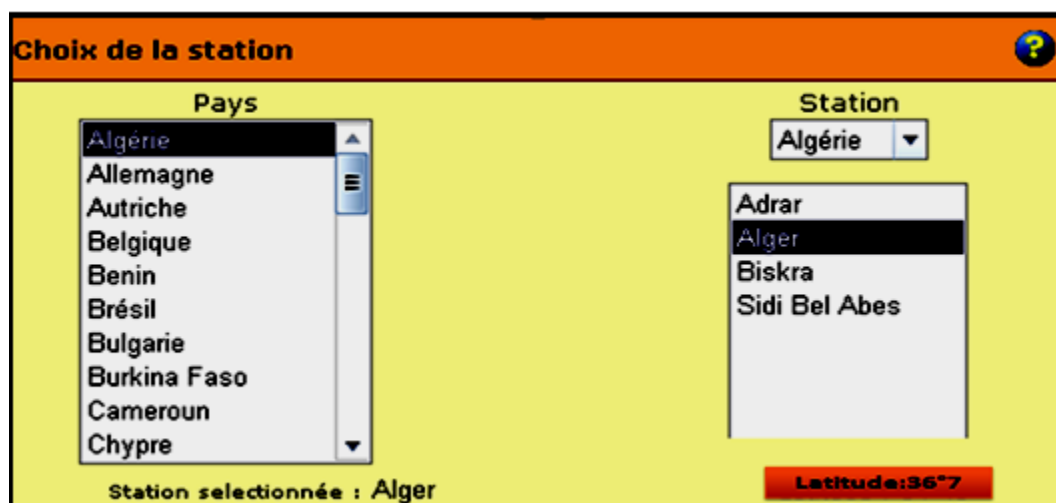
Les paramètres nécessaires d'introduire dans le calcul sont :

1. le climat
2. les besoins en eau chaude
3. les ballons
4. la constante de refroidissement
5. le capteur solaire

- **le climat**

Pour le climat nous avons choisi :

- pays : Algérie
- station : Alger
- la latitude : 34°43



- **Les besoins en eau chaude**

On doit connaître la consommation moyenne d'eau chaude sanitaire en litres/jour,

Dans notre cas nous avons choisi :

- La consommation moyenne annuelle 200 l/jour.

Consommation	
<input type="checkbox"/> Calcul de la consommation annuelle	<u>Consommation: On doit connaître la consommation moyenne d'eau chaude sanitaire en litres/jour à 60°C, soit en moyenne annuelle, soit en moyenne mensuelle en cas de variations saisonnières. Si vous n'avez aucune de ces valeurs, un guide expert la définira pour vous, à partir d'une description de votre bâtiment (hôtel, logement,...) et de son rythme d'utilisation. Il vous faudra évaluer son taux de remplissage moyen par mois.</u>
<input type="checkbox"/> Vous connaissez la consommation annuelle	
<input type="checkbox"/> Consommation annuelle	<input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/> L/jour
<input type="checkbox"/> Consommation moyenne mensuelle :	

- **les ballons**

Pour cette installation nous avons choisi les caractéristiques de ballon suivantes :

Situation par rapport à l'habitation : extérieur

Type de l'installation : thermosiphon sans échangeur

Volume de stockage total : 300 litres

Nombre de ballons : 1

Stockage		
Situation par rapport au bâtiment		
<input type="radio"/> Extérieur		
<input type="radio"/> Intérieur		
Type installation	<input type="text" value="Thermosiphon sans échangeur"/>	<p>Type d'installation: Il est possible de choisir entre 5 types de systèmes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thermosiphon direct. Sans échangeur, réservé aux installations individuelles sans risque de gel. Le ballon est toujours près du capteur et au dessus. • Thermosiphon indirect. Avec échangeur, réservé aux installations individuelles lorsqu'il y a risque de gel. Le ballon est toujours près du capteur et au dessus. • Circulation forcée, sans échangeur. Permet de séparer capteurs et ballon. Réservé aux régions sans aucun risque de gel, et aux eaux ni corrosives ni entartrantes. Installations individuelles ou petits collectifs. • Circulation forcée, échangeur incornoré. Permet de séparer capteurs et ballon. Indispensable lorsqu'il existe un risque de gel, ou lorsque l'eau est corrosive. Installations individuelles ou petits collectifs. • Circulation forcée, échangeur séparé. Permet la meilleure souplesse d'installation et les meilleurs résultats. Obligatoire pour les grandes installations collectives.
Température de l'eau	<input type="text" value=""/> °C	<p>Température de l'eau chaude: Les besoins d'eau chaude sanitaire ont été calculés pour de l'eau à 60°C. C'est donc la température du volume d'eau qui sera consommé. Si vous connaissez vos besoins de manière précise, vous pouvez saisir ici une température différente, entre 30 et 80°C.</p>

<p>Volume de stockage total</p> <input type="text"/> Litres	<p>Volume de stockage total: On le définit entre 50 et 120 % de la consommation journalière, avec un minimum de 50 litres par m² de capteurs. Lorsque le volume obtenu est important, on peut le diviser en plusieurs ballons plus petits.</p>
<p>Nombre de ballons</p> <input type="text" value="1"/>	

• **Isolant**

La valeur de constante de refroidissement est obtenue par un essai normalisé, et indique les pertes caractéristiques du ballon. Elle est fournie par le fabricant en fonction de la nature de l'isolant.

Pour cette installation nous avons choisi les caractéristiques de l'isolant suivantes :

Type d'isolant : polyuréthane

Epaisseur de l'isolant : 5 cm

Constante de refroidissement	
<p>Vous connaissez sa valeur :</p>	<p>Constante de refroidissement: En France, cette valeur est obtenue par un essai normalisé, et indique les pertes caractéristiques du ballon. Elle est fournie par le fabricant. Si vous ne la connaissez pas, un calcul simple vous permet de l'évaluer, en fonction de la nature de l'isolant.</p>
<p>non <input checked="" type="radio"/></p> <p>Type d'isolant <input type="text" value="Polyuretane"/></p> <p>Epaisseur de l'isolant <input type="text"/> cm</p>	<p>oui <input type="radio"/></p> <p>Constante de refroidissement <input type="text"/> Wh/jour.l.°C</p>

• **le capteur solaire**

Pour cette installation nous avons choisi les caractéristiques de capteur suivantes :

- Modèle : JACQUES GIORDANO INDUSTRIES

- K = 4.2 w/m².k

- B = 0,759

- Surface : 4 m²

- Nombre de capteurs : 67

- Orientation : peine sud

- L'inclinaison : 36°7

Capteurs I

Choisir un capteur

Vous trouverez dans la rubrique "capteurs solaires" du menu ci-contre des estimations des coefficients B et K que vous pourrez entrer manuellement ci-dessous, pour certains capteurs ne figurant pas dans cette liste

Fabricant: JACQUES GIORDANO INDUSTRIES

Modèle: C8/11 SU, C8/11H.SU, CS11 HI, POLYTUB S

ou Entrer coefs Solo (CSTB) ou Entrer coefs internationaux

B: K: W/m².°C Frta: FrUL: W/m².°C

Capteurs II

Inclinaison Capteur: °/Horiz.

Orientation: °/ Sud

Surface Utile: m²

Nbre de capteurs:

Surface Entrée Totale: m²

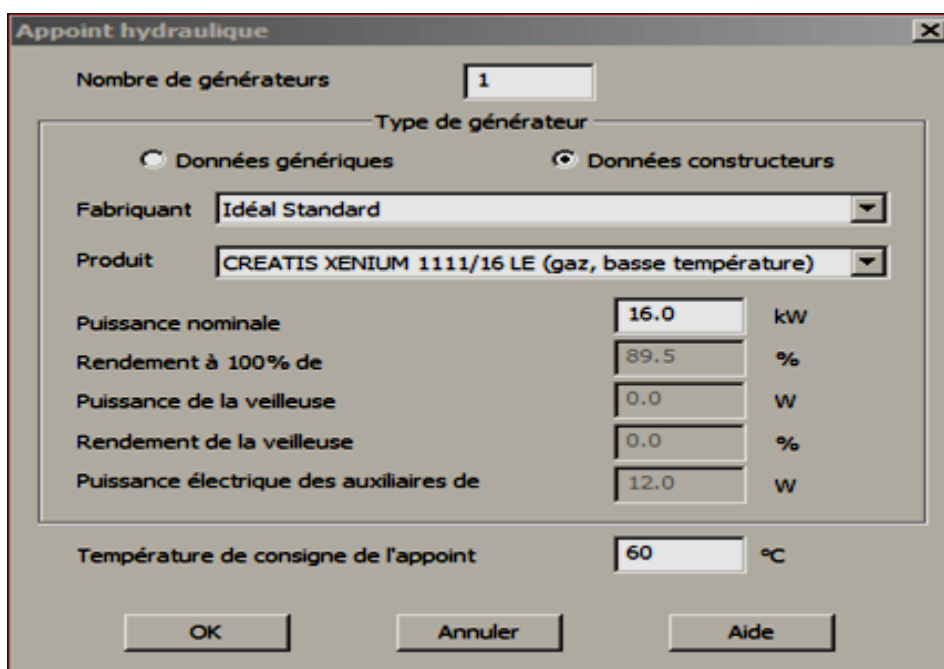
Inclinaison du capteur: Pour une utilisation annuelle, la règle générale est la suivante : Incl = Lat + 10° et on accroît l'inclinaison de + 15° pour un emploi essentiellement hivernal. Symétriquement, on réduit de 15° pour une utilisation d'été. Dans le Sud de la France, Nord de l'Espagne et de l'Italie, on obtient : Utilisation annuelle : incl = 45° sur l'horizontale
 hiver : incl = 60°
 été : incl = 30°.

Orientation du capteur: L'orientation préférentielle est le Sud (pour une implantation dans l'hémisphère Nord), avec une tolérance possible d'environ 15° vers l'Est ou l'Ouest. Au delà, les baisses de performances peuvent devenir importantes.

Surface d'entrée: elle correspond à la surface de vitrage visible pour un capteur plan, et à la somme des projections normales des tubes pour un capteur à tubes sous vide. Elle se différencie de la surface hors tout qui correspond à l'aire maximum de la projection du capteur complet, isolant latéral compris. Cette différenciation est importante pour la comparaison des performances des différents modèles de capteurs. On choisit entre 1 et 2 m² de capteurs pour 100 l/j de consommation d'eau chaude.

• **Appoint**

Nous allons utiliser le logiciel Transol pour le dimensionnement de l'appoint de l'installation de production d'eau chaude solaire individuelle.



IV.7.2. Résultats de calculs pour l'installation solaire

Les résultats de dimensionnement de l'installation solaire en utilisant le logiciel « SOLO » sont présentés dans les tableaux et courbes ci-dessous :

	Janv.	Fév.	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
T extérieur	11	12	13	15	18	21	24	25	23	19	15	12
T eau froide	14.16	14.66	15.16	16.16	17.66	19.16	20.66	21.16	20.16	18.16	16.16	14.66

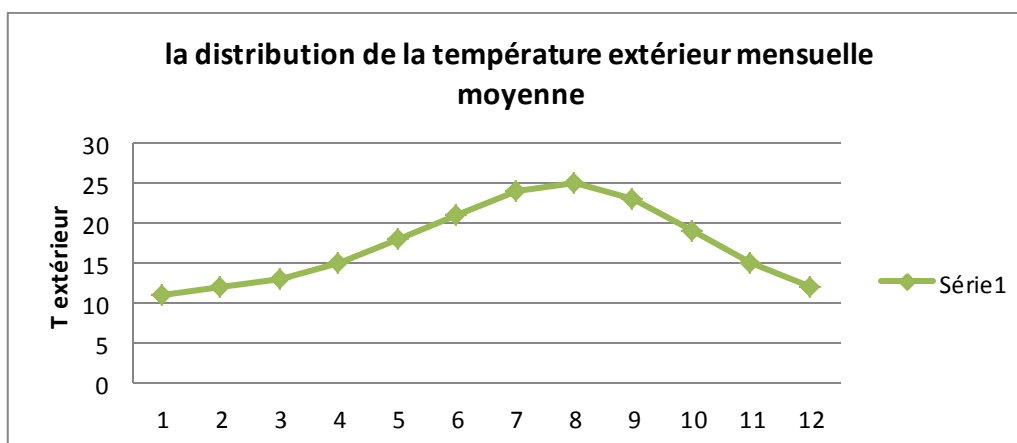


Figure IV.4: Distribution de la température extérieure mensuelle moyenne

	Irradiation Capteurs (Wh/m ² .jour)	Besoins (kWh/mois)	Apports (kWh/mois)	Apports (kWh/jour)	Taux (%)	Volume (litres)
Janvier	3032	186	107	3.5	57.6	200
Février	4241	165	128	4.6	77.4	200
Mars	5172	179	160	5.2	89.5	200
Avril	5515	166	157	5.2	94.5	200
Mai	6068	161	158	5.1	97.8	200
Juin	5917	145	143	4.8	98.6	200
Juillet	6123	139	138	4.5	99.2	200
Aout	6213	136	135	4.4	99.3	200
Septembre	5673	138	136	4.5	98.6	200
Octobre	4466	157	143	4.6	90.7	200
Novembre	3154	166	112	3.7	67.1	200
Décembre	2765	183	99	3.2	54.4	200

• Total

Taux de couverture solaire	84.1	%	Apport solaire annuel	1616	KWh/an
Besoin annuel	1923	KWh/an	Productivité annuelle	404	KWh/m ² .an

IV.7.3. Interprétation des résultats de dimensionnement

1° En comparant les résultats obtenus pour la durée allant du 1^{er} janvier au 31 décembre, on remarque que les besoins en eau chaude augmentent au voisinage du mois de janvier ceci se justifie par le fait qu'à cette période il fait plus froid et donc la consommation de l'eau chaude est importante.

Les besoins en eau chaude diminuent au voisinage du mois juin, ceci se justifie par le fait qu'à cette période il fait plus chaud et donc la consommation de l'eau chaude est minimale.

Nous pouvons déduire que les résultats de cette simulation avec un taux de couverture solaire total dépassant les 94% et la productivité annuelle de 274 kWh/m²/an sont satisfaisants.

IV.7.5. Résultats de calculs pour l'appoint

Les résultats de dimensionnement de l'installation de l'appoint à gaz en utilisant le logiciel «Transol» sont présentés dans un tableau et un graphique ci-dessous :

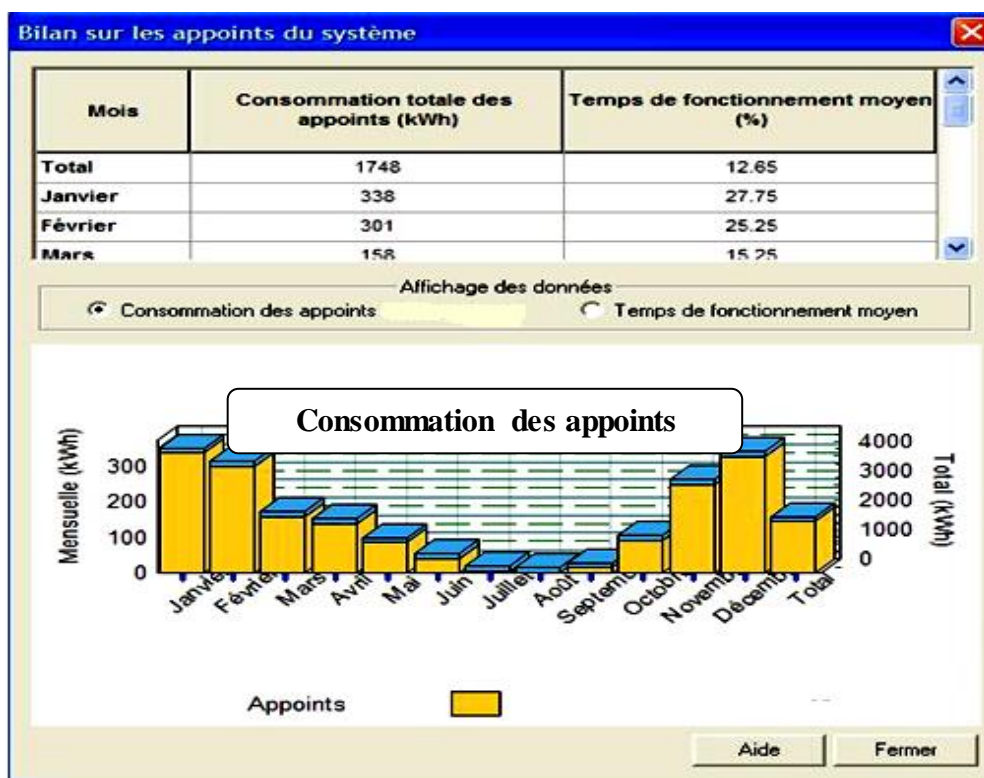


Figure IV.5 : Bilan de consommation des appoints du mois de janvier au mois de mars

IV.7.6. Interprétation des résultats de dimensionnement

Au voisinage du mois de janvier, la production solaire est faible ce qui implique que l'utilisation d'une source d'appoint est nécessaire.

Au voisinage du mois de juin, la production solaire est élevée donc l'installation solaire peut couvrir seule les besoins en eau chaude sanitaire sans l'utilisation d'une énergie d'appoint.

IV.8. CONCLUSION

Dimensionner une installation n'est pas une chose aisée car les besoins ne sont pas toujours connus rapidement. Donc pour dimensionner au plus juste une installation solaire avec appoint à gaz correspondant à l'optimum économique, on simule la production solaire et le coût en kWh solaire produit par plusieurs combinaisons "surface de capteur/ volume de stockage" l'installation offrant simultanément la production solaire la plus importante et le coût du kWh solaire le plus faible se situe à l'optimum économique. Notre installation est donc bien dimensionnée.

CHAPITRE V

V.1.Introduction

Les résultats expérimentaux pour l'installation existante au centre de recherche de BOUZAREAH sont représentés sous forme de courbes.

Parmi les mesures, nous avons choisi une journée claire pour ne pas perturber le système.

L'expérimentation a été faite pendant le mois de mai, la journée choisie est le 13 mai 2014 avec un pas de temps de 30 minutes de 8h à 17h.

V.2.Caractéristiques pondérales et dimensionnelles du chauffe eau solaire étudié :

Nous avons représenté le système de chauffe-eau solaire à thermocirculation situé dans la région d'Alger caractérisée par :

Latitude: 36°7.

Longitude: 3°12E.

Altitude: 345.

Albédo du sol =0.2

Le chauffe-eau solaire est un ensemble monobloc constitué par des capteurs plans assemblés et raccordés à un ballon de stockage situé en partie haute de l'ensemble, il fonctionne en thermosiphon (Figure VI.1).

-Soit par passage direct de l'eau sanitaire entre le capteur et le ballon de stockage. (C'est notre système étudié).

-Soit par passage d'un fluide caloporteur entre les capteurs et un échangeur situé dans le ballon.



Figure V.1: Schéma du chauffe-eau solaire expérimental étudié au CDER

V.2.1. Capteur plan

Le capteur solaire est composé de quatre éléments :

➤ Coffre

Le coffre est constitué d'un cadre en profil d'acier galvanisé prélaqué (MYRIALAC) d'épaisseur 7.5 cm, assemblé à chaque angle par deux vis en acier inoxydable (MARUTEX DIN 7504N). Les caractéristiques de la tôle sont les suivantes :

- Dimensions du coffre (mm) : 2002 x 1050 x 75
- nombre d'ailettes : 1 feuille unique

➤ Isolant

Isolant	Fond de coffre / côté latéral	Fond de coffre 2
Matériau constitutif	Polyuréthane	Laine de verre
Masse volumique (kg/m ³)	35	35
Epaisseur de l'isolation (mm)	20 / 15	20
Conductivité thermique (W/m.K)	0,023	0,035

Le fond de coffre est réalisé dans une plaque de mousse de polyuréthane d'épaisseur 20 mm, Une plaque de laine de verre d'épaisseur 20 mm est posée, sans fixation particulière, sur la plaque de polyuréthane constituant le fond de coffre. L'isolation latérale est réalisée dans une plaque d'épaisseur 15 mm, de même nature que le fond du coffre.

➤ Absorbeur

L'absorbeur des capteurs solaires est constitué d'une feuille en aluminium, d'épaisseur 0,5 mm, soudée au laser sur 8 tubes en cuivre de diamètre 11 x 0,5 mm.

Les collecteurs en tube de cuivre de diamètre 22 sont brasés sur les tubes de cuivre de l'absorbeur pour former une grille.

➤ Couverture transparente

La couverture transparente est constituée d'une vitre en verre trempé 1996 x 1044, d'épaisseur 4 mm (20 kg), collée sur le cadre en acier par un joint mousse adhésif double face.

Le maintien et l'étanchéité de la couverture transparente par rapport au coffre sont assurés par injection d'un mastic silicone entre la vitre, le rebord du coffre et un espaceur.

V.2.2.Réservoir et stockage

Le réservoir de stockage est constitué d'une cuve cylindrique munie à ses sorties hydrauliques, d'une isolation en mousse de polyuréthane injectée et d'une enveloppe extérieure en tôle d'acier galvanisé prélaquée.

➤ Enveloppe

La protection extérieure du réservoir de stockage est assurée par une enveloppe en tôle d'acier galvanisée prélaquée d'épaisseur 0,5 mm ou en tôle d'acier inoxydable, suivant présentation. Les extrémités sont obstruées par un capot en plastique injecté.

➤ Isolation

L'isolation thermique du réservoir de stockage est réalisée par injection de mousse de polyuréthane entre la paroi externe de la cuve et l'enveloppe.

- Epaisseur minimale de l'isolant : 50 mm.

V.2.3.Circuit hydraulique

➤ Raccordement ballon / capteur

Les extrémités des collecteurs haut / gauche et bas / droit des capteurs sont obturés par des bouchons filetés en laiton 7/8".

Le raccordement du réservoir de stockage aux collecteurs bas / gauche et haut / droit des capteurs est réalisé à l'aide de tuyauteries flexibles en inox DN 20 mm équipées aux extrémités de collets battus, joints plats et écrous tournants en laiton 1".

Le raccordement des capteurs entre eux est réalisé avec un nipple 7/8" (capteurs F/F),

➤ Raccordement au réseau

Le raccordement au réseau des chauffe-eau solaires s'effectue en respectant les préconisations du DTU 60.1 (P 40 201). Les raccords hydrauliques sont de type 3/4" au pas gaz.

V.2.4.Appoint

Les chauffe-eau solaires peuvent être branchés en amont de tout préparateur d'eau chaude classique.

V.3.Réalisation d'un schéma expérimental de l'installation à l'aide du logiciel SolidWorks

V.3.1.Capteur plan :

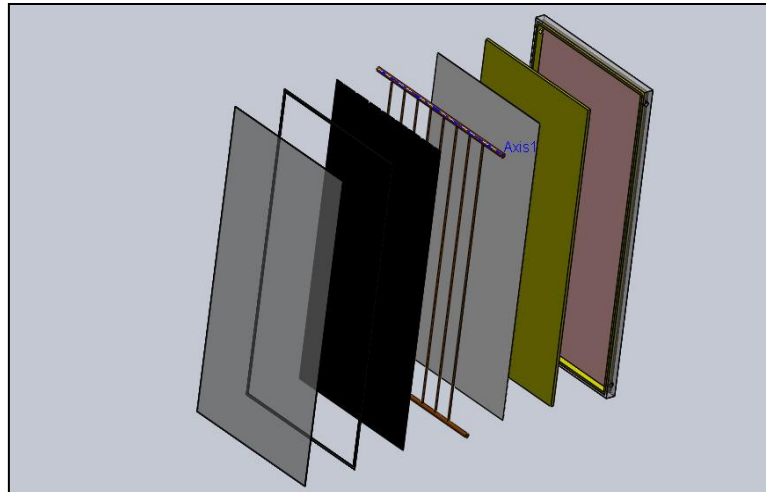


Figure V.2: Vue éclatée du capteur plan jacques Giordano

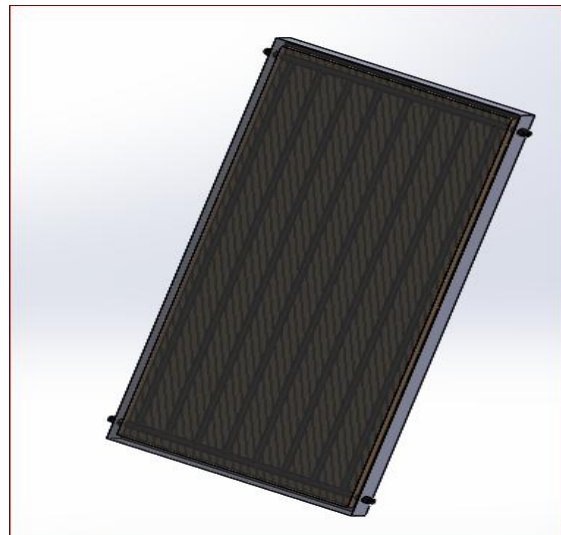


Figure V.3: capteur plan

V.3.2. Stockage :

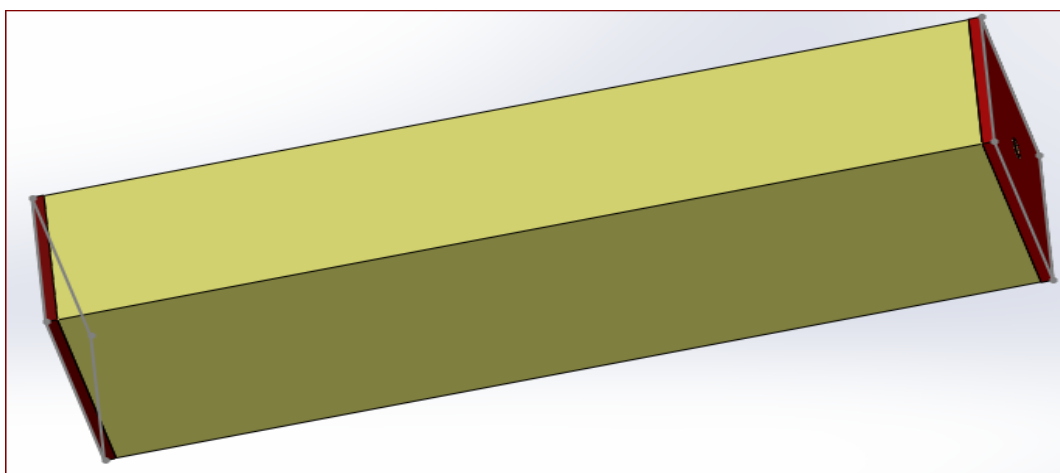


Figure V.4: Ballon de stockage de volume 300L

V.3.3. Chaudière :

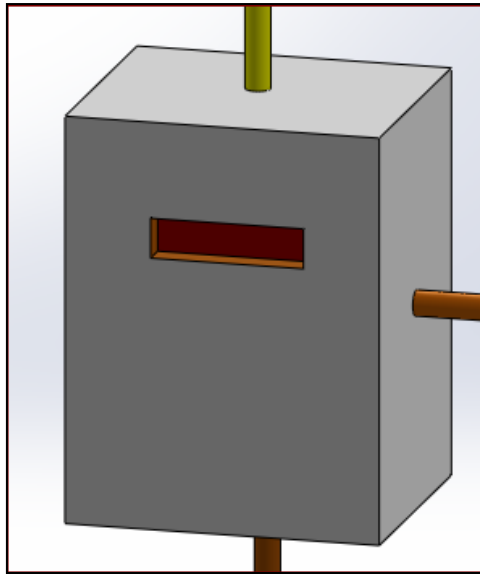


Figure V.5: Chaudière domestique

V.3.4. Chauffe eau solaire avec l'appoint à gaz :

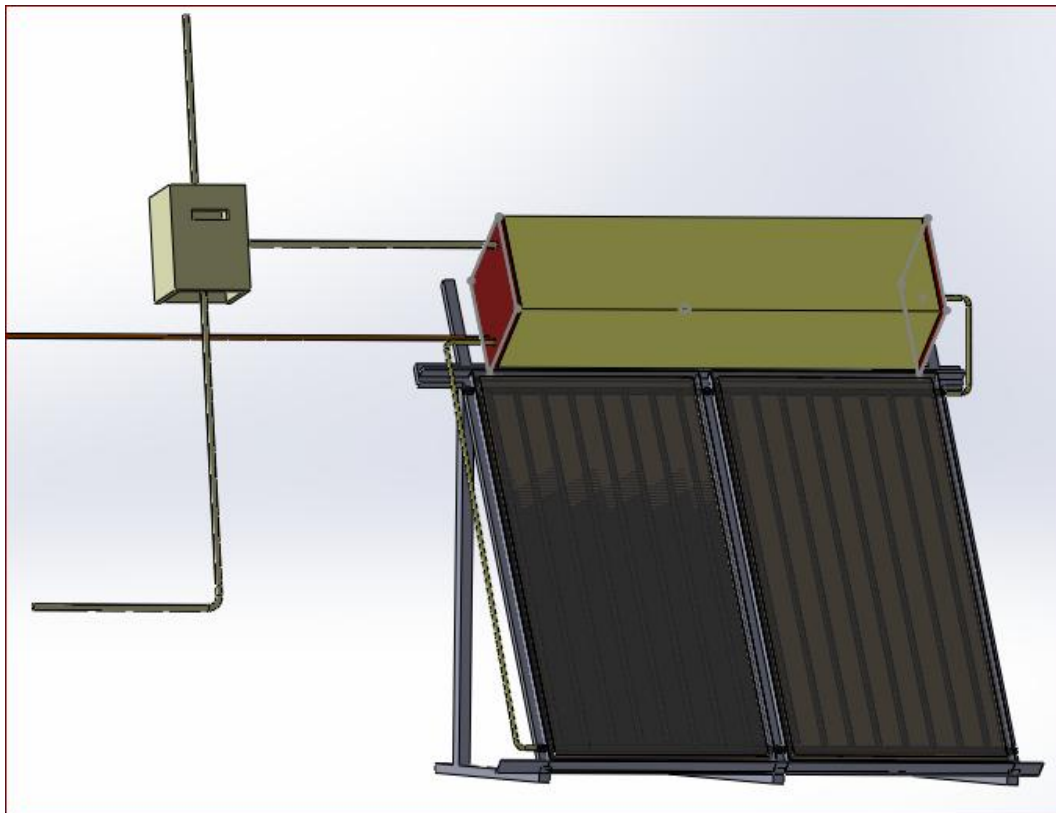


Figure V.6: chauffe eau solaire avec appoint à gaz

V.3.5.Mise en plan du capteur :

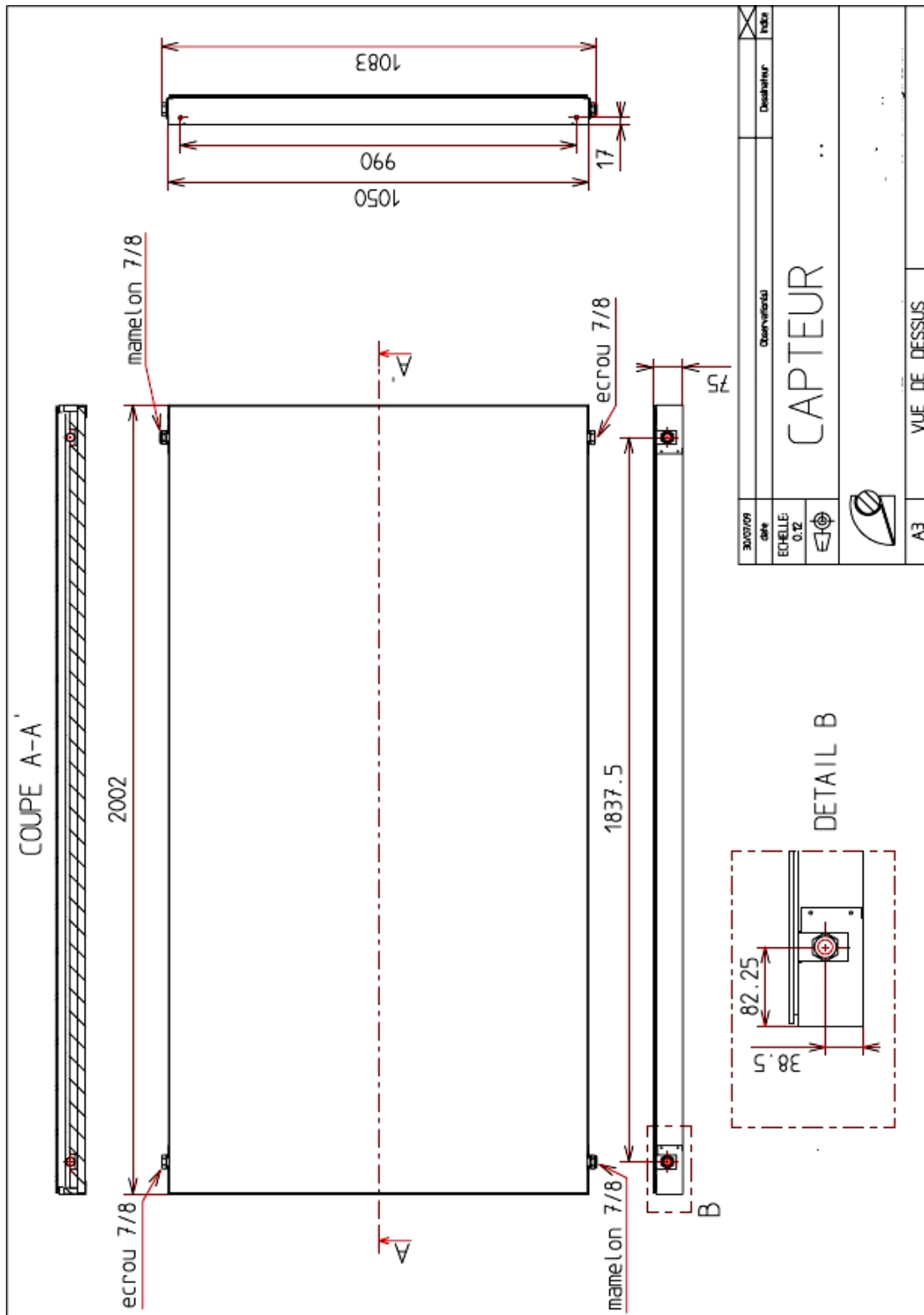


Figure V.7: Vue de dessus du capteur.

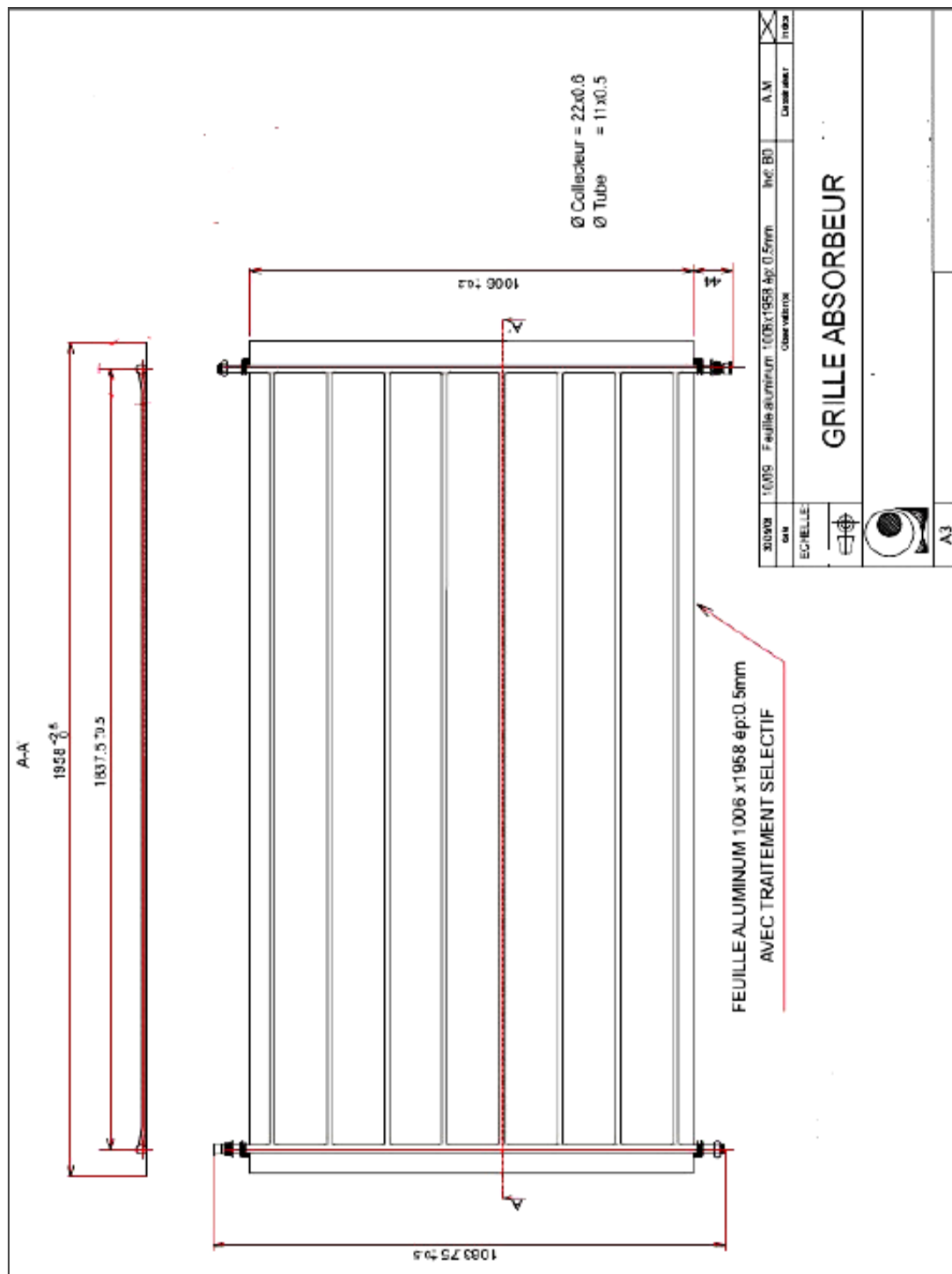


Figure V.8: Détail de l'absorbeur – Version verticale.

V.4. Les mesures effectuées par la boucle d'essai

Les différentes mesures réalisées par la boucle au cours des essais sont :

- Mesure du rayonnement solaire global dans le plan du capteur (G^*).
- La température ambiante au voisinage du chauffe-eau (T_a).

-Température d'entrée /sortie de l'eau dans le réservoir (T_{er}).

-Température d'entrée /sortie de l'eau dans le capteur(T_{ec}).

Nous détaillons ci-après les mesures relevées dans notre travail expérimental.

V.4.1.Le rayonnement solaire

La mesure de l'énergie solaire incidente sur le plan du capteur est assurée par un pyranomètre type DIGITAL SOLARIMETER. Il a été installé dans le plan d'ouverture des capteurs.

V.4.2.Température de sortie du capteur

Ces mesures ont été effectuées à l'aide des thermocouples, liés à un appareil digital pour la mesure de température. Les tuyauteries hydrauliques et l'isolation thermique de l'extérieur sont assurées par une épaisseur de 9 mm d'un isolant de type Armaflex.

V.4.3.Température ambiante

La température ambiante est mesurée à l'aide d'une sonde platine (PT 100) à 4 fils, de marque thermo-est. L'erreur sur cette mesure est de $0,1^{\circ}\text{C}$, après étalonnage.

V.4.4.Les différentes mesures effectuées au CDER



Figure V.9: Schéma du chauffe-eau solaire expérimental étudié



Figure V.10: Mesure de la température a l'entrée du capteur



Figure V.11: Mesure de la température a la sortie du capteur



Figure V.12: Mesure de la température a l'entrée du ballon de stockage/capteur



Figure V.13: Mesure de la température a la sortie du ballon/capteur



Figure V.14: Mesure de la température a la sortie du ballon de stockage/puisage

V.5.Interprétation :

V.5.1.Site de BOUZAREAH :

La figure (V.9) représente l'évolution de l'éclairement global solaire durant la journée du 13/05/2014 de 08h à 17h. On voit bien que la journée est à ciel clair et la courbe a l'allure d'une cloche qui atteint son maximum à 12h30 heure locale.

La figure (V.10) montre l'évolution de la température ambiante de 8h à 17h. On remarque qu'elle varie entre 26°C à 28°C de 8h à 12h et puis elle commence à avoir une pente négative légèrement et qui varie entre 27°C et 25°C

La figure (V.11) et (V.12) montrent l'évolution de la température de l'eau entrée et sortie du capteur respectivement pour la journée du 13/05/14 de 08h à 17h avec un pas de temps de 30 min. les courbes ont la même allure avec des température différentes.

Afin de voir l'écart de température entrée/sortie du capteur, nous avons représenté les deux courbes sur le même graphe figure (V.13) et qui montre que l'écart est de plus 10°C de 11h à 15h30 (la courbe noir représente la sortie du capteur et la courbe bleu représente l'entrée du capteur), ce paramètre est très important pour déterminer la performance de l'installation.

La figure (V.14) et (V.15) représente l'évolution de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de la cuve et qui présente une allure similaire de 09h à 15h , mais après cette heure l'allure des deux courbe change pour la courbe de la température de sortie cuve continue à

augment bien que l'éclaircement diminue et tend à se stabiliser et ça est dû au gain l'énergie qui est une pente négative ceci est dû aux pertes thermiques vers l'extérieur et tend à se stabiliser.

Afin de voir l'écart entre les deux températures entrée/sortie cuve, nous avons représenté les courbes sur le même graphe figure (V.16). On remarque que l'écart est de 10°C à 20°C de 9h à 15h (la courbe rose représente l'entrée cuve et la courbe rouge représente la sortie du cuve), et après ça l'écart continue à augmenter jusqu'à une stabilisation. On peut expliquer ce cas que la cuve est bien isolée d'où la performance du système.

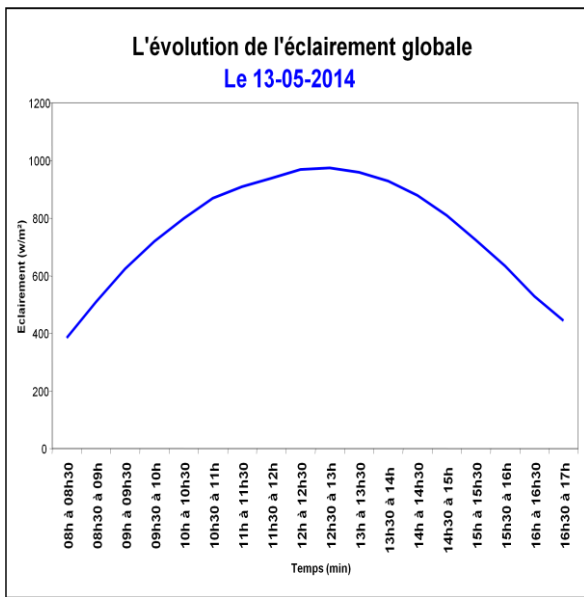


Figure V.15: L'évolution de l'éclaircement globale en fonction du temps.

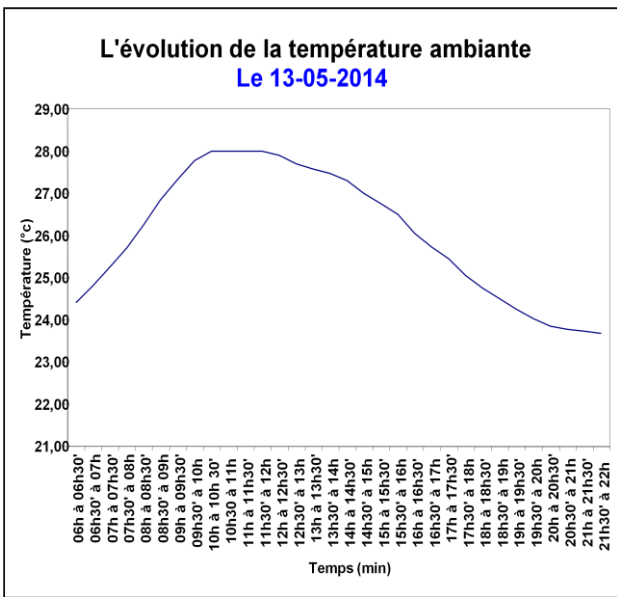


Figure V.16: L'évolution de la température ambiante en fonction du temps.

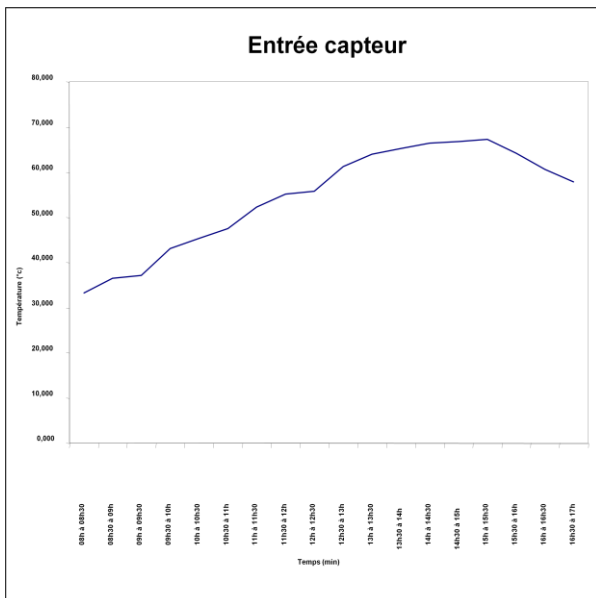


Figure V.17: L'évolution de la température à l'entrée du capteur.

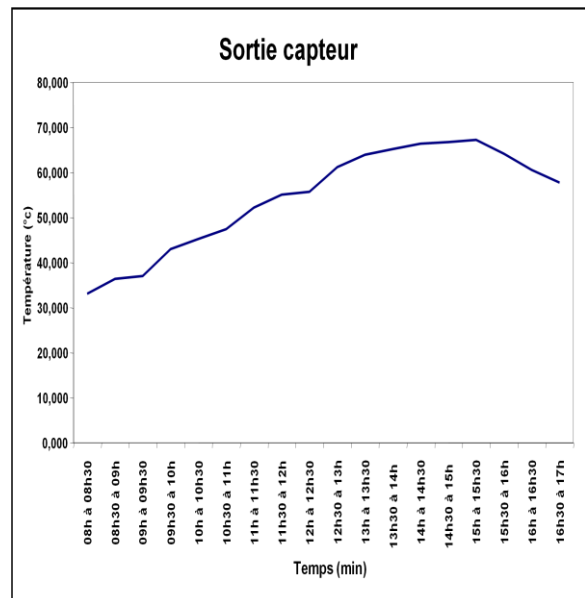


Figure V.18: L'évolution de la température à la sortie du capteur.

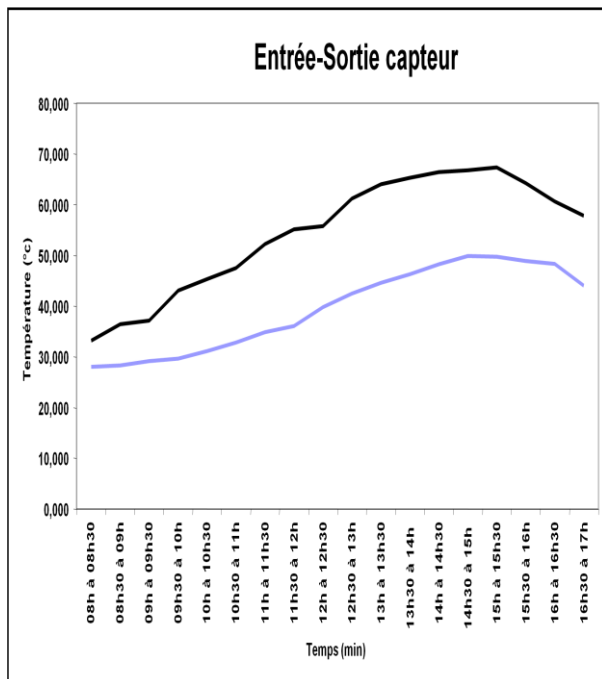


Figure V.19: L'écart de la température entre la sortie et l'entrée du capteur.

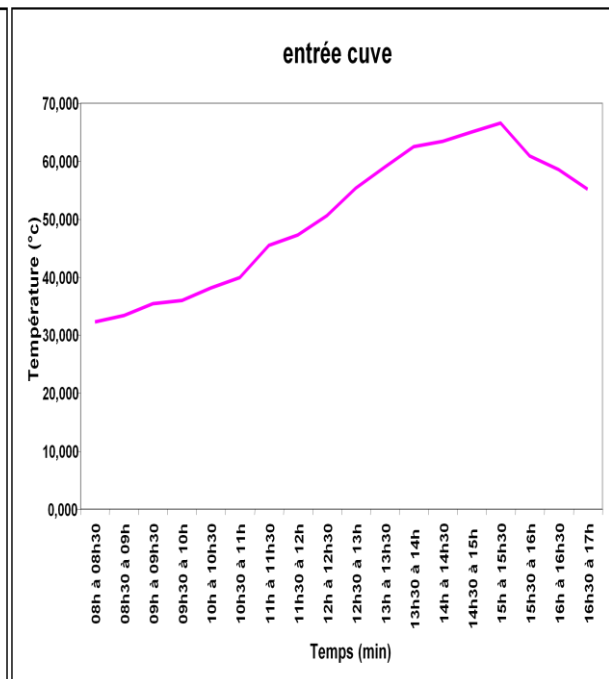


Figure V.20: L'évolution de la température à l'entrée du cuve.

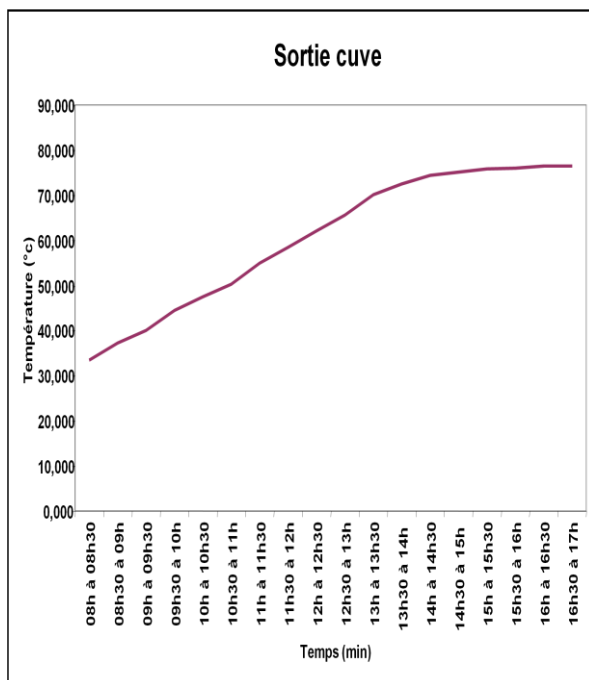


Figure V.21: L'évolution de la température à la sortie du cuve.

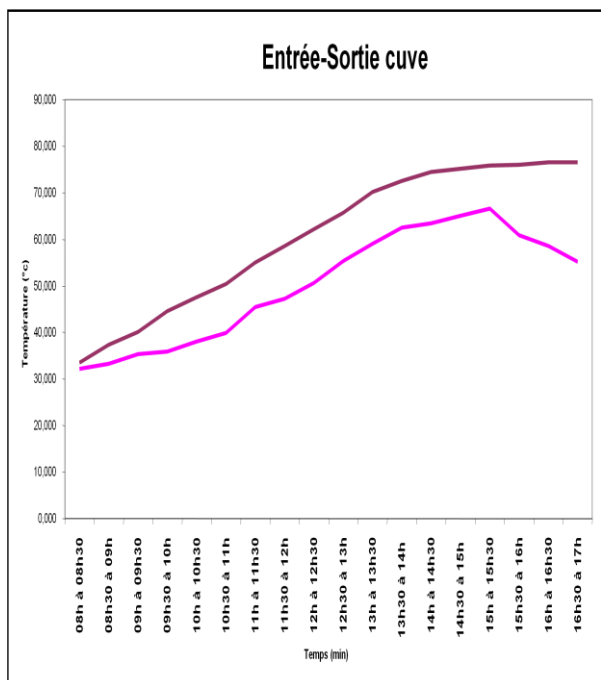


Figure V.22: L'écart de la température entre la sortie et l'entrée du cuve.

V.6.CONCLISION :

Dans ce chapitre, on a cité les différents caractéristiques pondérales et dimensionnelles du chauffe eau solaire étudié, en suite on a réalisé un schéma expérimental de l'installation à l'aide du logiciel Solid Works, on a présenté aussi les différentes résultats des mesures effectuées sous forme des courbes, en fin terminé ce chapitre par faire une interprétation des résultats obtenues.

CHAPITRE VI

VI.1.INTRODUCTION

L'étude économique va nous permettre de comparer entre un chauffe eau solaire et un chauffe eau à gaz. L'investissement dans les énergies renouvelables n'échappe pas à la règle de rentabilité financière, même s'il est vrai que le chauffe eau solaire est non polluant, disponible et durable, le coté économique est certainement le plus indicatif chez les ménages, d'où tout l'intérêt d'évaluer le prix du kWh solaire et le comparer à celui des énergies traditionnelles disponible sur le marché, à savoir le gaz naturel, l'électricité, le fioul et le gaz butane.

VI.2. L'évaluation financière et économique des projets [26]

- **Investissement**

L'investissement doit comprendre l'ensemble des coûts relatifs à la conception de l'installation, aux équipements, à l'achat des dispositifs de comptage et de suivi des performances des installations, à leur mise en œuvre et à la formation des personnels d'exploitation et de maintenance, s'ils sont placés sous l'autorité du maître d'ouvrage.

- **Coût d'exploitation et de maintenance**

Le coût d'exploitation est une grandeur difficile à estimer à priori, puisqu'il dépend largement de la performance de l'installation et des conditions réelles d'utilisation de l'ECS (besoins, usages, conditions de soutirage...).

Le coût d'exploitation est calculé à partir du coût de l'énergie utilisée par le système d'appoint et les équipements auxiliaires (pompes, réchauffeurs...). Il inclut également le coût des services de maintenance (entretien, réparation ou remplacement de tout ou partie des équipements de l'installation) et de télé-contrôle, ainsi que les coûts liés au personnel d'exploitation.

- **Prix de l'énergie solaire produite**

La formule suivante donne le coût d'1 kilowatt heure d'énergie solaire produit, ce qui constitue une première indication de l'intérêt économique de l'investissement :

$$\text{COÛT} = \frac{\text{Investissement Net}}{\text{Durée de Vie} \cdot \text{Apport Sol}} \quad (\text{VI.1})$$

VI.3. Calcul de prix du KWh solaire [26]

VI.3.1. Coût d'investissement de l'installation solaire

L'investissement comprend le coût des capteurs solaires et le coût du ballon de stockage. Le dimensionnement de l'installation solaire réalisée par le logiciel SOLO aboutit à deux panneaux solaires plan de type JAQCUES GIORDANO INDUSTRIES et un réservoir de stockage de 300 L.

- Coût du panneau solaire plan
- Coût d'un réservoir de stockage de 300 l
- Le coût total de l'installation solaire s'élèverait ainsi 120000 (1Dinar algérien DA = 0,11 Euro)

Ainsi, pour une durée de vie de l'installation qui est en moyenne de 25 ans, et la production d'énergie annuelle donnée ci dessus, le prix du kilowattheure solaire s'élèverait 4,25 DA. Actuellement, l'état accorde une aide financière de 45 % sur l'investissement. En tenant compte de cette subvention, le prix du kilowattheure solaire ne s'élèverait réellement qu'à 2.34 DA.

VI.3.2. Coût des énergies conventionnelles :

Les énergies conventionnelles utilisées en Algérie sont l'électricité, le gaz naturel, gaz butane et diesel.

Le coût du KWh du gaz naturel ainsi que celui de l'électricité dépend de la quantité d'énergie consommé sur une période donnée. En général, deux tranches de prix sont appliquées.

En Algérie, les prix de l'énergie vendue localement sont fixés par l'état. Ce sont des prix fortement subventionnés qui sont largement inférieurs au prix de revient réel de leur production.

- **Coût de KWh produit à partir du gaz naturel**

Le tableau suivant illustre le coût unitaire par tranche de consommation et le montant à payer pour la consommation mensuelle de notre logement.

Tableau (VI.1) Coût unitaire du gaz naturel et montant à payer pour le logement

1 ^{ere} tranche Consommation (th)	Prix unitaire (DA)	2 ^{eme} tranche Consommation (th)	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
375	0,168	989,08	0,324	383,461

TVA (taux 7 %)	26,842
Prime fixe /mois	28,500
Total à payer	438,803

Le prix du KWh en utilisant le gaz naturel pour le chauffage de l'eau de la maison est : **0,277 DA**

Le prix du KWh en utilisant l'électricité pour le chauffage de l'eau et de la maison est : **4,415 DA**

• **Coût de KWh produit à partir du gaz butane :**

Le gaz butane est vendu sur le marché sous forme de bouteille contenant 13 Kg de butane, dont le prix est de 230 DA la bouteille. Le pouvoir énergétique de 1 Kg de gaz butane est de l'ordre de 13.72 KWh. L'énergie nécessaire s'élève ainsi à 115.33 Kg correspondant au contenu d'environ 9 bouteilles. A partir de ces données, il en résulte que le prix du KWh _{butane} s'élève à 1.31 DA

Nous récapitulons en Tableau (VI.2) Les différents coûts du KWh en fonction de l'énergie utilisée

Energie utilisée	Energie solaire	Energies fossiles	
		Gaz naturel	Gaz butane
Coût du KWh en DA	2,34	0,28	1,31

Cette comparaison montre que, le prix du KWh solaire subventionné est très haut par rapport au gaz naturel et butane. Pour le consommateur, le gaz naturel est de loin le plus bas, mais dans le prix calculé, nous n'avons pas inclus l'investissement lourd supporté par l'état pour les stations de compression, pour son transport et son raccordement jusqu'au client. C'est d'ailleurs aussi pour cette raison que malgré tous les efforts entrepris par l'état, le gaz naturel n'atteint actuellement que la moitié de la population,

On constate ainsi, indépendamment de l'impact environnemental, qu'en Algérie, comme dans plusieurs autres pays riches en gaz naturel, le solaire ne sera vraiment compétitif que lorsque l'état appliquera le coût réel des énergies fossiles.

VI.4. Impact environnemental

L'énergie solaire est non seulement gratuite et inépuisable, mais elle ne génère aucune pollution. Le tableau(VI.3) présente les émissions unitaires de CO₂ issues de la combustion de différentes énergies fossiles.

Énergie	g de CO ₂ émis/kWh
Solaire thermique	≈ 0
Gaz naturel	205
Gaz propane/butane	231
charbon	342
Fioul lourd	281
Gaz turbine	912
Electricité	985
Hydraulique	5

D'après cette étude sur l'impact environnemental on constate que les émissions de gaz à effet de serre sont très importantes en utilisant les énergies conventionnelles comme moyen de chauffage

A l'inverse, une installation solaire thermique couvre une partie des besoins de chaleur d'une habitation pour la production d'eau chaude sanitaire. Ainsi le solaire thermique se substituant en très large partie aux énergies fossiles, il permet de réduire fortement les émissions de gaz à effet de serre.

VI.5. Conclusion :

L'étude réalisée dans ce chapitre montre la nécessité de recours à l'énergie renouvelable qui permet une réduction considérable des émissions de gaz à effet de serre qui est une des priorités essentielles inscrites dans la loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique, malgré son coût très élevé par rapport aux énergies conventionnelles tel que le gaz naturel, le butane et le mazout.

Conclusion Générale

Le travail que j'ai effectué au niveau du centre de développement des énergies renouvelables (CDER) Bouzareah, m'a permis d'acquérir des connaissances dans le domaine des énergies renouvelables et plus précisément le solaire thermique.

Une campagne de mesure a été réalisée pour une installation de chauffe eau solaire individuel de 300l et 4m² de surface de captation, pour une journée ensoleillée du mois de mai 2014 où on n'avait pas besoin d'un appoint à gaz vu que la température de l'eau chaude est arrivée à des degrés très suffisants et les courbes montrent que les températures de l'eau entrée /sortie capteur et ballon de stockage suit la même allure mais avec un écart de près de 10°C . un dimensionnement du chauffe eau solaire a été réalisé, et nous avons obtenus des résultats très satisfaisants avec un taux d'ensoleillement de plus de 50% et une productivité annuelle de plus de 400kwh/m².an , et le résultat de dimensionnement de l'appoint à gaz n'a fait que confirmé nos résultats expérimentaux car son utilisation n'est indispensable que pour les mois le plus défavorables à savoir le mois de décembre, janvier ,février.

Pour montrer l'intérêt d'utiliser le chauffe eau solaire par rapport à un chauffe eau à gaz ou électrique ou toutes autres sources d'énergies, une étude économique et l'impact environnemental a été réalisé et qui a montré que pour le coté environnemental il n'y a pas d'émission de gaz à effet de serre et pour le coté économique le chauffe à gaz reste le moins cher en Algérie vu que le prix ne dépasse 0.65 DA le m³, mais avec la subvention de l'état on peut développer le chauffe eau solaire en Algérie car à travers le programme national pour le développement des énergies renouvelables nous avons une subvention de 45% pour l'individuel et 35% pour le collectif.

Avec notre travail nous essayons de contribuer au développement des chauffe eau solaires par la recherche des méthodes les plus performantes pour une bonne conception dans le future.

Mon souhait est que je continu mon travail de doctorat avec les chauffe eau solaires collectif avec différents appoints.

Les chauffe eau solaires sont très rentables en Algérie car on peut les utilisés 9mois dans l'année vu le taux d'enseillement qui est évalué à 3000h/an. Mais les autres mois il faut utiliser l'appoint à gaz car c'est moins cher.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **J, Bernard.** « Energie solaire calculs et optimisation » Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [2] **Guendouz B.** Projet de fin d'étude pour ingénieur d'état en génie mécanique « *Etude d'un système de réfrigération solaire à absorption (application à une chambre froide)* », 2008.
- [3] **rapport** : le gisement solaire [Quali'PV]. Formation Générateur PV raccordé (élec) 2008.
- [4] **Robert Celaire** « Les chauffe-eau solaires Capteur-Stockeurs », Gret, GERES, SYNOPSIS France Janvier 1987.
- [5] **Sonalgaz** « *Potentialités et perspectives pour les Energies renouvelables en Algérie - Séminaire Algéro-Allemand sur le partenariat dans le domaine de l'Energie solaire* » Hôtel EL DJAZAIR le 25 janvier 2011.
- [6] **Support écrit pour l'architecte** « *Utilisation domestique de l'énergie solaire* » Les chauffe-eau solaires, 2003.
- [7] **J, Desautel** « *Les capteurs héliothermiques* ». Edisud, (1979).
- [8] **Nailée EBIBI et Guillaume MARTI** « *Etude et dimensionnement d'une installation solaire thermique pour eau chaude sanitaire d'une collectivité* » INSA 2009.
- [9] **Cruz J.F, Troude F, Gri on D.** Conservation des grains en régions chaudes' .2^{ème} édition, « *Techniques rurales en Afrique* » 1988, France.
- [10] **S, A, Hakem; N, Kasbadji-Merzouk ; M, Merzouk** « *Performances journalières d'un chauffe-eau solaire* ». Revue des Energies Renouvelables, p 153-162. (2008).
- [11] **Guide des installations des capteurs** « *capteurs solaire thermique* », France, (2010).
- [12] **Thierry Cabirol Albert PELISSOU - Daniel ROUX** « *l'isolateur plan à effet de serre et le chauffe eau solaire* » EDISUD, AIX-EN-PROVENCE 1978.
- [13] **Cours de Pascal Tobaly** « *Les échangeurs de chaleur* », 2002, SiteWeb: <http://genie.industriel.iaa.free.fr>.
- [14] **Jean PARISOT**, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique, « *Conception et calcul des chaudières* » : généralités et bilans, 2007,
- [15] **Energie. Mines et Ressources Canada**, « *Appareillage de chaufferie* », Canada, 1980.
- [16] **Fiche pratique PRIMAGAZ** « *La chaudière domestique gaz* », France ,2011.
- [17] **Jacques Percebois.** Energie et Société. Institut Economique et Juridique de L'énergie de Grenoble. Equipe de recherche du C.N.R.S 1975 (PP.123-128).
- [18] **Hans Gueric freitas** « *Technologie des chauffe eau solaires industriels pour la pasteurisation du lait* », *Mémoire de fin d'étude*, Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement BRMN, Promotion 2011/2012.
- [19] **Edwards et Marlot** « *Capteurs Solaires* » Dépôt légal 3^{ème} trimestre 1981.

- [20] **Robert Celaire** «Les chauffe-eau solaires Capteur-Stockeurs», Gret, GERES, SYNOPSIS France Janvier 1987.
- [21] **Yves JANNOT.** « *Thermique Solaire* », France, Octobre 2003.
- [22] **Alioune Diop SY** « Conception et réalisation d'un chauffe eau solaire » Ecole Supérieure Polytechnique de DAKAR, 2007.
- [23] Logiciel SOLO, CSTB, France, version 1..0.1, formation Strasbourg France 2004, www.cstb.fr
- [24] **Carol BUSCARLET et Dominique CACCAVELLI.** « *Chauffe eau solaire individuel* ». CSTB, France, JUILLET 2006.
- [25] **SITE WEB :**
http://www.xpair.com/lexique/definition/couverture_solaire.htm .
- [26] **F.Sahnoune.AL** « *Etude comparative chauffe eau solaire et un chauffe eau conventionel et impact environmental* » Conférence Beyrouth, Lebanon ,Avril 2014.

ANNEXES

A.1.L'effet de serre [1]

Son principe réside dans le fait qu'un matériau transparent pour le rayonnement solaire peut être opaque au rayonnement infrarouge. Le rayonnement de courtes longueurs d'onde va traverser ce matériau, échauffer la plaque absorbante qui va rayonner dans les grandes longueurs d'onde, c'est –à-dire l'infrarouge, Ce rayonnement infrarouge, ne pouvant s'échapper, va être en partie absorbé par la couverture qui s'échauffe et en partie réfléchi vers la plaque qui elle aussi s'échauffe. Mais bien entendu si la puissance reçue par le capteur est constante, au bout d'un certain temps, un équilibre s'installe. Les apports solaires sont alors égaux aux pertes thermiques. Ces dernières se font principalement par rayonnement et convection de la couverture avec l'extérieur.

Quand le capteur a atteint son équilibre thermique, la température de la plaque est d'autant plus élevée que l'effet de serre est plus prononcé. On peut s'en rendre compte avec les capteurs à double vitrage qui permettent d'atteindre des températures d'équilibre plus grandes qu'avec un simple vitrage.

A.2.Les temps solaires [1]

L'heure solaire est l'heure de la journée déterminée par le mouvement apparent du Soleil, égale à 12h00 au midi vrai. Pour obtenir l'heure légale, il faut lui additionner l'équation du temps, la correction de longitude et éventuellement l'heure d'été. Le midi vrai ou midi solaire est l'heure locale à laquelle le soleil passe au méridien du point d'observation et on a

$$TSV = TL - DEL + ET + \Lambda / 15 \text{ [heure]} \quad (\text{A.1})$$

avec

TSV : temps solaire vrai est définie à partir de la rotation de la terre sur elle-même. Il est donc directement lié à l'angle horaire. L'intervalle de temps entre deux passages du soleil au méridien est de 24 h. Il est donc midi (12h) lorsque le soleil est à son zénith.

TL : temps légal et on peu définie comme le temps moyen du fuseau horaire de rattachement, augmenté éventuellement de l'heure d'été. C'est l'heure de la montre sa relation donnée en fonction de temps universelle :

$$TL = TU + DEL \quad (\text{A.2})$$

TU : le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine)

DEL : est la correction due au changement d'heure légale (en Algérie DEL = 1).

ET : équation de temps, ce terme corrige le temps solaire de plus ou moins 15 minutes et pourra donc être négligé en première approximation; sa relation donnée par la formule suivant :

$$ET = 9.87 \sin (2N') - 7.53 \cos (N') - 1.5 \sin (N') \text{ [min]} \quad (\text{A. 3})$$

$$N' = (n - 81) \times 360/365 \quad (\text{A. 4})$$

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

On à aussi autre forme de cette équation mais en fonction de TSV et TSM

$$ET = TSV - TSM \quad (\text{A. 5})$$

TSM : le temps solaire moyen